

**А. И. РАСКАТОВ**



**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ  
ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ**



ПРОФТЕХИЗДАТ · 1962

А. И. РАСКАТОВ

# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

ВСЕСОЮЗНОЕ  
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ПРОФТЕХИЗДАТ  
Москва 1962

## ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

В книге даны по разделам краткие теоретические сведения по электротехнике, методика и порядок выполнения лабораторных работ.

Книга составлена в соответствии с учебными программами по общей электротехнике техникумов профтехобразования и может быть использована в качестве руководства к лабораторным работам по общей электротехнике, а также частично по курсам «Теоретические основы электротехники» и «Электрические машины» электротехнических специальностей техникумов.

Автор А. И. Раскатов — доцент кафедры электротехники и электроники Московского технологического института мясной и молочной промышленности.

Со всеми замечаниями по книге просим обращаться по адресу: *Москва, Центр, Хохловский пер., 7, Профтехиздат.*

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

При современном развитии электротехники и широком ее применении во всех областях народного хозяйства инженерам, техникам и рабочим самых различных специальностей приходится в своей работе иметь дело с вопросами применения электроэнергии. Без достаточно глубокого знания электротехники и ясного представления о физических процессах в электрических установках нельзя улучшить технологию производства, применить новые методы контроля, измерений и т. д.

Существенной составной частью преподавания курса «Электротехника» являются лабораторные занятия. Лабораторные занятия помогают лучшему усвоению курса и развитию у учащихся практических навыков.

Данное руководство содержит 38 лабораторных работ. Работы составлены так, что в зависимости от числа часов, отводимых на лабораторные занятия, отдельные работы могут быть выполнены полностью или частично. Вводный теоретический материал, чтобы облегчить учащимся подготовку, излагается по отдельным работам. Это дает учащимся возможность выполнять лабораторные работы при любой последовательности. Каждая лабораторная работа построена по плану:

- 1) цель работы;
- 2) общие сведения;
- 3) описание установки и методика проведения опыта;
- 4) порядок проведения работы;
- 5) контрольные вопросы.

Обычно электротехнические лаборатории имеют неодинаковое оборудование, поэтому в каждой работе приводится несколько схем, с тем чтобы преподаватель имел возможность выбора.

---



## ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ В ЛАБОРАТОРИИ

1. Занятия учащихся в лаборатории проводятся в дни и часы согласно расписанию занятий.

2. Вход в лабораторию ~~в~~ верхней одежде воспрещается.

3. Группа, работающая в лаборатории, разбивается преподавателем на бригады. В каждой бригаде должно быть не более двух-трех человек.

4. Каждый учащийся должен заранее получить у преподавателя задание к предстоящему занятию и хорошо подготовить его. Учащийся, не подготовивший задания, к занятиям не допускается.

5. Учащиеся, пропустившие учебные занятия в лаборатории по болезни или не допущенные к занятиям из-за неподготовленности, должны выполнить пропущенную работу в свободное от занятий время, в часы по расписанию лаборатории.

6. Перед началом работы каждый учащийся должен ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения данной работы, записать номинальные величины приборов системы, классы точности, завод, фабричные номера; вычертить схему соединения на бумаге и показать преподавателю. После утверждения схемы преподавателем учащиеся приступают к ее сборке при разомкнутых рубильниках.

7. Сборку схем нужно начинать с главной последовательной цепи, а затем подключать параллельные цепи, например цепи ваттметров, фазометров и т. п.

8. Необходимо проверить правильность положения электроизмерительных приборов согласно указательным стрелкам, а также проверить нулевое положение стрелок приборов.

9. Собранную схему должен проверить преподаватель или лаборант. Включать рубильники можно только после разрешения преподавателя или лаборанта.

10. Запрещается прикасаться голыми руками к неизолированным частям рабочей установки и включать под напряжение провода, у которых один из концов остается свободным.

11. Все пересоединения в схеме должны производиться при выключенных рубильниках. После каждого пересоединения схема должна быть проверена преподавателем или лаборантом.

12. Перед началом работы, а также перед каждым включением схемы регулировочные реостаты должны быть полностью включены, а переключатели электроизмерительных приборов на несколько пределов измерений должны быть установлены на наибольшие значения.

13. Прежде чем приступать к записи показаний приборов, следует предварительно проделать весь опыт.

14. Показания приборов следует записывать в заранее составленную таблицу в делениях шкалы с последующим их переводом в именованные величины.

15. Во время работы запрещается отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением.

16. Запрещается брать оборудование и приборы с чужих рабочих мест без разрешения преподавателя или лаборанта.

17. В случае неисправности или повреждения приборов учащиеся должны немедленно заявить об этом преподавателю или лаборанту.

18. По окончании работы каждый учащийся должен представить преподавателю таблицы наблюдений с контрольными подсчетами и получить от него пометку, что результаты работы верны. Только после этого можно приступить к разборке схемы, отключив предварительно источник питания. Если полученные данные неправильны, то опыт следует повторить.

19. К следующему занятию каждый учащийся обязан представить отчет о проделанной работе, в котором должны содержаться следующие данные:

- а) группа, фамилия и инициалы, производившего опыт;
- б) дата проведения опыта;
- в) краткое содержание работы;
- г) схемы;
- д) данные приборов (система, тип, номер и т. д.), машин (номинальные значения мощности, тока, напряжения, коэффициента мощности, скорости вращения и т. д.) и аппаратуры;
- е) таблицы с результатами измерений и вычислений;
- ж) формулы, по которым производились вычисления;
- з) графики.

20. Схемы, диаграммы и графики должны быть вычерчены при помощи чертежных инструментов, а отчеты написаны чернилами. Диаграммы и графики нужно выполнять в масштабе.

В начале осей координат должен быть нуль, а по осям — равномерные деления масштабов. Если в одной системе координат имеется несколько графиков, то желательно их вычерчивать разноцветными карандашами или тушью.

---

## Глава I

### ПОСТОЯННЫЙ ТОК

#### РАБОТА № 1

#### ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ МЕТОДОМ ВОЛЬТМЕТРА И АМПЕРМЕТРА

#### Цель работы

Целью работы является ознакомление с измерением сопротивлений средней величины (от 1 до 100 000 ом) методом вольтметра и амперметра.

#### Общие сведения

Метод вольтметра и амперметра получил широкое применение на практике. Он основан на применении закона Ома к участку цепи. Зная падение напряжения  $U_x$  на участке с сопротивлением  $r_x$  и ток  $I_x$ , проходящий через него, можно определить величину сопротивления по формуле

$$r_x = \frac{U_x}{I_x}. \quad (1)$$

Измерение сопротивлений можно производить по двум схемам, изображенным на рис. 1 и 2. Рассмотрим каждую схему в отдельности. При измерении сопротивления по схеме рис. 1 амперметр показывает действительное значение проходящего по сопротивлению  $r_x$  тока  $I_x$ ; вольтметр же показывает не только падение напряжения в измеряемом сопротивлении, но и падение напряжения  $U_A$  в амперметре, т. е.  $U = U_x + U_A$ .

Поэтому действительное значение сопротивления будет равно:

$$r_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U - U_A}{I_x} = \frac{U - I_x r_A}{I_x} = \frac{U}{I_x} - r_A, \quad (2)$$

где  $U$  — напряжение, показываемое вольтметром;  
 $r_A$  — сопротивление амперметра.

При измерении сопротивления по схеме рис. 2 вольтметр покажет падение напряжения на измеряемом сопротивлении  $r_x$ , а амперметр — сумму токов, проходящих через измеряемое сопротивление и вольтметр, т. е.  $I = I_x + I_V$ . Искомое сопротивление равно:

$$r_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{I - I_V} = \frac{U_x}{I - \frac{U_x}{r_V}}, \quad (3)$$

где  $r_V$  — сопротивление вольтметра;  
 $I_V = \frac{U_x}{r_V}$  — ток, проходящий через вольтметр.

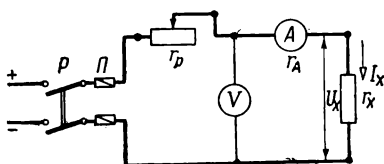


Рис. 1. Первая схема измерения сопротивления методом вольтметра и амперметра

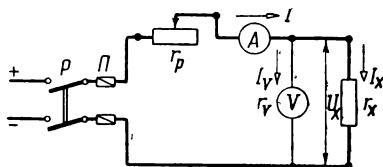


Рис. 2. Вторая схема измерения сопротивления методом вольтметра и амперметра

Первую схему мы применяем тогда, когда измеряемое сопротивление  $r_x$  велико по сравнению с сопротивлением  $r_A$  амперметра.

Вторую схему применяем тогда, когда измеряемое сопротивление  $r_x$  мало по сравнению с сопротивлением  $r_V$  вольтметра.

Если не требуется особой точности в измерении сопротивлений или неизвестны сопротивления  $r_A$  и  $r_V$ , то можно определять сопротивление по приближенной формуле независимо от того, как включены приборы, т. е.

$$r'_x = \frac{U}{I}, \quad (4)$$

где  $U$  — напряжение, показываемое вольтметром;

$I$  — ток, показываемый амперметром.

Относительная погрешность определяется по формуле

$$\gamma = \frac{r'_x - r_x}{r_x} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Если измерение сопротивления производится при токе меньше 0,5 а, то в этом случае рекомендуется применять схемы, по-

казанные на рис. 3 и 4. В этих схемах делителем напряжения  $D$  можно плавно регулировать ток в измеряемом сопротивлении, но расход энергии здесь больше, чем в схемах рис. 1 и 2.

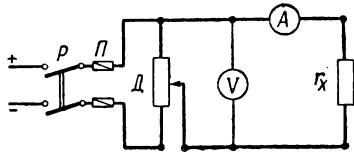


Рис. 3. Видоизмененная первая схема измерения сопротивления методом вольтметра и амперметра

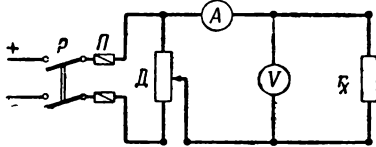


Рис. 4. Видоизмененная вторая схема измерения сопротивления методом вольтметра и амперметра

### Измерение сопротивлений методом вольтметра и амперметра

Измерение сопротивлений производим по схемам, показанным на рис. 1 и 2 (или 3 и 4). В этих схемах  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $r_p$  — регулировочный реостат,  $D$  — делитель напряжения,  $V$  — вольтметр, измеряющий напряжение;  $A$  — амперметр, измеряющий ток;  $r_x$  — измеряемое сопротивление.

Таблица 1

№ п/п	Наименование схемы	Измеряемый объект	Измерено				Вычислено					Примечание
			$U$		$I$							
			$C_V =$		$C_A =$		$r_x$	$r_x$ ср	$r'_x$	$r'_x$ ср	$\gamma$	
			дел.	в	дел.	а	ом	ом	ом	ом	о/о	
1 2 3	Рис. 1	Катушка										
4 5 6	Рис. 2	Катушка										
7 8 9	Рис. 1	Вольтметр										
10 11 12	Рис. 2	Вольтметр										

Примечание.  $r_{x\text{ ср}}$  и  $r'_{x\text{ ср}}$  определяются как средние арифметические из трех измеренных значений сопротивлений.

Опыт измерения сопротивлений производится следующим образом. Включаем рубильник  $P$ , при этом регулировочный реостат  $r_p$  в начале опыта должен быть полностью включен (или движок делителя напряжения  $D$  должен находиться в верхнем положении), а затем устанавливаем такое сопротивление регулировочного реостата, чтобы получить нормальные отклонения приборов, и записываем показания приборов в табл. 1. В данной работе следует измерить сопротивления двух катушек (или каких-либо двух других приемников) и вольтметра.

Каждое сопротивление желательно измерить при трех различных значениях тока и определить его величину как среднее арифметическое значение трех измеренных сопротивлений. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 1) вычисляем измеряемые сопротивления по формулам (2), (3), (4) и находим относительные погрешности по формуле (5).

### **Порядок проведения работы**

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схемы, изображенные на рис. 1 и 2 или 3 и 4.
3. По двум схемам произвести измерения сопротивлений двух катушек (или каких-либо двух других приемников) и вольтметра.
4. На основании данных опыта (согласно табл. 1) определить измеряемые сопротивления и найти относительные погрешности.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие достоинства и недостатки способа измерения сопротивлений вольтметром и амперметром?
2. Какой из приборов вносит погрешность, если измерение сопротивления производится по схеме рис. 1?
3. Какой из приборов вносит погрешность, если измерение сопротивления производится по схеме рис. 2?
4. По какой схеме следует включать приборы при измерении малых сопротивлений и по какой схеме — при измерении больших сопротивлений?
5. Что называется относительной погрешностью?

### **РАБОТА № 2**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ПРИБОРА**

#### **Цель работы**

Целью работы является ознакомление учащихся с нагревательным прибором и определение его к. п. д.

## Общие сведения

На основании многочисленных опытов Ленц и Джоуль независимо друг от друга установили, что электрический ток, проходя по проводнику, выделяет количество тепла, которое пропорционально квадрату тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока по проводнику:

$$Q = 0,24I^2rt, \quad (6)$$

где  $Q$  — количество тепла, выделяемого током, *кал*;

$I$  — ток, проходящий по проводнику, *а*;

$r$  — сопротивление проводника, *ом*;

$t$  — время, *сек*.

Если обозначить через  $U$  напряжение, приложенное к концам проводника, то на основании закона Ома можно написать:

$$U = rI, \quad I = \frac{U}{r}, \quad r = \frac{U}{I}.$$

Подставляя эти соотношения в формулу (6), получим:

$$Q = 0,24I^2rt = 0,24UIt = 0,24 \frac{U^2}{r} t. \quad (7)$$

В данной работе, пользуясь законом Ленца — Джоуля, определяем к. п. д. нагревательного прибора. Нагревательный прибор представляет собой металлический сосуд с двойным дном или двойными стенками, между которыми помещается нагревательный элемент. При прохождении тока элемент нагревается и передает тепло внутренним стенкам сосуда, а последние в свою очередь передают тепло воде, налитой в нагревательный прибор.

Количество тепла, выделенное током  $I$  нагревательному прибору, по закону Ленца — Джоуля будет равно:

$$Q_1 = 0,24UIt. \quad (8)$$

Количество тепла, которое получит вода за тот же промежуток времени, определяется по формуле:

$$Q_2 = Mc(\vartheta - \vartheta_0), \quad (9)$$

где  $M$  — вес воды, *г*;

$\vartheta_0$  — начальная температура воды;

$\vartheta$  — конечная температура воды;

$c$  — теплоемкость.

Коэффициент полезного действия нагревательного прибора есть отношение количества тепла, полученного водой, к количеству тепла, выделенному током:

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1} 100\%. \quad (10)$$



Величина к. п. д.  $\eta$  нагревательных приборов колеблется в пределах от 60 до 95 %.

### Испытание нагревательного прибора

В зависимости от того, какими нагревательными приборами располагает лаборатория, опыт может быть произведен по схеме рис. 5 или 6. Рассматривая схему рис. 5, мы видим, что на-

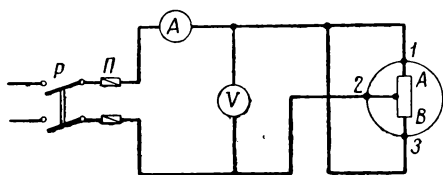


Рис. 5. Схема для испытания нагревательного прибора (с тремя зажимами)

гревательный элемент состоит из двух одинаковых секций *A* и *B* и имеет три зажима *1*, *2* и *3*, выведенные наружу. Благодаря такому устройству с помощью специального шнура (рис. 7) можно включать в сеть одну секцию или две секции, соединенные последовательно, или две секции, соединенные

параллельно. В первом случае включают зажимы *1* и *2* или *2* и *3*; во втором — *1* и *3*; в третьем случае к одному проводу включают вместе зажимы *1* и *3*, а к другому проводу — зажим *2*.

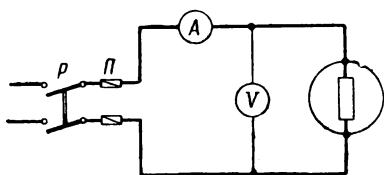


Рис. 6. Схема для испытания нагревательного прибора (с двумя зажимами)

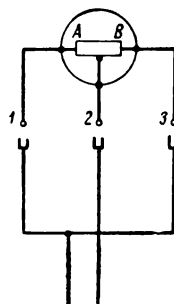


Рис. 7. Схема шнура, включающего в сеть нагревательный прибор

Опыт производится следующим образом. В нагревательный прибор наливается необходимое количество воды *M*, измеренное при помощи мензурки (или каким-либо другим способом). Затем термометром измеряем начальную температуру воды; после чего включаем рубильник *P* (рис. 5 или 6) и записываем

через каждые две минуты температуру воды \*, показания амперметра и вольтметра. Опыт продолжается до тех пор, пока вода не закипит. Результаты наблюдений записываем в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Измерено							Вычислено					Примечание
	U		I		θ	θ <sub>0</sub>	t	M	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	η	W	
	C <sub>V</sub> =		C <sub>A</sub> =									квт.ч	
	дел.	в	дел.	а	град	град	мин	г	кал	кал	%		
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													

На основании полученных данных опыта (согласно табл. 2) построить кривые:  $\eta=f(t)$  и  $Q_2=\varphi(Q_1)$ , как показано на рис. 8

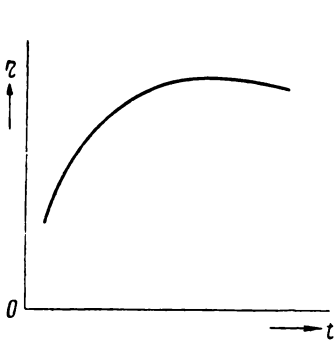


Рис. 8. Зависимость коэффициента полезного действия от времени

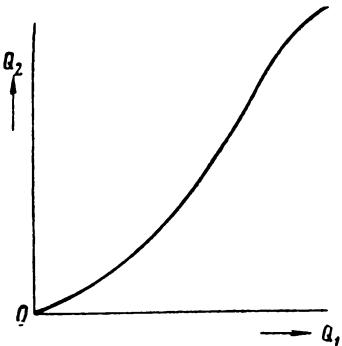


Рис. 9. Зависимость количества тепла, полученного водой, от количества тепла, выделенного током

и 9. Определить также стоимость электроэнергии для нагрева данного объема воды до кипения, если стоимость одного кило-

\* При каждом измерении температуры воду следует тщательно перемешивать.

ватт-часа равна 4 коп. Электрическая энергия, выраженная в киловатт-часах, определяется по формуле

$$W = \frac{Ult}{1000 \cdot 3600}, \quad (11)$$

где  $t$  — время, сек.

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 5 или 6.
3. Произвести испытание нагревательного прибора.
4. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 2) определить для каждого измерения к. п. д. нагревательного прибора.
5. На основании полученных данных опыта и подсчета (согласно табл. 2) построить кривые:  $\eta = f(t)$  и  $Q_2 = f(Q_1)$ .
6. На основании показаний вольтметра и амперметра (табл. 2) определить для каждого измерения сопротивление нагревательного прибора и объяснить причину разницы между найденными величинами сопротивлений.
7. Определить стоимость электроэнергии, затраченной на нагрев воды.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На каком принципе основана работа нагревательных приборов?
2. Напишите формулу коэффициента полезного действия нагревательного прибора.
3. Зависит ли величина коэффициента полезного действия нагревательного прибора от его конструкции и температуры окружающей среды?
4. Напишите формулу электрической энергии, потребляемой нагревательным прибором.

## РАБОТА № 3

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ

#### Цель работы

Целью работы является опытная проверка соотношений для цепи постоянного тока при последовательном соединении приемников. \*

---

\* Последовательной цепи.

## Общие сведения

*Последовательным соединением приемников* называют такое их соединение, при котором через все приемники проходит один и тот же ток. Рассмотрим цепь, состоящую из трех последовательно соединенных приемников (рис. 10). Напряжение  $U$ , приложенное к цепи, равно сумме напряжений на зажимах отдельных приемников:

$$U = U_1 + U_2 + U_3, \quad (12)$$

где  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$  — напряжения на зажимах отдельных приемников.

Обозначив сопротивления отдельных приемников через  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ , на основании закона Ома можем написать:

$$U_1 = r_1 I; \quad U_2 = r_2 I; \quad U_3 = r_3 I. \quad (13)$$

Подставляя эти соотношения в уравнение (12), получим:

$$U = r_1 I + r_2 I + r_3 I = (r_1 + r_2 + r_3) I = r I, \quad (14)$$

если положить

$$r = r_1 + r_2 + r_3, \quad (15)$$

т. е. эквивалентное сопротивление цепи при последовательном соединении приемников равно сумме сопротивлений отдельных приемников. Следовательно, цепь, состоящую из нескольких последовательно включенных приемников, можно заменить одним эквивалентным приемником с сопротивлением  $r$ , причем ток  $I$  и напряжение  $U$  должны остаться неизменными. На основании формулы (14) закон Ома для цепи, состоящей из нескольких последовательно включенных приемников, примет вид:

$$I = \frac{U}{r_1 + r_2 + r_3} = \frac{U}{r}. \quad (16)$$

Умножив левую и правую части уравнения (15) на  $I^2$ , получим:

$$r I^2 = r_1 I^2 + r_2 I^2 + r_3 I^2$$

или

$$P = P_1 + P_2 + P_3^*, \quad (17)$$

---

\* Такую же формулу получим, если умножим левую и правую части уравнения (12) на  $I$ , т. е.  $UI = U_1 I + U_2 I + U_3 I$   
или

$$P_1 + P_2 + P_3. \quad (17')$$

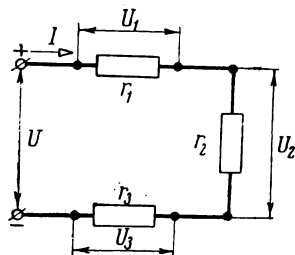


Рис. 10. Последовательное соединение приемников

т. е. мощность, потребляемая всей цепью, равна сумме мощностей, потребляемых отдельными приемниками. Из уравнений (13) видно, что при последовательном соединении приемников напряжения на зажимах отдельных приемников относятся между собой как сопротивления этих приемников. Основным недостатком последовательной цепи является то, что изменение сопротивления одного из приемников отражается на режиме работы других. Кроме того, выключение одного из приемников приводит к выключению остальных, т. е. разрыву цепи.

### Испытание последовательной цепи

Испытание последовательной цепи производится по схеме рис. 11, в которой  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $r_p$  — регулировочный реостат, который служит для регулирования напряжения на зажимах всей цепи;  $r_1$  и  $r_2$  — ламповые реостаты (вместо ламповых можно применить проволочные реостаты);  $V$ ,  $V_1$  и  $V_2$  — вольтметры\*, измеряющие напряжение на зажимах всей цепи и на зажимах приемников;  $A$  — амперметр, измеряющий ток  $I$  в цепи.

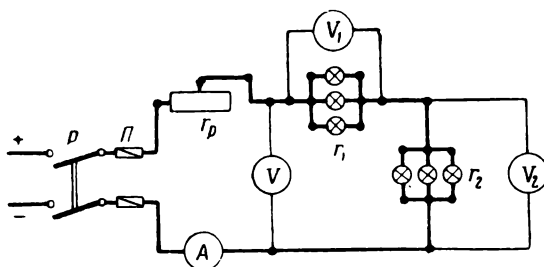


Рис. 11. Схема для испытания последовательного соединения приемников

Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , регулировочным реостатом  $r_p$  устанавливаем заданное напряжение на зажимах всей цепи, которое во время опыта поддерживается постоянным, а при помощи ламповых (или проволочных) реостатов  $r_1$  и  $r_2$  изменяем ток в цепи, а следовательно и напряжение на зажимах этих реостатов. Число измерений следует сделать не менее трех, одно из них при одинаковом числе включенных ламп в реостатах. При каждом изменении тока записываем показания приборов в табл. 3.

\* Вместо трех вольтметров можно применить один вольтметр, измеряя поочередно напряжения  $U$ ,  $U_1$  и  $U_2$ .

Таблица 3

№ п/п	Измерено						Вычислено								Примечание			
	<i>I</i>		<i>U</i> <sub>1</sub>		<i>U</i> <sub>2</sub>		<i>U</i>		<i>U</i> <sub>1</sub> + <i>U</i> <sub>2</sub>	<i>r</i> <sub>1</sub>	<i>r</i> <sub>2</sub>	<i>r</i> <sub>1</sub> + <i>r</i> <sub>2</sub>	<i>r</i>	<i>P</i> <sub>1</sub>		<i>P</i> <sub>2</sub>	<i>P</i>	<i>P</i> <sub>1</sub> + <i>P</i> <sub>2</sub>
	<i>C</i> <sub>A</sub> =		<i>C</i> <sub>V</sub> =		<i>C</i> <sub>V</sub> =		<i>C</i> <sub>V</sub> =											
	дел.	а	дел.	в	дел.	в	дел.	в	в	ом	ом	ом	ом	вт		вт	вт	вт
	дел.	а	дел.	в	дел.	в	дел.	в	в	ом	ом	ом	ом	вт		вт	вт	вт
1																		
2																		
3																		

Зная показания вольтметров и амперметра, определяем следующие величины:

сопротивления реостатов

$$r_1 = \frac{U_1}{I}, \quad r_2 = \frac{U_2}{I}; \quad (18)$$

сопротивление двух последовательно включенных реостатов (всей цепи)

$$r = \frac{U}{I}; \quad (19)$$

мощности, потребляемые реостатами,

$$P_1 = U_1 I = r_1 I^2, \quad P_2 = U_2 I = r_2 I^2; \quad (20)$$

мощность, потребляемую двумя последовательно включенными реостатами (всей цепью),

$$P = UI = r I^2. \quad (21)$$

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.

2. Собрать схему, изображенную на рис. 11.

3. При одинаковом числе включенных ламп в реостатах  $r_1$  и  $r_2$  записать показания приборов в табл. 3, затем установить различное число ламп в реостатах и снова записать показания приборов и т. д.

4. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 3) определить сопротивления каждого реостата и всей цепи, а также мощности, потребляемые каждым реостатом и всей цепью.

5. Проверить результаты измерений по формулам (12), (15) и (17).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется последовательным соединением приемников (участков электрической цепи)?
2. Как распределяются напряжения при последовательном соединении приемников?
3. Чему равно эквивалентное сопротивление цепи при последовательном соединении приемников?
4. Написать закон Ома для цепи, состоящей из пяти последовательно включенных приемников.
5. Чему равна мощность всей цепи при последовательном соединении пяти приемников?

## РАБОТА № 4

### ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ

#### Цель работы

Целью работы является опытная проверка основных соотношений для разветвленной электрической цепи \*.

#### Общие сведения

*Параллельным соединением приемников* называется такое их соединение, при котором все они находятся под одним и тем же напряжением. Рассмотрим цепь, состоящую из трех параллельно включенных приемников (рис. 12). Применяя первый закон Кирхгофа к узлу *A* (*узлом* или *узловой точкой* называется такая точка, в которой сходятся не менее трех проводников), получим:

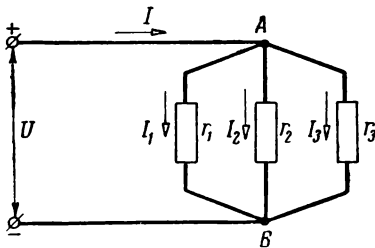


Рис. 12. Параллельное соединение приемников

$$I = I_1 + I_2 + I_3, \quad (22)$$

т. е. *сумма токов, притекающих к узлу, равна сумме токов, уходящих от него*. Уравнение (22) можно представить и в другом виде:

$$I - I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (23)$$

В этом случае первый закон Кирхгофа гласит: *алгебраическая сумма токов в узле равна нулю*. При этом токи, притекающие к узлу, условно считаются положительными, а уходящие от него — отрицательными. Обозначим напряжение на зажимах

\* Цепи постоянного тока с параллельным соединением приемников.

приемников через  $U$ , сопротивления отдельных приемников через  $r_1, r_2, r_3$ , а проводимости приемников через  $g_1, g_2, g_3$ .

На основании закона Ома токи отдельных приемников будут равны:

$$I_1 = \frac{U}{r_1} = Ug_1; \quad I_2 = \frac{U}{r_2} = Ug_2; \quad I_3 = \frac{U}{r_3} = Ug_3. \quad (24)$$

Из формулы (24) имеем:

$$U = r_1 I_1 = r_2 I_2 = r_3 I_3,$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{g_1}{g_2}; \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{r_3}{r_2} = \frac{g_2}{g_3}, \quad (25)$$

т. е. токи распределяются в параллельно соединенных приемниках обратно пропорционально сопротивлениям или прямо пропорционально проводимостям приемников. Подставляя значения токов из формул (24) в формулу (22) будем иметь:

$$I = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2} + \frac{U}{r_3} = U \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right) = \frac{U}{r}, \quad (26)$$

если положить

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}, \quad (27)$$

где  $r$  — эквивалентное (общее) сопротивление цепи.

Так как  $\frac{1}{r} = g$ ,  $\frac{1}{r_1} = g_1$ ,  $\frac{1}{r_2} = g_2$ ,  $\frac{1}{r_3} = g_3$ , то формула (27) примет вид:

$$g = g_1 + g_2 + g_3, \quad (28)$$

т. е. эквивалентная проводимость цепи при параллельном соединении приемников равна сумме проводимостей отдельных приемников. Таким образом, цепь, состоящую из нескольких параллельно включенных приемников, можно заменить одним эквивалентным приемником с проводимостью  $g$ , чтобы при том же напряжении  $U$  в нем проходил ток  $I$ , равный току в неразветвленной части цепи.

Если параллельно соединены два приемника, то эквивалентное сопротивление цепи найдем из формулы (27):

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2},$$

откуда

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \quad (29)$$



Если сопротивления параллельно включенных приемников одинаковы ( $r_1=r_2=r_3=\dots=r_n$ ), то эквивалентное сопротивление цепи найдем из формулы

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

откуда

$$r = \frac{r_1}{n}, \quad (30)$$

где  $r_1$  — сопротивление одного приемника;

$n$  — число параллельно включенных приемников.

Следует отметить, что эквивалентное сопротивление цепи при параллельном соединении приемников всегда меньше наименьшего из сопротивлений, имеющихсх в данной цепи. Умножив левую и правую части формулы (22) на напряжение  $U$ , получим:

$$UI = UI_1 + UI_2 + UI_3$$

или

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (31)$$

т. е. *мощность, потребляемая всей цепью, равна сумме мощностей, потребляемых отдельными приемниками*. При постоянном напряжении на зажимах параллельно включенных приемников токи отдельных приемников не зависят друг от друга. Поэтому приемники (лампы, электродвигатели и др.) обычно включаютсх параллельно.

### Испытание разветвленной цепи

Испытание разветвленной цепи постоянного тока производится по схеме, изображенной на рис. 13. В этой схеме  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $r_p$  — регулировочный реостат, при помощи которого напряжение на зажимах приемников поддерживается постоянным;  $r_1$  и  $r_2$  — ламповые реостаты (вместо ламповых можно применить проволочные ре-

№ п/п	Измерено								Вы
	$U$		$I_1$		$I_2$		$I$		$I = I_1 + I_2$
	$C_V =$		$C_A =$		$C_A =$		$C_A =$		
	дел.	в	дел.	а	дел.	а	дел.	а	а
1									
2									
3									

остаты);  $A$ ,  $A_1$  и  $A_2$  — амперметры, измеряющие токи в неразветвленной части цепи и в приемниках;  $V$  — вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах цепи.

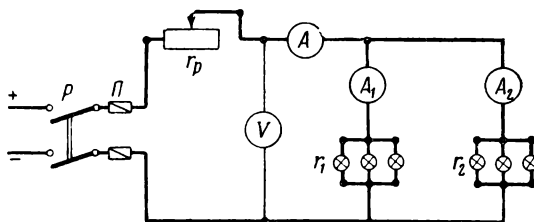


Рис. 13. Схема для проверки первого закона Кирхгофа

Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , регулировочным реостатом  $r_p$  устанавливаем заданное напряжение на зажимах цепи, которое во время опыта поддерживается постоянным; реостатами  $r_1$  и  $r_2$  устанавливаем одинаковые токи в параллельных ветвях и записываем показания приборов в табл. 4. Затем производим еще два измерения при различных значениях сопротивлений реостатов  $r_1$  и  $r_2$ . Зная показания вольтметра и амперметров, определяем следующие величины:

сопротивления реостатов

$$r_1 = \frac{U}{I_1}, \quad r_2 = \frac{U}{I_2}; \quad (32)$$

сопротивление всей цепи

$$r = \frac{U}{I}; \quad (33)$$

мощности, потребляемые реостатами и всей цепью,

$$P_1 = UI_1 = r_1 I_1^2; \quad P_2 = UI_2 = r_2 I_2^2; \quad P = UI = r I^2. \quad (34)$$

Таблица 4

числено											Примечание
$r_1$	$r_2$	$r$	$\frac{U}{I}$	$g_1$	$g_2$	$g$	$P_1$	$P_2$	$P$	$P_1 + P_2$	
ом	ом	ом	ом	1/ом	1/ом	1/ом	вт	вт	вт	вт	

## Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 13.
3. Реостатами  $r_1$  и  $r_2$  установить одинаковые токи в параллельных ветвях и записать показания приборов в табл. 4. Затем произвести еще два измерения при различных значениях сопротивлений реостатов  $r_1$  и  $r_2$ .
4. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 4) определить сопротивления каждого реостата и всей цепи, проводимости каждого реостата и всей цепи и мощности, потребляемые каждым реостатом и всей цепью.
5. Проверить результаты измерений и вычислений по формулам (22), (25), (28), (29), (31), (33) и (34).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется параллельным соединением приемников?
2. Как распределяются токи при параллельном соединении приемников?
3. Чему равна эквивалентная проводимость цепи при параллельном соединении приемников?
4. Напишите первый закон Кирхгофа для четырех параллельно соединенных приемников.
5. Чему равна мощность всей цепи при параллельном соединении приемников?

## РАБОТА № 5

### СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ

#### Цель работы

Целью работы является опытная проверка основных соотношений для смешанного соединения приемников.

#### Общие сведения

*Смешанным соединением приемников* называют такое их соединение, при котором часть из них соединена последовательно, а часть — параллельно (рис. 14). Рассмотрим расчет электрической цепи на смешанное соединение приемников (рис. 14). Предположим, что задано напряжение  $U$  на зажимах всей цепи и сопротивления отдельных приемников  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ . Найти токи отдельных приемников. Заменяем два параллельно включенных сопротивления  $r_2$  и  $r_3$  эквивалентным сопротивлением:

$$r_{23} = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3} . \quad (35)$$

В этом случае схему, изображенную на рис. 14, можно заменить схемой рис. 15. Так как сопротивление  $r_1$  включено последовательно с сопротивлением  $r_{23}$  (рис. 15), то эквивалентное сопротивление  $r$  всей цепи будет равно:

$$r = r_1 + r_{23} = r_1 + \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3} . \quad (36)$$

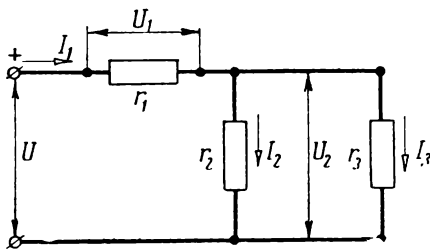


Рис. 14. Смешанное соединение приемников

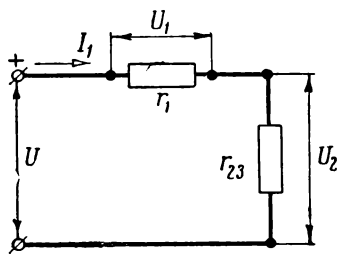


Рис. 15. Последовательное соединение приемников

Зная напряжение  $U$  на зажимах всей цепи и сопротивление  $r$  цепи, можно определить ток в неразветвленной части цепи:

$$I_1 = \frac{U}{r} . \quad (37)$$

Напряжение на зажимах сопротивления  $r_1$  равно:

$$U_1 = r_1 I_1 . \quad (38)$$

Напряжение на зажимах параллельных ветвей:

$$U_2 = r_{23} I_1 \quad (39)$$

или

$$U_2 = U - U_1 . \quad (40)$$

Токи в параллельных ветвях:

$$I_2 = \frac{U_2}{r_2} , \quad I_3 = \frac{U_2}{r_3} . \quad (41)$$

Мощности, потребляемые приемниками:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= U_1 I_1 = r_1 I_1^2; \\ P_2 &= U_2 I_2 = r_2 I_2^2; \\ P_3 &= U_2 I_3 = r_3 I_3^2. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Мощность, потребляемая всей цепью:

$$P = UI_1 = rI_1^2 \quad (43)$$

или

$$P = P_1 + P_2 + P_3. \quad (44)$$

### Испытание цепи при смешанном соединении приемников

Испытание при смешанном соединении приемников производится по схеме, изображенной на рис. 16. В этой схеме  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $r_p$  — регулировочный реостат, при помощи которого напряжение на зажимах

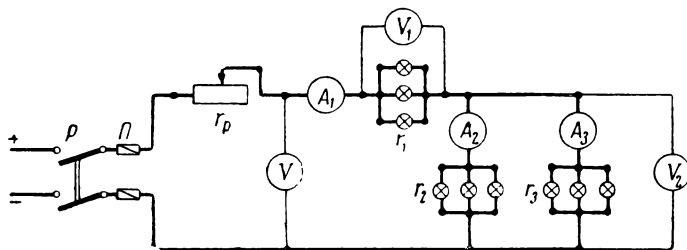


Рис. 16. Испытание цепи при смешанном соединении приемников.

всей цепи поддерживается постоянным;  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  — ламповые реостаты (вместо ламповых можно применить проволочные реостаты);  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  — амперметры, измеряющие токи приемников;  $V$ ,  $V_1$  и  $V_2$  — вольтметры, измеряющие напряжения на зажимах всей цепи и напряжения на зажимах отдельных приемников (вместо трех можно применить один вольтметр, измеряя поочередно напряжения  $U$ ,  $U_1$  и  $U_2$ ).

Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , регулировочным реостатом  $r_p$  устанавливаем заданное напряжение, которое во время опыта поддерживаем постоянным; реостатами  $r_2$  и  $r_3$  устанавливаем одинаковые токи в параллельных ветвях и записываем показания приборов в табл. 5.

Затем изменяем сопротивление реостата  $r_1$  и снова записываем показания приборов. После этого производим еще два измерения при постоянных сопротивлениях реостатов  $r_1$  и  $r_2$ , а изменяем только сопротивление реостата  $r_3$ . Зная показания вольтметров и амперметров, определяем следующие величины: сопротивления реостатов

$$r_1 = \frac{U_1}{I_1}; \quad r_2 = \frac{U_2}{I_2}; \quad r_3 = \frac{U_2}{I_3}; \quad (45)$$

Таблица 5

№ п/п	Измерено										Вычислено							Примечание			
	$U$		$U_2$		$I_1$		$I_2$		$I_3$		$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r$	$\frac{U}{I_1}$	$P_1$	$P_2$		$P_3$	$P$	$P_1+P_2+P_3$
	$C_V=$		$C_V=$		$C_A=$		$C_A=$		$C_A=$												
	дел.	в	дел.	в	дел.	а	дел.	а	дел.	а											
1																					
2																					
3																					
4																					

Таблица 6

№ п/п	Измерено										Вычислено				Примечание	
	Тип аккумулятора	$U_p$		$I_p$		$t_p$	$\gamma$	$U_3$		$I_3$	$t_3$	$\eta$	$\eta_W$	$\gamma_{в.р}$		$\gamma_{в.з}$
		дел.	в	дел.	а	мин	град	дел.	в	дел.	а					
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																

Примечание. Число измерений в данной работе зависит от условий проведения опыта.

сопротивление всей цепи

$$r = \frac{U}{I_1}; \quad (46)$$

мощности, потребляемые отдельными приемниками и всей цепью по формулам (42) и (43).

Зная сопротивление отдельных приемников, можно определить сопротивление всей цепи по формуле (36).

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.

2. Собрать схему, изображенную на рис. 16.

3. Реостатами  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  при постоянном напряжении на зажимах цепи установить одинаковые токи в параллельных ветвях и записать показания приборов в табл. 5. Затем изменить сопротивление реостата  $r_1$  и снова записать показания приборов. После этого произвести еще два отсчета по приборам при постоянных сопротивлениях реостатов  $r_1$  и  $r_2$ , а изменять сопротивление реостата  $r_3$ .

4. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 5) определить сопротивления каждого реостата и всей цепи, мощности, потребляемые каждым реостатом и всей цепью.

5. Проверить результаты измерений и вычислений по формулам (36), (43), (44) и (46).

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется смешанным соединением приемников?

2. Напишите формулу эквивалентного сопротивления цепи при смешанном соединении приемников, если три приемника соединены параллельно, а четвертый — последовательно им.

3. Чему равна мощность цепи при смешанном соединении приемников?

### РАБОТА № 6

### ИСПЫТАНИЕ АККУМУЛЯТОРОВ

#### Цель работы

Целью работы является ознакомление с устройством аккумулятора и исследованием процессов разряда и заряда аккумулятора.

#### Общие сведения

Аккумуляторы делятся на два типа: свинцовые (или кислотные) и щелочные (кадмиево-никелевые и железо-никелевые).

*Емкостью аккумулятора* называется количество электричества, отдаваемое аккумулятором при разряде (разрядная емкость). Количество электричества, поглощаемое при заряде, определяет зарядную емкость аккумулятора. Емкость аккумулятора измеряется в ампер-часах ( $a \cdot ч$ ). Следует отметить, что емкость аккумулятора зависит от типа пластин, величины их поверхности и числа пластин, от плотности и объема электролита. Величина разрядной емкости указывается на щитке аккумулятора, она зависит от величины разрядного тока и значительно падает с его увеличением. Величина разрядного и зарядного токов указывается на щитке аккумулятора. Если  $I_3$  — ток при заряде аккумулятора,  $I_p$  — ток при разряде аккумулятора и если эти токи поддерживаются неизменными, то количество электричества, поглощенное аккумулятором при заряде, будет равно:

$$Q_3 = I_3 t_3, \quad (47)$$

а при разряде

$$Q_p = I_p t_p, \quad (48)$$

где  $t_3$  и  $t_p$  — продолжительность заряда и разряда.

*Отдача (к. п. д.) аккумулятора по емкости* есть отношение разрядной емкости к зарядной:

$$\eta = \frac{Q_p}{Q_3} = \frac{I_p t_p}{I_3 t_3}. \quad (49)$$

*Отдачей (к. п. д.) аккумулятора по энергии* называется отношение энергии, отданной аккумулятором при разряде, к энергии, поглощенной им при заряде:

$$\eta_w = \frac{W_p}{W_3}, \quad (50)$$

где  $W_p$  — энергия, отданная аккумулятором при разряде;

$W_3$  — энергия, потребляемая аккумулятором при заряде.

На практике часто определяют энергию, отдаваемую аккумулятором при разряде, а также энергию, потребляемую при заряде по следующим формулам:

$$W_p = U_{p.c.p} I_p t_p, \quad (51)$$

$$W_3 = U_{3.c.p} I_3 t_3, \quad (52)$$

где  $U_{p.c.p}$  — среднее напряжение при разряде, которое равно среднему арифметическому из напряжения в начале разряда  $U_{p.n}$  и в конце разряда  $U_{p.k}$ , т. е.

$$U_{p.c.p} = \frac{U_{p.n} + U_{p.k}}{2}, \quad (53)$$



$U_{з.ср}$  — среднее напряжение при заряде, которое равно:

$$U_{з.ср} = \frac{U_{з.н} + U_{з.к}}{2}. \quad (54)$$

Каждый свинцовый аккумулятор состоит из комплектов положительных и отрицательных пластин, электролита и сосуда. Отрицательных пластин в свинцовом аккумуляторе на одну больше, чем положительных. Следовательно, каждую положительную пластину располагают между двумя отрицательными. В свинцовых аккумуляторах применяются пластины трех типов: поверхностные, коробчатые и решетчатые (пастированные или массовые). Поверхностные пластины делаются литыми из химически чистого свинца. Чтобы увеличить поверхность этих пластин с обеих сторон они снабжаются ребрышками. Поверхностные пластины применяются в качестве положительных пластин для стационарных аккумуляторов типа С и СК.

Коробчатая пластина состоит из двух решеток, отлитых из свинца. В крупные ячейки решеток вмазывается активная масса, состоящая из свинцовой пыли Pb с добавлением 1,9% сернокислого бария BaSO<sub>4</sub>, замешанной на серной кислоте H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Сернокислый барий является расширителем, предохраняющим активную массу от усадки, и в химической реакции участия не принимает. Свинцовые решетки скрепляют между собой и закрывают с обеих внешних сторон свинцовыми листами с мелкими отверстиями. Следовательно, активной массой является пористый или губчатый свинец Pb. Коробчатые пластины применяют в качестве отрицательных пластин в стационарных аккумуляторах типа С и СК. Решетчатая пластина состоит из решетки с мелкими ячейками, в которые вмазывается паста, состоящая из смеси окислов свинца — свинцового глета PbO и сурика Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> или свинцовой пыли Pb, замешанных на серной кислоте H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. В качестве расширителя применяется сернокислый барий BaSO<sub>4</sub>. Решетчатые пластины применяются для переносных аккумуляторов в качестве как положительных (с пастой из свинцовой пыли), так и отрицательных (с пастой из смеси свинцового глета и сурика). В качестве электролита свинцовых аккумуляторов применяется водный раствор серной кислоты, который готовится из химически чистой серной кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и дистиллированной воды. Электродами свинцового аккумулятора в заряженном состоянии являются: перекись свинца PbO<sub>2</sub> (анод — положительная пластина) и чистый свинец Pb (катод — отрицательная пластина).

Основными признаками окончания заряда свинцовых аккумуляторов являются: сильное выделение газов на пластинах обеих полярностей («кипение» электролита); повышение плотности электролита до 1,2÷1,21; повышение напряжения до

2,7÷2,8 в; в конце заряда положительные пластины становятся темно-коричневыми, а отрицательные — светло-серыми.

При разряде аккумулятора происходит переход перекиси свинца  $PbO_2$  и губчатого свинца  $Pb$  в сернокислый свинец  $PbSO_4$  с образованием воды, т. е. плотность электролита падает в конце разряда 1,17÷1,15. Следует обратить внимание, что свинцовый аккумулятор нельзя разряжать ниже чем до 1,75 в, так как при глубоком разряде аккумулятор может быть испорчен. Это объясняется тем, что при глубоком разряде активная масса пластин переходит в сплошную массу сернокислого свинца с выделением крупных кристаллов, которые при нормальном заряде аккумулятора не восстановятся ни в перекись свинца  $PbO_2$ , ни в чистый губчатый свинец  $Pb$ .

Щелочные аккумуляторы подразделяются на железо-никелевые и кадмиево-никелевые. Конструкции положительных и отрицательных пластин почти одинаковы, но положительные пластины имеют несколько больший размер и толщину. Отличаются они только активной массой. Активной массой положительных пластин в заряженном состоянии как для железо-никелевых, так и кадмиево-никелевых аккумуляторов является гидрат окиси никеля  $Ni(OH)_3$ .

Активной массой заряженных отрицательных пластин железо-никелевых аккумуляторов является губчатое железо  $Fe$ . Активная масса заряженных отрицательных пластин состоит из губчатого кадмия  $Cd$  (80÷85%) и губчатого железа  $Fe$  (20÷15%). Электролитом щелочных аккумуляторов является 20-процентный раствор едкого калия  $KOH$  с добавлением моногидрата лития  $LiOH$ . Емкость щелочных аккумуляторов возрастает с увеличением температуры и падает с ее уменьшением. Она мало зависит от величины разрядного тока. Следует отметить, что плотность электролита в щелочных аккумуляторах не изменяется во время заряда и разряда и остается приблизительно постоянной.

Щелочные аккумуляторы по сравнению со свинцовыми обладают:

- большой механической прочностью;
- они меньше требуют ухода;
- имеют меньший вес;
- не боятся короткого замыкания;
- длительное время могут оставаться в разряженном состоянии.

К недостаткам щелочных аккумуляторов по сравнению со свинцовыми относятся:

- большое внутреннее сопротивление,
- меньшая отдача (к. п. д.);
- меньшее рабочее напряжение.

## Исследование разряда и заряда аккумулятора

На рис. 17 показаны схемы для заряда и разряда аккумулятора. Схема рис. 17, а применяется тогда, когда имеется амперметр с нулем в середине, а схема рис. 17, б — когда имеется амперметр с нулем слева. В этих схемах  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $\Pi_1$  — двухполюсный переключатель, который служит для быстрого переключения аккумуля-

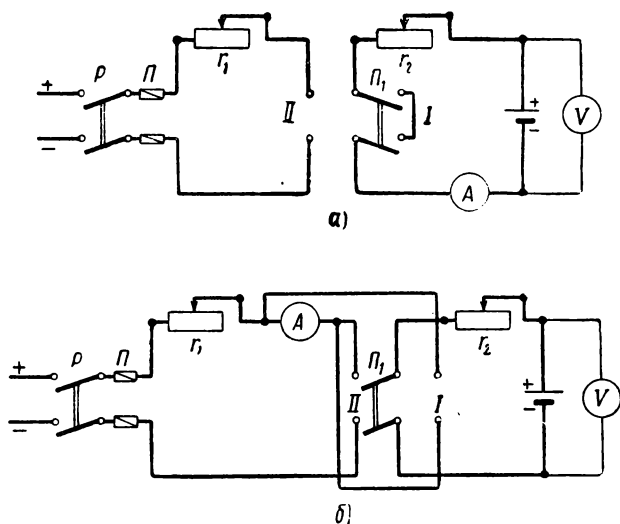


Рис. 17. Схемы для заряда и разряда аккумулятора:  
а — при пользовании амперметром с нулем в середине, б — при  
пользовании амперметром с нулем слева

мулятора с заряда на разряд и обратно;  $r_1$  — реостат для регулирования тока при заряде;  $r_2$  — реостат для регулирования тока при разряде;  $V$  — вольтметр магнитоэлектрической системы, измеряющий напряжение на зажимах аккумулятора (предел его измерения должен соответствовать наибольшему напряжению аккумулятора, а шкала должна быть подробной и позволять отсчитывать показания с точностью до сотых долей вольта);  $A$  — амперметр магнитоэлектрической системы, измеряющий ток при заряде и разряде аккумулятора \*.

Опыт производится сначала с заряженным аккумулятором. Если аккумулятор не был полностью заряжен, то его следует дозарядить номинальным током до наибольшего напряжения,

\* До проведения опыта необходимо убедиться в правильности полярности аккумулятора по отношению к полярности сети.

соответствующего типу элемента. После этого переключатель  $\Pi$ , ставим в положение  $I$  и реостатом  $r_2$  быстро устанавливаем разрядный ток согласно данным паспорта. Разрядный ток во время опыта поддерживается неизменным при помощи реостата  $r_2$ . В начале разряда в течение 3—5 мин измерения следует производить через 15—20 сек, после чего записи по вольтметру производим через 10—15 мин. Показания приборов записываем в табл. 6.

Разряд нужно продолжать до тех пор, пока напряжение на зажимах аккумулятора не станет равным 1,8 в (или 1,75 в) для свинцового и 1,1 в для щелочного аккумуляторов. Во время опыта измеряется при помощи ареометра плотность электролита. Если требуется определить внутреннее сопротивление аккумулятора, то следует перед разрядом измерить его э. д. с.  $E_{p.n}$  (при разомкнутой внешней цепи вольтметр измеряет э. д. с. аккумулятора, так как падением напряжения ввиду малой величины можно пренебречь) и напряжение  $U_{p.n}$  в начале разряда, т. е.

$$U_{p.n} = E_{p.n} - r'_{в.н} I_p, \quad (55)$$

где  $r'_{в.н}$  — внутреннее сопротивление аккумулятора в начале разряда.

Напряжение  $U_{p.к}$ , измеренное в конце разряда, равно

$$U_{p.к} = E_{p.к} - r'_{в.к} I_p, \quad (56)$$

где  $E_{p.к}$  — э. д. с., измеренная в конце разряда аккумулятора;  $I_p$  — ток при разряде;

$r'_{в.к}$  — внутреннее сопротивление аккумулятора в конце разряда.

Внутреннее сопротивление аккумулятора в начале и в конце разряда найдем из формул (55) и (56):

$$r'_{в.н} = \frac{E_{p.n} - U_{p.n}}{I_p} \quad (57)$$

и

$$r'_{в.к} = \frac{E_{p.к} - U_{p.к}}{I_p}. \quad (58)$$

Средняя величина внутреннего сопротивления аккумулятора при разряде будет равна:

$$r_{в.p} = \frac{r'_{в.н} + r'_{в.к}}{2}. \quad (59)$$

На основании полученных данных опыта (согласно табл. 6) строим кривую  $U_p = f(t_p)$ , как показано на рис. 18. После разряда аккумулятора следует быстро перейти к его заряду. Для

этого переключатель  $\Pi_1$  ставим в положение  $II$ ; реостатом  $r_1$  быстро устанавливаем зарядный ток, равный номинальному. Зарядный ток  $I_3$  во время опыта поддерживается неизменным. Показания приборов записываем в табл. 6. Заряд аккумулятора следует продолжать до тех пор, пока напряжение у свинцового аккумулятора не станет равным 2,7—2,8 в, а у щелочного — 1,8 в. Напряжение, измеренное в начале заряда,

$$U_{3,н} = E_{3,н} + r''_{в,н} I_3, \quad (60)$$

где  $E_{3,н}$  — э. д. с., измеренная в начале заряда;  
 $r''_{в,н}$  — внутреннее сопротивление аккумулятора в начале заряда;  
 $I_3$  — ток при заряде.

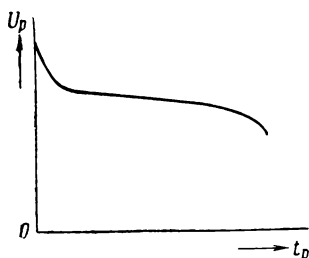


Рис. 18. Кривая изменения напряжения свинцового аккумулятора при разряде

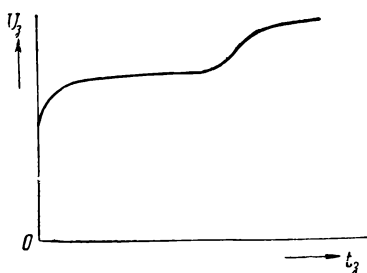


Рис. 19. Кривая изменения напряжения свинцового (кислотного) аккумулятора при заряде

Напряжение, измеренное в конце заряда,

$$U_{3,к} = E_{3,к} + r''_{в,к} I_3, \quad (61)$$

где  $E_{3,к}$  — э. д. с., измеренная в конце заряда;  
 $r''_{в,к}$  — внутреннее сопротивление аккумулятора в конце заряда.

Внутреннее сопротивление аккумулятора в начале и конце заряда определяют из формул (60) и (61):

$$r''_{в,н} = \frac{U_{3,н} - E_{3,н}}{I_3}, \quad (62)$$

$$r''_{в,к} = \frac{U_{3,к} - E_{3,к}}{I_3}. \quad (63)$$

Средняя величина внутреннего сопротивления аккумулятора при заряде

$$r_{в,з} = \frac{r''_{в,н} + r''_{в,к}}{2}. \quad (64)$$

На основании полученных данных опыта (согласно табл. 6) строим кривую  $U_3 = f(I_3)$ , как показано на рис. 19.

### **Порядок проведения работы**

1. Ознакомиться с устройством аккумулятора, аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.

2. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 17.

3. Произвести разряд аккумулятора.

4. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 6) построить кривую  $U_p = f(t_p)$ .

5. Произвести заряд аккумулятора.

6. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 6) построить кривую  $U_3 = f(t_3)$ .

7. На основании полученных данных опыта и подсчета (согласно табл. 6) определить разрядную и зарядную емкости аккумулятора, отдачу (к. п. д.) по емкости и энергии и внутреннее сопротивление аккумулятора при разряде и заряде его. Сравнить полученные данные для испытанного аккумулятора с нормальными техническими данными для этого аккумулятора и сделать соответствующие выводы.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Опишите устройство аккумулятора.
2. Что называется разрядной и зарядной емкостью аккумулятора?
3. Напишите формулу отдачи аккумулятора по энергии.
4. Какой процесс происходит в аккумуляторе при разряде?
5. Какой процесс происходит в аккумуляторе при заряде?
6. Какие основные преимущества и недостатки щелочных и свинцовых аккумуляторов и где они применяются?
7. Почему при заряде аккумулятора напряжение на зажимах его должно быть выше э. д. с.?
8. Почему при включении в сеть аккумуляторов на заряд необходимо проверить полярность их по отношению к сети?

### **РАБОТА № 7**

#### **ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ, ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ И СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ АККУМУЛЯТОРОВ ИЛИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

#### **Цель работы**

Целью работы является испытание аккумуляторов или гальванических элементов при различном их соединении.

## Общие сведения

Для соединения аккумуляторов или гальванических элементов в батареи применяется последовательное, параллельное и смешанное соединение их.

*Последовательным соединением аккумуляторов* (или гальванических элементов) \* называется такое их соединение, когда отрицательный полюс первого аккумулятора (или гальванического элемента) соединяют с положительным полюсом второго аккумулятора (элемента), отрицательный полюс второго — с положительным полюсом третьего и т. д. (рис. 20). При последовательном соединении аккумуляторов (или гальванических элементов) э. д. с. батареи равняется сумме э. д. с. отдельных аккумуляторов (или гальванических элементов):

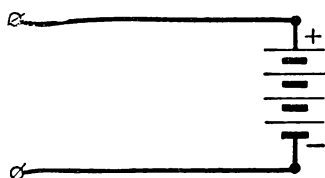


Рис. 20. Последовательное соединение аккумуляторов (или гальванических элементов)

Рис. 20. Последовательное соединение аккумуляторов (или гальванических элементов) э. д. с. батареи равняется сумме э. д. с. отдельных аккумуляторов (или гальванических элементов):

$$E_6 = E_1 + E_2 + \dots + E_n, \quad (65)$$

а внутреннее сопротивление батареи равняется сумме внутренних сопротивлений отдельных аккумуляторов (или элементов):

$$r_{в.6} = r_{в1} + r_{в2} + \dots + r_{вn}, \quad (66)$$

где  $r_{в1}$ ,  $r_{в2}$ ,  $r_{вn}$  — внутренние сопротивления отдельных аккумуляторов (или элементов).

Ток во внешней цепи будет равен:

$$I = \frac{E_6}{r_{в.6} + r}, \quad (67)$$

где  $r$  — сопротивление внешней цепи.

Если батарея состоит из  $n$  одинаковых ( $E_1 = E_2 = \dots = E_n$ ,  $r_{в1} = r_{в2} = \dots = r_{вn}$ ) последовательно соединенных аккумуляторов (или элементов), то э. д. с. батареи равна:

$$E_6 = nE, \quad (68)$$

а внутреннее сопротивление батареи

$$r_{в.6} = nr_{в}, \quad (69)$$

где  $r_{в}$  — внутреннее сопротивление одного аккумулятора (или элемента).

\* Иногда вместо термина «гальванический элемент» будем употреблять термин «элемент».

Если батарея замкнута на внешнее сопротивление  $r$ , то ток в цепи будет равен:

$$I = \frac{nE}{nr_B + r} = \frac{E_6}{r_{B.6} + r}, \quad (70)$$

где  $E_6 = nE$  — э. д. с. батареи;

$E$  — э. д. с. одного аккумулятора (или элемента).

Напряжение на зажимах батареи при последовательном соединении аккумуляторов или гальванических элементов равняется сумме напряжений на зажимах отдельных аккумуляторов или элементов. Последовательное соединение аккумуляторов (или элементов) применяется тогда, когда напряжение одного аккумулятора или элемента будет мало для питания данной цепи, а величина номинального разрядного тока равна или больше тока цепи. Последовательное соединение аккумуляторов (или элементов) получило широкое применение, например в радиотехнике, телеграфии.

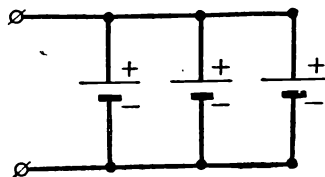


Рис. 21. Параллельное соединение аккумуляторов (или гальванических элементов)

*Параллельным соединением аккумуляторов (или элементов)* (рис. 21) называется такое их соединение, когда все положительные полюсы аккумуляторов (или элементов) соединяются вместе, образуя положительный полюс батареи. Отрицательные полюсы аккумуляторов (или элементов) также соединяются вместе, образуя отрицательный полюс батареи. Рассмотрим частный случай, когда все аккумуляторы (или элементы) имеют одинаковые э. д. с. и одинаковые внутренние сопротивления, т. е.

$$E_1 = E_2 = \dots = E_m \text{ и } r_{B1} = r_{B2} = \dots = r_{Bm}.$$

В этом случае э. д. с.  $E_6$  батареи равняется э. д. с.  $E$  одного аккумулятора (или элемента):

$$E_6 = E, \quad (71)$$

а внутреннее сопротивление батареи будет равно:

$$r_{B.6} = \frac{r_B}{m}, \quad (72)$$

где  $r_B$  — внутреннее сопротивление одного аккумулятора (или элемента);

$m$  — число параллельно включенных аккумуляторов (или элементов).



Если батарея, состоящая из  $m$  параллельно включенных аккумуляторов (или элементов), замкнута на внешнее сопротивление  $r$ , то ток в цепи будет равен:

$$I = \frac{E}{r_{в.б} + r} = \frac{E}{\frac{r_{в.б}}{m} + r}. \quad (73)$$

Параллельное соединение аккумуляторов или элементов применяется в тех случаях, когда напряжение одного аккумулятора или элемента соответствует напряжению данной цепи, а ток в цепи должен быть больше номинального тока одного аккумулятора (элемента).

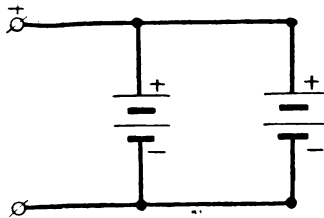


Рис. 22. Смешанное соединение аккумуляторов (или гальванических элементов)

Смешанным соединением (рис. 22) аккумуляторов (или элементов) называется такое их соединение, когда имеется несколько параллельно соединенных групп, каждая из которых состоит из одинакового числа последовательно соединенных аккумуляторов (или гальванических

элементов). Э. д. с. батареи при смешанном соединении аккумуляторов (или гальванических элементов) определяется по формуле

$$E_6 = nE, \quad (74)$$

а внутреннее сопротивление батареи равно:

$$r_{в.б} = \frac{nr_{в.б.}}{m}, \quad (75)$$

где  $n$  — число последовательно соединенных аккумуляторов (или гальванических элементов) в группе;

$m$  — число параллельных групп.

Ток при смешанном соединении аккумуляторов (или гальванических элементов) определяется по формуле

$$I = \frac{E_6}{r_{в.б} + r} = \frac{nE}{\frac{nr_{в.б.}}{m} + r}, \quad (76)$$

где  $r$  — сопротивление внешней цепи.

Смешанное соединение аккумуляторов (или гальванических элементов) применяется тогда, когда напряжение и ток приемника энергии (сети) больше напряжения и тока отдельного аккумулятора (или гальванического элемента).

## Испытание последовательного, параллельного и смешанного соединений аккумуляторов (или элементов)

На рис. 23 показаны схемы последовательного, параллельного и смешанного соединений аккумуляторов (или гальванических элементов). В этих схемах  $P$  — однополюсный рубильник (вместо однополюсного можно применить двухполюсный рубильник);  $V$  — вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах батареи;  $A$  — амперметр (либо миллиамперметр в зависимости от того, что испытываются аккумуляторы или гальванические элементы), измеряющий ток во внешней цепи.

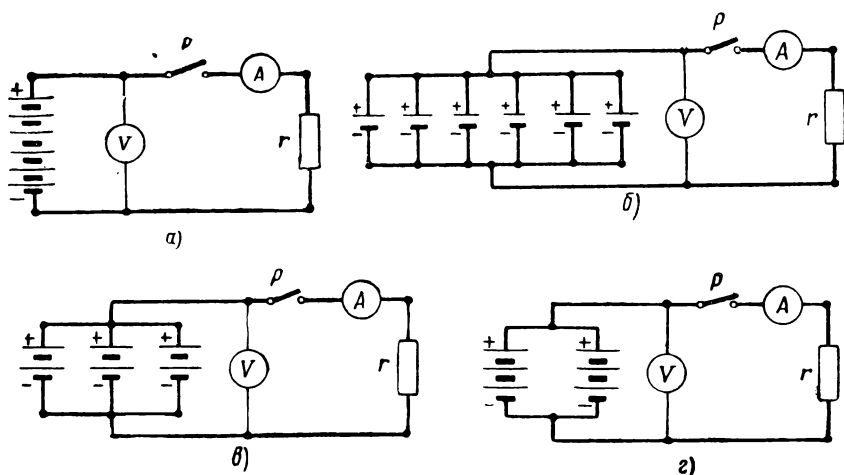


Рис. 23. Схемы испытания аккумуляторов или элементов при различном способе их соединения:

$a$  — при последовательном соединении аккумуляторов (или гальванических элементов),  
 $б$  — при параллельном соединении аккумуляторов (или гальванических элементов),  
 $в$  и  $г$  — смешанное соединение аккумуляторов (или гальванических элементов)

На рис. 23,  $a$  показано последовательное соединение аккумуляторов (или гальванических элементов). При разомкнутом рубильнике  $P$  измеряем э. д. с. батареи, при этом падением напряжения в батарее пренебрегаем из-за малой его величины. Затем включаем рубильник  $P$  и измеряем напряжение на зажимах цепи и ток в цепи. Показания приборов записываем в табл. 7.

На рис. 23,  $б$  показано параллельное соединение аккумуляторов (или гальванических элементов). При разомкнутом рубильнике  $P$  измеряем э. д. с. батареи. Затем включаем рубильник  $P$  и измеряем напряжение на зажимах батареи и ток во внешней цепи.

Таблица 7

№ п/п	Соединение аккумуляторов или гальванических элементов	Измерено						Вычислено						Примечание
		$E_6$		$U$		$I$		$r$	$r_{в.б}$	$r_{в}$	$P$	$P_p$	$\eta$	
		$C_V =$		$C_V =$		$C_A =$								
		дел.	в	дел.	в	дел.	а	ом	ом	ом	вт	вт	%	
1	Последовательное соединение (рис. 23, а)													
2	Параллельное соединение (рис. 23, б)													
3	Смешанное соединение (рис. 23, в)													
4	Смешанное соединение (рис. 23, г)													

На рис. 23, в показана батарея, состоящая из трех групп по два аккумулятора (или гальванического элемента) в каждой. При разомкнутом рубильнике  $P$  измеряем э. д. с. батареи. Затем включаем рубильник  $P$  и измеряем напряжение на зажимах батареи и ток во внешней цепи.

На рис. 23, г показана батарея, состоящая из двух групп по три аккумулятора (или гальванического элемента) в каждой. При разомкнутом рубильнике  $P$  измеряем э. д. с. батареи. Затем включаем рубильник  $P$  и измеряем напряжение на зажимах батареи и ток во внешней цепи. Во всех четырех опытах нагрузка остается постоянной. Зная показания вольтметра и амперметра, можно определить сопротивление внешней цепи, т. е. нагрузки по формуле

$$r = \frac{U}{I}. \quad (77)$$

Внутреннее сопротивление батареи определяется по формуле

$$r_{в.б} = \frac{E_6 - rI}{I} = \frac{E_6 - U}{I}. \quad (78)$$

Внутреннее сопротивление одного аккумулятора (или гальванического элемента) в зависимости от того, по какой схеме производили опыт, определяется по формулам (69), (72) и (75).

Мощность, отдаваемая батареей, определяется по формуле

$$P = UI. \quad (79)$$

Мощность, развиваемая батареей,

$$P_p = E_0 I. \quad (80)$$

Коэффициент полезного действия батареи

$$\eta = \frac{P}{P_p}. \quad (81)$$

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 23, а, и произвести измерения при разомкнутом и замкнутом рубильнике  $P$ .
3. Собрать схему, изображенную на рис. 23, б, и произвести измерения при разомкнутом и замкнутом рубильнике  $P$ .
4. Собрать схему, изображенную на рис. 23, в, и произвести измерения при разомкнутом и замкнутом рубильнике  $P$ .
5. Собрать схему, изображенную на рис. 23, г, и произвести измерения при разомкнутом и замкнутом рубильнике  $P$ .
6. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 7) для каждой схемы определить: сопротивление нагрузки  $r$ ; внутреннее сопротивление батареи  $r_{в.б}$ ; среднее значение внутреннего сопротивления одного аккумулятора (или гальванического элемента)  $r_в$ ; мощность  $P$ , отдаваемую батареей во внешнюю цепь; мощность  $P_p$ , развиваемую батареей; к. п. д.  $\eta$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется последовательным соединением аккумуляторов или гальванических элементов и когда оно применяется?
  2. Что называется параллельным соединением аккумуляторов или гальванических элементов и когда оно применяется?
  3. Что называется смешанным соединением аккумуляторов или гальванических элементов и когда оно применяется?
  4. Чему равна э. д. с. батареи при последовательном и параллельном соединении аккумуляторов или гальванических элементов?
  5. Написать формулу закона Ома для цепи, состоящей из трех последовательно соединенных элементов и приемника энергии.
  6. Написать формулу закона Ома для цепи, состоящей из трех параллельно соединенных элементов и приемника энергии.
  7. При каком соединении аккумуляторов или гальванических элементов получается наименьшее внутреннее сопротивление батареи?
-

## Глава II

# ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ

### РАБОТА № 8

#### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

#### Цель работы

Целью работы является определение емкости одного конденсатора, а также двух последовательно и двух параллельно соединенных конденсаторов.

#### Общие сведения

Два проводника (обкладки), разделенные диэлектриком, представляют собой электрический конденсатор или просто конденсатор. В простейшем конденсаторе обкладки имеют форму параллельных пластин, это так называемый *плоский конденсатор*. Если конденсатор присоединить к сети постоянного тока, то на его обкладках появятся электрические заряды, равные по величине, но противоположные по знаку. Величина электрического заряда  $q$  на одной из обкладок конденсатора пропорциональна напряжению  $U$ , приложенному к обкладкам конденсатора:

$$q = CU. \quad (1)$$

Отношение электрического заряда  $q$  к напряжению  $U$  на обкладках конденсатора называется *электрической емкостью* или просто емкостью конденсатора и обозначается буквой  $C$ , т. е.

$$C = \frac{q}{U}. \quad (2)$$

Емкость измеряется в фарадах ( $\phi$ ), а также в более мелких единицах — микрофарадах ( $1 \text{ мк}\phi = 10^{-6} \phi$ ) и пикофарадах ( $1 \text{ п}\phi = 10^{-12} \phi$ ).

**Последовательное соединение конденсаторов.** При последовательном соединении конденсаторов (рис. 24) напряжение, приложенное к батарее конденсаторов, равняется сумме напряжений отдельных конденсаторов:

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (3)$$

Так как при последовательном соединении конденсаторов заряды на всех его обкладках одинаковы, то напряжения отдельных конденсаторов будут равны:

$$U_1 = \frac{q}{C_1}; \quad U_2 = \frac{q}{C_2}; \quad U_3 = \frac{q}{C_3}. \quad (4)$$

Подставляя эти соотношения в формулу (3), получим:

$$U = q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right).$$

Разделив обе части уравнения на  $q$ , получим

$$\frac{U}{q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{C},$$

если положить

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}, \quad (5)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  — емкости отдельных конденсаторов;

$C$  — эквивалентная (общая) емкость батареи.

Если соединены последовательно два конденсатора, то общая их емкость будет равна:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (6)$$

Если последовательно соединены  $n$  одинаковых конденсаторов ( $C_1 = C_2 = C_3 = \dots$ ), то общая емкость всей батареи конденсаторов будет равна:

$$C = \frac{C_1}{n}, \quad (7)$$

где  $C_1$  — емкость одного конденсатора.

Следовательно, общая емкость последовательно соединенных конденсаторов одинаковой емкости меньше емкости одного конденсатора в  $n$  раз.

Так как при последовательном соединении конденсаторов

$$q = C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_3 U_3,$$

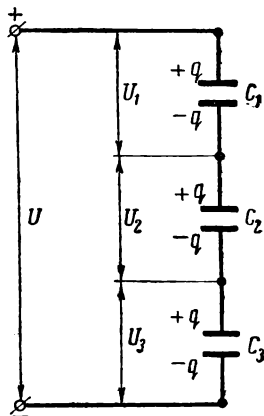


Рис. 24. Последовательное соединение конденсаторов

то напряжения между конденсаторами распределяются обратно пропорционально емкостям:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}; \quad \frac{U_2}{U_3} = \frac{C_3}{C_2}; \quad \frac{U_3}{U_1} = \frac{C_1}{C_3}. \quad (8)$$

**Параллельное соединение конденсаторов.** При параллельном соединении конденсаторов (рис. 25) напряжение у всех конденсаторов будет одинаково и равно  $U$ , а электрические заряды на их обкладках пропорциональны емкостям:

$$q_1 = C_1 U; \quad q_2 = C_2 U; \quad q_3 = C_3 U. \quad (9)$$

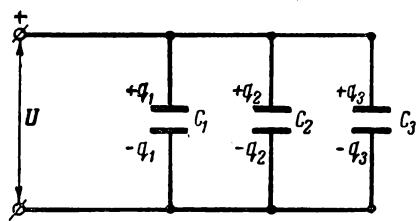


Рис. 25. Параллельное соединение конденсаторов

Заряд всей батареи параллельно соединенных конденсаторов равен сумме зарядов отдельных конденсаторов:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 \quad (10)$$

или

$$q = U (C_1 + C_2 + C_3).$$

Разделив обе части уравнения на напряжение  $U$ , получим:

$$\frac{q}{U} = C_1 + C_2 + C_3 = C,$$

если положить

$$C = C_1 + C_2 + C_3, \quad (11)$$

т. е. эквивалентная (общая) емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов равняется сумме емкостей отдельных конденсаторов. Если параллельно соединены  $n$  одинаковых конденсаторов ( $C_1 = C_2 = C_3 = \dots = C_n$ ), то общая емкость всей батареи конденсаторов будет равна:

$$C = n C_1, \quad (12)$$

где  $C_1$  — емкость одного конденсатора.

Следовательно, общая емкость параллельно соединенных конденсаторов одинаковой емкости больше емкости одного конденсатора в  $n$  раз.

## Определение емкости конденсатора баллистическим гальванометром

На рис. 26, *а* показана схема для определения емкости конденсатора баллистическим гальванометром. В этой схеме  $\Pi$  — однопольный переключатель,  $E_0$  — нормальный элемент,  $БГ$  — баллистический гальванометр,  $C_0$  — образцовый конденсатор (конденсатор-эталон) с известной емкостью. Опыт производится следующим образом. Переключатель  $\Pi$  ставим в положение

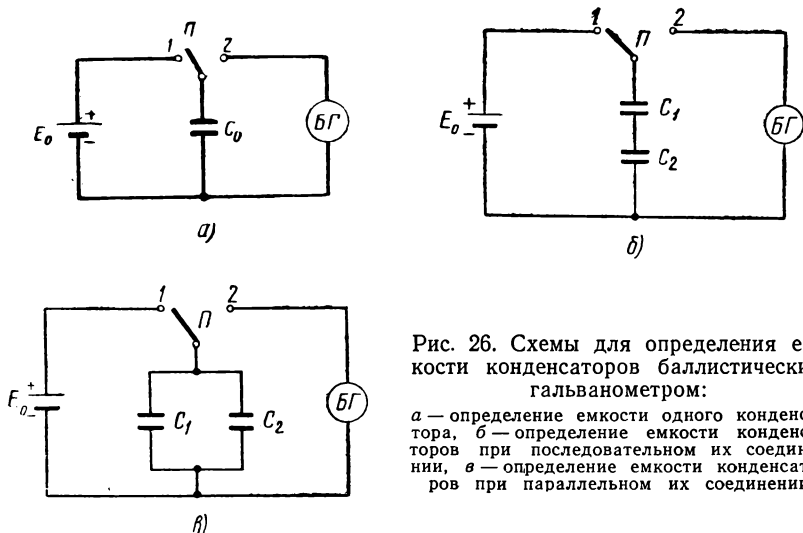


Рис. 26. Схемы для определения емкости конденсаторов баллистическим гальванометром:

*а* — определение емкости одного конденсатора, *б* — определение емкости конденсаторов при последовательном их соединении, *в* — определение емкости конденсаторов при параллельном их соединении

ние 1 и заряжаем образцовый конденсатор до напряжения  $U$ . Затем переключатель  $\Pi$  ставим в положение 2 и разряжаем конденсатор через гальванометр, при этом отсчитываем число делений шкалы  $n_0$  при первом максимальном отбросе. После этого вместо образцового конденсатора  $C_0$  включаем исследуемый конденсатор  $C_1$  и повторяем опыт так же, как и с образцовым конденсатором, т. е. сначала переключатель  $\Pi$  ставим в положение 1 и заряжаем исследуемый конденсатор до напряжения  $U$ , а затем переключатель  $\Pi$  ставим в положение 2 и разряжаем исследуемый конденсатор через гальванометр, при этом отсчитываем число делений шкалы  $n_1$  при первом максимальном отбросе.

Количество электричества, прошедшее через гальванометр в первом и во втором случае, соответственно равно:

$$q_0 = C_0 U = C_0 n_0 \text{ и } q = C_1 U = C_1 n_1,$$

где  $C_0$  — баллистическая постоянная гальванометра.



Разделив одно уравнение на другое, получим:

$$\frac{C_0}{C_1} = \frac{n_0}{n_1},$$

откуда

$$C_1 = C_0 \frac{n_1}{n_0}. \quad (13)$$

Зная  $n_0$ ,  $n_1$  и  $C_0$ , можно определить емкость  $C_1$  исследуемого конденсатора. Следует отметить, что опыт повторяется не менее трех раз и в формулу (13) подставляется среднее арифметическое значение из найденных значений для отбросов. Таким же образом определяется емкость второго исследуемого конденсатора. Затем соединяем последовательно исследуемые конденсаторы (рис. 26, б) и определяем их эквивалентную (общую) емкость  $C_{\text{пос}}$ , как было сказано выше. После этого соединяем параллельно исследуемые конденсаторы (рис. 26, в) и определяем их общую емкость  $C_{\text{пар}}$ . Следует сравнить результаты непосредственного определения емкостей  $C_{\text{пос}}$  и  $C_{\text{пар}}$  с результатами вычисления их по формулам (6) и (11). Результаты наблюдений и вычислений записываем в табл. 8.

Таблица 8

№ п/п	Исследуемые конденсаторы и характер их соединения	Измерено	Вычислено			Примечание
		отклонение гальвано- метра	вычислен- ная емкость	$\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$	$C_1 + C_2$	
		делений		$\phi$	$\phi$	
1 2 3	Первый конденса- тор					
4 5 6	Второй конденса- тор					
7	Последовательное соединение конденса- торов					
8	Параллельное сое- динение конденса- торов					

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с конденсаторами, нормальным элементом и баллистическим гальванометром и записать их технические данные.

2. Собрать схему, изображенную на рис. 26, а.
3. Зарядить образцовый конденсатор  $C_0$  и разрядить его на гальванометр.
4. Вместо образцового конденсатора  $C_0$  включить исследуемый конденсатор  $C_1$ , зарядить его, а затем разрядить через гальванометр.
5. Определить емкость  $C_1$  первого конденсатора.
6. Таким же способом определить емкость  $C_2$  второго конденсатора.
7. Соединить последовательно исследуемые конденсаторы (рис. 26, б), зарядить их и затем разрядить через гальванометр.
8. Определить емкость  $C_{\text{пос}}$  двух последовательно соединенных конденсаторов.
9. Соединить параллельно исследуемые конденсаторы (рис. 26, в), зарядить их и затем разрядить через гальванометр.
10. Определить емкость  $C_{\text{пар}}$  двух параллельно соединенных конденсаторов.
11. Сравнить результаты непосредственного определения емкостей  $C_{\text{пос}}$  и  $C_{\text{пар}}$  с результатами вычисления их по формулам (6) и (11).

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется конденсатором?
  2. Что называется емкостью и в каких единицах она измеряется?
  3. Напишите формулу эквивалентной емкости батареи при последовательном соединении конденсаторов.
  4. Чему равна эквивалентная емкость батареи при параллельном соединении конденсаторов?
  5. Два параллельно соединенных конденсатора емкостью  $C_1$  каждый соединяются затем последовательно. Как изменится при этом эквивалентная емкость?
  6. Напишите формулу энергии электрического поля конденсатора и в каких единицах она измеряется?
-

### Глава III

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

### РАБОТА № 9

#### ПРОВЕРКА ЗАКОНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ, ЯВЛЕНИЯ САМОИНДУКЦИИ И ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИИ

#### Цель работы

Целью работы является получение э. д. с. индукции, самоиндукции и взаимной индукции и выяснение факторов, от которых зависит величина и направление индуцированной э. д. с.

#### Общие сведения

**Электродвижущая сила индукции.** Закон электромагнитной индукции был открыт Фарадеем в 1831 г. Явление электромаг-

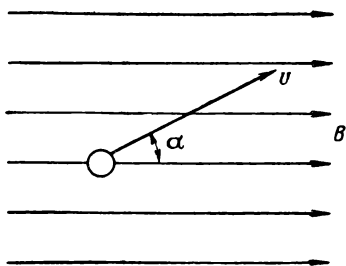


Рис. 27. Движение проводника в однородном (равномерном) магнитном поле

нитной индукции заключается в том, что при движении прямолинейного проводника в магнитном поле (рис. 27) и пересечении им линий магнитной индукции в проводнике возникает (индуцируется) э. д. с. Эта э. д. с. носит название *э. д. с. индукции*. Такое же явление мы имеем, если проводник неподвижен, а магнитное поле перемещается, т. е. линии магнитной индукции пересекают проводник. Величина индуцированной э. д. с. в прямолинейном проводнике прямо пропорциональна магнитной индукции  $B$ , скорости

движения  $v$  проводника в магнитном поле, активной длине  $l$  проводника\* и синусу угла  $\alpha$  между направлением движения

\* Под активной длиной проводника надо понимать ту длину проводника, которая пересекает линии магнитной индукции.

проводника и направлением вектора магнитной индукции (магнитного поля)

$$e = Blv \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $e$  — э. д. с. индукции,  $v$ ;

$B$  — магнитная индукция,  $\frac{вб}{м^2}$ ;

$l$  — активная длина проводника,  $м$ ;

$v$  — скорость движения проводника в магнитном поле,  $м/сек.$

Если прямолинейный проводник движется перпендикулярно направлению магнитного поля (вектору магнитной индукции), то в проводнике индуцируется наибольшая э. д. с. индукции:

$$e = Blv. \quad (2)$$

Если проводник движется в магнитном поле и не пересекает линии магнитной индукции, то в проводнике не индуцируется э. д. с. индукции. Направление индуцированной э. д. с. определяется по правилу правой руки.

Если правую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а отогнутый под прямым углом большой палец указывал направление движения проводника, то четыре вытянутых пальца покажут направление индуцированной э. д. с. Если проводник неподвижен, а перемещается магнитное поле, то направление индуцированной э. д. с. индукции также можно определить по правилу правой руки; только в этом случае действительное движение поля заменяется обратным. Если концы проводника соединить проводом, находящимся вне магнитного поля, то в образовавшемся контуре под действием э. д. с. индукции появится электрический ток.

Рассмотрим индуцирование э. д. с. индукции в замкнутом контуре (рис. 28). Если прямолинейный проводник (остальная часть контура находится вне магнитного поля) за время  $\Delta t$  переместится перпендикулярно направлению магнитного поля на расстояние  $\Delta a$ , то скорость движения проводника будет равна:

$$v = \frac{\Delta a}{\Delta t}.$$

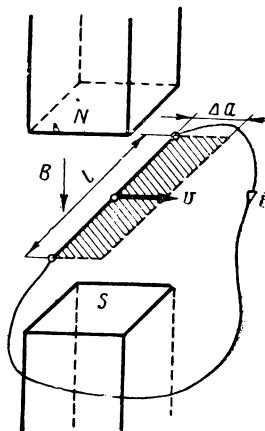


Рис. 28. Индуцирование э. д. с. в замкнутом контуре

Э. д. с., индуцируемая в проводнике, определяется по формуле

$$e = Blv = Bl \frac{\Delta a}{\Delta t}.$$

Так как произведение  $l\Delta a$  представляет собой площадь  $\Delta S$ , описанную проводником при его движении, а произведение площади  $\Delta S$  и магнитной индукции  $B$  равно магнитному потоку  $\Delta \Phi$ , пересеченному проводником (контуром) при движении, то э. д. с., индуцируемая в проводнике (контуре), будет определяться по формуле

$$e = B \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (3)$$

Так как изменение магнитного потока, сцепленного с контуром, может иметь разные знаки, то возникающая вследствие этого в контуре э. д. с. индукции может иметь разные направления в зависимости от того, увеличивается ли магнитный поток, сцепленный с контуром, или уменьшается. Поэтому, принимая во внимание правило Ленца, э. д. с. индукции пишут со знаком минус и тогда формула (3) примет вид:

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

или

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4)$$

Данная формулировка закона электромагнитной индукции была дана Максвеллом. Из этой формулы видно, что э. д. с., индуцируемая в замкнутом контуре, равна скорости изменения магнитного потока, сцепленного с контуром, взятой со знаком минус. Следовательно, при возрастании магнитного потока, сцепленного с контуром, когда  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} > 0$ , э. д. с. индукции будет отрицательна, а при уменьшении магнитного потока, когда  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} < 0$ , э. д. с. индукции будет положительна.

**Электродвижущая сила самоиндукции.** Электрический ток, проходя по контуру (цепи), создает магнитный поток, сцепленный с этим контуром. Если ток в контуре будет изменяться, то и магнитный поток, сцепленный с контуром также будет изменяться; вследствие этого в контуре будет индуцироваться э. д. с. Эта э. д. с. носит название *э. д. с. самоиндукции*, а само явление называется *самоиндукцией*. Если магнитное поле, создаваемое контуром, расположено в неферромагнитной среде, то магнитный поток, сцепленный с контуром, пропорционален току  $i$  в контуре:

$$\Phi = Li. \quad (5)$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  называется *индуктивностью контура (цепи)* и измеряется в *гн*. Если ток в контуре изменяется на величину  $\Delta i$ , то и магнитный поток, сцепленный с контуром, изменяется на величину  $\Delta \Phi = L \Delta i$ .

В контуре будет индуцироваться э. д. с. самоиндукции:

$$e_L = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

или

$$e_L = - L \frac{di}{dt} . \quad (6)$$

Из этой формулы видно, что э. д. с. самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения тока в контуре. Направление э. д. с. определяется по правилу Ленца. При возрастании тока, когда  $\frac{\Delta i}{\Delta t} > 0$ , э. д. с. самоиндукции направлена против тока в контуре, т. е. э. д. с. самоиндукции отрицательна. При уменьшении тока, когда  $\frac{\Delta i}{\Delta t} < 0$ , э. д. с. самоиндукции совпадает с направлением тока в контуре, т. е. э. д. с. самоиндукции положительна. Следует отметить, что э. д. с. самоиндукции возникает в цепи постоянного тока лишь в моменты включения, отключения или изменения режима цепи.

**Электродвижущая сила взаимной индукции.** Пусть мы имеем два контура (цепи), близко расположенные друг относительно друга. Если по одному из контуров, например первому, будет проходить ток, то часть магнитного потока, создаваемого этим контуром, будет сцеплена со вторым контуром. При изменении тока в первом контуре будет изменяться и магнитный поток, сцепленный со вторым контуром, и во втором контуре будет индуцироваться э. д. с. Эта э. д. с. носит название *э. д. с. взаимной индукции*, а само явление называется *взаимной индукцией (взаимоиндукцией)*. Величина индуцированной э. д. с. взаимной индукции во втором контуре определяется по формуле

$$e_{2M} = - M \frac{\Delta i_1}{\Delta t}$$

или

$$e_{2M} = - M \frac{di_1}{dt} , \quad (7)$$

где  $M$  — взаимная индуктивность двух контуров, *гн*.

Уравнение (7) показывает, что э. д. с. взаимной индукции, индуцируемая в одном из двух индуктивно связанных контуров, прямо пропорциональна изменению скорости тока в другом. Явление взаимной индукции широко используется в электротехнике, например в трансформаторах.

## Опытная проверка закона электромагнитной индукции, явления самоиндукции и взаимной индукции

**Электродвижущая сила индукции.** На рис. 29 показана катушка, к которой присоединен гальванометр с нулем в середине. Опыт производим следующим образом. Внутри катушки медленно вводим постоянный магнит северным полюсом, а затем медленно выводим его. В первом случае стрелка гальванометра отклонится (например, вправо). Это показывает, что в катушке

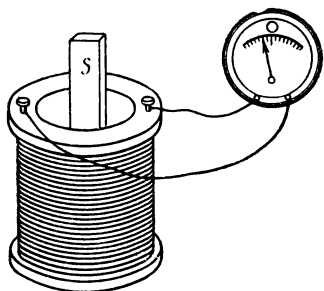


Рис. 29. Схема для проверки закона электромагнитной индукции

индуцируется э. д. с. индукции, а под действием э. д. с. в катушке возникает ток. Во втором случае стрелка гальванометра отклонится в обратную сторону (влево). Если мы прекратим движение постоянного магнита внутри катушки, то стрелка гальванометра установится на нуле. Таким образом, мы приходим к следующему выводу: чтобы индуцировалась э. д. с. в катушке, необходимо относительно нее перемещать постоянный магнит или же, наоборот, постоянный магнит должен быть неподвижен, а катушка должна пере-

мещаться. Направление индуцированной э. д. с. зависит от направления движения постоянного магнита (магнитного поля) относительно катушки или наоборот. Затем внутри катушки медленно вводим постоянный магнит южным полюсом, а потом медленно выводим его. В этом опыте стрелка гальванометра будет отклоняться в противоположные стороны по сравнению с первым опытом. Повторяем опыты, для чего быстро вводим постоянный магнит внутрь катушки, а затем быстро выводим его. Берем катушку с большим числом витков и все опыты повторяем.

**Электродвижущая сила самоиндукции.** Явление самоиндукции хорошо наблюдать при выключении цепи постоянного тока: в этом случае ток  $i$  изменяется от первоначального значения  $I$  до нуля. В данном случае э. д. с. самоиндукции будет совпадать с направлением выключаемого тока.

Величину э. д. с. самоиндукции можно приближенно измерить вольтметром с двухсторонней шкалой (нуль в середине шкалы) специального устройства. На рис. 30 показано направление тока в катушке и вольтметре при включенном рубильнике  $P$ , а на рис. 31 — направление тока и э. д. с. самоиндукции после выключения рубильника. Из рис. 30 и 31 видно, что направление тока в вольтметре после выключения рубильника  $P$  противоположно первоначальному. Таким образом, при размыкании цепи стрелка вольтметра, возвращаясь на нуль, откло-

няется в обратную сторону. Величина отклонения стрелки зависит от величины индуцируемой в катушке э. д. с. самоиндукции и инерции вращающейся части вольтметра. Чтобы устранить последнюю причину, вольтметр снабжен специальным приспособлением, которое удерживает стрелку вольтметра на нуле

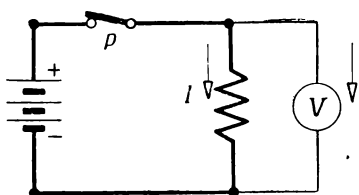


Рис. 30. Направление тока в вольтметре при включенном рубильнике

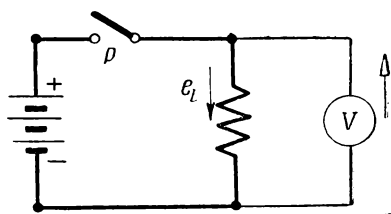


Рис. 31. Направление тока в вольтметре после выключения рубильника

при включенном рубильнике, но стрелка может отклоняться в обратную сторону. Вследствие этого отклонение стрелки вольтметра приблизительно будет пропорционально индуцируемой э. д. с. самоиндукции.

Опыт производится по схеме, изображенной на рис. 32. В этой схеме  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $K$  — катушка, которая должна иметь несколько выводов;  $r_p$  —

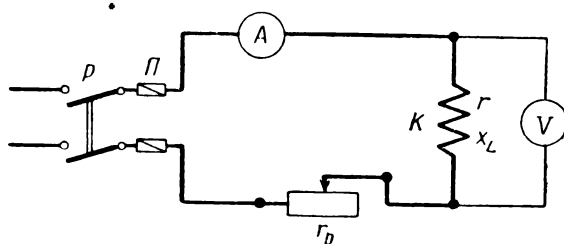


Рис. 32. Схема для проверки явления самоиндукции

регулировочный реостат, при помощи которого можно изменять ток в катушке;  $A$  — амперметр, измеряющий ток в катушке\*;  $V$  — вольтметр, приблизительно измеряющий э. д. с. самоиндукции.

Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , реостатом  $r_p$  устанавливаем заданный ток в катушке.

\* Током в вольтметре пренебрегаем.



Затем размыкаем рубильник и производим отсчет по вольтметру. Показание вольтметра записываем в табл. 9. Измеряем э. д. с. самоиндукции при различных числах витков катушки без стального сердечника в катушке. После этого вставляем стальной сердечник в катушку и снова производим измерения. В заключение следует измерить э. д. с. самоиндукции при трех различных значениях тока в катушке и при постоянном числе витков катушки.

Таблица 9

№ п/п	Измерено			Примечание
	$e$	$e_L$	$e_{2M}$	
	$v$	$v$	$v$	

**Э. д. с. взаимной индукции.** Опыт производится по схеме, изображенной на рис. 33. В этой схеме применяются две катушки, из которых одна имеет большое число витков, источник питания (аккумулятор или гальванические элементы) и вольтметр с нулем в середине. Опыт производится следующим образом.

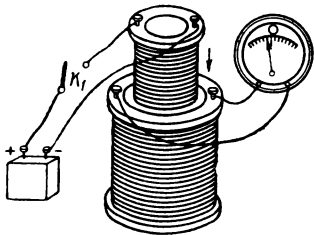


Рис. 33. Схема для проверки явления взаимной индукции

Соединяем источник питания с катушкой, имеющей малое число витков, вследствие чего вокруг нее возникает постоянное магнитное поле. Эту катушку сначала без стального сердечника, а затем со стальным сердечником вставляем внутрь катушки с большим числом витков, а потом вынимаем из нее и производим наблюдение. После этого, поместив меньшую катушку внутри большей, с помощью ключа  $K_1$  включаем и выключаем ток при неподвижных обеих катушках и производим наблюдения.

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 29.

3. Внутрь катушки медленно вводить и выводить постоянный магнит сначала северным, а затем южным полюсом.

4. Внутрь катушки быстро вводить, а затем выводить сначала северный, а затем южный полюс постоянного магнита.

5. Собрать схему, изображенную на рис. 32.

6. Измерить э. д. с. самоиндукции при различных числах витков катушки без стального сердечника.

7. Измерить э. д. с. самоиндукции при различных числах витков со стальным сердечником.

8. Измерить э. д. с. самоиндукции при трех различных значениях тока и при постоянном числе витков катушки.

9. Собрать схему, изображенную на рис. 33.

10. Катушку с током вводить внутрь катушки, соединенной с гальванометром, и выводить из нее.

11. Поместить катушку с током внутри неподвижной катушки и с помощью ключа  $K_1$  включить и выключить ток при неподвижных обеих катушках.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое явление электромагнитной индукции?

2. Что характеризует магнитная индукция и в каких единицах она измеряется?

3. Напишите формулу э. д. с., индуктируемой в прямолинейном проводнике, при перемещении его во внешнем магнитном поле.

4. Сформулируйте правило правой руки.

5. По какой формуле определяется э. д. с., индуктируемая в замкнутом контуре?

6. В чем заключается явление самоиндукции и взаимной индукции?

7. Напишите формулы э. д. с. самоиндукции и взаимной индукции.

---

## Глава IV

### ОДНОФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

#### РАБОТА № 10

#### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ АКТИВНОГО И ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ

##### Цель работы

Целью работы является опытная проверка основных соотношений для последовательной цепи переменного тока, обладающей активным и индуктивным сопротивлениями.

##### Общие сведения

Пусть в цепь переменного тока включена катушка с активным сопротивлением  $r$  и индуктивностью  $L$  (рис. 34). Эту цепь

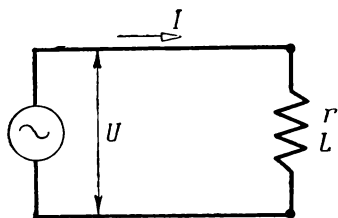


Рис. 34. Цепь, содержащая активное сопротивление  $r$  и индуктивность  $L$  (катушка)

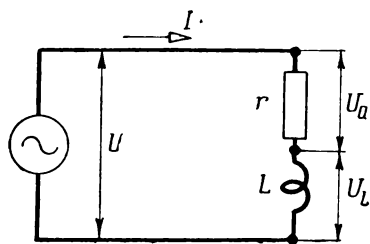


Рис. 35. Последовательное соединение активного сопротивления  $r$  и индуктивности  $L$

можно рассматривать как последовательное соединение активного сопротивления  $r$  и индуктивности  $L$  (рис. 35). При прохождении переменного синусоидального тока

$$i = I_m \sin \omega t \quad (1)$$

по катушке в ней создается переменный синусоидальный магнитный поток, который индуцирует в катушке э. д. с. самоин-

дукции  $e_L$ . Электродвижущая сила самоиндукции имеет такое направление, что она препятствует изменению тока, т. е. при увеличении тока э. д. с. самоиндукции направлена противоположно ему, а при уменьшении тока имеет одинаковое направление с ним. Применяя второй закон Кирхгофа для мгновенных значений электрических величин, получим:

$$u + e_L = ri,$$

откуда напряжение на зажимах цепи

$$u = ri - e_L = u_a + u_L. \quad (2)$$

Падение напряжения в активном сопротивлении  $u_a = ri$  носит название *активной составляющей напряжения* или просто *активного напряжения*\*,  $u_L = -e_L$  — *индуктивной* или *реактивной составляющей напряжения* или просто *индуктивного* или *реактивного напряжения*. Если ток изменяется по закону синуса [формула (1)], то напряжение на зажимах цепи можно представить в следующем виде:

$$u = rI_m \sin \omega t + \omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_{am} \sin \omega t + U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ).$$

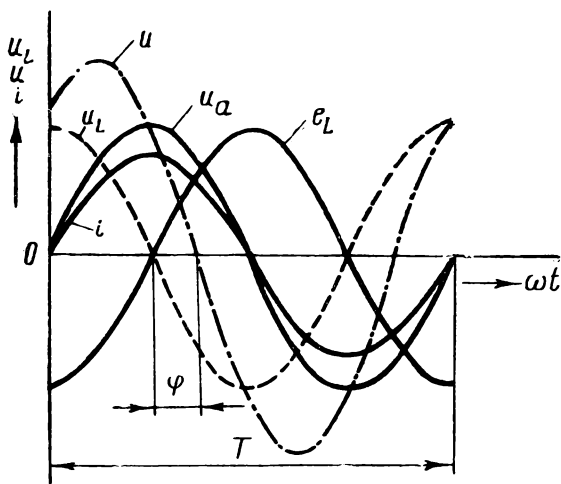


Рис. 36. Кривые мгновенных значений напряжений и тока при последовательном соединении  $r$  и  $L$

Из этой формулы видно, что активная составляющая напряжения совпадает по фазе с током (рис. 36), а индуктивная со-

\* Мгновенное значение напряжения на активном сопротивлении иногда обозначают  $u_r$ , а действующее значение напряжения —  $U_r$ .

ставляющая напряжения опережает ток на  $90^\circ$  (четверть периода). Действующие значения активной и индуктивной составляющих напряжения найдем, если разделим на  $\sqrt{2}$  их амплитуды, т. е.

$$U_a = U_r = \frac{U_{am}}{\sqrt{2}} = r \frac{I_m}{\sqrt{2}} = rI, \quad (3)$$

$$U_L = \frac{U_{Lm}}{\sqrt{2}} = \omega L \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \omega LI. \quad (4)$$

Определим напряжение на зажимах цепи при помощи векторной диаграммы. Вектор тока  $\vec{I}$  откладываем в произвольном направлении, например горизонтально (рис. 37), так как он является постоянной величиной для всех последовательно соединенных приемников. По направлению вектора тока  $\vec{I}$  откладываем вектор активной составляющей напряжения (активного напряжения)  $\vec{U}_a$ , а под углом  $90^\circ$  в сторону опережения вектора тока  $\vec{I}$  откладываем вектор индуктивной составляющей напряжения (индуктивного напряжения)  $\vec{U}_L$ . Складывая геометрически векторы  $\vec{U}_a$  и  $\vec{U}_L$ , мы получим вектор напряжения  $\vec{U}$  на зажимах цепи, т. е.

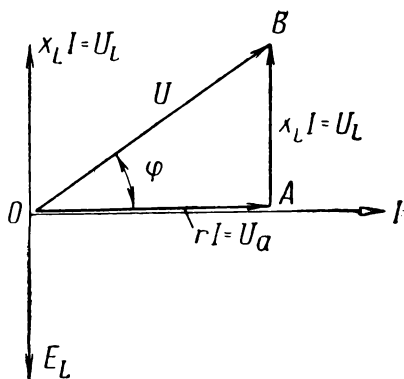


Рис. 37. Векторная диаграмма при последовательном соединении  $r$  и  $L$

Величина  $x_L = \omega L = 2\pi fL$  называется *индуктивным сопротивлением* и измеряется в омах. Индуктивное сопротивление зависит от частоты приложенного напряжения, т. е. чем больше будет частота  $f$ , тем больше будет индуктивное сопротивление.

Прямоугольный треугольник  $OAB$  называется *треугольником напряжений*. Из треугольника  $OAB$  имеем:

$$\vec{U} = \vec{U}_a + \vec{U}_L = r\vec{I} + x_L\vec{I}. \quad (5)$$

Величина  $x_L = \omega L = 2\pi fL$  называется *индуктивным сопротивлением* и измеряется в омах. Индуктивное сопротивление зависит от частоты приложенного напряжения, т. е. чем больше будет частота  $f$ , тем больше будет индуктивное сопротивление.

Прямоугольный треугольник  $OAB$  называется *треугольником напряжений*. Из треугольника  $OAB$  имеем:

$$U^2 = U_a^2 + U_L^2$$

или

$$U^2 = (rI)^2 + (x_L I)^2 = (r^2 + x_L^2) I^2.$$

Извлекая из обеих частей уравнения квадратный корень, получим:

$$U = I\sqrt{r^2 + x_L^2},$$

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}}. \quad (6)$$

Эта формула представляет собой закон Ома для цепи переменного тока с активным и индуктивным сопротивлениями, соединенными последовательно.

Величина  $\sqrt{r^2 + x_L^2}$ , имеющая размерность сопротивления, называется *полным сопротивлением* цепи и обозначается буквой  $z$ . Следовательно,

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} \quad (7)$$

и закон Ома для цепи переменного тока примет вид:

$$I = \frac{U}{z} \quad (8)$$

или

$$U = zI. \quad (9)$$

Следует отметить, что в действительности цепь обладает только активным сопротивлением  $r$ , а кажущееся увеличение сопротивления цепи до значения  $z$  объясняется наличием электродвижущей силы самоиндукции вследствие индуктивности цепи.

Из векторной диаграммы видно, что вектор напряжения  $\bar{U}$  опережает вектор тока  $\bar{I}$  на угол  $\varphi$  или вектор тока отстает от вектора напряжения на угол  $\varphi$ . Угол  $\varphi$  считается положительным, если вектор напряжения опережает вектор тока, и — отрицательным, если вектор напряжения отстает от вектора тока.

Угол  $\varphi$  сдвига фаз между напряжением на зажимах всей цепи и током в цепи можно определить из треугольника напряжений (рис. 37):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L}{U_a} = \frac{x_L I}{r I} = \frac{x_L}{r}. \quad (10)$$

Если все стороны треугольника напряжений разделим на величину тока  $I$ , то получим *треугольник сопротивлений* (рис. 38). Треугольник сопротивлений подобен треугольнику напряжений. Из треугольника сопротивлений имеем:

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}; \quad \sin \varphi = \frac{x_L}{z}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_L}{r}; \quad (11)$$

$$r = z \cos \varphi; \quad x_L = z \sin \varphi; \quad z = \sqrt{r^2 + x_L^2}. \quad (12)$$

Треугольник сопротивлений дает возможность найти полное сопротивление  $z$  цепи, угол  $\varphi$  сдвига фаз между напряжением на зажимах цепи и током в цепи. Кроме того, по треугольнику со-

противлений и заданному напряжению можно графически определить активную  $U_a$  и индуктивную  $U_L$  составляющие напряжения. Если все стороны треугольника напряжений \* умножим на  $I$ , то получим *треугольник мощностей* (рис. 39), подобный треугольнику напряжений.

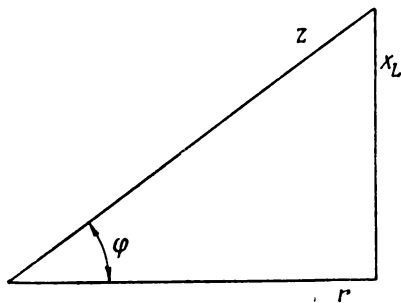


Рис. 38. Треугольник сопротивлений цепи с  $r$  и  $L$

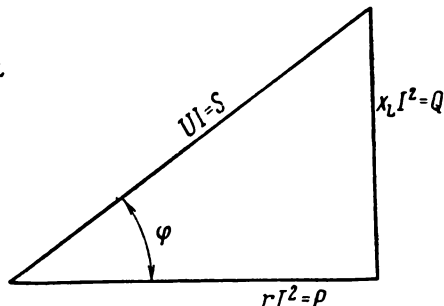


Рис. 39. Треугольник мощностей

Из треугольника мощностей имеем: активная мощность

$$P = rI^2 = UI \cos \varphi. \quad (13)$$

Активная мощность измеряется в ваттах (*вт*), киловаттах (*квт*) или мегаваттах (*Мвт*);

реактивная мощность

$$Q = x_L I^2 = UI \sin \varphi. \quad (14)$$

Реактивная мощность измеряется в вольтамперах реактивных (*вар*) или киловольтамперах реактивных (*квар*);

полная мощность

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (15)$$

Полная мощность измеряется в вольтамперах (*ва*) или киловольтамперах (*ква*).

Отношение активной мощности к полной мощности называется *коэффициентом мощности*:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}. \quad (16)$$

Зная показания ваттметра, вольтметра и амперметра, можно определить коэффициент мощности. Коэффициент мощности можно определить при помощи одного прибора, называемого

---

\* Треугольник мощностей можно получить из треугольника сопротивлений, если все его стороны умножим на  $I^2$ .

фазометром. Из формулы (13) видно, что с увеличением  $\cos \varphi$  активная мощность также увеличивается. При  $\cos \varphi = 1$  активная мощность будет равна полной мощности.

### Испытание катушки

Испытание катушки производится по одной из схем, изображенных на рис. 40. В этих схемах:  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $r_p$  — регулировочный реостат, который

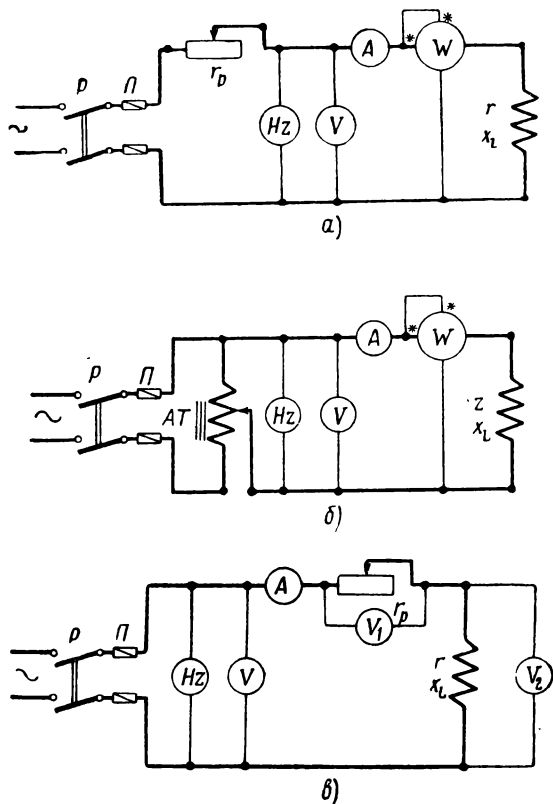


Рис. 40. Схемы для испытания катушки:  
а — при помощи регулировочного реостата, б — при помощи автотрансформатора, в — по методу трех вольтметров

служит для регулирования напряжения на зажимах катушки;  $AT$  — автотрансформатор для регулирования напряжения на зажимах катушки;  $V$  — вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах катушки (если испытание катушки производится по схеме



Таблица 10

№ п/п	Исследуемый объект	Измерено					Вычислено					Примечание		
		$U$		$I$		$P$		$f$	$z$	$r$	$x_L$		$L$	$\cos \varphi$
		$C_V =$		$C_A =$		$C_W =$		$гц$	$ом$	$ом$	$ом$		$гн$	—
		дел.	$v$	дел.	$a$	дел.	$вт$							
1 2 3 4 5 6 7	Катушка без стального сердечника при $f = \text{const}$													
1 2 3 4 5 6 7	Катушка без стального сердечника при $U = \text{const}$													
1 2 3 4 5 6 7	Катушка со стальным сердечником при $f = \text{const}$													
1 2 3 4 5 6 7	Катушка со стальным сердечником при $U = \text{const}$													

ме рис. 40, в, то вместо трех можно применить один вольтметр, которым поочередно можно измерять напряжение на зажимах всей цепи, напряжение на зажимах реостата и напряжение на зажимах катушки);  $A$  — амперметр, измеряющий ток в катушке;  $W$  — ваттметр, измеряющий мощность, потребляемую катуш-

кой;  $H_z$  — частотомер\*, измеряющий частоту приложенного напряжения к катушке.

**Испытание катушки без стального сердечника при переменном напряжении на зажимах катушки и при постоянной частоте.** Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , регулировочным реостатом  $r_p$  (или автотрансформатором  $AT$ ) устанавливаем различные напряжения на зажимах катушки. Первый отсчет по приборам производится при полностью включенном реостате  $r_p$  (или автотрансформатором подводим к катушке неполное напряжение сети), а затем постепенно уменьшаем его сопротивление (или автотрансформатором увеличиваем напряжение на зажимах катушки). Напряжение на зажимах катушки рекомендуется изменять через 10 в. Во время опыта частота должна поддерживаться постоянной. При каждом изменении напряжения показания приборов записываем в табл. 10.

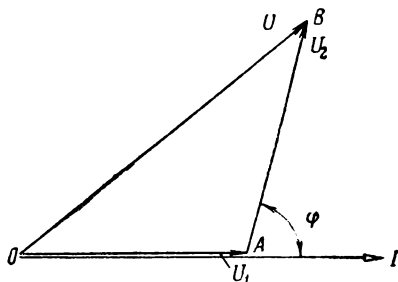


Рис. 41. Векторная диаграмма для схемы рис. 40, в

**Примечание.** Если испытание катушки производится по схеме рис. 40, в, то в табл. 10 следует добавить еще две графы для напряжений  $U_1$  и  $U_2$ . В этом случае активную мощность, потребляемую катушкой, можно определить по показаниям четырех электроизмерительных приборов\*\*. Из тупоугольного треугольника  $OAB$  (рис. 41) имеем:

$$U^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \varphi,$$

откуда

$$U_2 \cos \varphi = \frac{U^2 - U_1^2 - U_2^2}{2U_1},$$

где  $U$  — напряжение на зажимах всей цепи;

$U_1$  — напряжение на зажимах реостата  $r_p$ ;

$U_2$  — напряжение на зажимах катушки;

$\cos \varphi$  — коэффициент мощности катушки.

\* Если испытание катушки будут производить только при постоянной частоте, то частотомер можно не включать в схему; частоту при вычислениях можно принимать равной 50 гц.

\*\* Если сопротивление  $r_p$  известно, то активная мощность определяется по показаниям трех вольтметров.

Умножив обе части этого уравнения на  $I$ , получим активную мощность катушки:

$$P = U_2 I \cos \varphi = \frac{U^2 - U_1^2 - U_2^2}{2U_1} I = \frac{U^2 - U_1^2 - U_2^2}{2r_p},$$

где  $r_p = \frac{U_1}{I}$ .

Полное сопротивление катушки \*

$$z = \frac{U}{I}. \quad (17)$$

Активное сопротивление катушки

$$r = \frac{P}{I^2}. \quad (18)$$

Индуктивное сопротивление катушки

$$x_L = \sqrt{z^2 - r^2}. \quad (19)$$

Индуктивность катушки

$$L = \frac{x_L}{\omega} = \frac{x_L}{2\pi f}. \quad (20)$$

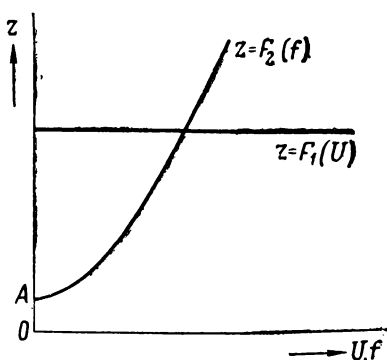


Рис. 42. Зависимость полного сопротивления  $z$  катушки от напряжения  $U$ , приложенного к катушке, г. е.  $z = F_1(U)$ , и зависимость полного сопротивления  $z$  катушки от частоты  $f$ , т. е.  $z = F_2(f)$

Коэффициент мощности катушки определяется по формуле (16)

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

Данный опыт имеет целью показать, что полное сопротивление  $z$  катушки без стального сердечника не зависит от величины приложенного к катушке напряжения при постоянной частоте, так как индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $r$  катушки остаются постоянными величинами. Поэтому зависимость полного сопротивления  $z$  от напряжения  $U$  [ $z = F_1(U)$ ] изобразится прямой, параллельной оси напряжений (рис. 42).

\* Если испытание катушки производится по схеме рис. 40, в, то полное сопротивление катушки определяется по формуле

$$z = \frac{U_3}{I} \quad (17')$$

**Испытание катушки без стального сердечника при переменной частоте и неизменном напряжении на зажимах катушки.** Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , регулировочным реостатом  $r_p$  (или автотрансформатором) устанавливаем заданное напряжение  $U$  на зажимах катушки, которое во время опыта поддерживается неизменным. Величину напряжения  $U$  выбираем, исходя из того, что ток в катушке будет иметь максимальное значение при наименьшей частоте. Первый отсчет по приборам производим при частоте 30 гц, а затем через каждые 5 гц повышаем частоту до 60 гц. Частота регулируется изменением скорости вращения генератора. При каждом изменении частоты показания приборов записываем в табл. 10. На основании полученных данных опыта определяем  $z$ ,  $r$ ,  $x_L$ ,  $L$  и  $\cos \varphi$  по вышеприведенным формулам и строим характеристику  $z = F_2(f)$ , как показано на рис. 42. Так как для катушки без стального сердечника можно считать  $r$  и  $L$  величинами постоянными, то из выражения  $z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$  имеем

$$\frac{z^2}{r^2} - \frac{\omega^2}{\frac{r^2}{L^2}} = 1.$$

Следовательно, характеристика  $z = F_2(f)$  представляет собой гиперболу. Как видно из кривой, отрезок  $OA$  дает сопротивление катушки при  $f = 0$ , т. е. сопротивление катушки  $r_0$  при постоянном токе.

**Испытание катушки со стальным сердечником при переменном напряжении на зажимах катушки и при постоянной частоте.** Снятие характеристик  $z$ ,  $r$ ,  $x_L = F_3(U)$  при  $f = \text{const}$  производится так же, как было сказано выше. Полное  $z$ , активное  $r$  и индуктивное  $x_L$  сопротивления катушки при наличии сердечника зависят от величины приложенного к зажимам катушки напряжения  $U$  (рис. 43). В данном случае, кроме потерь  $P_m$  в меди обмотки катушки, возникают потери  $P_{ст}$  в стали сердечника на гистерезис и на вихревые токи. Следовательно, активная мощность, потребляемая катушкой, будет равна:

$$P = P_m + P_{ст} = rI^2 = UI \cos \varphi, \quad (21)$$

откуда активное сопротивление катушки

$$r = \frac{P}{I^2} = \frac{P_m}{I^2} + \frac{P_{ст}}{I^2} = r_m + r_{ст}, \quad (22)$$

где  $r_m = \frac{P_m}{I^2}$  — активное сопротивление обмотки катушки;

$r_{ст} = \frac{P_{ст}}{I^2}$  — сопротивление, которое учитывает потери в стали сердечника катушки.

Таким образом, активное сопротивление катушки с сердечником больше активного сопротивления катушки без сердечника. Зная мощность, потребляемую катушкой, и потери в меди обмотки катушки, можно определить потери в стали сердечника:

$$P_{\text{ст}} = P - P_{\text{м}}. \quad (23)$$

**Испытание катушки со стальным сердечником при переменной частоте и при неизменном напряжении на зажимах катушки.** Снятие характеристик  $z$ ,  $r$ ,  $x_L = F_4(f)$  при  $U = \text{const}$  производится так же, как и при испытании катушки без сердечника при

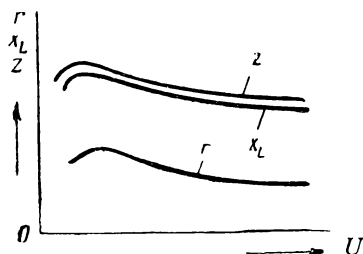


Рис. 43. Кривые зависимости полного  $z$ , активного  $r$  и индуктивного  $x_L$  сопротивлений от напряжения  $U$ , приложенного к катушке

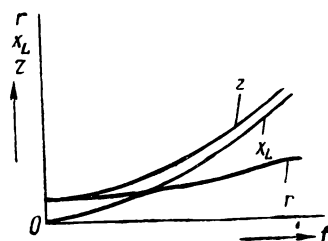


Рис. 44. Кривые зависимости полного  $z$ , активного  $r$  и индуктивного  $x_L$  сопротивлений от частоты  $f$

переменной частоте, но при неизменном напряжении. Активное сопротивление катушки с сердечником определяется по формуле (22). На рис. 44 показаны кривые изменения полного  $z$ , активного  $r$  и индуктивного  $x_L$  сопротивлений в зависимости от частоты  $f$ . Из этих кривых видно, что с увеличением частоты сопротивления  $z$ ,  $r$  и  $x_L$  будут увеличиваться.

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 40.
3. Произвести испытание катушки без стального сердечника при переменном напряжении на зажимах катушки и при постоянной частоте. Число измерений взять не менее шести.
4. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 10) определить полное  $z$ , активное  $r$ , индуктивное  $x_L$  сопротивления катушки, индуктивность  $L$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi$  катушки.
5. Построить векторную диаграмму для одного из опытов.
6. Построить характеристику  $z = F_1(U)$  при  $f = \text{const}$ .

7. Произвести испытание катушки без стального сердечника при переменной частоте и при неизменном напряжении на зажимах катушки. Число измерений взять не менее шести.

8. На основании полученных данных (согласно табл. 10) определить  $z$ ,  $r$ ,  $x_L$ ,  $L$  и  $\cos \varphi$  катушки.

9. Построить векторную диаграмму для одного из опытов.

10. Построить характеристику  $z = F_2(f)$  при  $U = \text{const}$ .

11. Произвести испытание катушки со стальным сердечником при переменном напряжении на зажимах катушки и при постоянной частоте. Число измерений взять не менее шести.

12. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 10) определить  $z$ ,  $r$ ,  $x_L$ ,  $L$  и  $\cos \varphi$  катушки.

13. Построить характеристики  $z$ ,  $r$ ,  $x_L = F_3(U)$  при  $f = \text{const}$ .

14. Произвести испытание катушки со стальным сердечником при переменной частоте и при неизменном напряжении на зажимах катушки. Число измерений взять не менее шести.

15. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 10) определить  $z$ ,  $r$ ,  $x_L$ ,  $L$  и  $\cos \varphi$ .

16. Построить характеристики  $z$ ,  $r$ ,  $x_L = F_4(f)$  при  $U = \text{const}$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется действующим значением синусоидального тока?

2. Какое соотношение между действующим и максимальным значениями синусоидального тока?

3. Какое значение (мгновенное, максимальное или действующее) показывают вольтметр и амперметр, включенные в цепь переменного тока?

4. Почему сопротивление катушки в цепи переменного тока больше ее сопротивления в цепи постоянного тока?

5. Почему полное сопротивление катушки со стальным сердечником больше полного сопротивления этой же катушки без сердечника?

6. Изменится ли полное сопротивление катушки без стального сердечника при постоянной частоте, если напряжение на зажимах катушки увеличится?

7. Напишите формулы активной, реактивной и полной мощностей. В каких единицах они измеряются?

## РАБОТА № 11

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КАТУШЕК

#### Цель работы

Целью работы является опытная проверка основных соотношений при последовательном соединении катушек, т. е. что напряжение, приложенное к цепи, не равно арифметической

сумме напряжений на зажимах отдельных катушек и полное сопротивление цепи не равно арифметической сумме полных сопротивлений отдельных катушек\*.

### Общие сведения

Рассмотрим цепь, состоящую из трех последовательно включенных катушек (рис. 45). Предположим, что заданными величинами являются: напряжение  $U$ , приложенное к цепи; активные сопротивления катушек  $r_1, r_2, r_3$ ; индуктивности катушек  $L_1, L_2$  и  $L_3$ , а требуется найти ток  $I$  в цепи и коэффициенты мощности каждой катушки и всей цепи. При последовательном соединении катушек напряжение, приложенное

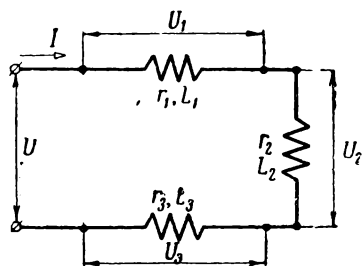


Рис. 45. Последовательное соединение катушек

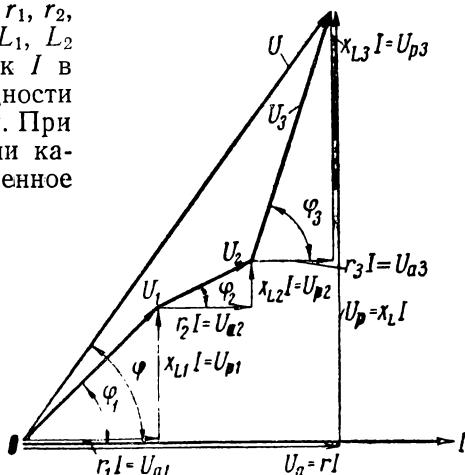


Рис. 46. Векторная диаграмма для цепи, изображенной на рис. 45

к цепи, равно геометрической сумме напряжений на зажимах отдельных катушек (рис. 46)

$$\bar{U} = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_3, \quad (24)$$

где  $U_1 = z_1 I$ ,  $U_2 = z_2 I$  и  $U_3 = z_3 I$  — напряжения на зажимах отдельных катушек;

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}, \quad z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_{L2}^2} \text{ и } z_3 = \sqrt{r_3^2 + x_{L3}^2}$$

— полные сопротивления отдельных катушек.

\* В частном случае, если катушки имеют одинаковые активные и индуктивные сопротивления или одинаковый сдвиг фаз между током и напряжением на зажимах каждой катушки, то напряжение, приложенное к цепи, будет равно арифметической сумме напряжений на зажимах отдельных катушек; полное сопротивление цепи в этом случае также равно арифметической сумме полных сопротивлений отдельных катушек.

Разложив векторы напряжений на активные и реактивные составляющие, получим:

$$\overline{U} = \overline{U}_{a1} + \overline{U}_{p1} + \overline{U}_{a2} + \overline{U}_{p2} + \overline{U}_{a3} + \overline{U}_{p3}. \quad (25)$$

Так как активные составляющие напряжений катушек совпадают по фазе с вектором тока  $I$ , то активная составляющая приложенного напряжения к цепи равна арифметической сумме активных составляющих напряжений отдельных катушек:

$$U_a = U_{a1} + U_{a2} + U_{a3} = r_1 I + r_2 I + r_3 I = (r_1 + r_2 + r_3) I = r I, \quad (26)$$

если положить

$$r = r_1 + r_2 + r_3, \quad (27)$$

т. е. эквивалентное активное сопротивление всей цепи равно арифметической сумме активных сопротивлений отдельных катушек. Реактивные составляющие напряжений катушек опережают вектор тока  $I$  на  $90^\circ$ , поэтому реактивная составляющая приложенного напряжения к цепи также равна арифметической сумме реактивных составляющих напряжений отдельных катушек.

$$U_p = U_{p1} + U_{p2} + U_{p3} = x_{L1} I + x_{L2} I + x_{L3} I = (x_{L1} + x_{L2} + x_{L3}) I = x_L I, \quad (28)$$

если положить

$$x_L = x_{L1} + x_{L2} + x_{L3}, \quad (29)$$

т. е. эквивалентное индуктивное сопротивление всей цепи равно арифметической сумме индуктивных сопротивлений отдельных катушек. Следовательно, уравнение (25) можно представить так:

$$\overline{U} = \overline{U}_a + \overline{U}_p = \overline{rI} + \overline{x_L I} \quad (30)$$

или

$$U = I \sqrt{r^2 + x_L^2} = z I, \quad (31)$$

где  $z = \sqrt{r^2 + x_L^2}$  — полное сопротивление всей цепи.

Следует обратить внимание, что полное сопротивление  $z$  цепи не равно арифметической сумме полных сопротивлений отдельных катушек.

Полное сопротивление всей цепи равно геометрической сумме полных сопротивлений отдельных катушек:

$$\overline{z} = \overline{z}_1 + \overline{z}_2 + \overline{z}_3. \quad (32)$$

Зная полное сопротивление всей цепи и напряжение на ее зажимах, можно определить ток в цепи:

$$I = \frac{U}{z}. \quad (33)$$



Коэффициенты мощности отдельных катушек и всей цепи

$$\begin{aligned}\cos \varphi_1 &= \frac{r_1}{z_1} = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}}; \quad \cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_{L2}^2}}; \\ \cos \varphi_3 &= \frac{r_3}{z_3} = \frac{r_3}{\sqrt{r_3^2 + x_{L3}^2}}; \quad \cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + x_L^2}}.\end{aligned}\quad (34)$$

Умножив обе части уравнений (27) и (29) на  $I^2$ , получим:

$$rI^2 = r_1I^2 + r_2I^2 + r_3I^2, \quad x_LI^2 = x_{L1}I^2 + x_{L2}I^2 + x_{L3}I^2$$

или

$$\left. \begin{aligned}P &= P_1 + P_2 + P_3, \\ Q &= Q_1 + Q_2 + Q_3.\end{aligned}\right\} \quad (35)$$

Следовательно, активная мощность  $P$  всей цепи равна арифметической сумме активных мощностей отдельных катушек и реактивная мощность  $Q$  всей цепи равна арифметической сумме реактивных мощностей отдельных катушек.

### Испытание двух последовательно соединенных катушек

Сначала определяем полное, активное и индуктивное сопротивления каждой катушки в отдельности, для этого собираем одну из схем, изображенных на рис. 40. Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , полностью включаем регулировочный реостат  $r_p$  (или автотрансформатором устанавливаем небольшое напряжение) и записываем показания приборов в табл. 11. Затем уменьшаем сопротивление регулировочно-

Таблица 11

№ п/п	№ катушки	Измерено						Вычислено			Примечание	
		$U$		$I$		$P$		$f$	$z$	$r$		$x_L$
		$C_V =$		$C_A =$		$C_W =$		Гц	ОМ	ОМ		ОМ
		дел.	$\nu$	дел.	$\alpha$	дел.	$\nu m$					
1 2 3	Первая катушка											$z_1 =$ ОМ $r_1 =$ ОМ $x_{L1} =$ ОМ
1 2 3	Вторая катушка											$z_2 =$ ОМ $r_2 =$ ОМ $x_{L2} =$ ОМ

Примечание.  $z_1, z_2, r_1, r_2, x_{L1}$  и  $x_{L2}$ —средние арифметические значения полных, активных и индуктивных сопротивлений первой и второй катушек.

го реостата  $r_p$  (или автотрансформатором увеличиваем напряжение на зажимах катушки) и снова записываем показания приборов.

Для более точного определения сопротивлений катушек следует произвести измерения при трех различных значениях напряжения на зажимах катушки, т. е. при трех положениях движка регулировочного реостата  $r_p$ . Сопротивления  $z$ ,  $r$  и  $x_L$  определяются по формулам (17), (18) и (19). Истинное значение сопротивления находим как среднее арифметическое из трех результатов измерений. После этого собираем схему рис. 47. В этой

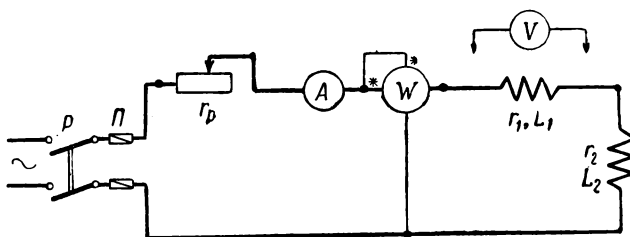


Рис. 47. Схема для испытания двух последовательно соединенных катушек

схеме:  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $r_p$  — регулировочный реостат;  $A$  — амперметр, измеряющий ток в цепи;  $W$  — ваттметр, измеряющий мощность, потребляемую двумя катушками;  $V$  — вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах всей цепи и каждой катушки. Опыт производится так же, как при определении сопротивлений каждой катушки. Показания приборов записываем в табл. 12.

Зная показания вольтметра  $U$  и амперметра, можно определить полное сопротивление двух последовательно соединенных катушек:

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

Активное сопротивление двух последовательно соединенных катушек определим на основании показаний ваттметра и амперметра, т. е.

$$r = \frac{P}{I^2}.$$

Индуктивное сопротивление двух последовательно соединенных катушек равно:

$$x_L = \sqrt{z^2 - r^2}.$$

[illegible]

Таблица 13

[illegible]

Зная активное и индуктивное сопротивления каждой катушки, можно определить аналитически активное, индуктивное и полное сопротивления двух последовательно соединенных катушек по формулам:

$$r = r_1 + r_2;$$

$$x_L = x_{L1} + x_{L2};$$

$$z = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_{L1} + x_{L2})^2}.$$

На рис. 48 показано графическое определение полного сопротивления двух последовательно соединенных катушек. Из этого рисунка видно, что полное сопротивление двух последовательно соединенных катушек равно геометрической сумме полных сопротивлений этих катушек.

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.

2. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 40, и произвести измерения для каждой катушки при трех различных значениях напряжения на зажимах катушки.

3. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 11) определить полное, активное и индуктивное сопротивления каждой катушки.

4. Собрать схему, изображенную на рис. 47, и произвести измерения при трех различных значениях напряжения на зажимах двух последовательно соединенных катушек.

5. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 12) определить полное, активное и индуктивное сопротивления двух последовательно соединенных катушек.

6. Определить аналитически (на основании табл. 11) активное, индуктивное и полное сопротивления двух последовательно соединенных катушек.

7. Определить графически (на основании табл. 11) полное сопротивление двух последовательно соединенных катушек.

8. Сравнить результаты пп. 5; 6; 7.

9. На основании полученных данных (согласно табл. 12) построить векторную диаграмму.

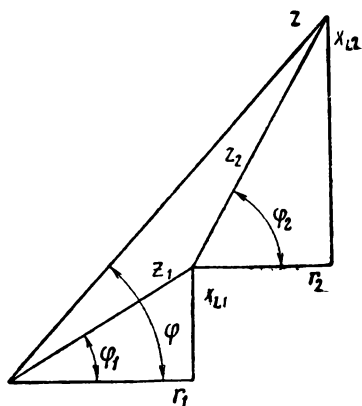


Рис. 48. Диаграмма сопротивлений для цепи, показанной на рис. 47

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чему равно полное сопротивление двух последовательно соединенных катушек?
2. По показаниям амперметра, вольтметра (измеряющего напряжение на зажимах всей цепи) и ваттметра определить активное и индуктивное сопротивления двух последовательно соединенных катушек, а также найти реактивную и полную мощности всей цепи.
3. Напишите формулы коэффициента мощности каждой катушки и всей цепи.

## РАБОТА № 12

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ АКТИВНОГО И ЕМКОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ

#### Цель работы

Целью работы является опытная проверка основных соотношений для последовательной цепи переменного тока, обладающей активным и емкостным сопротивлениями.

#### Общие сведения

Если цепь переменного тока обладает активным сопротивлением  $r$  и емкостью  $C$  (рис. 49), то на основании второго закона

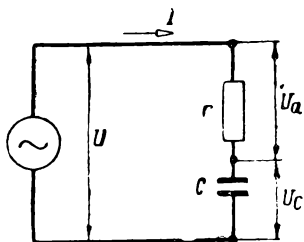


Рис. 49. Последовательное соединение активного сопротивления  $r$  и емкости  $C$

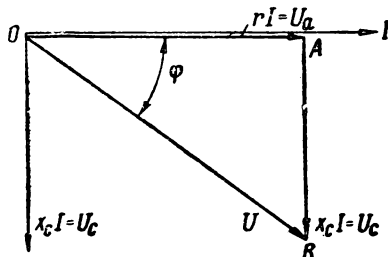


Рис. 50. Векторная диаграмма для последовательного соединения  $r$  и  $C$

Кирхгофа для мгновенных значений электрических величин можем написать

$$u = ri + u_C, \quad (36)$$

где  $u$  — мгновенное значение приложенного к цепи напряжения;

$i$  — мгновенное значение тока в цепи;

$u_C$  — мгновенное значение напряжения, приложенного к обкладкам конденсатора и представляющего собой падение напряжения на емкости.

Если ток изменяется по закону синуса, т. е.  $i = I_m \sin \omega t$ , то предыдущее уравнение можно представить так:

$$u = r I_m \sin \omega t + \frac{1}{\omega C} I_m \sin (\omega t - 90^\circ).$$

Из этой формулы видно, что приложенное к цепи напряжение состоит из двух составляющих: активной составляющей напряжения (или активного напряжения)  $u_a = r I_m \sin \omega t$ , совпадающей по фазе с током, и емкостной или реактивной составляющей напряжения (или емкостного напряжения)  $u_c = \frac{I_m}{\omega C} \sin (\omega t - 90^\circ)$ , отстающей по фазе от тока на  $90^\circ$  (четверть периода). Следовательно,

$$u = u_a + u_c. \quad (37)$$

Построим векторную диаграмму. В произвольном направлении откладываем вектор тока  $\bar{I}$ , так как он является постоянной величиной для всех последовательно соединенных приемников (рис. 50). По направлению вектора тока  $\bar{I}$  откладываем вектор напряжения  $\bar{U}_a$  на зажимах активного сопротивления, а под углом  $90^\circ$  в сторону отставания от вектора тока  $\bar{I}$  откладываем вектор напряжения  $\bar{U}_c$  на зажимах конденсатора (емкости). Складывая геометрически векторы  $\bar{U}_a$  и  $\bar{U}_c$ , получим вектор напряжения  $\bar{U}$  на зажимах цепи, т. е.

$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_c. \quad (38)$$

Вектор напряжения  $\bar{U}$  отстает от вектора тока  $\bar{I}$  на угол  $\varphi$  (рис. 50), который можно определить из треугольника напряжений  $OAB$ . Из треугольника  $OAB$  имеем:

$$U^2 = U_a^2 + U_c^2$$

или

$$U^2 = (rI)^2 + \left(\frac{1}{\omega C} I\right)^2 = I^2 \left[ r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2 \right].$$

Извлекая из обеих частей уравнения квадратный корень, получим:

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

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_c^2}}. \quad (39)$$

Эта формула представляет собой закон Ома для цепи переменного тока с активным сопротивлением и емкостью, соединенными последовательно.

Величина  $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$  называется *емкостным сопротивлением* и измеряется в омах. Емкостное сопротивление зависит от частоты приложенного напряжения  $f$ , т. е. чем больше будет частота, тем меньше будет емкостное сопротивление. Величина  $\sqrt{r^2 + x_C^2}$ , имеющая размерность сопротивления, называется *полным сопротивлением цепи* и обозначается буквой  $z$ . Следовательно,  $z = \sqrt{r^2 + x_C^2}$  и закон Ома для цепи переменного тока примет следующий вид:

$$I = \frac{U}{z} \quad (40)$$

или

$$U = zI. \quad (41)$$

Если все стороны треугольника напряжений  $OAB$  разделим на величину тока  $I$ , то получим *треугольник сопротивлений* (рис. 51). Из треугольника сопротивлений имеем:

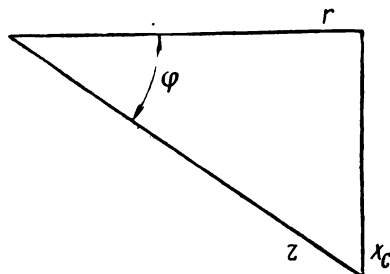


Рис. 51. Треугольник сопротивлений цепи с  $r$  и  $C$

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}; \quad \sin \varphi = \frac{x_C}{z}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_C}{r}; \quad (42)$$

$$r = z \cos \varphi; \quad x_C = z \sin \varphi; \quad z = \sqrt{r^2 + x_C^2}. \quad (43)$$

### Испытание последовательной цепи, содержащей $r$ и $C$

Испытание последовательной цепи, содержащей активное и емкостное сопротивления, производится по одной из схем, изображенных на рис. 52. В этих схемах:  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $r$  — ламповый или проволочный рео-

стат;  $C$  — конденсаторы\*;  $A$  — амперметр, измеряющий ток в цепи;  $W$  — ваттметр, измеряющий активную мощность цепи;  $V$ ,  $V_a$ ,  $V_C$  — вольтметры, измеряющие напряжение на зажимах всей цепи, напряжение на зажимах лампового или проволочного реостата и напряжение на обкладках конденсаторов (вместо трех можно взять один вольтметр, измеряя напряжения на зажимах всей цепи, реостата и конденсаторов поочередно).

Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , записываем показания приборов в табл. 13 (см. стр. 70).

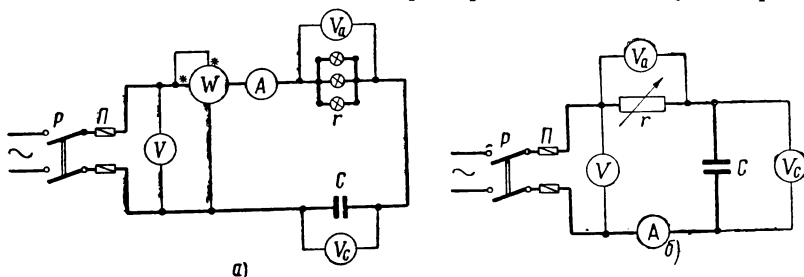


Рис. 52. Последовательное соединение ламп накаливания и конденсаторов:  
а — при помощи ваттметра, б — по методу трех вольтметров

Затем, изменяя сопротивление лампового или проволочного реостата, необходимо произвести еще два измерения по приборам.

На основании данных опыта (согласно табл. 13) можно определить следующие величины:

полное сопротивление цепи

$$z = \frac{U}{I}; \quad (44)$$

активное сопротивление реостата

$$r = \frac{U_a}{I}; \quad (45)$$

емкостное сопротивление конденсаторов

$$x_C = \frac{U_C}{I}; \quad (46)$$

емкость конденсаторов

$$C = \frac{1}{2\pi f x_C} \quad (47)$$

(частоту  $f$  следует взять равной 50 гц);

\* На схеме показан только один конденсатор, на самом же деле их имеется несколько и они соединены между собой параллельно.



коэффициент мощности цепи

$$\text{или} \quad \left. \begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{r}{z} \\ \cos \varphi &= \frac{P}{UI} \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

реактивную мощность цепи

$$Q = x_c I^2; \quad (49)$$

полную мощность цепи

$$\text{или} \quad \left. \begin{aligned} S &= UI \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.

2. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 52, и произвести измерения при трех различных значениях сопротивления лампового или проволочного реостата.

3. На основании полученных данных опыта и подсчета (согласно табл. 13) определить  $z$ ,  $r$ ,  $x_c$ ,  $C$ ,  $\cos \varphi$ ,  $Q$  и  $S$ .

4. Построить векторную диаграмму для одного из наблюдений опыта.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Напишите закон Ома для последовательного соединения активного сопротивления  $r$  и емкости  $C$ .

2. Как зависит емкостное сопротивление  $x_c$  от частоты  $f$ ?

3. Как зависит реактивная мощность  $Q$  для данной цепи от величины емкости  $C$ ?

4. Будут ли изменяться величины тока и мощности (активной, реактивной и полной) данной цепи при изменении частоты  $f$ ?

### РАБОТА № 13

#### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ АКТИВНОГО, ИНДУКТИВНОГО И ЕМКОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

#### Цель работы

Целью работы является опытная проверка основных соотношений для последовательной цепи переменного тока, обладающей активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью, и получение резонанса напряжения в этой цепи путем изменения ее индуктивности или емкости.

## Общие сведения

При последовательном соединении активного сопротивления  $r$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$  (рис. 53) приложенное к цепи напряжение будет состоять из трех составляющих: активной составляющей напряжения (активного напряжения)  $U_a = rI$ , совпадающей по фазе с вектором тока  $I$ ; индуктивной составляющей напряжения (индуктивного напряжения)  $U_L = x_L I$ , опе-

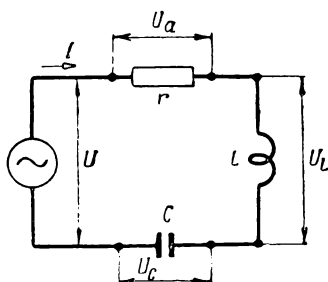


Рис. 53. Последовательное соединение активного сопротивления  $r$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$

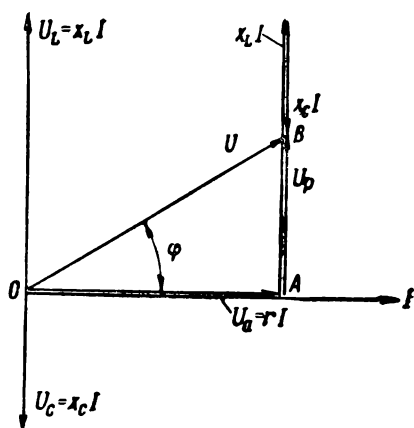


Рис. 54. Векторная диаграмма цепи с  $r$ ,  $L$  и  $C$  для случая, когда  $x_L > x_C$  (к схеме рис. 53)

режающей вектор тока  $\bar{I}$  на  $90^\circ$ , и емкостной составляющей напряжения (емкостного напряжения)  $U_C = x_C I$ , отстающей от вектора тока  $\bar{I}$  на  $90^\circ$ , т. е.

$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_L + \bar{U}_C. \quad (51)$$

Построение векторной диаграммы для рассматриваемой цепи производится следующим образом. В произвольном направлении откладываем вектор тока  $\bar{I}$  (рис. 54). По направлению вектора тока  $\bar{I}$  откладываем вектор активного напряжения  $\bar{U}_a = r\bar{I}$  на зажимах активного сопротивления, под углом  $90^\circ$  в сторону опережения вектора тока  $\bar{I}$  откладываем вектор индуктивного напряжения  $\bar{U}_L = x_L \bar{I}$  на зажимах индуктивности и под углом  $90^\circ$  в сторону отставания от вектора тока  $\bar{I}$  откладываем вектор емкостного напряжения  $\bar{U}_C = x_C \bar{I}$  на обкладках конденсатора. Складывая геометрически векторы  $\bar{U}_a$ ,  $\bar{U}_L$  и  $\bar{U}_C$ , получим вектор

напряжения  $\bar{U}$  на зажимах всей цепи. Прямоугольный треугольник  $OAB$  называется *треугольником напряжений*. Из треугольника  $OAB$  имеем:

$$U^2 = U_a^2 + (U_L - U_C)^2 = U_a^2 + U_p^2 = r^2 I^2 + (x_L - x_C)^2 I^2,$$

где  $U_p = U_L - U_C = (x_L - x_C)I$  — реактивная составляющая напряжения или реактивное напряжение.

Извлекая из обеих частей уравнения квадратный корень, получим:

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

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{U}{z}, \quad (52)$$

где  $z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$  — полное сопротивление цепи;

$x = x_L - x_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$  — реактивное сопротивление.

Полное и реактивное сопротивления измеряются в омах. Уравнение (52) представляет собой закон Ома для цепи переменного тока, содержащей  $r$ ,  $L$  и  $C$ . Угол  $\varphi$  сдвига фаз между током и напряжением на зажимах всей цепи определяется из формулы

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_p}{U_a} = \frac{(x_L - x_C)I}{rI} = \frac{x_L - x_C}{r} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}. \quad (53)$$

Это соотношение показывает, что угол  $\varphi$  может быть положительным или отрицательным в зависимости от того, что в цепи преобладает индуктивное сопротивление ( $x_L > x_C$ ) или емкостное сопротивление ( $x_L < x_C$ ). В первом случае напряжение, приложенное к цепи, опережает ток на угол  $\varphi$ , а во втором отстает от тока на угол  $\varphi$ . На рис. 54 показана векторная диаграмма для случая, когда  $x_L > x_C$  ( $U_L > U_C$ ), а на рис. 55 — для случая, когда  $x_L < x_C$  ( $U_L < U_C$ ). Если все стороны треугольников напряжений  $OAB$  и  $Oab$  (рис. 54 и рис. 55) разделим на величину тока  $I$ , то получим треугольники сопротивлений (рис. 56 и 57). Из треугольника сопротивлений имеем:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r} = \frac{x_L - x_C}{r}; \quad \cos \varphi = \frac{r}{z}; \quad \sin \varphi = \frac{x}{z} = \frac{x_L - x_C}{z}. \quad (54)$$

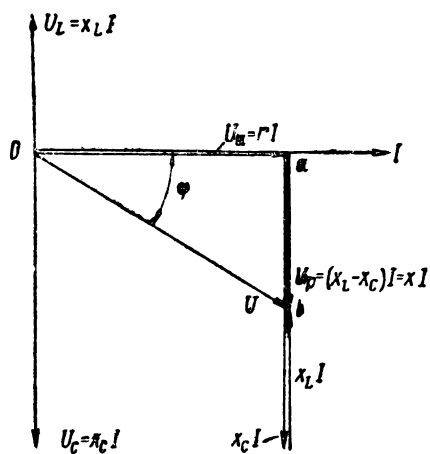


Рис. 55. Векторная диаграмма цепи с  $r$ ,  $L$  и  $C$  для случая, когда  $x_C > x_L$  (к схеме рис. 53)

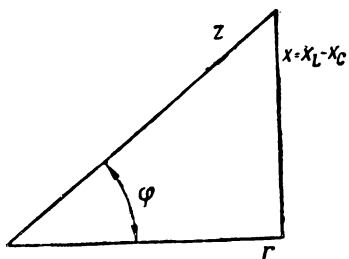


Рис. 56. Треугольник сопротивлений цепи с  $r$ ,  $L$  и  $C$  для случая, когда  $x_L > x_C$

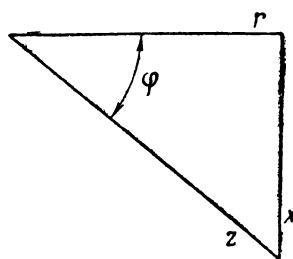


Рис. 57. Треугольник сопротивлений цепи с  $r$ ,  $L$  и  $C$  для случая, когда  $x_C > x_L$

Активная мощность цепи равна:

$$P = UI \cos \varphi = rI^2. \quad (55)$$

Реактивная мощность цепи:

$$\left. \begin{aligned} Q &= UI \sin \varphi \\ \text{или} \quad Q &= xI^2 = x_L I^2 - x_C I^2 = Q_L - Q_C, \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

т. е. реактивную мощность цепи можно рассматривать как разность реактивных мощностей катушки и конденсатора.

Полная мощность цепи

$$S = UI. \quad (57)$$

Рассмотрим случай, когда индуктивное сопротивление  $x_L$  равно емкостному сопротивлению  $x_C$ :

$$x_L = x_C \quad (58)$$

или

$$x = x_L - x_C = 0. \quad (59)$$

Такой режим цепи, содержащей катушку и конденсаторы, при котором реактивное сопротивление всей цепи равно нулю, называется *резонансом напряжений*. При резонансе напряжений полное сопротивление цепи становится равным активному сопротивлению

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

так как  $x = x_L - x_C = 0$ . Ток в цепи при неизменном напряжении на зажимах цепи достигает максимального значения

$$I = \frac{U}{r} \quad (60)$$

и совпадает по фазе с напряжением, приложенным к цепи, так как

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} = \frac{0}{r} = 0, \text{ а } \varphi = 0.$$

При резонансе напряжений напряжения на индуктивности и емкости равны по величине, но противоположны по фазе, т. е. взаимно компенсируют друг друга (рис. 58). Следует отметить, что каждое из этих напряжений может быть значительно больше, чем напряжение, приложенное к цепи. Легко показать, что

$$U_L = x_L I = x_L \frac{U}{r} \text{ и } U_C = x_C I = x_C \frac{U}{r}, \quad (61)$$

т. е. напряжения на зажимах индуктивности и на обкладках конденсаторов при резонансе напряжений во столько раз больше приложенного к цепи напряжения, во сколько раз сопротивление  $x_L = x_C$  больше активного сопротивления  $r$ . Вследствие повышенных напряжений на отдельных участках цепи, если они будут превышать допустимое напряжение, может произойти повреждение приборов, находящихся на этих участках, а также пробой изоляции проводов или диэлектрика конденсатора. Однако работа электрической цепи в режиме резонанса напряжений находит широкое применение в радиотехнике, в автоматике и т. п. Такую цепь часто называют *последовательным (колебательным) контуром*.

Отношение напряжения на индуктивности или емкости к напряжению, приложенному к цепи, при резонансе

$$\frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = Q \quad (62)$$

называется *коэффициентом резонанса* или *добротностью контура*. Коэффициент резонанса показывает, во сколько раз напряжение на индуктивности или емкости больше, чем приложенное к цепи напряжение.

Формулу (58) можно представить так:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{или} \quad 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}. \quad (63)$$

Из этой формулы видно, что резонанс напряжений можно получить изменением одной из трех величин  $L$ ,  $C$  и  $f$  при постоянстве двух других, т. е.

1)  $L = \text{var}$ ,  $f$  и  $C = \text{const}$ ; 2)  $C = \text{var}$ ,  $f$  и  $L = \text{const}$ ;

3)  $f = \text{var}$ ,  $C$  и  $L = \text{const}$ .

Значения индуктивности, емкости и частоты, при которых наступает резонанс, определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} L_0 &= \frac{1}{4\pi^2 f^2 C}; \\ C_0 &= \frac{1}{4\pi^2 f^2 L}; \\ f_0 &= \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}. \end{aligned} \right\} \quad (64)$$

Мы рассмотрим только первые два случая.

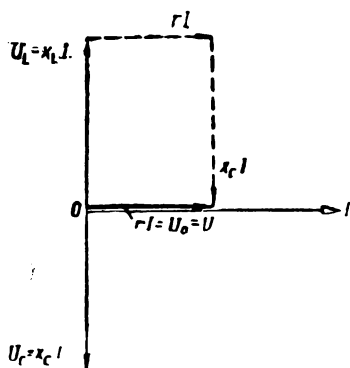


Рис. 58. Векторная диаграмма резонанса напряжений

## Опыт получения резонанса напряжений при переменной индуктивности

Для проведения опыта собираем одну из схем, изображенных на рис. 59. В этих схемах  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $AT$  — автотрансформатор;  $r_p$  — регулировочный реостат;  $D$  — делитель напряжения;  $H_z$  — частотомер,

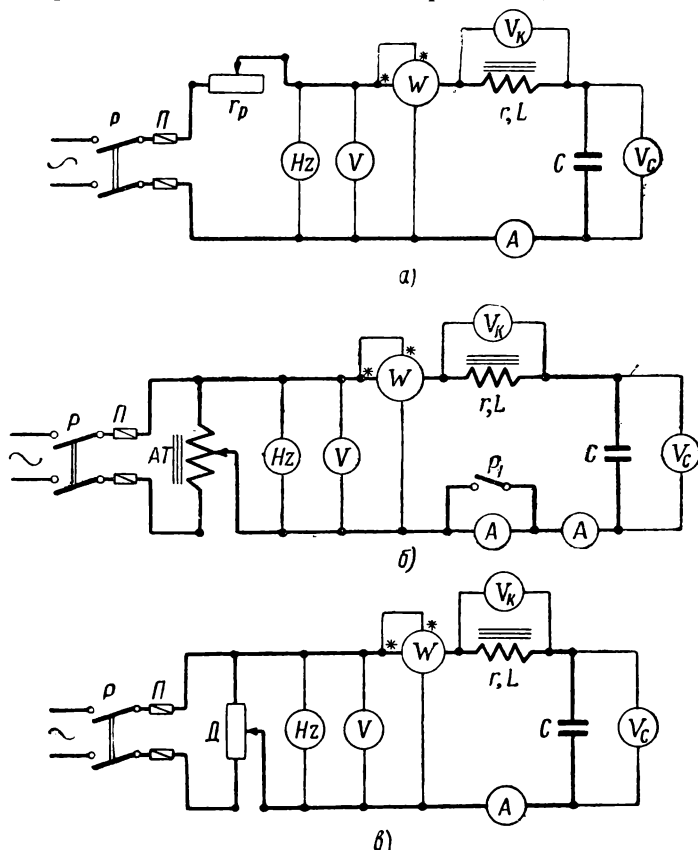


Рис. 59. Схемы для исследования резонанса напряжений:

а — при помощи регулировочного реостата, б — при помощи автотрансформатора, в — при помощи делителя напряжения

измеряющий частоту\*;  $W$  — ваттметр, измеряющий активную мощность цепи;  $A$  — амперметр, измеряющий ток в цепи;  $V$ ,  $V_K$  и  $V_C$  — вольтметры, измеряющие напряжения на зажимах всей

\* Иногда частотомер не включают в схему, в этом случае частоту  $f$  принимают равной 50 гц (см. стр. 61).

цепи, на зажимах катушки и на обкладках конденсаторов. Вместо трех можно применить один вольтметр со щупами, измеряя поочередно напряжения на зажимах всей цепи, на зажимах катушки и на обкладках конденсаторов. Во избежание больших напряжений на зажимах катушки и конденсаторов подводимое к цепи напряжение  $U$  при помощи автотрансформатора или трансформатора понижают до 20—40 в. Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , регулировочным реостатом  $r_p$  или автотрансформатором  $AT$  (или делителем напряжения  $D$ ) устанавливаем определенное напряжение на зажимах цепи, которое во время опыта поддерживаем неизменным. Затем, постепенно выдвигая стальной сердечник из катушки, изменяем индуктивность  $L$  катушки и добиваемся резонанса напряжений. Момент резонанса напряжений определяется наибольшим значением тока в цепи; после резонанса ток начинает уменьшаться. Во время опыта емкость конденсаторов и частота должны быть постоянными. Число измерений необходимо сделать не менее девяти, т. е. четыре точки до резонанса, одну при резонансе и четыре точки после резонанса. При каждом изменении индуктивности  $L$  катушки записываем показания приборов в табл. 14 (см. стр. 92).

Активное сопротивление катушки можно определить по показаниям ваттметра и амперметра:

$$r = \frac{P}{I^2}, \quad (65)$$

где  $P$  — активная мощность, измеряемая ваттметром.

Сопротивление катушки складывается из сопротивления обмотки катушки  $r_m$  и сопротивления  $r_{ст}$ , обусловленного потерями на гистерезис и вихревые токи в стали сердечника катушки. Так как  $r_{ст}$  есть величина непостоянная, то и активное сопротивление катушки также будет непостоянным:

$$r = r_m + r_{ст}.$$

Полное сопротивление катушки определяется на основании показаний вольтметра и амперметра:

$$z_k = \frac{U_k}{I}. \quad (66)$$

Зная полное и активное сопротивление катушки, можно определить индуктивное сопротивление по формуле

$$x_L = \sqrt{z_k^2 - r^2}. \quad (67)$$

Индуктивность катушки

$$L = \frac{x_L}{\omega} = \frac{x_L}{2\pi f}. \quad (68)$$



Емкость конденсаторов в этом опыте определяется только при резонансе, при этом сначала находим емкостное сопротивление на основании показаний вольтметра и амперметра:

$$x_C = \frac{U_C}{I}, \quad (69)$$

тогда емкость конденсаторов будет равна:

$$C = \frac{1}{\omega x_C} = \frac{1}{2\pi f x_C}. \quad (70)$$

Коэффициент мощности катушки

$$\cos \varphi_K = \frac{P}{U_K I}. \quad (71)$$

Коэффициент мощности цепи

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}. \quad (72)$$

На основании полученных данных строим кривые  $I$ ,  $U_K$ ,  $U_C$ ,  $\cos \varphi = F(L)$  при  $C = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и  $U = \text{const}$ , как показано на рис. 60.

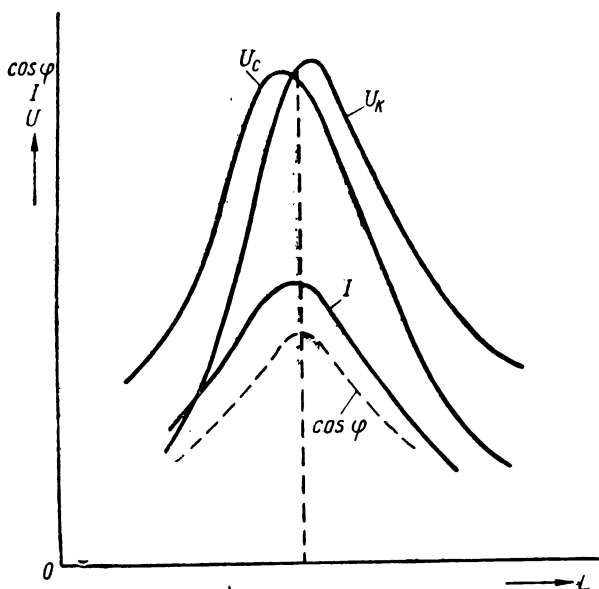


Рис. 60. Кривые зависимости тока  $I$  в цепи, напряжения  $U_K$  на зажимах катушки, напряжения  $U_C$  на зажимах конденсатора, коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от индуктивности  $L$  катушки

## Опыт получения резонанса напряжений при переменной емкости

Опыт производится по одной из схем, изображенных на рис. 59, следующим образом. Вводим внутрь катушки стальной сердечник. Затем, включив рубильник  $P$ , автотрансформатором  $AT$  или регулировочным реостатом  $r_p$  (или делителем напряжения  $D$ ) устанавливаем определенное напряжение, которое во время опыта поддерживаем неизменным. После этого постепенно увеличиваем емкость и добиваемся резонанса напряжений.

Во время опыта индуктивность и частота должны быть постоянными. При каждом изменении емкости записываем показания приборов в табл. 14. Индуктивность катушки в этом опыте определяется только при резонансе по формуле.

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{1}{(2\pi f)^2 C}.$$

Все остальные величины определяем на основании приведенных выше формул.

На основании полученных данных строим кривые  $I$ ,  $U_k$ ,  $U_C$ ,  $\cos \varphi = F_1(C)$  при  $L = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и  $U = \text{const}$ .

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.

2. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 59.

3. При постоянных значениях емкости  $C$ , частоты  $f$  и напряжения  $U$  на зажимах цепи путем изменения индуктивности  $L$  катушки получить резонанс напряжений. Необходимо сделать не менее девяти измерений, т. е. четыре точки до резонанса, одну точку при резонансе, четыре точки после резонанса.

4. При постоянных значениях индуктивности  $L$ , частоты  $f$  и напряжения  $U$  на зажимах цепи путем изменения емкости  $C$  получить резонанс напряжений. Следует сделать не менее девяти измерений.

5. По данным опыта и подсчета (согласно табл. 14) построить кривые: а)  $I$ ,  $U_k$ ,  $U_C$ ,  $\cos \varphi = F(L)$  при  $C = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и  $U = \text{const}$ ; б)  $I$ ,  $U_k$ ,  $U_C$ ,  $\cos \varphi = F_1(C)$  при  $L = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и  $U = \text{const}$ .

6. Построить векторные диаграммы для случаев

$$x_L > x_C; \quad x_L = x_C \quad \text{и} \quad x_L < x_C.$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Напишите условие резонанса напряжений.
2. Почему при резонансе напряжений ток в цепи будет максимальным?
3. Почему при резонансе напряжений напряжение на зажимах катушки и конденсатора может быть больше приложенного к цепи напряжения?
4. Почему при резонансе напряжений реактивная мощность всей цепи равна нулю?
5. Как влияет на полное сопротивление цепи включение емкостного сопротивления последовательно с индуктивным сопротивлением?
6. От каких факторов зависит коэффициент мощности всей цепи и при каком условии он будет равен единице?
7. Когда ток отстает по фазе от напряжения на зажимах всей цепи и когда опережает напряжение?

## РАБОТА № 14

### ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КАТУШКИ И ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ (ИЛИ ПРОВОЛОЧНОГО РЕОСТАТА)

#### Цель работы

Целью работы является опытная проверка основных соотношений для разветвленной цепи \* переменного тока.

#### Общие сведения

При решении задач на разветвленные цепи целесообразнее разложить вектор тока на две составляющие: активную составляющую тока (активный ток)  $I_a$ , совпадающую по фазе с вектором напряжения  $\bar{U}$  (рис. 61), и реактивную составляющую тока (реактивный ток)  $I_p$ , отстающую (или опережающую в зависимости от того, что преобладает в цепи — индуктивность или емкость) от вектора напряжения  $\bar{U}$  на  $90^\circ$ . Прямоугольный треугольник  $OAB$  называется *треугольником токов*.

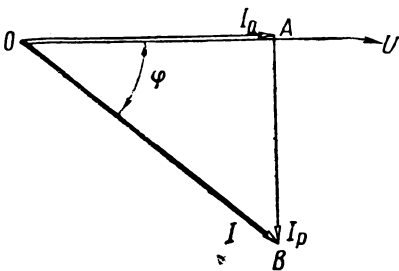


Рис. 61. Треугольник токов

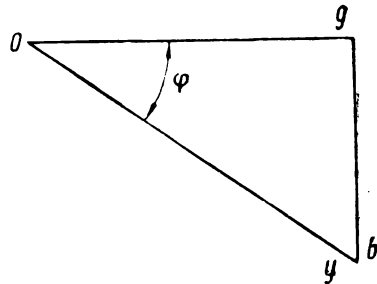


Рис. 62. Треугольник проводимостей

\* Цепь переменного тока с параллельным соединением приемников энергии.

Из треугольника токов (рис. 61) имеем:

$$I_a = I \cos \varphi; I_p = I \sin \varphi; I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (73)$$

Если все стороны треугольника токов разделим на напряжение  $U$ , то получим *треугольник проводимостей* (рис. 62), подобный треугольнику токов.

Активная проводимость

$$g = \frac{I_a}{U} = \frac{I}{U} \cos \varphi = \frac{1}{z} \cdot \frac{r}{z} = \frac{r}{z^2}. \quad (74)$$

Реактивная проводимость

$$b = \frac{I_p}{U} = \frac{I}{U} \sin \varphi = \frac{1}{z} \cdot \frac{x}{z} = \frac{x}{z^2}. \quad (75)$$

Полная проводимость

$$y = \frac{I}{U} = \frac{1}{z} = \sqrt{g^2 + b^2}. \quad (76)$$

Активная, реактивная и полная проводимости измеряются в  $1/\text{ом}$ .

Из треугольников проводимостей (см. рис. 62) имеем:

$$\cos \varphi = \frac{g}{y}; \quad \sin \varphi = \frac{b}{y}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}. \quad (77)$$

Рассмотрим разветвленную цепь, состоящую из трех параллельно соединенных приемников энергии (рис. 63). Пусть заданными величинами являются напряжение  $U$ , приложенное к цепи, активные и индуктивные сопротивления  $r_1, r_2, r_3, x_{L1}, x_{L2}$  и  $x_{L3}$ . Требуется найти ток  $I$  в неразветвленной части цепи.

Токи приемников:

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}};$$

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + x_{L2}^2}};$$

$$I_3 = \frac{U}{z_3} = \frac{U}{\sqrt{r_3^2 + x_{L3}^2}}. \quad (78)$$

Коэффициенты мощности приемников

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1}; \quad \cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2}; \quad \cos \varphi_3 = \frac{r_3}{z_3}. \quad (79)$$

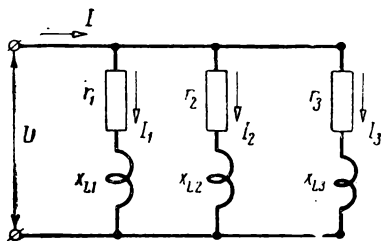


Рис. 63. Параллельное соединение приемников

По первому закону Кирхгофа ток в неразветвленной части цепи равен геометрической сумме токов отдельных приемников:

$$\overline{I} = \overline{I}_1 + \overline{I}_2 + \overline{I}_3. \quad (80)$$

На рис. 64 показана векторная диаграмма для случая параллельного соединения трех приемников. Построение векторной диаграммы производится следующим образом. В произвольном направлении откладываем вектор напряжения  $\overline{U}$  на зажимах параллельно соединенных приемников, так как для всех приемников напряжение остается постоянной величиной.

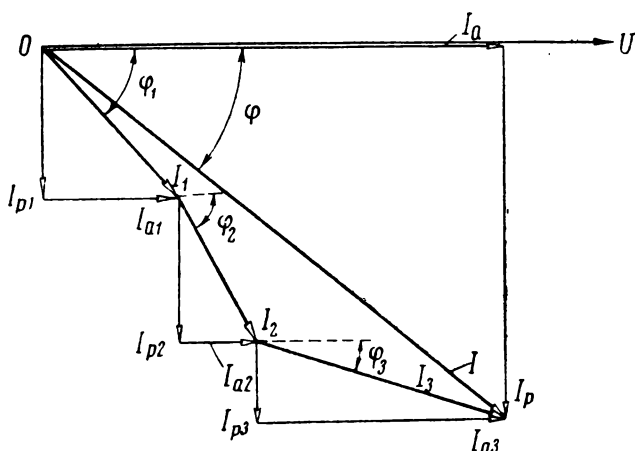


Рис. 64. Векторная диаграмма для цепи, изображенной на рис. 63

Под углами  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  откладываем векторы токов  $\overline{I}_1$ ,  $\overline{I}_2$  и  $\overline{I}_3$  в сторону отставания от вектора напряжения  $\overline{U}$ . Складывая геометрически векторы  $\overline{I}_1$ ,  $\overline{I}_2$  и  $\overline{I}_3$ , получим вектор тока  $\overline{I}$  в неразветвленной части цепи. Разложив векторы токов на активные и реактивные составляющие, получим:

$$\overline{I} = \overline{I}_{a1} + \overline{I}_{p1} + \overline{I}_{a2} + \overline{I}_{p2} + \overline{I}_{a3} + \overline{I}_{p3}. \quad (81)$$

Так как активные составляющие токов (активные токи) приемников энергии совпадают по фазе с вектором напряжения  $\overline{U}$ , то активная составляющая тока (активный ток)  $I_a$  в неразветвленной части цепи равна арифметической сумме активных составляющих токов отдельных приемников:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a3}. \quad (82)$$

Реактивная составляющая тока (реактивный ток)  $I_p$  в неразветвленной части цепи равна алгебраической сумме реактивных составляющих токов \* отдельных приемников (см. рис. 64):

$$I_p = I_{p1} + I_{p2} + I_{p3}. \quad (83)$$

Активные и реактивные проводимости приемников:

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= \frac{r_1}{z_1^2}; \quad g_2 = \frac{r_2}{z_2^2}; \quad g_3 = \frac{r_3}{z_3^2}; \\ b_1 &= \frac{x_{L1}}{z_1^2}; \quad b_2 = \frac{x_{L2}}{z_2^2}; \quad b_3 = \frac{x_{L3}}{z_3^2}. \end{aligned} \right\} \quad (84)$$

Заменяя активные и реактивные составляющие токов произведениями напряжения  $U$  на соответствующие активные и реактивные проводимости, получим:

$$I_a = U g_1 + U g_2 + U g_3 = U (g_1 + g_2 + g_3) = U g, \quad (85)$$

$$I_p = U b_1 + U b_2 + U b_3 = U (b_1 + b_2 + b_3) = U b, \quad (86)$$

если положить

$$g = g_1 + g_2 + g_3, \quad (87)$$

$$b = b_1 + b_2 + b_3, \quad (88)$$

т. е. эквивалентная активная проводимость цепи при параллельном соединении приемников равна арифметической сумме активных проводимостей отдельных приемников, а эквивалентная реактивная проводимость цепи равна алгебраической сумме \*\* реактивных проводимостей отдельных приемников. Следовательно, уравнение (81) можно представить так:

$$\overline{I} = \overline{I}_a + \overline{I}_p = \overline{U} g + \overline{U} b$$

или

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{(Ug)^2 + (Ub)^2} = U \sqrt{g^2 + b^2} = Uy, \quad (89)$$

где  $y = \sqrt{g^2 + b^2}$  — эквивалентная полная проводимость всей цепи.

Следует отметить, что эквивалентная полная проводимость цепи  $y$  не равна сумме полных проводимостей отдельных прием-

\* Если приемник энергии обладает активным и емкостным сопротивлениями, т. е. реактивная составляющая тока, реактивная проводимость и реактивная мощность берутся в формулах (83), (86), (88) и (96) со знаком минус.

\*\* В нашем случае будет арифметическая сумма, так как все приемники обладают активными и индуктивными сопротивлениями.

ников. Эквивалентная полная проводимость цепи равна геометрической сумме полных проводимостей отдельных приемников:

$$\bar{y} = \bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3. \quad (90)$$

Коэффициент мощности всей цепи

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I} \quad \text{или} \quad \cos \varphi = \frac{g}{y}. \quad (91)$$

Полное \* сопротивление всей цепи

$$z = \frac{1}{y} \quad \text{или} \quad z = \frac{U}{I}. \quad (92)$$

Активное сопротивление всей цепи

$$r = z \cos \varphi \quad \text{или} \quad r = \frac{g}{y^2}. \quad (93)$$

Реактивное сопротивление всей цепи

$$x = \sqrt{z^2 - r^2} \quad \text{или} \quad x = \frac{b}{y^2}. \quad (94)$$

Умножив обе части уравнений (87) и (88) на  $U^2$ , получим активную и реактивную мощности \*\* всей цепи:

$$U^2 g = U^2 g_1 + U^2 g_2 + U^2 g_3,$$

$$U^2 b = U^2 b_1 + U^2 b_2 + U^2 b_3$$

или

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (95)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (96)$$

т. е. активная мощность  $P$  всей цепи равна арифметической сумме активных мощностей отдельных приемников, а реактивная мощность  $Q$  всей цепи равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных приемников. Из формул (78) имеем:

$$z_1 I_1 = z_2 I_2 = z_3 I_3$$

или

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{y_1}{y_2}; \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{z_3}{z_2} = \frac{y_2}{y_3},$$

\* Вместо терминов «эквивалентное полное сопротивление всей цепи», «эквивалентное активное сопротивление всей цепи» и «эквивалентное реактивное сопротивление всей цепи» применяются также термины, «полное сопротивление всей цепи», «активное сопротивление всей цепи» и «реактивное сопротивление всей цепи».

\*\* Активную и реактивную мощности всей цепи можно получить из уравнений (82) и (83), если обе части уравнений умножить на  $U$ , т. е.

$$P = UI_a = UI \cos \varphi = UI_{a1} + UI_{a2} + UI_{a3} = UI_1 \cos \varphi_1 + UI_2 \cos \varphi_2 + UI_3 \cos \varphi_3,$$

$$Q = UI_p = UI \sin \varphi = UI_{p1} + UI_{p2} + UI_{p3} = UI_1 \sin \varphi_1 + UI_2 \sin \varphi_2 + UI_3 \sin \varphi_3.$$

т. е. токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально полным сопротивлениям или прямо пропорционально полным проводимостям параллельных ветвей.

### Испытание разветвленной цепи, состоящей из катушки и ламп накаливания (или проволочного реостата)

Испытание разветвленной цепи производится по одной из схем, изображенных на рис. 65. В этих схемах  $P$  — двухполюс-

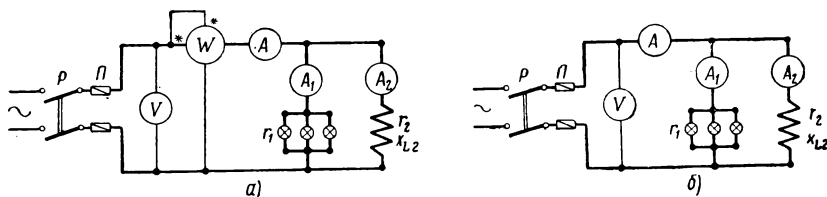


Рис. 65. Параллельное соединение ламп накаливания и катушки:  
а — при помощи ваттметра, б — по методу трех амперметров

ный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $V$  — вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах цепи;  $A$ ,  $A_1$  и  $A_2$  — амперметры, измеряющие токи в неразветвленной части цепи, в катушке и в лампах накаливания;  $W$  — ваттметр, измеряющий активную мощность всей цепи. Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$  при полностью включенных лампах накаливания, записываем показания приборов в табл. 15.

Затем постепенно выключаем лампы накаливания (последний отсчет по приборам производим при выключенных лампах) и записываем показания приборов в табл. 15. Число измерений следует сделать не менее трех. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 15) определяем следующие величины:

мощность, потребляемую лампами накаливания,

$$P_1 = UI_1; \quad (97)$$

мощность, потребляемую катушкой,

$$P_2 = P - P_1; \quad (98)$$

активные сопротивления ламп накаливания, катушки и всей цепи

$$r_1 = \frac{U}{I_1}, \quad r_2 = \frac{P_2}{I_2^2}, \quad r = \frac{P}{I^2}; \quad (99)$$

полные сопротивления катушки и всей цепи

$$z_2 = \frac{U}{I_2}, \quad z = \frac{U}{I}; \quad (100)$$



[illegible]

Таблица 15

[illegible]

индуктивные сопротивления катушки и всей цепи

$$x_{L2} = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}, \quad x = \sqrt{z^2 - r^2}. \quad (101)$$

Остальные величины, указанные в табл. 15, определяются по формулам, приведенным в общих сведениях. На рис. 66 изображена векторная диаграмма для параллельного соединения ламп накаливания и катушки.

Если опыт производился по схеме рис. 65, б, то активную мощность, потребляемую катушкой, можно найти, исходя из следующих рассуждений.

Из треугольника  $OAB$  (рис. 66) находим

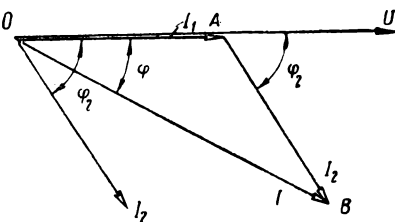


Рис. 66. Векторная диаграмма для цепи, показанной на рис. 65

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2 \cos \varphi_2,$$

откуда

$$I_2 \cos \varphi_2 = \frac{I^2 - I_1^2 - I_2^2}{2I_1}.$$

Умножив обе части этого уравнения на  $U$ , получим активную мощность, потребляемую катушкой:

$$P_2 = UI_2 \cos \varphi_2 = \frac{U(I^2 - I_1^2 - I_2^2)}{2I_1}. \quad (102)$$

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 65.
3. Произвести испытание разветвленной цепи при трех различных сопротивлениях лампового реостата.
4. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 15) определить все величины, указанные в табл. 15 для реостата, катушки и всей цепи.
5. Построить векторную диаграмму для одного из наблюдений опыта.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как графически определить ток в неразветвленной части цепи, если известны токи в двух параллельных ветвях и коэффициенты мощности этих ветвей?

2. Как влияет на коэффициент мощности всей цепи параллельное включение ламп накаливания, т. е. если число параллельно включенных ламп будет увеличиваться?

3. Чему равны эквивалентные активная и реактивная проводимости цепи при параллельном соединении приемников?

4. Напишите формулу коэффициента мощности  $\cos \varphi$  всей цепи при параллельном соединении приемников.

5. Чему равны активное и реактивное сопротивления всей цепи при параллельном соединении приемников?

## РАБОТА № 15

### ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ (ИЛИ ПРОВОЛОЧНОГО РЕОСТАТА) И КОНДЕНСАТОРОВ

#### Цель работы

Целью работы является опытная проверка основных соотношений для разветвленной цепи переменного тока.

#### Общие сведения

Рассмотрим разветвленную цепь, состоящую из двух параллельных ветвей, в одной из которых включены лампы накаливания или проволочный реостат, в другой же ветви включены конденсаторы (рис. 67). Пусть заданными величинами являются: напряжение  $U$ , приложенное к цепи, активное сопротивление  $r_1$  ламп накаливания (лампового реостата) и емкостное сопротивление  $x_C$  конденсаторов. Требуется определить ток  $I$  в неразветвленной части цепи.

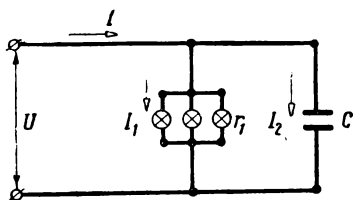


Рис. 67. Параллельное соединение ламп накаливания и конденсаторов

Ток в лампах накаливания

$$I_1 = \frac{U}{r_1}. \quad (103)$$

Ток в конденсаторах

$$I_2 = \frac{U}{x_C}. \quad (104)$$

Ток в неразветвленной части цепи равен:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2}, \quad (105)$$

где  $I_a = I_1$  — активная составляющая тока в неразветвленной части цепи, которая равна току в лампах накаливания, а активную составляющую тока в конденсаторах считаем равной нулю, т. е. конденсаторы без потерь;

$I_p = I_2$  — реактивная составляющая тока в неразветвленной части цепи, которая равна току в конденсаторах, так как реактивная составляющая тока в лампах накаливания равна нулю.

Активная проводимость ламп накаливания определяется по формуле

$$g_1 = \frac{1}{r_1} . \quad (106)$$

Реактивная проводимость конденсаторов

$$b_2 = \frac{1}{x_c} . \quad (107)$$

Полная проводимость всей цепи

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{g_1^2 + b_2^2} , \quad (108)$$

где  $g = g_1$  — эквивалентная активная проводимость всей цепи, которая равна активной проводимости ламп накаливания, так как  $g_2 = 0$ ;

$b = b_2$  — эквивалентная реактивная проводимость всей цепи, которая равна реактивной проводимости конденсаторов, так как  $b_1 = 0$ .

Коэффициент мощности всей цепи можно определить по формуле

$$\cos \varphi = \frac{g}{y}$$

или

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I} .$$

Полное сопротивление всей цепи

$$z = \frac{1}{y}$$

или

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

Активное сопротивление всей цепи

$$r = z \cos \varphi$$

или

$$r = \frac{g}{y^2} .$$

Реактивное сопротивление всей цепи

$$x = \sqrt{z^2 - r^2}$$

или

$$x = \frac{b}{y^2} .$$

Активная мощность всей цепи

$$\left. \begin{aligned} P &= UI \cos \varphi = r I^2 \\ \text{или} \quad P &= r_1 I_1^2, \end{aligned} \right\} \quad (109)$$

так как активная мощность всей цепи равна активной мощности, потребляемой лампами накаливания.

Реактивная мощность всей цепи

$$\left. \begin{aligned} Q &= UI \sin \varphi \\ \text{или} \quad Q &= x_c I_2^2, \end{aligned} \right\} \quad (110)$$

так как реактивная мощность всей цепи равна реактивной мощности конденсаторов. Векторная диаграмма строится следующим

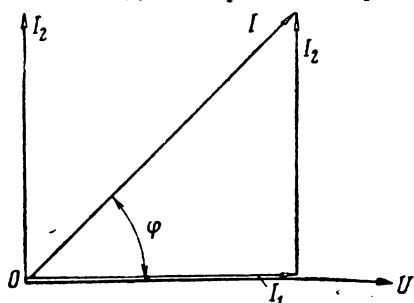


Рис. 68. Векторная диаграмма для цепи, показанной на рис. 67

образом. Откладываем вектор напряжения  $\bar{U}$  в произвольном направлении (рис. 68). По направлению вектора напряжения  $\bar{U}$  откладываем вектор тока  $\bar{I}_1$  в реостате, а под углом  $90^\circ$  в сторону опережения вектора напряжения  $\bar{U}$  откладываем вектор тока  $\bar{I}_2$  в конденсаторах. Складывая геометрически векторы  $\bar{I}_1$  и  $\bar{I}_2$ , получим вектор тока  $\bar{I}$  в неразветвленной части цепи.

### Испытание разветвленной цепи, состоящей из ламп накаливания и конденсаторов

Испытание разветвленной цепи производится по схеме рис. 69. В этой схеме  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $W$  — ваттметр, измеряющий активную мощность всей цепи;  $A$ ,  $A_1$  и  $A_2$  — амперметры, измеряющие токи в нераз-

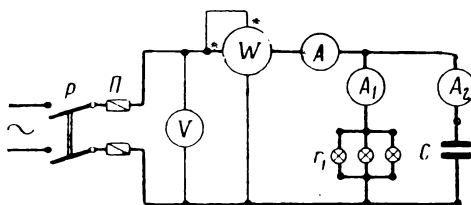


Рис. 69. Схема для испытания параллельно включенных ламп накаливания и конденсаторов

ветвленной части цепи, в лампах накаливания и в конденсаторах;  $V$  — вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах всей цепи. Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$  при полностью включенных лампах накаливания, записываем показания приборов в табл. 16.

Затем постепенно выключаем лампы накаливания и записываем показания приборов в табл. 16. Следует сделать не менее трех измерений. Зная показания вольтметра и амперметров, определяем активное сопротивление ламп накаливания и емкостное сопротивление конденсаторов по формулам:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{U}{I_1}, \\ x_c &= \frac{U}{I_2}. \end{aligned} \right\} \quad (111)$$

Остальные величины, указанные в табл. 16, определяются по формулам, приведенным в общих сведениях.

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 69.
3. Произвести испытание разветвленной цепи при трех различных сопротивлениях лампового (или проволочного) реостата.
4. На основании полученных данных опыта (табл. 16) определить все величины, указанные в табл. 16, для лампового (или проволочного) реостата, конденсаторов и всей цепи.
5. Построить векторную диаграмму для одного из наблюдений опыта.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как графически определить ток  $I_2$  в конденсаторах, если известны ток  $I_1$  в лампах накаливания, ток  $I$  в неразветвленной части цепи и коэффициент мощности  $\cos \varphi$  всей цепи?
2. Чему равна максимальная энергия электрического поля конденсаторов?

### РАБОТА № 16

#### ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КАТУШЕК

##### Цель работы

Целью работы является опытная проверка основных соотношений при параллельном соединении катушек.

Таблица 16

U/U ॐ

Таблица 17

u/u ३

123

## Общие сведения

Рассмотрим цепь, состоящую из двух параллельно соединенных катушек (рис. 70), активные и индуктивные сопротивления которых соответственно равны  $r_1, r_2, x_{L1}$  и  $x_{L2}$ . Если к этой цепи приложено синусоидальное напряжение, то токи в катушках будут равны:

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}},$$

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + x_{L2}^2}}.$$

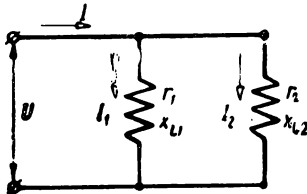


Рис. 70. Параллельное соединение катушек

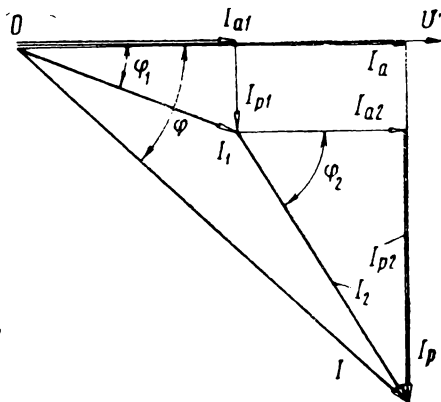


Рис. 71. Векторная диаграмма двух параллельно соединенных катушек

Эти токи отстают от напряжения, приложенного к цепи, на углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  (рис. 71), которые можно найти из следующих соотношений:

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1}, \quad \cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2}.$$

По первому закону Кирхгофа ток в неразветвленной части цепи равен геометрической сумме токов двух катушек:

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2. \quad (112)$$

Разложив векторы токов на активные и реактивные составляющие (см. рис. 71), получим:

$$\vec{I} = \vec{I}_{a1} + \vec{I}_{p1} + \vec{I}_{a2} + \vec{I}_{p2}. \quad (113)$$



или

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + (I_{p1} + I_{p2})^2}, \quad (114)$$

где  $I_a = I_{a1} + I_{a2}$  — активная составляющая тока в неразветвленной части цепи, равная арифметической сумме активных составляющих токов двух катушек;

$I_p = I_{p1} + I_{p2}$  — реактивная составляющая тока в неразветвленной части цепи, равная арифметической сумме реактивных составляющих токов двух катушек.

Так как полная проводимость цепи  $y$  есть отношение  $\frac{I}{U}$ , активная проводимость  $g = \frac{I_a}{U}$ , реактивная проводимость  $b = \frac{I_p}{U}$ , то, разделив обе части уравнения на  $U$ , получим:

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 + b_2)^2}, \quad (115)$$

где  $g = g_1 + g_2$  — эквивалентная активная проводимость цепи, равная арифметической сумме активных проводимостей двух катушек;

$b = b_1 + b_2$  — эквивалентная реактивная проводимость цепи, равная арифметической сумме реактивных проводимостей двух катушек.

Коэффициент мощности всей цепи

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I} \text{ или } \cos \varphi = \frac{g}{y}.$$

Полное сопротивление всей цепи

$$z = \frac{1}{y} \text{ или } z = \frac{U}{I}.$$

Активное сопротивление всей цепи

$$r = z \cos \varphi \text{ или } r = \frac{g}{y^2}.$$

Индуктивное сопротивление всей цепи

$$x_L = \sqrt{z^2 - r^2} \text{ или } x_L = \frac{b}{y^2}.$$

Активная мощность всей цепи

$$P = UI \cos \varphi = P_1 + P_2.$$

Реактивная мощность всей цепи

$$Q = UI \sin \varphi = Q_1 + Q_2.$$

Полная мощность всей цепи

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

### Испытание двух параллельно соединенных катушек

Прежде чем приступить к испытанию двух параллельно соединенных катушек, следует определить полное, активное и индуктивное сопротивления каждой катушки в отдельности, что производится так же, как в работе № 11. Испытание двух параллельно соединенных катушек производится по схеме рис. 72. В

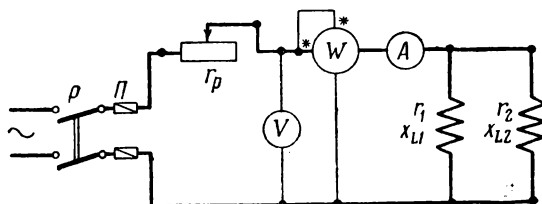


Рис. 72. Схема для испытания двух параллельно соединенных катушек

этой схеме  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $r_p$  — регулировочный реостат;  $V$  — вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах цепи;  $W$  — ваттметр, измеряющий мощность всей цепи;  $A$  — амперметр, измеряющий ток в неразветвленной части цепи. Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , включаем полностью регулировочный реостат  $r_p$  и записываем показания приборов в табл. 17 (см. стр. 98).

Затем уменьшаем сопротивление регулировочного реостата  $r_p$  и снова записываем показания приборов. Для более точного определения сопротивления цепи следует произвести измерения при трех различных значениях напряжения на зажимах катушек, т. е. при трех положениях движка реостата  $r_p$ . Истинное значение сопротивления определяется как среднее арифметическое трех результатов измерений. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 17) можно определить полное  $z$ , активное  $r$  и индуктивное  $x_L$  сопротивления всей цепи:

$$z = \frac{U}{I}, \quad r = \frac{P}{I^2},$$

$$x_L = \sqrt{z^2 - r^2}.$$

Зная активное и индуктивное сопротивления каждой катушки, можно определить аналитически активную, реактивную и полную проводимости всей цепи, а также найти полное, активное и индуктивное сопротивления всей цепи.

На рис. 73 показано графическое определение полной проводимости двух параллельно соединенных катушек. Из этого рисунка видно, что полная проводимость двух параллельно соединенных катушек равна геометрической сумме полных проводимостей этих катушек.

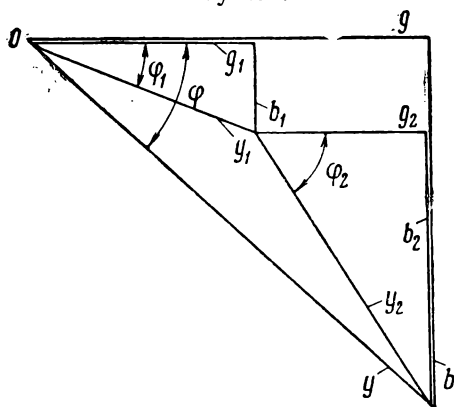


Рис. 73. Диаграмма проводимостей двух параллельно соединенных катушек

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.

2. Собрать схему, изображенную на рис. 40, и произвести измерения для каждой катушки при трех различных значениях напряжения на ее зажимах (см. работу № 11).

3. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 11) определить полное, активное и индуктивное сопротивления каждой катушки (см. работу № 11).

4. Собрать схему, изображенную на рис. 72, и произвести измерения при трех различных значениях напряжения на зажимах двух параллельно соединенных катушек.

5. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 17) определить полное, активное и индуктивное сопротивления двух параллельно соединенных катушек.

6. Определить аналитически (на основании табл. 11) активную, индуктивную и полную проводимости двух параллельно соединенных катушек.

7. Определить графически (на основании табл. 11) полную проводимость двух параллельно соединенных катушек.

8. Сравнить полученные результаты пп. 5, 6, 7.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как графически и аналитически определить эквивалентное полное сопротивление двух параллельно соединенных катушек?

2. Чему равен ток  $I_2$  во второй катушке, если известны ток  $I$  в неразветвленной части цепи, ток  $I_1$  в первой катушке, коэффициент мощности  $\cos \varphi$  всей цепи и коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  первой катушки?

# ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КАТУШКИ И КОНДЕНСАТОРОВ. РЕЗОНАНС ТОКОВ

## Цель работы

Целью работы является опытная проверка основных соотношений для цепи, состоящей из параллельно соединенных катушки и конденсаторов, и получение резонанса токов в этой цепи путем изменения ее индуктивности или емкости.

## Общие сведения

Рассмотрим цепь, состоящую из двух параллельных ветвей, когда в одной ветви имеется катушка с активным сопротивлением  $r_1$  и индуктивным  $x_L$ , а в другой ветви — конденсаторы с емкостным сопротивлением  $x_C$  (рис. 74).

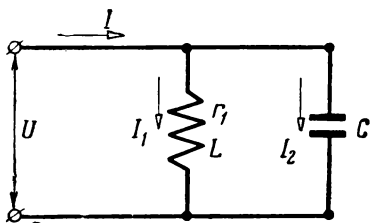


Рис. 74. Параллельное соединение катушки и конденсаторов

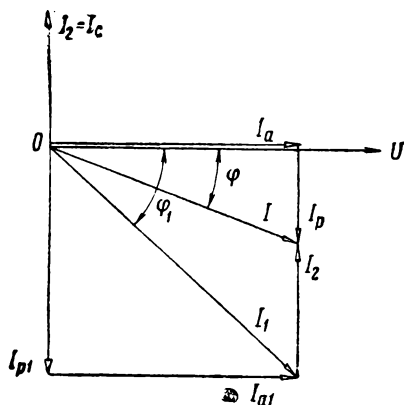


Рис. 75. Векторная диаграмма для цепи, показанной на рис. 74 для случая  $I_{p1} > I_C$  ( $b_L > b_C$ )

Ток в катушке равен

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + x_L^2}}. \quad (116)$$

Этот ток отстает от напряжения на угол  $\varphi_1$  (рис. 75), определяемый из формулы

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{x_L}{r_1}. \quad (117)$$

Вектор тока  $\overline{I}_1$  разложим на две составляющие: активную

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1$$

и реактивную

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1.$$

Ток в конденсаторах

$$I_2 = I_C = \frac{U}{x_C} = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = U \omega C. \quad (118)$$

Этот ток опережает по фазе напряжение на угол  $90^\circ$ . Ток в неразветвленной части цепи равен геометрической сумме токов

$$\overline{I} = \overline{I}_1 + \overline{I}_2 \quad (119)$$

или

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}, \quad (120)$$

где  $I_a = I_{a1}$  — активная составляющая тока в неразветвленной части цепи, равная активной составляющей тока катушки;

$I_p = I_{p1} - I_C$  — реактивная составляющая тока в неразветвленной части цепи, равная разности реактивных составляющих токов катушки и конденсаторов.

Ток в неразветвленной части цепи можно определить и по другой формуле:

$$I = Uy = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}, \quad (121)$$

где  $y$  — полная проводимость всей цепи;

$g = g_1$  — активная проводимость всей цепи;

$b = b_L - b_C$  — реактивная проводимость всей цепи.

Угол  $\varphi$  сдвига фаз между током в неразветвленной части цепи и напряжением можно определить из формул:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{I_p}{I_a} = \frac{I_{p1} - I_C}{I_{a1}} \\ \operatorname{tg} \varphi &= \frac{b_L - b_C}{g} \end{aligned} \right\} \quad (122)$$

Из этих формул видно, что ток в неразветвленной части цепи может отставать от напряжения (рис. 75) на угол  $\varphi$ , если  $I_{p1} > I_C$  ( $b_L > b_C$ ) или опережать напряжение (рис. 76), если  $I_{p1} < I_C$  ( $b_L < b_C$ ), или, наконец, совпадать по фазе с напряжением (рис. 77), если  $I_{p1} = I_C$  ( $b_L = b_C$ ). В последнем случае в цепи наступает резонанс токов. Следовательно, резонанс то-

ков — это такой режим разветвленной цепи, при котором реактивные составляющие токов параллельных ветвей равны друг другу и сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ , т. е. взаимно компенсируются. Так как при резонансе токов реактивная составляющая тока в неразветвленной части цепи и эквивалентная реактивная про-

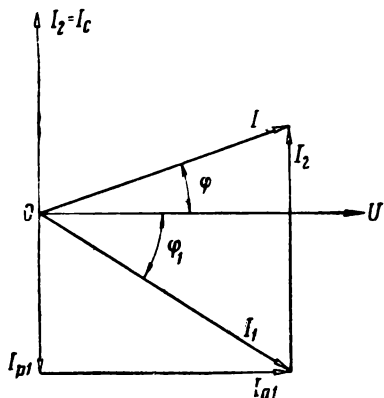


Рис. 76. Векторная диаграмма для цепи, показанной на рис. 74, для случая  $I_{p1} < I_C$  ( $b_L < b_C$ )

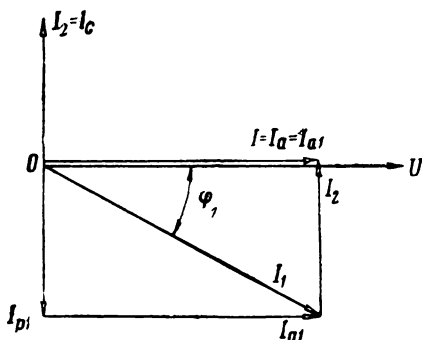


Рис. 77. Векторная диаграмма для резонанса токов  $I_{p1} = I_C$  ( $b_L = b_C$ )

водимость цепи равны нулю  $I_p = I_{p1} - I_C = 0$  и  $b = b_L - b_C = 0$ , то ток в неразветвленной части цепи будет наименьшим и равен активной составляющей тока катушки:

$$I = I_a = I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = Ug. \quad (123)$$

Здесь  $y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = g$  — эквивалентная полная проводимость цепи, равная эквивалентной активной проводимости цепи. Полное сопротивление всей цепи в момент резонанса будет наибольшим, так как

$$z = \frac{1}{y} = \frac{1}{g}.$$

Как известно, реактивные составляющие токов параллельных ветвей зависят только от реактивных проводимостей и напряжения на зажимах цепи, поэтому ток  $I$  в неразветвленной части может быть значительно меньше каждого из токов. Коэффициент мощности при резонансе равен единице ( $\cos \varphi = 1$ ), а активная мощность всей цепи равна полной мощности:

$$P = S = UI. \quad (124)$$

При резонансе сеть и генератор будут полностью разгружены от реактивного тока. Если обратиться к условию резонанса токов

$$b_L = b_C \quad \text{или} \quad \frac{\omega L}{r_1^2 + (\omega L)^2} = \frac{1}{\frac{1}{\omega C}},$$

то отсюда следует, что резонанс токов можно получить изменением одной из трех величин —  $L$ ,  $C$  и  $f$  при постоянстве двух других. Если пренебречь активным сопротивлением  $r_1$  катушки, то условие резонанса токов будет:

$$\frac{1}{\omega L} = \frac{1}{\frac{1}{\omega C}} = \omega C \quad \text{или} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{или} \quad 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC},$$

т. е. мы получили для частного случая условие резонанса токов аналогичное условию резонанса напряжений. В этом случае ток в неразветвленной части цепи равен нулю. Это значит, что притока энергии извне нет, но в замкнутом контуре, образуемом двумя ветвями, проходит переменный ток. В этом контуре происходит непрерывное превращение энергии электрического поля, запасенной конденсаторами, в энергию магнитного поля, запасаемую катушкой, и наоборот. Явление резонанса токов используется в радиотехнике, а также в электрических установках для улучшения их коэффициента мощности. В самом деле, если подключить емкость параллельно приемнику энергии, то в зависимости от величины этой емкости можно полностью или частично компенсировать реактивную составляющую тока приемника энергии, а следовательно улучшить коэффициент мощности  $\cos \phi$ . Мы рассмотрим получение резонанса токов при переменной индуктивности и переменной емкости.

### Проведение опыта при переменной индуктивности и получение резонанса токов

Для проведения опыта собираем одну из схем, изображенных на рис. 78. В этих схемах  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $AT$  и  $D$  — автотрансформатор и делитель напряжения, при помощи которых поддерживается неизменным напряжение на зажимах цепи;  $H_z$  — частотомер\*, измеряющий частоту;  $V$  — вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах цепи;  $W$  — ваттметр, измеряющий мощность цепи;  $A$ ,  $A_1$  и  $A_2$  — амперметры, измеряющие токи в неразветвленной части цепи, в

---

\* Иногда частотомер не включают в схему, в этом случае частоту принимают равной 50 гц.

катушке и в конденсаторах. Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , автотрансформатором или делителем напряжения устанавливаем определенное напряжение на зажимах цепи, которое во время опыта поддерживается неизменным. Затем, изменяя индуктивность катушки, постепенно выдвигая стальной сердечник из катушки, добиваемся резонанса токов. Момент резонанса токов определяется наименьшим значением тока в неразветвленной части цепи. После резонанса ток

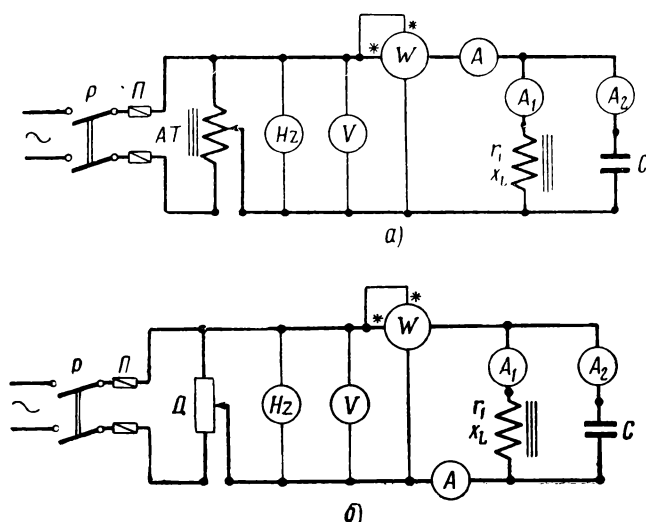


Рис. 78. Схемы для исследования резонанса токов:  
а — при помощи автотрансформатора, б — при помощи делителя напряжения

в неразветвленной части цепи будет возрастать. При каждом изменении индуктивности  $L$  записываем показания приборов в табл. 18.

Во время опыта емкость конденсаторов и частота должны быть постоянными. Число измерений необходимо сделать не менее девяти, т. е. четыре измерения до резонанса, в момент резонанса и четыре после резонанса.

Зная показания ваттметра и амперметра, можно определить активное сопротивление катушки:

$$r_1 = \frac{P}{I_1^2},$$

где  $I_1$  — ток в катушке.

Сопротивление катушки складывается из сопротивления обмотки катушки  $r_m$  и сопротивления  $r_{ст}$ , обусловленного потерями



[illegible]

ми на гистерезис и вихревые токи в стали сердечника катушки. Мы предполагаем, что активная мощность всей цепи (мощность, измеряемая ваттметром) расходуется только в катушке, а потерей мощности в конденсаторах пренебрегаем.

Полное сопротивление катушки определяется на основании показаний вольтметра и амперметра:

$$z_1 = \frac{U}{I_1},$$

Зная полное и активное сопротивления катушки, можно определить ее индуктивное сопротивление:

$$x_L = \sqrt{z_1^2 - r_1^2}.$$

Индуктивность катушки:

$$L = \frac{x_L}{\omega} = \frac{x_L}{2\pi f}.$$

Емкость конденсаторов в этом опыте определяется только при резонансе. Сначала находим емкостное сопротивление на основании показаний вольтметра и амперметра:

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

тогда емкость конденсаторов будет равна

$$C = \frac{1}{\omega x_C} = \frac{1}{2\pi f x_C}.$$

Коэффициент мощности цепи  $\cos \varphi = \frac{P}{UI}$ .

На основании полученных данных строим кривые  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,

$\cos \varphi = F(L)$  при  $C = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и  $U = \text{const}$ , как показано на рис. 79.

### **Проведение опыта при переменной емкости и получение резонанса токов**

Опыт производится по одной из схем, изображенных на рис. 78, следующим образом. Выключив конденсаторы, а стальной сердечник вставив в катушку, включаем рубильник  $P$  и автотрансформатором  $AT$  или делителем напряжения  $D$  устанавливаем определенное напряжение на зажимах цепи, которое во время опыта поддерживается неизменным. Затем постепенно увеличиваем емкость и добиваемся резонанса токов. Во время опыта индуктивность и частота должны быть постоянными. При каждом изменении емкости записываем показания приборов в табл. 18.

Число измерений необходимо сделать не менее девяти, т. е. четыре точки до резонанса, одну при резонансе и четыре точки после резонанса. Индуктивность катушки в этом опыте определяется только при резонансе токов. На основании полученных данных строим кривые:  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $\cos \varphi = F_1(C)$  при  $L = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и  $U = \text{const}$ , как показано на рис. 80.

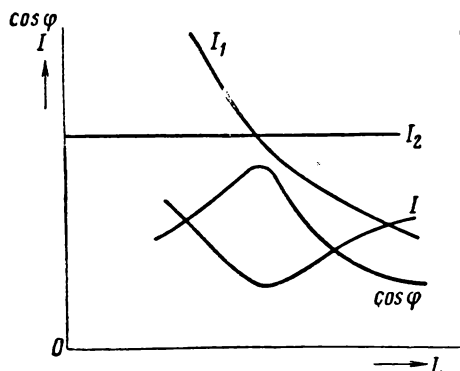


Рис. 79. Кривые зависимости тока  $I$  в неразветвленной части цепи, тока  $I_1$  в катушке, тока  $I_2$  в конденсаторах, коэффициента мощности  $\cos \varphi$  всей цепи от индуктивности  $L$  катушки:

$I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $\cos \varphi = F(L)$  при  $C = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и  $U = \text{const}$

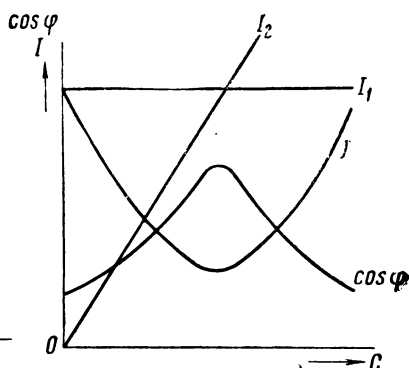


Рис. 80. Кривые зависимости тока  $I$  в неразветвленной части цепи, тока  $I_1$  в катушке, тока  $I_2$  в конденсаторах, коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от емкости  $C$ :

$I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $\cos \varphi = F_1(C)$  при  $L = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и  $U = \text{const}$

## Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.

2. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 78.

3. При постоянных значениях емкости  $C$ , частоты  $f$  и напряжения  $U$  на зажимах цепи путем изменения индуктивности  $L$  получить резонанс токов. Число измерений следует сделать не менее девяти, т. е. четыре точки до резонанса, одну точку при резонансе и четыре точки после резонанса.

4. При постоянных значениях индуктивности  $L$ , частоты  $f$  и напряжения  $U$  на зажимах цепи путем изменения емкости  $C$  получить резонанс токов.

5. По данным опыта и подсчета (согласно табл. 18) построить кривые:

а)  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $\cos \varphi = F(L)$  при  $C = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и  $U = \text{const}$ ;

б)  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $\cos \varphi = F_1(C)$  при  $L = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и  $U = \text{const}$ .

6. Построить векторные диаграммы до резонанса ( $b_L > b_C$ ), при резонансе ( $b_L = b_C$ ) и после резонанса ( $b_L < b_C$ ).

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. При каком условии наступает резонанс токов?
2. Почему при увеличении емкости ток в неразветвленной части цепи сначала уменьшается, а потом, достигнув минимума, начинает увеличиваться?
3. Почему реактивная мощность всей цепи при резонансе токов равна нулю?
4. Чему равнялось бы при резонансе токов полное сопротивление  $z$  всей цепи, если бы активное сопротивление  $r_1$  первой ветви (рис. 78) было равно нулю?
5. Когда ток  $I$  в неразветвленной части цепи отстает по фазе от напряжения и когда он опережает напряжение?
6. Почему при выдвигании стального сердечника из катушки ток  $I$  в неразветвленной части цепи уменьшается, а при некотором положении сердечника он достигает наименьшего значения; при дальнейшем выдвигании сердечника ток начинает возрастать?
7. Почему стремятся повышать коэффициент мощности электрических установок?
8. Как определить емкость  $C$  конденсаторов для повышения коэффициента мощности до заданной величины?

### РАБОТА № 18

#### ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

##### Цель работы

Целью работы является ознакомление с устройством ваттметра, включением его в сеть и измерением мощности как для чисто активной, так и для индуктивной нагрузок.

##### Общие сведения

Активная мощность цепи переменного тока определяется по формуле

$$P = UI \cos \varphi,$$

где  $U$  — напряжение на зажимах цепи;  
 $I$  — ток в цепи;  
 $\cos \varphi$  — коэффициент мощности цепи.

Для измерения активной мощности применяются электродинамические, ферродинамические и индукционные ваттметры. Рассмотрим электродинамический ваттметр. Неподвижная катушка ваттметра включается последовательно с приемником энергии и называется *последовательной обмоткой* или *последо-*

вательной цепью\* ваттметра, а подвижная катушка с добавочным сопротивлением включается параллельно приемнику и называется *параллельной цепью* или *параллельной обмоткой ваттметра*. Лабораторные электродинамические ваттметры обычно имеют несколько пределов измерения по току и напряжению. Наибольшее распространение получили ваттметры на два предела измерения по току.

У таких ваттметров последовательная обмотка состоит из двух секций, которые можно включить между собой последовательно или параллельно.

Расширение пределов измерения по напряжению у ваттметров производится при помощи добавочных сопротивлений, которые включаются последовательно с подвижной катушкой. Постоянная ваттметра (или цена деления ваттметра) определяется по формуле

$$C_W = \frac{U_n I_n}{\alpha_n} \left[ \frac{вт}{дел} \right], \quad (125)$$

где  $U_n$  и  $I_n$ —номинальные (предельные) значения напряжения и тока при данном способе включения;  
 $\alpha_n$ —полное число делений шкалы.

Для измерения небольших мощностей с малым коэффициентом мощности применяют специальные ваттметры, которые рассчитаны так, что полное отклонение их стрелки будет при номинальном токе  $I_n$ , номинальном напряжении  $U_n$  и при номинальном коэффициенте мощности  $\cos \varphi_n$  значительно меньше единицы (например, 0,3; 0,1 и т. д.). В этом случае постоянная ваттметра определяется по формуле

$$C_W = \frac{U_n I_n \cos \varphi_n}{\alpha_n} \left[ \frac{вт}{дел} \right]. \quad (126)$$

Величины  $U_n$ ,  $I_n$  и  $\cos \varphi_n$  указываются на ваттметре. Мощность  $P$ , показываемая ваттметром, определяется как произведение постоянной ваттметра  $C_W$  на число делений  $\alpha$ , отсчитанных по шкале при данном положении стрелки, т. е.

$$P = C_W \alpha. \quad (127)$$

Так как отклонение стрелки ваттметра зависит от взаимного направления токов в его последовательной и параллельной цепях, то для правильного включения ваттметра в цепь один зажим последовательной и один зажим параллельной цепей отмечают

---

\* Кроме терминов «последовательная обмотка» или «последовательная цепь», употребляются термины «токовая обмотка» или «толстая обмотка», а для параллельной цепи или параллельной обмотки термины «обмотка напряжения» или «тонкая обмотка».

особыми знаками «\*» (звездочка). Эти зажимы называют *генераторными*. Название генераторных объясняется тем, что при подключении обоих зажимов к одному полюсу генератора отклонение стрелки ваттметра будет правильным. Электродинамические ваттметры пригодны как для постоянного, так и переменного тока. Показания ваттметра не зависят от частоты переменного тока приблизительно до 100 гц.

## Измерение активной мощности

Прежде чем приступить к измерению активной мощности в цепи переменного тока, следует сначала определить зажимы цепей (обмоток) ваттметра. Определение зажимов последовательной и параллельной цепей ваттметра производится по схеме, изображенной на рис. 81. Два провода сети присоединяем к двум зажимам ваттметра. Если вольтметр\* показывает полное напряжение сети, то это значит, что зажимы принадлежат последовательной цепи, так как падение напряжения в последовательной цепи ваттметра очень мало. Если вольтметр\*\* показывает часть напряжения сети, то зажимы принадлежат параллельной цепи ваттметра, так как часть напряжения теряется в параллельной цепи. Если же вольтметр\*\*\* ничего не показывает, то концы принадлежат разным цепям.

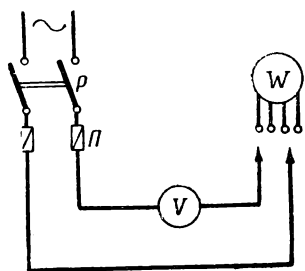


Рис. 81. Схема определения зажимов цепей (обмоток) ваттметра

После определения зажимов цепей ваттметра собираем схему рис. 82 для измерения мощности в цепи переменного тока. В этой схеме  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $r_p$  — регулировочный реостат;  $\Pi_1$  — двухполюсный переключатель;  $A$  — амперметр, измеряющий ток в цепи;  $W$  — ваттметр, измеряющий мощность в цепи;  $\phi$  — фазометр, измеряющий коэффициент мощности  $\cos \phi'$  цепи;  $r_1$  и  $r_2$  — проволочные реостаты, один \*\*\*\* для грубой, другой для плавной регулировки тока;

\* Зажимы последовательной и параллельной цепей ваттметра можно определить также при помощи лампы накаливания. В этом случае лампа горит ярко.

\*\* Лампа горит с неполным накалом.

\*\*\* Лампа не горит.

\*\*\*\* Вместо проволочного реостата  $r_1$  можно включить лампы накаливания.

$K$  — катушка со стальным сердечником. Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , регулировочным реостатом  $r_p$  устанавливаем заданное напряжение, которое во время опыта поддерживается неизменным.

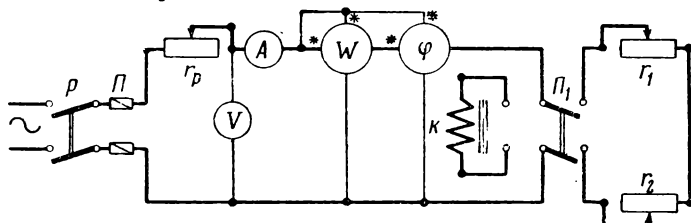


Рис. 82. Схема измерения мощности ваттметром в цепи однофазного тока

Переключатель  $\Pi_1$  ставим в левое положение и при помощи стального сердечника устанавливаем в катушке ток, равный 1 а, затем переключатель  $\Pi_1$  ставим в правое положение и реостатами  $r_1$  и  $r_2$  устанавливаем ток, равный 1 а. Показания приборов записываем в табл. 19.

Таблица 19

№ п/п	Измерено								Вычислено					Примечание
	$U$		$I$		$P$		$\cos \varphi'$	$\cos \varphi$	$I_a$	$I_p$	$S$	$Q$		
	$C_V =$		$C_A =$		$C_W =$		—	—	$a$	$a$	$va$	$var$		
	дел.	$v$	дел.	$a$	дел.	$вт$								
1														
2														
3														
4														

Аналогичные измерения следует сделать при токах 2, 3 и 4 а. Так как при чисто активной нагрузке коэффициент мощности  $\cos \varphi = 1$ , а при индуктивной (смешанной) нагрузке  $\cos \varphi < 1$ , то при одинаковом токе активная мощность в первом случае будет больше, чем во втором случае. Ток, измеренный амперметром, при чисто активной нагрузке будет иметь только активную составляющую тока, а при индуктивной нагрузке ток будет иметь как активную составляющую тока ( $I_a = I \cos \varphi$ ), так и реактивную составляющую тока

$$(I_p = I \sin \varphi), \text{ т. е. } I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}.$$

Зная активную мощность катушки, напряжение и ток, можно определить коэффициент мощности катушки по формуле

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

Полная мощность \* катушки

$$S = UI.$$

Реактивная мощность катушки

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

или

$$Q = UI \sin \varphi.$$

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 81.
3. Определить зажимы последовательной и параллельной цепей (обмоток) ваттметра.
4. Собрать схему, изображенную на рис. 82.
5. Измерить активную мощность при одинаковых токах 1, 2, 3 и 4 а как для индуктивной нагрузки, так и для чисто активной нагрузки.
6. На основании полученных данных (согласно табл. 19) определить  $\cos \varphi$ ,  $I_a$ ,  $I_p$ ,  $S$  и  $Q$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Из каких основных частей состоит электродинамический ваттметр?
2. На каком принципе основана работа электродинамического ваттметра?
3. Как можно определить зажимы последовательной и параллельной цепей (обмоток) ваттметра?
4. Что называется постоянной (ценой деления) ваттметра?
5. Почему в данной работе можно сравнивать показания ваттметра с показаниями образцовых вольтметра и амперметра при активной нагрузке?
6. Почему для измерения небольших мощностей с малым коэффициентом мощности применяют специальные ваттметры?
7. Почему стрелка ваттметра при его включении иногда может отклоняться влево за нуль шкалы и что нужно сделать, чтобы она отклонялась вправо?

---

\* Для чисто активной нагрузки активная мощность равна полной мощности, так как коэффициент мощности равен единице.



## ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ПОВЕРКА СЧЕТЧИКА

## Цель работы

Целью работы является ознакомление с устройством индукционного счетчика однофазного тока, включением его в сеть, измерением электрической энергии и поверкой счетчика.

## Общие сведения

Для учета активной электрической энергии, отдаваемой электрической станцией в сеть, и энергии, получаемой потребителями, применяют приборы, которые называются *счетчиками электрической энергии*. Наибольшее распространение на практике получили счетчики индукционной системы. Индукционные счетчики применяются только для переменного тока. Эти счетчики бывают разнообразных конструкций и типов, но принцип их действия и основы теории являются общими не только для счетчиков, но и для индукционных приборов.

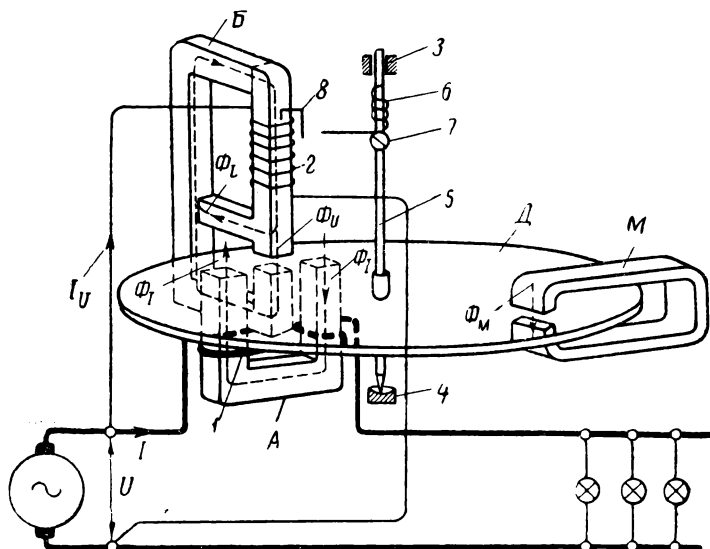


Рис. 83. Схема устройства и включения однофазного индукционного счетчика

На рис. 83 показана принципиальная схема устройства и включения в цепь однофазного индукционного счетчика. Магнитная система счетчика состоит из электромагнита последова-

тельной цепи *A* и электромагнита параллельной цепи *B*. Сердечники электромагнитов набираются из тонких листов электротехнической стали для уменьшения потерь на вихревые токи. На сердечнике электромагнита *A* помещена последовательная обмотка *1* с небольшим числом витков толстого медного изолированного провода. На одном стержне сердечника электромагнита *B* помещена параллельная обмотка *2* с большим числом витков тонкого медного изолированного провода. В зазоре между полюсами электромагнитов расположен алюминиевый диск *D*, укрепленный на оси в подшипнике *3* и в подпятнике *4*. Вращение оси *5* через червячную передачу *6* и шестерни (на рис. 83 не показаны) передается счетному механизму.

При включении счетчика в сеть переменного тока по последовательной цепи будет проходить ток *I* приемника энергии, который создает магнитный поток  $\Phi_I$ . Так как рабочий магнитный поток  $\Phi_I$  пересекает алюминиевый диск в двух местах в противоположных направлениях, что можно рассматривать как пересечение диска двумя потоками  $\Phi_I$  и  $\Phi_I' = -\Phi_I$ , сдвинутыми по фазе на  $180^\circ$ . По параллельной цепи счетчика будет проходить ток  $I_U$ , который создаст рабочий магнитный поток  $\Phi_U$  и нерабочий магнитный поток  $\Phi_L$ ; последний не будет пересекать диск (рис. 83). Рабочий магнитный поток  $\Phi_U$  пересекает диск в одном месте и замыкается через нижнюю часть сердечника электромагнита (противополюс) *B*. Следовательно, в счетчике имеются три переменных магнитных потока, сдвинутых в пространстве и во времени друг относительно друга, вследствие чего получается бегущий магнитный поток.

Рабочие потоки  $\Phi_U$ ,  $\Phi_I$  и  $\Phi_I'$ , пересекая диск, индуктируют в нем э. д. с., которые вызывают вихревые токи  $I_U'$ ,  $I'$  и  $I''$ . Взаимодействие вихревых токов с бегущим магнитным потоком (магнитным полем) создает вращающий момент, под действием которого диск счетчика начнет вращаться. Вращающий момент счетчика пропорционален активной мощности цепи (приемника энергии)

$$M = kUI \cos \varphi = kP, \quad (128)$$

где *k* — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивных особенностей счетчика;

*U* — напряжение на зажимах параллельной цепи счетчика;

*I* — ток в последовательной цепи счетчика;

$\cos \varphi$  — коэффициент мощности цепи;

*P* — активная мощность цепи.

При вращении диск счетчика пересекает магнитное поле (линии магнитной индукции) постоянного магнита *M* и в нем наво-

дятся вихревые токи  $I_m$ , которые, взаимодействуя с полем постоянного магнита, создадут тормозной момент, т. е.

$$M_T = k_1 I_m \Phi_m, \quad (129)$$

где  $k_1$  — постоянная величина;

$I_m$  — ток в диске, равный  $\frac{E_d}{r_d}$ ;

$r_d$  — сопротивление, оказываемое вихревым токам в диске;

$E_d$  — э. д. с., индуцируемая в диске и равная  $E_d = k' \Phi_m n$ ;

$n$  — скорость вращения диска.

Следовательно,

$$M_T = k_2 \Phi_m^2 n$$

или при постоянном магнитном потоке  $\Phi_m$  тормозной момент пропорционален скорости вращения диска

$$M_T = k_3 n. \quad (130)$$

В индукционных счетчиках, кроме основного тормозного момента, возникают еще два дополнительных тормозных момента  $M_T'$  и  $M_T''$  от взаимодействия магнитных потоков  $\Phi_I$  и  $\Phi_U$ , пересекающих диск счетчика, с токами, наводимыми ими в диске при его вращении. Тормозной момент  $M_T'$  обычно мал и им пренебрегают. Тормозной момент  $M_T''$  практически остается постоянным, и его можно рассматривать как дополнительный к основному тормозному моменту, что учитывается автоматически при регулировке счетчика. При установившейся скорости диска вращающий и тормозной моменты равны:

$$M = M_T$$

или

$$kP = k_3 n,$$

откуда

$$P = \frac{k_3}{k} n = Cn. \quad (131)$$

Из этой формулы видно, что скорость вращения диска счетчика пропорциональна активной мощности  $P$  цепи. Электрическая энергия  $W$ , израсходованная в цепи за время  $t$ , будет равна

$$W = Pt = Cnt = CN, \quad (132)$$

где  $N = nt$  — число оборотов диска счетчика за время  $t$ . Коэффициент пропорциональности называется *действительной постоянной счетчика*. Действительная постоянная представляет собой количество электрической энергии, которое прошло через счетчик (потреблено приемником энергии) за время одного оборота диска, т. е.

$$C = \frac{W}{N} \left[ \frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{\text{оборот}} \right]. \quad (133)$$

Действительная постоянная счетчика не остается неизменной при разных режимах работы счетчика, так как она зависит от нагрузки и от внешних условий, например температуры. Кроме действительной постоянной  $C$  счетчика, вводится понятие *номинальной* (фабричной) *постоянной счетчика*, представляющей количество электрической энергии, учитываемое счетным механизмом за один оборот диска. Обычно на щитке счетчика указывается передаточное число счетчика, обозначаемое «1 *квт · ч* —  $N$  оборотов диска». Следовательно, передаточное число счетчика представляет собой число оборотов диска счетчика, чтобы счетный механизм учел одну единицу энергии, например 1 *квт · ч* (или 1 *гвт · ч*). Зная передаточное число счетчика, можно определить номинальную постоянную по формуле

$$C_n = \frac{1}{A} \left[ \frac{\text{квт} \cdot \text{ч}}{\text{оборот}} \right] = \frac{1000 \cdot 3600}{A} \left[ \frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{\text{оборот}} \right], \quad (134)$$

где  $A$  — передаточное число счетчика в оборотах на 1 *квт · ч*.

Определим номинальную постоянную  $C_n$  счетчика, если на счетчике написано «1 *квт · ч* = 2500 оборот. диска». Подставив данные в формулу (134), получим:

$$C_n = \frac{1}{A} = \frac{1000 \cdot 3600}{2500} = 1440 \frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{\text{оборот}}.$$

Зная действительную и номинальную постоянные счетчика, можно определить относительную погрешность или просто погрешность счетчика по формуле

$$\gamma = \frac{W - W_d}{W_d} \cdot 100\% = \frac{C_n N - CN}{CN} \cdot 100\% = \frac{C_n - C}{C} \cdot 100\%. \quad (135)$$

Здесь  $W = C_n N$  — энергия, учтенная счетчиком, а  $W_d = CN$  — действительная энергия, израсходованная в цепи за некоторый промежуток времени, определяемая по образцовым приборам.

Согласно ГОСТ 6570—60 по точности учета электроэнергии счетчики активной энергии делятся на классы: 1,0; 2,0 и 2,5. Условное обозначение счетчика активной энергии, однофазного, непосредственного включения на 220 в, 5 а, класса 2,5: СО 220 в, 5 а класса 2,5 ГОСТ 6570—60. В табл. 20 приведены допустимые погрешности для однофазных счетчиков активной энергии.

При выводе формулы (132) мы не учитывали потери на трение в счетчике. В действительности потери на трение имеются. Они складываются из трения оси в подпятнике и цапфе, трения в счетном механизме и трения подвижной части о воздух. При небольших нагрузках в 5—10% от номинальной момент трения может вызвать, если это не предусмотрено, погрешность в 10—15%, а согласно ГОСТ 6570—60 (см. табл. 20) погрешность для счетчиков класса 1 равна  $\pm 2\%$  и для счетчиков класса 2 — 2,5%

Таблица 20

Условия нагрузки	Допустимая относительная погрешность счетчика, ‰		
	класс 1,0	класс 2,0	класс 2,5
При $\cos \varphi = 1$ и токе, равном:			
5‰ от номинального . . . . .	$\pm 2$	$\pm 2,5$	—
10‰ " " . . . . .	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 3,5$
50‰ " " . . . . .	$\pm 1$	—	—
100‰ " " . . . . .	$\pm 1$	—	—
150‰ " " . . . . .	$\pm 1$	—	—
от 10 до 200‰ " . . . . .	—	$\pm 2$	$\pm 2,5$
При $\cos \varphi = 0,5$ и токе, равном:			
10‰ от номинального . . . . .	$\pm 2$	$\pm 2,5$	—
20‰ " " . . . . .	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 4$
50‰ " " . . . . .	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 4$
100‰ " " . . . . .	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 4$
150‰ " " . . . . .	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 4$

при  $\cos \varphi = 1$  и токе 5‰ от номинального. Если нагрузка счетчика будет меньше 4‰, то может случиться, что подвижная часть остановится, так как вращающий момент может оказаться меньше момента трения. Поэтому при испытании счетчика определяют его чувствительность. Чувствительность  $S$  счетчика — отношение наименьшей мощности  $P_{\min}$  или наименьшего тока  $I_{\min}$ , при которой диск счетчика вращается без остановки, к номинальной мощности  $P_n$  или к номинальному току  $I_n$ , т. е.

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{P_{\min}}{P_n} \cdot 100\text{‰} \\ \text{или} \quad S &= \frac{I_{\min}}{I_n} \cdot 100\text{‰} \end{aligned} \right\} \quad (136)$$

Чувствительность счетчика определяется при номинальном напряжении, номинальной частоте и  $\cos \varphi = 1$ . Согласно ГОСТ 6570—60 диск счетчика должен вращаться без остановки при нагрузке не более 0,5‰ от номинальной для счетчиков класса 1,0 и 2 и 1‰ для счетчиков класса 2,5. Чтобы счетчик правильно учитывал энергию при малых нагрузках, у счетчиков делают дополнительное приспособление, при помощи которого создается компенсационный момент, т. е. дополнительный вращающий момент, компенсирующий трение. Иногда счетчики имеют самоход, т. е. при разомкнутой последовательной цепи диск счетчика вращается. Это явление зависит от того, что компенсационный момент больше момента трения, или от неточности сборки счетчика. Чтобы не было самохода, к оси счетчика прикрепляют стальную проволоку 7, а на сердечнике параллельного электромагнита укрепляют Г-образную стальную пластинку 8,

называемую *тормозным флажком*. При вращении оси стальная проволока своим незакрепленным концом подходит и притягивается к намагниченной стальной пластинке 8, благодаря чему подвижная часть счетчика останавливается.

## Поверка счетчика

Поверка счетчика производится по одной из схем, показанных на рис. 84. В этих схемах  $P$  — двухполюсный рубильник (в схеме рис. 84, в,  $P$  — трехполюсный рубильник);  $\Pi$  — предохранители;  $D$  — делитель напряжения (вместо делителя напряжения можно применить автотрансформатор), служащий для поддер-

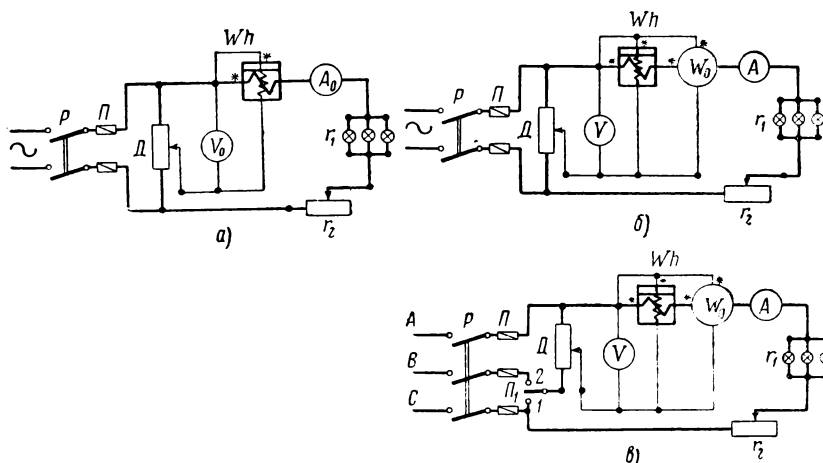


Рис. 84. Схемы поверки однофазного индукционного счетчика:  
а — при помощи образцовых вольтметра и амперметра, б — при помощи образцового ваттметра, в — при помощи образцового ваттметра от трехфазной сети

жания напряжения на зажимах параллельных цепей ваттметра и счетчика;  $\Pi_1$  — однополюсный переключатель;  $V_0$  и  $V$  — вольтметры, измеряющие напряжение на зажимах цепи; ( $V_0$  — образцовый вольтметр);  $A_0$  и  $A$  — амперметры, измеряющие ток в цепи ( $A_0$  — образцовый амперметр);  $Wh$  — поверяемый индукционный счетчик;  $W_0$  — образцовый электродинамический ваттметр, измеряющий мощность в цепи;  $r_1$  и  $r_2$  — нагрузочные реостаты (вместо ламп накаливания можно включить проволоочный реостат).

**Определение действительной постоянной счетчика.** Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$  (если опыт производится по схеме рис. 84, в, то переключатель  $\Pi_1$

ставим в положение 1), делителем напряжения  $D$  или автотрансформатором устанавливаем номинальное напряжение  $U = U_n$ , которое во время опыта поддерживаем неизменным. Нагрузочными реостатами  $r_1$  и  $r_2$  устанавливаем номинальный ток и прогреваем счетчик в течение 15 мин (согласно ГОСТ 6570—60). В то же время записываем показание счетчика  $W_1$ . Во время прогрева счетчика определяем его номинальную постоянную по формуле (134). После прогрева счетчика нагрузочными реостатами  $r_1$  и  $r_2$  по образцовому ваттметру устанавливаем номинальную нагрузку (если опыт производится по схеме рис. 84, а, то нагрузка устанавливается по образцовому амперметру  $A_0$ ,  $I = I_n$ ) и отсчитываем число оборотов  $N$  диска. Если имеется секундомер, то опыт проводится одним наблюдателем следующим образом. При появлении метки, имеющейся на диске счетчика, наблюдатель нажимает головку секундомера и начинает отсчитывать число оборотов, считая «ноль» (а не «один», как часто делают ошибочно), «один», «два» и т. д.

Счет числа оборотов следует продолжать до тех пор, пока стрелка секундомера не начнет приближаться к заданному времени (или не будет получено заданное число оборотов диска); в этом случае наблюдатель досчитывает до ближайшего целого числа оборотов счетчика и останавливает секундомер. Если секундомера нет, то поверку счетчика производят по часам с секундной стрелкой. В этом случае опыт проводят два наблюдателя один из них считает число оборотов, другой отсчитывает время по секундной стрелке часов. Счет числа оборотов и времени должен производиться по сигналам, которые дает первый наблюдатель в начале и в конце опыта. Для каждой нагрузки опыт необходимо проделать два раза и за действительное время принимать среднее арифметическое двух отсчетов, полученных по секундомеру. Поддерживая номинальное напряжение на зажимах цепи, повторяем опыт для нагрузки (тока) в 75, 50, 20,

Таблица 21

№ эл/п	Измерено								Вычислено						Примечание
	$U$		$I$		$P$		$t$	$N$	$W_1$	$W_2$	$W_{сч}$	$C_n$	$C$	$\gamma$	
	$C_V =$		$C_A =$		$C_W =$		сек	оборотов	квт·ч	квт·ч	квт·ч	вт·сек об	вт·сек об	‰	
	дел.	в	дел.	а	дел.	вт									
1															
2															
3															
4															
5															
6															

10 и 5% от номинальной. При каждом изменении тока (нагрузки) записываем показания приборов в табл. 21.

В конце опыта записываем показания счетчика  $W_2$ . Расход энергии в цепи равен:

$$W_{\text{сч}} = W_1 - W_2. \quad (137)$$

Действительная постоянная счетчика для разных нагрузок определяется по формуле

$$C = \frac{Pt}{N}, \quad (138)$$

где  $P$  — мощность, измеряемая образцовым ваттметром,

$N$  — число оборотов диска счетчика за время  $t$  сек.

Если опыт производится по схеме рис. 84, а, то действительная постоянная счетчика определяется по формуле

$$C = \frac{UIt}{N}, \quad (139)$$

где  $U$  — напряжение, показываемое образцовым вольтметром;

$I$  — ток, показываемый образцовым амперметром.

На основании полученных данных строим нагрузочную кривую (кривую погрешностей) счетчика  $\gamma\% = f(I\%)$ , как изображено на рис. 85.



Рис. 85. Нагрузочная кривая (кривая погрешностей) индукционного счетчика

**Проверка счетчика при номинальных напряжении и частоте,  $\cos \varphi = 0,5$  и различных нагрузках.** Чтобы выяснить влияние коэффициента мощности на работу счетчика, следует определить погрешности при номинальном напряжении, номинальной частоте,  $\cos \varphi = 0,5$  ( $\varphi = +60^\circ$ , т. е. для индуктивной нагрузки) и различных значениях тока (нагрузки) в пределах от 10 до 100% (10, 20, 50 и 100%) номинального. Если включить рубильник  $P$  (рис. 84, в), а переключатель  $\Pi_1$  поставить в положение 2, то последовательная цепь будет питаться от напряжения  $U_{AC}$ , а параллельная цепь счетчика — от напряжения  $U_{AB}$ . На рис. 86 показана векторная диаграмма для схемы рис. 84, в, из которой



видно, что вектор напряжения  $\overline{U}_{AB}$  опережает на угол  $\varphi=60^\circ$  вектор напряжения  $\overline{U}_{AC}$ .

Вектор тока  $\overline{I}$  совпадает по фазе с вектором напряжения  $\overline{U}_{AC}$ , так как нагрузка счетчика чисто активная. Следовательно, мы имеем положительный сдвиг фаз между током в последовательной цепи счетчика и напряжением, приложенным к его параллельной цепи, равный  $60^\circ$ , т. е.  $\cos \varphi=0,5$ . В данном

случае опыт и подсчет действительной постоянной  $S$  счетчика и относительной погрешности производится так же, как и при  $\cos \varphi=1$ . Относительные погрешности при этих условиях согласно ГОСТ 6570—60 не должны превышать указанных в табл. 20 значений.

**Определение чувствительности счетчика.** Обычный амперметр заменяется более чувствительным амперметром, а вместо реостатов  $r_1$  и  $r_2$  следует включить реостат с очень большим сопротивлением (например, реостат с сопротивлением 1000 ом, который в начале опыта должен быть полностью включен). Опыт производится следующим образом. Включив

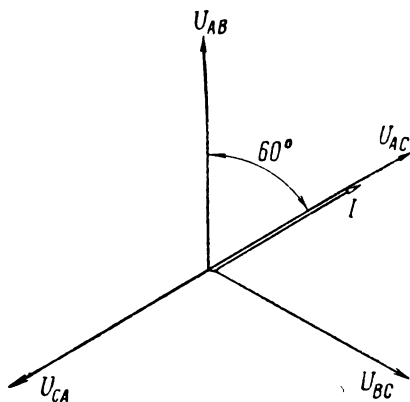


Рис. 86. Векторная диаграмма, поясняющая получение сдвига фаз в  $60^\circ$  при испытании однофазного индукционного счетчика

рубильник  $P$  (если опыт производится по схеме рис. 84, в, то переключатель  $\Pi_1$  ставим в положение 1), делителем напряжения  $D$  (или автотрансформатором) устанавливаем номинальное напряжение счетчика. Затем постепенно выводим сопротивление реостата до тех пор, пока диск счетчика не начнет медленно (безостановочно) вращаться. Показания приборов записываем в табл. 22. По формуле (136) определяем чувствительность счетчика.

Т а б л и ц а 22

№ п/п	Измерено				Вычислено	Примечание
	$P_{\min}$		$I_{\min}$		$S$	
	$C_W =$		$C_A =$		$\%$	
	дел.	вт	дел.	а		
1						

**Определение самохода счетчика.** Согласно ГОСТ 6570—60 при отсутствии тока в последовательной цепи счетчика (при разомкнутой последовательной цепи) и при напряжении на зажимах параллельной цепи от 80 до 110% от номинального диск счетчика не должен вращаться, или же, медленно двигаясь, останавливается при появлении красной метки в окошечке крышки. Не изменяя схемы, при которой определялась чувствительность, следует отсоединить последовательную цепь счетчика, а делителем напряжения  $D$  (или автотрансформатором) установить сначала напряжение на зажимах параллельной цепи счетчика, равное 80% от номинального, а затем равное 110% от номинального. Если в обоих случаях диск счетчика не вращается, то счетчик не имеет самохода.

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Ознакомиться с устройством индукционного счетчика.
3. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 84.
4. Определить действительную постоянную счетчика  $C$  при номинальном напряжении и различных значениях тока (нагрузки), т. е. при токе 100, 75, 50, 20, 10 и 5% от номинального, а также найти номинальную постоянную  $C_n$  счетчика.
5. Определить погрешности счетчика.
6. По данным опыта и подсчета (согласно табл. 21) построить нагрузочную кривую (кривую погрешностей) счетчика.
7. Выяснить влияние коэффициента мощности на работу счетчика, т. е. произвести опыт при номинальном напряжении, номинальной частоте,  $\cos \varphi = 0,5$  и различных значениях тока — 100, 50, 20 и 10% от номинального.
8. Определить чувствительность счетчика.
9. Определить самоход счетчика.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните устройство и принцип действия счетчика индукционной системы.
  2. Нарисуйте схему включения однофазного счетчика.
  3. Что называется передаточным числом счетчика?
  4. Дайте определение номинальной и действительной постоянных счетчика.
  5. Как найти номинальную постоянную  $C_n$  счетчика?
  6. Почему номинальная постоянная счетчика остается неизменной?
  7. Напишите формулу действительной постоянной счетчика.
  8. Почему действительная постоянная  $C$  при различных режимах работы счетчика не остается неизменной?
  9. Что называется относительной погрешностью счетчика?
  10. Что называется чувствительностью счетчика?
  11. Что такое самоход счетчика?
  12. Каково назначение постоянного магнита в счетчике?
-

## Глава V

### ТРЕХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

#### РАБОТА № 20

#### СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ

#### Цель работы

Целью работы является опытная проверка основных соотношений для цепи трехфазного тока при соединении приемников звездой как для симметричной (равномерной), так и для несимметричной (неравномерной) нагрузки фаз, а также исследование влияния нейтрального (нулевого) провода на величину фазных напряжений приемников энергии.

#### Общие сведения

*Трехфазной системой электрических цепей* называется система, состоящая из трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные э. д. с. одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга на  $1/3$  периода и создаваемые общим источником электрической энергии. Отдельные электрические цепи, входящие в состав трехфазной системы, называют *фазами*.

Трехфазный ток получил широкое применение, так как трехфазная система по сравнению с однофазной имеет следующие преимущества:

1) одновременное действие токов трехфазной системы создает вращающееся магнитное поле (на этом основано устройство трехфазных асинхронных двигателей);

2) при передаче одной и той же мощности при одинаковом напряжении на зажимах генератора и при одинаковой потере мощности расход цветного металла на провода в трехфазной установке составляет 75% от расхода металла в однофазной установке;

3) можно иметь в одной установке два напряжения (при четырехпроводной цепи трехфазного тока).

На рис. 87 схематически изображен двухполюсный генератор трехфазного тока. На внутренней поверхности статора (неподвижной части генератора) расположены три обмотки (фазы)  $A-X$ ,  $B-Y$  и  $C-Z$ , сдвинутые в пространстве друг относительно друга на  $120^\circ$ . Согласно ГОСТ начала фаз обозначаются буквами  $A$ ,  $B$  и  $C$ , а концы фаз — буквами  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . На роторе (вращающейся части генератора) расположена обмотка возбуждения, к которой подводится постоянный ток от сети (или выпрямителя) или специального генератора постоянного тока, посаженного на один вал с генератором переменного тока, называемого *возбудителем*. При вращении ротора генератора первичным двигателем\* (паровой турбиной, гидротурбиной и т. п.) вследствие пересечения магнитным полем обмоток статора в них будут индуцироваться синусоидальные э. д. с. Если за начало отсчета времени примем момент, когда э. д. с. первой фазы, или просто фазы  $A$ , проходит через нуль и становится положительной (рис. 88), то мгновенные значения э. д. с., индуцируемых в фазах  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , будут соответственно равны:

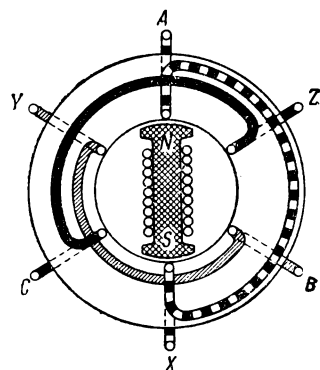


Рис. 87. Схема трехфазного генератора

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin (\omega t - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin (\omega t - 240^\circ), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $E_m$  — одинаковая для всех фаз амплитуда э. д. с.

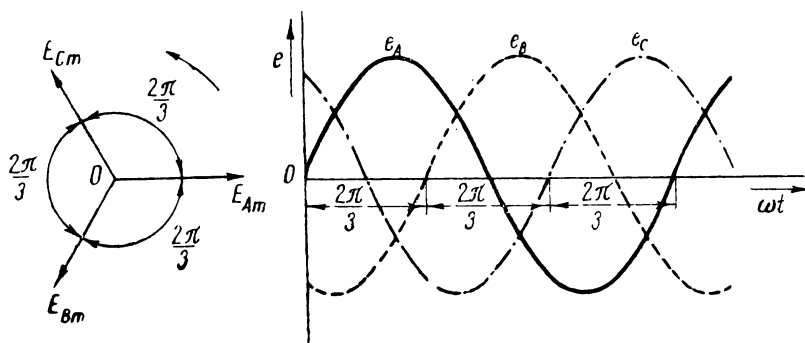


Рис. 88. Векторная диаграмма и графики э. д. с. трехфазного генератора

\* Обычно в электротехнической лаборатории первичным двигателем является двигатель постоянного тока параллельного возбуждения.

*Симметричной трехфазной системой синусоидальных э. д. с. (напряжений, токов)* называется такая система, в которой э. д. с. (напряжения, токи) всех фаз равны по величине и сдвинуты по фазе друг относительно друга на  $120^\circ$ .

Если трехфазная система э. д. с. (напряжений, токов) не удовлетворяет хотя бы одному из указанных условий симметрии, то она называется несимметричной. Из рис. 88 видно, что в любой момент алгебраическая сумма трех э. д. с. равна нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0. \quad (2)$$

Если каждая фаза генератора включена на свой приемник энергии (рис. 89) и не имеет электрической связи с другими фазами, то такая система называется *несвязанной трехфазной*

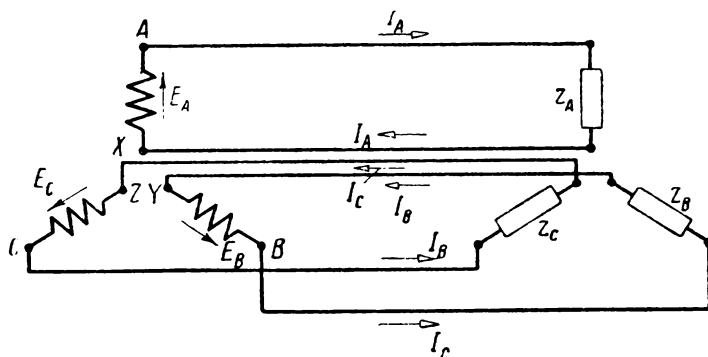


Рис. 89. Несвязанная трехфазная система электрических цепей

*системой электрических цепей* или *несвязанной трехфазной цепью*. Основным недостатком несвязанной трехфазной цепи является большое число проводов, идущих от генератора к приемникам, поэтому она не применяется.

**Четырехпроводная цепь трехфазного тока.** Число проводов можно уменьшить, если три обратных провода заменить одним общим проводом (рис. 90), называемым *нейтральным* или *нулевым проводом*. В этом случае мы получаем четырехпроводную связанную\* трехфазную систему или трехфазную четырехпроводную цепь, соединенную звездой.

*Звездой* называется такое соединение, когда концы или начала фаз (обмоток) соединены в одну точку, называемую *нейтральной (нейтралью)* или *нулевой точкой*. Напряжения между началами и концами фаз генератора или приемника или напряжения между каждым из линейных проводов и нейтральной точкой называются *фазными напряжениями* и обозначаются  $U_A, U_B$  и  $U_C$ . Напряжения между линейными проводами или

\* В дальнейшем слово «связанная» будем опускать.

началами фаз называются *линейными напряжениями* и обозначаются  $U_{AB}, U_{BC}$  и  $U_{CA}$ . *Линейными токами* называются токи, проходящие по линейным проводам; они обозначаются  $I_A, I_B$  и  $I_C$ . *Фазными токами* называют токи, проходящие по фазам. При соединении звездой линейный ток  $I_L$  равен фазному току  $I_\phi$ ,

$$I_L = I_\phi, \quad (3)$$

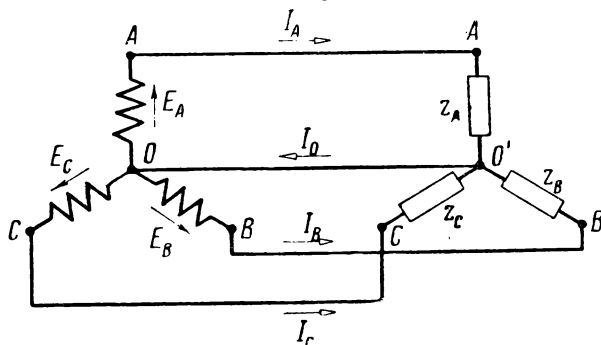


Рис. 90. Трехфазная четырехпроводная цепь, соединенная звездой

а линейные напряжения равны геометрическим разностям соответствующих фазных напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_{AB} &= \bar{U}_A - \bar{U}_B; \\ \bar{U}_{BC} &= \bar{U}_B - \bar{U}_C; \\ \bar{U}_{CA} &= \bar{U}_C - \bar{U}_A. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

На рис. 91 показано графическое определение линейных напряжений посредством векторной диаграммы. Из этой векторной диаграммы видно, что для получения линейных напряжений  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$  необходимо произвести геометрическое сложение векторов  $\bar{U}_A$ ,  $\bar{U}_B$  и  $\bar{U}_C$  соответственно с векторами  $-\bar{U}_B$ ,  $-\bar{U}_C$  и  $-\bar{U}_A$ , равными и противоположными векторам  $\bar{U}_B$ ,  $\bar{U}_C$  и  $\bar{U}_A$ .

Векторы линейных напряжений проще можно определить, если соединить прямой линией концы векторов фазных напряжений, как показано на рис. 92. Эта векторная диаграмма напряжений носит название *топографической диаграммы напряжений*. Три вектора фазных напряжений образуют звезду фазных напряжений. Звезда линейных напряжений\* опережает звезду фазных напряжений на угол  $30^\circ$  (см. рис. 91). Найдем соотно-

\* При симметричной системе напряжений.

шение между фазными и линейными напряжениями в схеме звезда, считая, что

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi \text{ и } U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\lambda.$$

Опустив перпендикуляр из точки  $O$  на вектор линейного напряжения (рис. 92), получим прямоугольный треугольник  $ODA$ , из которого имеем:

$$\frac{U_\lambda}{2} = \frac{U_{AB}}{2} = U_A \cos 30^\circ = U_\phi \cos 30^\circ = U_\phi \frac{\sqrt{3}}{2},$$

откуда

$$U_\lambda = \sqrt{3} U_\phi, \quad (5)$$

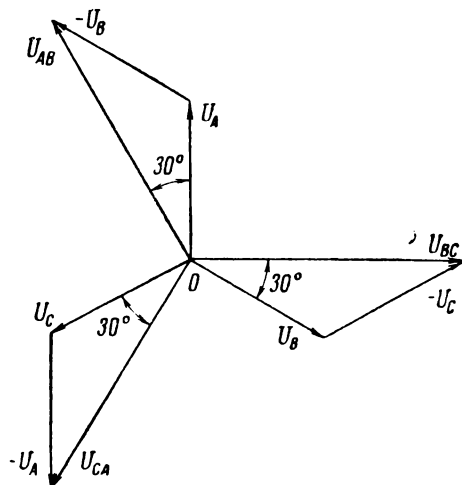


Рис. 91. Векторная диаграмма напряжений при соединении звездой

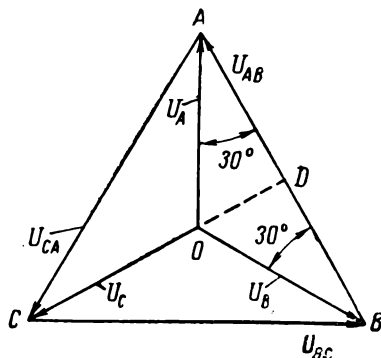


Рис. 92. Топографическая диаграмма напряжений при соединении звездой

т. е. линейное напряжение больше фазного напряжения в  $\sqrt{3}$  раз. Уравнение (5) будет справедливо как для трехфазной четырехпроводной цепи, так и для трехфазной трехпроводной цепи, т. е. без нейтрального провода.

Фазные токи приемников определяются так же, как в однофазных цепях:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= \frac{U_A}{z_A} = \frac{U_A}{\sqrt{r_A^2 + x_A^2}}; & I_B &= \frac{U_B}{z_B} = \frac{U_B}{\sqrt{r_B^2 + x_B^2}}; \\ I_C &= \frac{U_C}{z_C} = \frac{U_C}{\sqrt{r_C^2 + x_C^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $z_A, z_B$  и  $z_C$  — полные сопротивления отдельных фаз приемников;

$r_A, r_B, r_C, x_A, x_B$  и  $x_C$  — активные и реактивные сопротивления отдельных фаз приемников. Углы сдвига фаз между фазными напряжениями и фазными токами можно определить из следующих формул:

$$\cos \varphi_A = \frac{r_A}{z_A}; \cos \varphi_B = \frac{r_B}{z_B}; \cos \varphi_C = \frac{r_C}{z_C}, \quad (7)$$

где  $\cos \varphi_A, \cos \varphi_B$  и  $\cos \varphi_C$  — коэффициенты мощности отдельных фаз приемников.

Если приемники обладают только активным сопротивлением (лампы накаливания), то  $z_A = r_A, z_B = r_B, z_C = r_C$ ,

$$\cos \varphi_A = \cos \varphi_B = \cos \varphi_C = \cos \varphi = 1.$$

Ток в нейтральном проводе равен геометрической сумме токов отдельных фаз:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C. \quad (8)$$

На рис. 93 показано графическое определение тока в нейтральном проводе для чисто активной неравномерной нагрузки фаз.

Сечение нейтрального провода зависит от неравномерности нагрузки фаз, но обычно его берут равным 50% от сечения линейного провода, так как ток в нейтральном проводе меньше, чем токи в линейных проводах. При наличии нейтрального провода и несимметричной нагрузке фаз напряжения на фазах приемников остаются неизменными и равными напряжениям на соответствующих фазах генератора, если пренебречь сопротивлением проводов линии и нейтрального провода. Если же случайно произойдет обрыв нейтрального провода, то фазные токи при несимметричной нагрузке фаз изменятся и установятся такими, чтобы их сумма была равна нулю. Вследствие этого напряжения на отдельных фазах будут различными, т. е. на наиболее нагруженной фазе (с меньшим сопротивлением) напряжение уменьшится, а на других фазах увеличится по сравнению с номинальным значением фазного напряжения. Поэтому не рекомендуется ставить рубильник и предохранитель в нейтральный провод. Если же произойдет

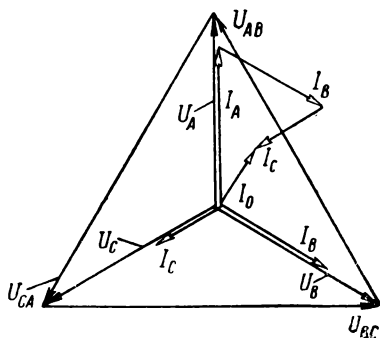


Рис. 93. Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов четырехпроводной цепи для активной несимметричной (неравномерной) нагрузки фаз



обрыв одного из линейных проводов, то эта фаза отключается, а две другие фазы продолжают нормально работать от трехфазной системы при наличии нейтрального провода, а при отсутствии его происходит перераспределение напряжений на фазах пропорционально их сопротивлениям.

### Симметричная (равномерная) нагрузка фаз в трехпроводной цепи трехфазного тока

При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке фаз ток в нейтральном проводе равен нулю (рис. 94), а

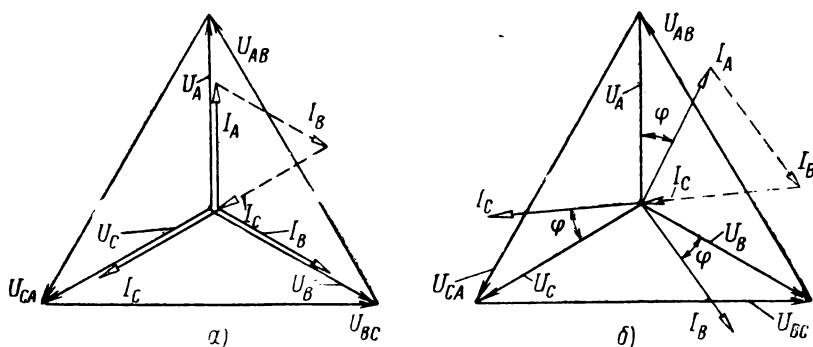


Рис. 94. Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов:

*а* — для чисто активной симметричной (равномерной) нагрузки фаз, *б* — для индуктивной симметричной (равномерной) нагрузки фаз

поэтому нейтральный провод не нужен. В этом случае мы получим трехпроводную трехфазную систему или трехпроводную цепь трехфазного тока (рис. 95). Так как при симметричной

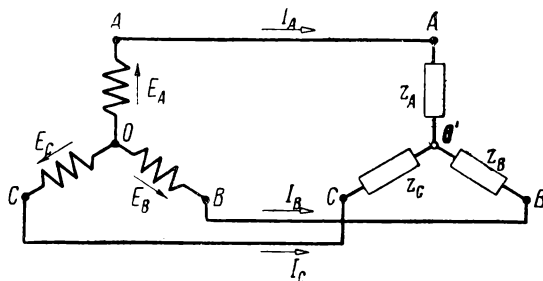


Рис. 95. Трехпроводная цепь трехфазного тока

нагрузке фаз напряжение между нейтральными точками генератора и приемника  $O$  и  $O'$  равно нулю, то каждую фазу систе-

мы можно рассматривать как замкнутый контур. В этом случае расчет трехфазной системы при симметричной нагрузке фаз сводится к расчету одной лишь фазы. Если задано линейное напряжение на зажимах приемника энергии и его сопротивление, то сначала определяем фазное напряжение

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}, \quad (9)$$

а затем фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{z} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{r^2 + x^2}}, \quad (10)$$

где  $z$ ,  $r$  и  $x$  — полное, активное и реактивное сопротивления одной фазы приемника энергии.

Коэффициент мощности приемника энергии

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}. \quad (11)$$

### **Несимметричная (неравномерная) нагрузка фаз в трехпроводной цепи трехфазного тока**

При несимметричной нагрузке фаз напряжения на фазах приемников будут неравны, тогда соотношение (5) между линейным и фазным напряжениями нарушится, а соотношение (3) останется справедливым и для этого случая. Если сопротивление  $r_A$  фазы  $A$  (первой фазы) уменьшим, то ток в ней возрастет и напряжение уменьшится, а напряжение на двух других фазах увеличится (рис. 96). При уменьшении сопротивления  $r_A$  фазы  $A$  до нуля, т. е. если мы замкнем ее накоротко (рис. 97), то напряжение на фазе  $A$  станет равным нулю, а напряжение на двух других фазах будет равно линейному (рис. 98). Если же сопротивление  $r_A$  фазы  $A$  будем увеличивать, то напряжение на этой фазе возрастет, а на двух других фазах упадет (рис. 99). При  $r_A = \infty$  [это соответствует обрыву цепи фазы  $A$  или перегоранию предохранителя (рис. 100)] напряжение на двух других фазах при одинаковой нагрузке их будет равно половине линейного напряжения (рис. 101)  $U_B' = U_C' = \frac{U_{\text{л}}}{2}$ . Нако-

нец, может быть такой случай, когда сопротивления отдельных фаз будут неодинаковыми ( $r_A \neq r_B \neq r_C$ ), в этом случае напряжения на фазах будут различными (рис. 102). Отсюда мы приходим к следующему выводу, что уменьшение или увеличение сопротивления отдельных фаз вызывает перераспределение всех фазных напряжений. Следует еще раз отметить, что соединение звездой без нейтрального (нулевого) провода при несимметричной нагрузке фаз обычно не применяется.

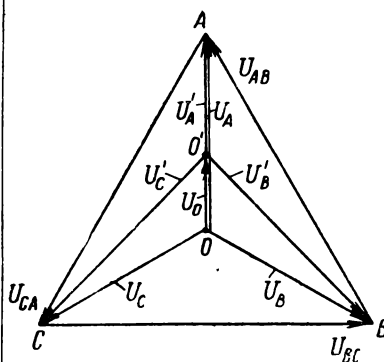


Рис. 96. Топографическая диаграмма напряжений (к схеме рис. 95) при  $r_A < r_B = r_C$

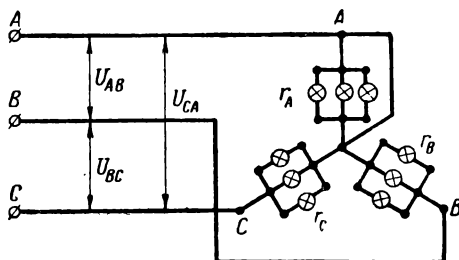


Рис. 97. Соединение ламп накаливания звездой при замыкании накоротко фазы А

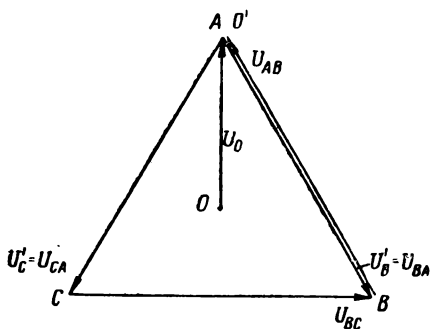


Рис. 98. Топографическая диаграмма напряжений (к схеме рис. 97) при  $r_A = 0$  и  $r_B = r_C$

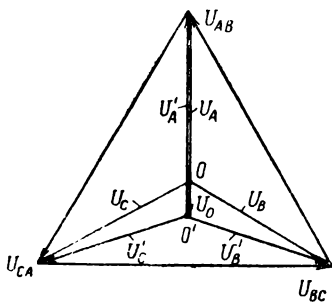


Рис. 99. Топографическая диаграмма напряжений при  $r_A > r_B = r_C$

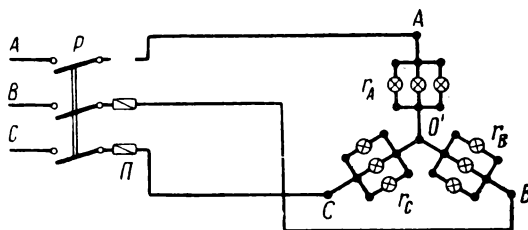


Рис. 100. Соединение ламп накаливания звездой при перегорании предохранителя (обрыве) фазы  $A$

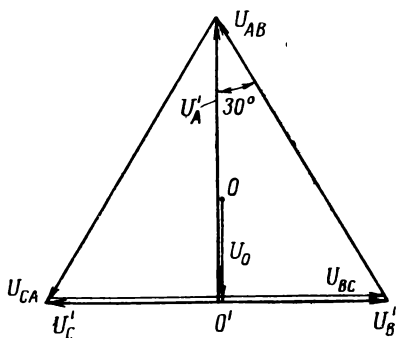


Рис. 101. Топографическая диаграмма напряжений (к схеме рис. 100) при  $r_A = \infty$  (т. е. при обрыве цепи фазы  $A$ ) и  $r_B = r_C$

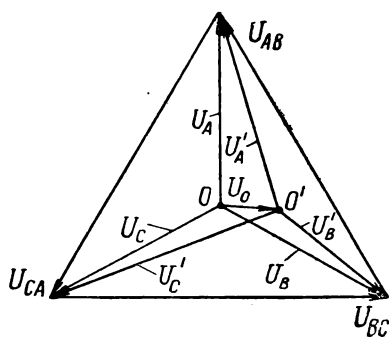


Рис. 102. Топографическая диаграмма напряжений (к схеме рис. 100) при несимметричной (неравномерной) нагрузке фаз

Активная мощность трехфазного тока при несимметричной нагрузке фаз равна сумме активных мощностей всех фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C, \quad (12)$$

где  $P_A, P_B$  и  $P_C$  — активные мощности отдельных фаз;  
 $U_A, U_B$  и  $U_C$  — фазные напряжения;  
 $I_A, I_B$  и  $I_C$  — фазные токи;  
 $\cos \varphi_A, \cos \varphi_B, \cos \varphi_C$  — коэффициенты мощности отдельных фаз.

Так как при симметричной нагрузке фаз и симметричной системе напряжений  $U_A = U_B = U_C = U_\phi$ ,  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\Delta$ ,  $\cos \varphi_A = \cos \varphi_B = \cos \varphi_C = \cos \varphi$ , то активная мощность трехфазного тока равна:

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi. \quad (13)$$

Так как при соединении звездой

$$U_\phi = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}} \text{ и } I_\phi = I_\Delta,$$

то

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3 \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}} I_\Delta \cos \varphi = \sqrt{3} U_\Delta I_\Delta \cos \varphi. \quad (14)$$

### Испытание соединения приемников звездой

Испытание соединения звездой для чисто активной нагрузки проводится по одной из схем рис. 103. В этих схемах  $P$  — трехполюсный рубильник;  $r_A, r_B$  и  $r_C$  — ламповые (или проволочные) реостаты;  $A_A, A_B$  и  $A_C$  — амперметры, измеряющие линейные токи;  $A_0$  — амперметр, измеряющий ток в нейтральном проводе;  $V$  — вольтметр со шупами, измеряющий поочередно фазные и линейные напряжения. Напряжения между нейтральными точками  $O$  и  $O'$  измеряются вольтметром со шкалой на небольшой предел измерения. Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , устанавливаем симметричную (равномерную) нагрузку фаз, при которой амперметры  $A_A, A_B$  и  $A_C$  должны давать одинаковые показания. Записываем показания приборов в табл. 23. Напряжение  $U_0$  измеряется между нейтральными (нулевыми) точками источника питания и приемника энергии; в данном случае следует убедиться в том, что показание вольтметра равно нулю, т. е. напряжение  $U_0 = 0$ . Затем, не изменяя нагрузки фаз, включаем рубильник  $P_0$  и убеждаемся, что показание амперметра  $A_0$  будет равно нулю.

После этого, выключив рубильник  $P_0$ , при симметричной нагрузке фаз замыкаем накоротко фазу  $A$ , соединив начало и

конец ее (в двух других фазах нагрузки не меняем), и записываем показания приборов в табл. 23. В этом опыте напряжение  $U_0$  не измеряется. Затем, отсоединив проводник, замыкавший фазу накоротко, уменьшаем нагрузку этой фазы и записываем показания приборов как при выключенном рубильнике\*  $P_0$ , так и при включенном рубильнике  $P_0$ . После этого выключаем все лампы накаливания в фазе  $A$  и снова записываем показания приборов при выключенном и включенном рубильнике  $P_0$ .

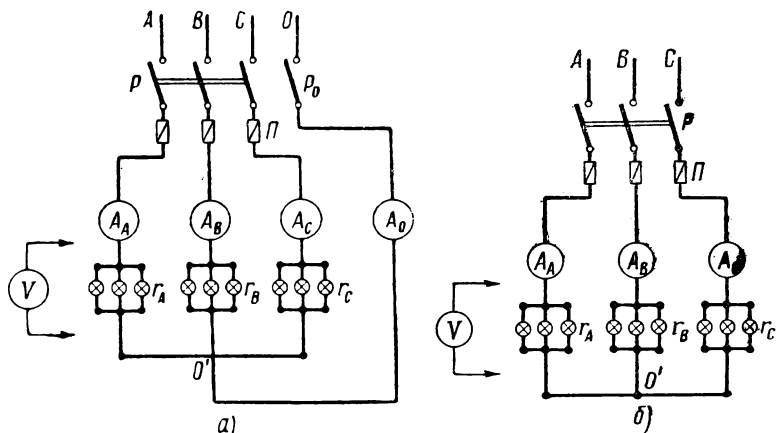


Рис. 103. Схемы для испытания цепи трехфазного тока при соединении ламп накаливания звездой:

$a$  — при наличии нейтрального провода,  $б$  — без нейтрального провода

Затем устанавливаем неравномерную нагрузку во всех фазах и записываем показания приборов при выключенном и включенном рубильнике  $P_0$ . Зная фазные напряжения нагрузки и фазные токи, на основании закона Ома можно определить сопротивления фаз  $r_A$ ,  $r_B$  и  $r_C$ . На основании полученных данных опыта (согласно табл. 23) построим векторные диаграммы напряжений и токов. Построение векторной диаграммы при  $r_A < r_B = r_C$  (рис. 96) производится следующим образом. Сначала строим треугольник линейных напряжений, для чего откладываем вектор напряжения  $U_{BC}$ , и из начала и конца этого вектора делаем засечки радиусами  $BA$  и  $CA$ , равными линейным напряжениям  $U_{AB}$  и  $U_{CA}$ . Затем из вершин треугольника  $A$ ,  $B$  и  $C$  производим засечки радиусами  $AO$ ,  $BO$  и  $CO$ , равными (в том же масштабе) фазным напряжениям  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$  источника питания. Соединив точку  $O$  с вершинами треугольника, мы

\* В этом опыте измеряется напряжение  $U_0$ .

Таблица 23

[illegible]

№ п/п	Режим нагрузки	Измерено												Вычислено					Примечание
		$C_V =$						$U_0$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_0$	$\frac{U_d}{U_\phi}$	$r_A$	$r_B$	$r_C$	$P$		
		дсл.	в	дсл.	в	дсл.	в	дсл.	в	дсл.	в	дсл.	в	дсл.	в	дсл.	в	дсл.	в
4	Симметричная—обрыв линейного провода без нейтрального провода																		
5	Несимметричная без нейтрального провода																		
6																			
7	Несимметричная с нейтральным проводом																		
8																			



получим векторы фазных напряжений источника питания. Радиусами  $AO'$ ,  $BO'$  и  $CO'$  делаем засечки, равные фазным напряжениям приемника и получаем точку  $O'$ . Соединив  $O'$  с точками  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , получим  $U'_A$ ,  $U'_B$ ,  $U'_C$  приемника. Из точки  $O'$  по направлению векторов фазных напряжений приемника откладываем векторы фазных токов (на рис. не показаны).

Аналогичным образом строят и другие векторные диаграммы напряжений и токов.

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 103, *a* или 103, *б*.
3. Установить симметричную нагрузку фаз без нейтрального провода и записать показания приборов.
4. То же с нейтральным проводом.
5. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 23) убедиться в справедливости формул (3) и (5).
6. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.
7. Установить симметричную нагрузку фаз. Затем произвести опыт короткого замыкания фазы  $A$ , соединив проводником начало и конец ее (в двух других фазах нагрузку не меняем). В этом опыте нейтральный провод не должен быть включен (рубильник  $P_0$  разомкнут) и напряжение  $U_0$  не измеряется.
8. Отсоединить проводник, замыкавший фазу накоротко, уменьшить нагрузку этой фазы (в двух других фазах нагрузку не менять,  $r_B = r_C$ ) и записать показания приборов при выключенном и включенном рубильнике  $P_0$ .
9. Построить векторную диаграмму напряжений и токов для случая, когда рубильник  $P_0$  разомкнут.
10. Выключить лампы в фазе  $A$ , а в двух других фазах должна быть одинаковая нагрузка, и записать показания приборов при выключенном и включенном рубильнике  $P_0$ .
11. Построить векторную диаграмму напряжений и токов для случая, когда выключен рубильник  $P_0$ .
12. Установить несимметричную нагрузку во всех фазах и записать показания приборов при выключенном и включенном рубильнике  $P_0$ .
13. Построить векторные диаграммы напряжений и токов при выключенном и включенном рубильнике  $P_0$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется соединением звездой приемников энергии?
2. Что называется фазным и линейным напряжениями?
3. Что называется фазным и линейным токами?
4. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями.

а также между линейными и фазными токами при соединении звездой при симметричной нагрузке фаз?

5. Каково назначение нейтрального (нулевого) провода?

6. К чему приводит обрыв или отсутствие нейтрального провода при несимметричной нагрузке фаз?

7. Почему в нейтральный провод не ставят предохранитель?

8. Чему равен ток в нейтральном проводе при несимметричной нагрузке фаз?

9. Чему будут равны напряжения на фазах при симметричной нагрузке фаз, если произойдет обрыв фазы  $A$ ?

10. Чему будут равны напряжения на фазах при симметричной нагрузке фаз, если фазу  $A$  замкнуть накоротко?

11. Начертите векторную диаграмму напряжений и токов для симметричной чисто активной нагрузки фаз?

12. Начертите векторную диаграмму напряжений и токов для четырехпроводной цепи для несимметричной чисто активной нагрузки фаз.

## РАБОТА № 21

### СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

#### Цель работы

Целью работы является опытная проверка основных соотношений для цепи трехфазного тока при соединении приемников треугольником как для симметричной (равномерной), так и для несимметричной (неравномерной) нагрузки фаз.

#### Общие сведения

*Треугольником* называется такое соединение, когда начало фазы  $A$  (первой фазы) соединяется с концом фазы  $B$  (второй фазы), начало фазы  $B$  — с концом фазы  $C$  (третьей фазы), начало фазы  $C$  — с концом фазы  $A$  \*. К точкам соединения начал

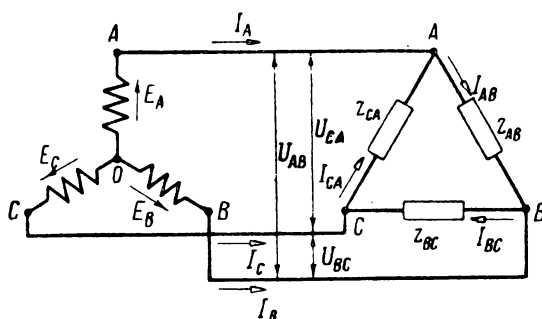


Рис. 104. Соединение приемников треугольником

и концов фаз присоединяют линейные провода. На рис. 104 показана схема соединения приемников энергии треугольником, а

\* Или конец фазы  $A$  соединяется с началом фазы  $B$ , конец фазы  $B$  — с началом фазы  $C$ , конец фазы  $C$  — с началом фазы  $A$ .

соединение обмоток (фаз) генератора звездой. Следует отметить, что обмотки как генераторов, так и трансформаторов могут быть соединены звездой или треугольником. Положительные направления линейных токов  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_C$  приняты от генератора к приемнику, а фазных токов  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$  и  $I_{CA}$  — от  $A$  к  $B$ , от  $B$  к  $C$  и от  $C$  к  $A$ . При соединении треугольником, как это видно из рис. 104, линейное напряжение  $U_\Delta$  равно фазному напряжению  $U_\Phi$ :

$$U_\Delta = U_\Phi. \quad (15)$$

Следовательно, линейные напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$  в данном случае будут равны фазным напряжениям. Линейные токи не равны фазным токам. Соотношения между линейными и фазными токами найдем, применяя первый закон Кирхгофа для узлов  $A$ ,  $B$  и  $C$  (рис. 104),

$$\bar{I}_A + \bar{I}_{CA} = \bar{I}_{AB}; \quad \bar{I}_B + \bar{I}_{AB} = \bar{I}_{BC}; \quad \bar{I}_C + \bar{I}_{BC} = \bar{I}_{CA},$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_A &= \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}; \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}; \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}; \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

т. е. *линейные токи равны геометрическим разностям соответствующих фазных токов*. Из этих формул видно, что геометрическая сумма линейных токов равна нулю:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0. \quad (17)$$

**Симметричная (равномерная) нагрузка фаз.** На рис. 105 показана векторная диаграмма напряжений и токов для симметричной (равномерной) нагрузки фаз, т. е.

$$\begin{aligned} r_{AB} &= r_{BC} = r_{CA} = r; \quad x_{AB} = x_{BC} = x_{CA} = x; \\ z_{AB} &= z_{BC} = z_{CA} = z \quad \text{и} \quad \varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi. \end{aligned}$$

Иногда строят так называемую топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов, как показано на рис. 106. Фазные токи равны между собой  $I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_\Phi$  и сдвинуты друг относительно друга на  $120^\circ$  (см. рис. 105), а по отношению к фазным напряжениям сдвинуты на одинаковые углы  $\varphi$ . Линейные токи  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_C$  также равны между собой и сдвинуты друг относительно друга на  $120^\circ$ . Звезда линейных токов отстает от звезды фазных токов на  $30^\circ$ . Из рис. 105 видно, что все векторы проведены из одной точки. Опустив перпендикуляр из конца вектора фазного тока  $I_{AB}$  (рис. 106) на век-

тор линейного тока  $\overline{I}_A$ , получим прямоугольный треугольник  $BED$ , из которого имеем:

$$\frac{1}{2} I_L = \frac{I_A}{2} = I_{AB} \cos 30^\circ = I_\phi \cos 30^\circ = I_\phi \frac{\sqrt{3}}{2},$$

откуда

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi, \quad (18)$$

т. е. линейный ток больше фазного тока в  $\sqrt{3}$  раза.

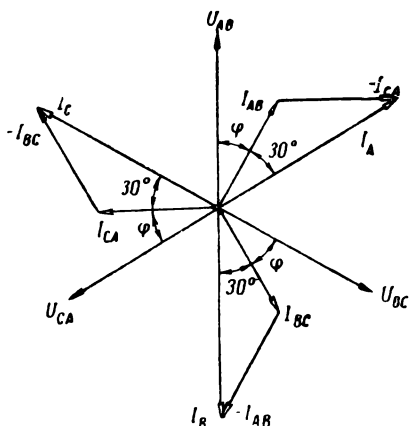


Рис. 105. Векторная диаграмма напряжений и токов для индуктивной симметричной (равномерной) нагрузки фаз при соединении приемников треугольником

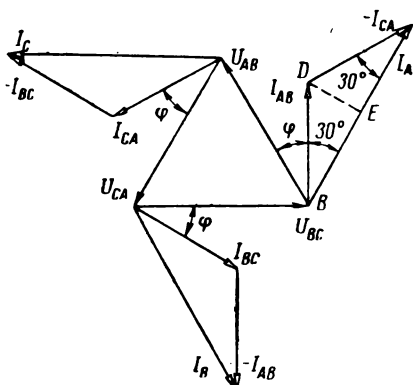


Рис. 106. Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов для индуктивной симметричной (равномерной) нагрузки фаз при соединении приемников треугольником

Фазный ток равен

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{z} = \frac{U_\phi}{\sqrt{r^2 + x^2}}, \quad (19)$$

где  $z$ ,  $r$  и  $x$  — полное, активное и реактивное сопротивления фазы приемника энергии.

Коэффициент мощности приемника энергии

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}. \quad (20)$$

На рис. 107 показана векторная диаграмма напряжений и токов для чисто активной симметричной (равномерной) нагрузки фаз.

**Несимметричная (неравномерная) нагрузка фаз.** При несимметричной нагрузке фаз токи в отдельных фазах равны:

$$\left. \begin{aligned} I_{AB} &= \frac{U_{AB}}{z_{AB}} = \frac{U_{AB}}{\sqrt{r_{AB}^2 + x_{AB}^2}}; \\ I_{BC} &= \frac{U_{BC}}{z_{BC}} = \frac{U_{BC}}{\sqrt{r_{BC}^2 + x_{BC}^2}}; \\ I_{CA} &= \frac{U_{CA}}{z_{CA}} = \frac{U_{CA}}{\sqrt{r_{CA}^2 + x_{CA}^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

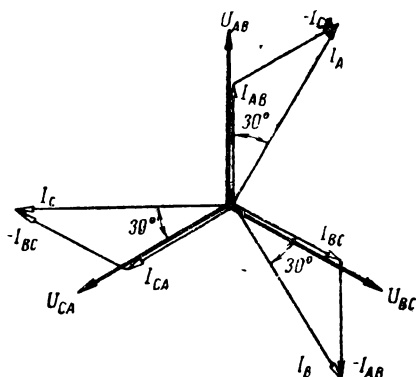


Рис. 107. Векторная диаграмма напряжений и токов для чисто активной симметричной (равномерной) нагрузки фаз при соединении приемников треугольником

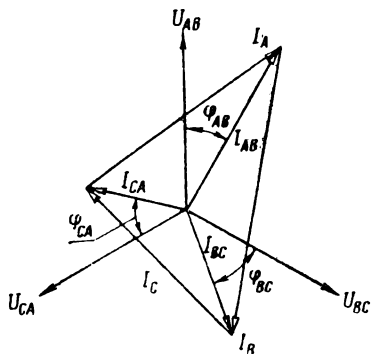


Рис. 108. Векторная диаграмма напряжений и токов для индуктивной несимметричной (неравномерной) нагрузки фаз при соединении приемников треугольником

где  $z_{AB}$ ,  $z_{BC}$ ,  $z_{CA}$ ,  $r_{AB}$ ,  $r_{BC}$ ,  $r_{CA}$ ,  $x_{AB}$ ,  $x_{BC}$  и  $x_{CA}$  — полные, активные и реактивные сопротивления фаз приемников. Коэффициенты мощности отдельных фаз приемников:

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi_{AB} &= \frac{r_{AB}}{z_{AB}}; \\ \cos \varphi_{BC} &= \frac{r_{BC}}{z_{BC}}; \\ \cos \varphi_{CA} &= \frac{r_{CA}}{z_{CA}}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Зная фазные токи  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$ ,  $I_{CA}$  и углы сдвига фаз  $\varphi_{AB}$ ,  $\varphi_{BC}$ ,  $\varphi_{CA}$  между фазными токами и напряжениями, можно графически определить линейные токи  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_C$ , как это показано на рис. 108.

Для чисто активной нагрузки  $z_{AB} = r_{AB}$ ,  $z_{BC} = r_{BC}$ ,  $z_{CA} = r_{CA}$  и фазные токи совпадают по фазе с соответствующими фазными напряжениями (рис. 109). Из векторных диаграмм, изображенных на рис. 108 и 109, видно, что при несимметричной нагрузке всех фаз при неизменных линейных напряжениях фазные токи  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$  и  $I_{CA}$  неодинаковы, благодаря чему и линейные токи  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_C$  также неодинаковы.

### Перегорание предохранителя или обрыв линейного провода.

При перегорании предохранителя в одном из линейных проводов, например в проводе  $A$  (рис. 110), или обрыве этого провода, лампы в фазе  $BC$  будут нормально гореть. Лампы в двух других фазах  $AB$  и  $CA$  будут соединены последовательно и будут находиться под линейным напряжением  $U_{BC}$ . Если сопротивления ламп накаливания этих фаз будут одинаковы, то линейное напряжение  $U_{BC}$  распределится между ними поровну, т. е. лампы накаливания в этих фазах будут гореть в полнакала. В

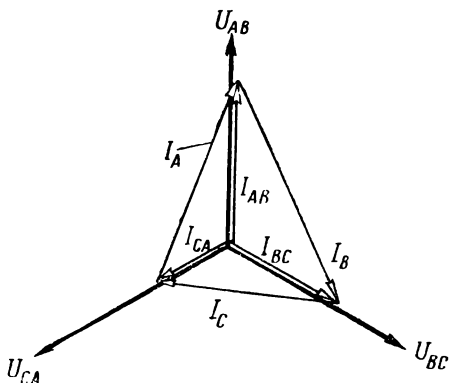


Рис. 109. Векторная диаграмма напряжений и токов для чисто активной несимметричной (неравномерной) нагрузки фаз при соединении приемников треугольником

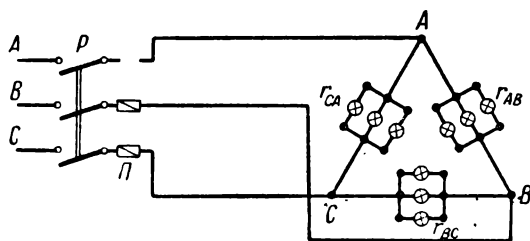


Рис. 110. Соединение ламп накаливания треугольником при перегорании предохранителя (обрыве) линейного провода

этом случае схема треугольника превращается в однофазную разветвленную цепь. Ток в фазах  $AB$  и  $CA$  равен:

$$I_{AB} = I_{CA} = \frac{U_{BC}}{r_{AB} + r_{CA}}. \quad (23)$$

Ток в фазе  $BC$  равен:

$$I_{BC} = \frac{U_{BC}}{r_{BC}}. \quad (24)$$

Напряжения на лампах накаливания

$$U_{AB} = r_{AB} I_{AB}, \quad U_{BC} = r_{BC} I_{BC}, \quad U_{CA} = r_{CA} I_{CA}. \quad (25)$$

Линейный ток

$$I_B = I_C = I_{AB} + I_{BC} = \frac{I_{BC}}{2} + I_{BC} = \frac{3}{2} I_{BC}. \quad (26)$$

**Обрыв фазы при симметричной (равномерной) нагрузке фаз.** Если произойдет обрыв какой-либо фазы (или разгрузка фазы, так как в нашем случае можно выключить все лампы этой фазы), например фазы  $AB$ , то ее сопротивление будет равно бесконечности и ток в ней будет равен нулю ( $I_{AB} = 0$ , рис. 111). Фазные (линейные) напряжения не изменятся.

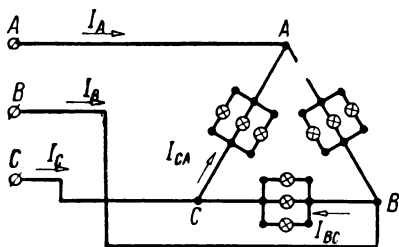


Рис. 111. Соединение ламп накаливания треугольником при обрыве фазы  $AB$

Применяя первый закон Кирхгофа к узлам  $A$ ,  $B$  и  $C$ , получим:

линейный ток в проводе  $A$  равен току в фазе  $CA$  с обратным знаком  $I_A = -I_{CA}$ , знак минус показывает, что фазный ток  $I_{CA}$  должен иметь противоположное указанному на схеме направление;

линейный ток  $I_B$  в проводе  $B$  равен фазному  $I_{BC}$ , и они совпадают по фазе;

линейный ток в проводе  $C$  равен геометрической разности токов в фазах  $BC$  и  $CA$ :

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC} \text{ или } I_C = \sqrt{3} I_{\phi}.$$

### Активная мощность трехфазного тока

Активная мощность трехфазного тока при несимметричной (неравномерной) нагрузке фаз равна сумме активных мощностей всех фаз:

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA} = U_{AB} I_{AB} \cos \varphi_{AB} + U_{BC} I_{BC} \cos \varphi_{BC} + U_{CA} I_{CA} \cos \varphi_{CA}, \quad (27)$$

где  $P_{AB}, P_{BC}$  и  $P_{CA}$  — активные мощности отдельных фаз;  
 $U_{AB}, U_{BC}$  и  $U_{CA}$  — фазные напряжения;  
 $I_{AB}, I_{BC}$  и  $I_{CA}$  — фазные токи;  
 $\cos \varphi_{AB}, \cos \varphi_{BC}$  и  $\cos \varphi_{CA}$  — коэффициенты мощности отдельных фаз.

При симметричной нагрузке фаз и симметричной системе напряжений

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\phi}, \quad I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_{\phi}, \quad \cos \varphi_{AB} = \\ = \cos \varphi_{BC} = \cos \varphi_{CA} = \cos \varphi,$$

активная мощность трехфазного тока равна:

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi. \quad (28)$$

Так как при соединении треугольником

$$U_{\phi} = U_{\text{л}} \quad \text{и} \quad I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}, \quad \text{то} \quad P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3U_{\text{л}} \times \\ \times \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi. \quad (29)$$

### Испытание приемников, соединенных треугольником

Испытание приемников, соединенных треугольником, для чисто активной нагрузки производится по схеме рис. 112. В этой схеме  $P$  — трехполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $r_{AB}, r_{BC}$  и  $r_{CA}$  — ламповые (или проволочные) реостаты;  $A_A, A_B$  и  $A_C$  — амперметры, измеряющие линейные токи;  $A_{AB}, A_{BC}$  и  $A_{CA}$  — амперметры, измеряющие фазные токи;  $V$  — вольтметр со шупами, измеряющий поочередно фазные (линейные) напряжения.

Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , устанавливаем симметричную (равномерную) нагрузку фаз, при которой амперметры  $A_{AB}, A_{BC}$  и  $A_{CA}$  должны давать одинаковые показания. Записываем показания приборов в табл. 24.

Не меняя нагрузки фаз в предыдущем опыте, отсоединяем один из линейных проводов, например провод  $A$ , и записываем показания приборов в табл. 24.

Присоединив линейный провод  $A$ , производим обрыв (в данном случае можно выключить все лампы этой фазы, что равносильно обрыву) какой-либо фазы, например фазы  $AB$ , при этом нагрузка двух фаз должна быть одинаковой, т. е. такой, как в предыдущем опыте. Записываем показания приборов.



Установив симметричную нагрузку фаз, изменяем нагрузку только в одной фазе, например в фазе  $AB$ , а в двух других фазах не изменяем. Записываем показания приборов.

Установив резко несимметричную нагрузку всех фаз, записываем показания приборов.

Зная фазные напряжения нагрузки и фазные токи, можно определить сопротивления фаз по формулам:

$$r_{AB} = \frac{U_{AB}}{I_{AB}}; r_{BC} = \frac{U_{BC}}{I_{BC}}; r_{CA} = \frac{U_{CA}}{I_{CA}}. \quad (30)$$

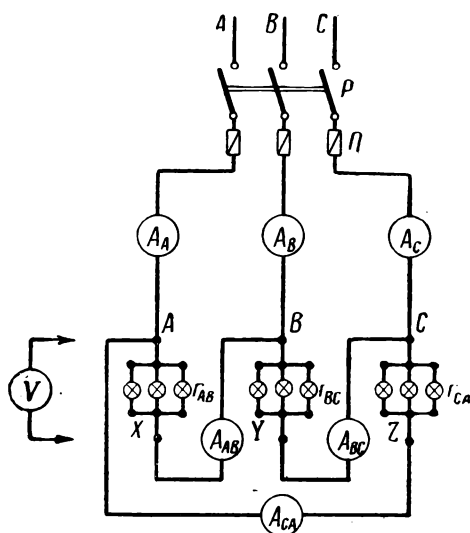


Рис. 112. Схема для испытания цепи трехфазного тока при соединении ламп накаливания треугольником

Активная мощность трехфазного тока при несимметричной и симметричной нагрузках определяется по формулам (27) и (29). Так как нагрузка фаз чисто активная, то в этих формулах коэффициент мощности равен единице. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 24) построить векторные диаграммы напряжений и токов для симметричной и несимметричной нагрузок фаз.

Рассмотрим построение векторной диаграммы напряжений и токов для несимметричной нагрузки фаз. Под углом  $120^\circ$  в выбранном масштабе откладываем векторы фазных напряжений  $\bar{U}_{AB}, \bar{U}_{BC}$  и  $\bar{U}_{CA}$  (рис. 109) по

направлению векторов  $\bar{U}_{AB}, \bar{U}_{BC}$  и  $\bar{U}_{CA}$  откладываем векторы фазных токов  $\bar{I}_{AB}, \bar{I}_{BC}$  и  $\bar{I}_{CA}$ , так как нагрузка чисто активная. Соединив концы векторов фазных токов прямой линией, получим векторы линейных токов  $\bar{I}_A, \bar{I}_B$  и  $\bar{I}_C$ .

Аналогичным образом строится векторная диаграмма напряжений и токов (рис. 108) для индуктивной несимметричной нагрузки фаз. Эта диаграмма отличается от предыдущей тем, что векторы фазных токов  $\bar{I}_{AB}, \bar{I}_{BC}$  и  $\bar{I}_{CA}$  сдвинуты относительно векторов фазных напряжений  $\bar{U}_{AB}, \bar{U}_{BC}$  и  $\bar{U}_{CA}$  на углы  $\varphi_{AB}, \varphi_{BC}$  и  $\varphi_{CA}$ .

Таблица 24

№ п/п	Режим нагрузки	Измерено										Вычислено					При- меча- ние		
		$U_{AB}$		$U_{BC}$		$U_{CA}$		$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_{AB}$	$I_{BC}$	$I_{CA}$	$\frac{I_\Delta}{I_\Phi}$	$r_{AB}$	$r_{BC}$		$r_{CA}$	$P$
		$C_V =$						$C_A =$							$C_A =$				
		дел.	в	дел.	в	дел.	в	дел.	а	дел.	а	дел.	а			дел.		а	
1	Симмет- ричная																		
2	Симмет- ричная с обрывом ли- нейного провода																		
3	Симмет- ричная с обрывом од- ной фазы																		
4 5	Несим- метричная																		

## Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 112.
3. Установить симметричную нагрузку фаз и записать показания приборов.
4. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 24) проверить справедливость формул (15) и (18).
5. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.
6. Установить симметричную нагрузку фаз, отсоединить один из линейных проводов и записать показания приборов.
7. Установить симметричную нагрузку фаз и произвести обрыв какой-либо фазы (или выключить лампы этой фазы) и записать показания приборов.
8. Установить симметричную нагрузку фаз, затем изменить нагрузку только в одной фазе и записать показания приборов.
9. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.
10. Установить резко несимметричную нагрузку всех фаз и записать показания приборов.
11. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется соединением треугольником?
  2. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями, а также между линейными и фазными токами при соединении треугольником и симметричной нагрузке фаз?
  3. Как определяются линейные токи при несимметричной нагрузке фаз?
  4. Чему равна активная мощность трехфазного тока при несимметричной нагрузке фаз?
  5. Чему равна активная мощность трехфазного тока при симметричной нагрузке фаз?
  6. Каковы будут напряжения на фазах приемников, если перегорит предохранитель в одном из линейных проводов или произойдет обрыв линейного провода (нагрузка фаз симметричная)?
  7. Постройте векторную диаграмму напряжений и токов для симметричной чисто активной нагрузки фаз.
  8. Постройте векторную диаграмму напряжений и токов для несимметричной чисто активной нагрузки фаз.
-

## *Глава VI*

### **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

#### РАБОТА № 22

#### **ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА**

##### **Цель работы**

Целью работы является ознакомление с методами измерения активной мощности в цепи трехфазного тока как при симметричной (равномерной), так и при несимметричной (неравномерной) нагрузке фаз.

##### **Общие сведения**

Активная мощность в трехфазных цепях может быть измерена тремя методами:

- одним ваттметром;
- двумя ваттметрами;
- тремя ваттметрами.

Каждый из этих методов применяется только в определенной области. Рассмотрим каждый метод измерения мощности в отдельности.

##### **Измерение активной мощности в цепи трехфазного тока одним ваттметром**

Этот метод применяется в трехфазных трехпроводных цепях при симметричной системе напряжений и симметричной (равномерной) нагрузке фаз; активная мощность в цепи трехфазного тока может быть измерена одним ваттметром. Если приемник энергии соединен звездой и нейтральная (нулевая) точка доступна, то однофазный ваттметр включается по схеме (рис. 113). При соединении приемника треугольником последовательная цепь (обмотка) ваттметра включается в одну из его фаз (рис. 114). Так как через последовательную цепь проходит фазный ток  $I_{\phi}$ , а параллельная цепь (обмотка) находится под фаз-

ным напряжением  $U_\phi$ , то ваттметр измеряет активную мощность одной фазы:

$$P_W = P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $\cos \varphi$  — коэффициент мощности приемника.

Чтобы получить активную мощность в цепи трехфазного тока, надо показание ваттметра умножить на 3, т. е.

$$P = 3P_W = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi. \quad (2)$$

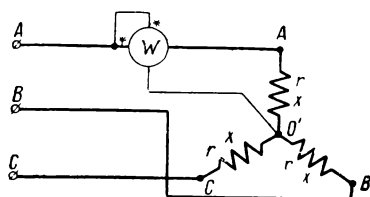


Рис. 113. Схема измерения активной мощности одним ваттметром в трехфазной цепи при соединении приемников звездой с доступной нейтральной (нулевой) точкой при симметричной (равномерной) нагрузке фаз

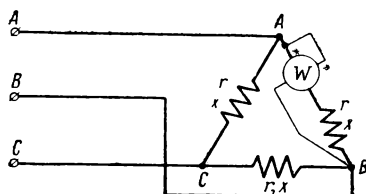


Рис. 114. Схема измерения активной мощности одним ваттметром в трехфазной цепи при соединении приемников треугольником при симметричной (равномерной) нагрузке фаз

Если приемник соединен звездой с недоступной нейтральной (нулевой) точкой или треугольником с концами фаз, не выведенными на щиток, то применяют ваттметр с искусственной нулевой точкой. Искусственная нулевая точка \* для ваттметра электродинамической системы создается при помощи трех добавочных активных сопротивлений  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ , соединенных звездой (рис. 115). Эти сопротивления подбираются так, чтобы

$$r_{wv} + r_1 = r_2 = r_3,$$

где  $r_{wv}$  — сопротивление параллельной обмотки ваттметра. Как видно из схемы рис. 115 напряжение, приложенное к параллельной цепи ваттметра, будет равно фазному напряжению  $U_\phi$ , а через последовательную цепь ваттметра будет проходить фазный ток. Поэтому ваттметр покажет активную мощность одной фазы, т. е.

$$P_W = P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi.$$

Чтобы получить активную мощность трехфазной цепи, надо показание ваттметра умножить на 3. То же самое получим, если

\* Искусственная нулевая точка может быть создана и при помощи двух добавочных активных сопротивлений, при этом должно быть выполнено условие  $r_{wv} = r = r$ .

приемник будет соединен треугольником. Если ваттметр предназначен для постоянной работы, то шкала его обычно градуируется на активную мощность трехфазного тока.

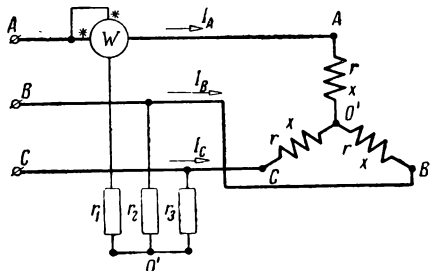


Рис. 115. Схема измерения активной мощности в трехфазной цепи одним ваттметром с искусственной нулевой точкой при соединении приемников звездой при симметричной нагрузке фаз

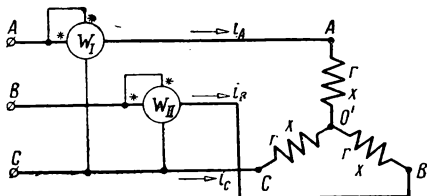


Рис. 116. Схема измерения активной мощности двумя ваттметрами при соединении приемников звездой

### Измерение активной мощности в цепи трехфазного тока двумя ваттметрами

Метод двух ваттметров применяется в трехпроводных цепях трехфазного тока. Он дает возможность измерять активную мощность трехфазной цепи независимо от нагрузки фаз и способа их соединения (звездой или треугольником)..

Мгновенная мощность цепи трехфазного тока равна сумме мгновенных мощностей отдельных фаз:

$$p = p_A + p_B + p_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C, \quad (3)$$

где  $p_A$ ,  $p_B$  и  $p_C$  — мгновенные мощности отдельных фаз;

$u_A$ ,  $u_B$  и  $u_C$  — мгновенные значения фазных напряжений;

$i_A$ ,  $i_B$  и  $i_C$  — мгновенные значения фазных токов.

Применяя первый закон Кирхгофа к узловой точке  $O'$  (рис. 116), получим:

$$i_A + i_B + i_C = 0,$$

откуда

$$i_C = -(i_A + i_B).$$

Подставляя это выражение в формулу (3), будем иметь:

$$p = u_A i_A + u_B i_B - u_C (i_A + i_B) = (u_A - u_C) i_A + (u_B - u_C) i_B.$$

Так как при соединении звездой разность двух фазных напряжений равна линейному напряжению:

$$u_A - u_C = u_{AC} \text{ и } u_B - u_C = u_{BC},$$

то предыдущая формула примет следующий вид:

$$P = u_{AC}i_A + u_{BC}i_B. \quad (4)$$

Эта формула показывает, что активную мощность трехпроводной цепи трехфазного тока можно измерить двумя ваттметрами (см. рис. 116). Таким же образом, применяя второй закон Кирхгофа для фазных напряжений,

$$u_{AB} + u_{BC} + u_{CA} = 0,$$

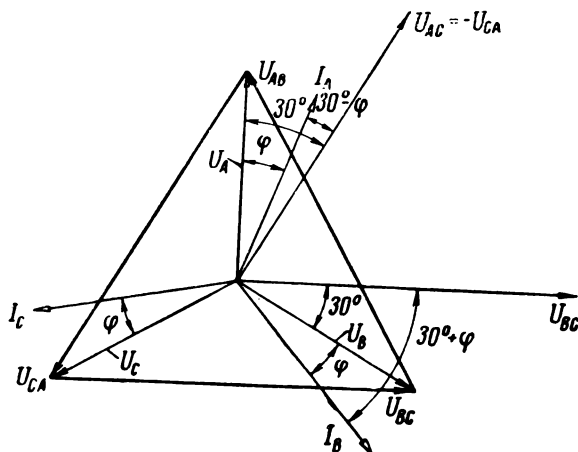


Рис. 117. Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов к схеме измерения активной мощности двумя ваттметрами (см. рис. 116)

можно доказать возможность применения схемы двух ваттметров и для соединения приемника треугольником. Показание первого ваттметра (рис. 117) будет равно:

$$P_I = U_{AC}I_A \cos(\overline{U_{AC}}, \overline{I_A}), \quad (5)$$

а показание второго ваттметра:

$$P_{II} = U_{BC}I_B \cos(\overline{U_{BC}}, \overline{I_B}). \quad (6)$$

Так как при симметричной системе напряжений и симметричной (равномерной) нагрузке фаз

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\lambda, \quad I_A = I_B = I_C = I_\lambda, \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi,$$

то показание первого ваттметра равно:

$$P_I = U_\lambda I_\lambda \cos(30^\circ - \varphi), \quad (7)$$

а показание второго ваттметра:

$$P_{II} = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ + \varphi). \quad (8)$$

Сумма показаний двух ваттметров равна активной мощности трехфазной цепи:

$$\begin{aligned} P &= P_I + P_{II} = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ - \varphi) + U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ + \varphi) = \\ &= U_{\text{л}} I_{\text{л}} [\cos(30^\circ - \varphi) + \cos(30^\circ + \varphi)] = \\ &= U_{\text{л}} I_{\text{л}} \left[ 2 \cos \frac{(30^\circ + \varphi) + (30^\circ - \varphi)}{2} \cos \frac{(30^\circ + \varphi) - (30^\circ - \varphi)}{2} \right] = \\ &= U_{\text{л}} I_{\text{л}} 2 \cos 30^\circ \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

Из формул (7) и (8) видно, что показания ваттметров будут одинаковы только при чисто активной нагрузке ( $\varphi=0$ ), т. е.

$$P_I = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos 30^\circ$$

и

$$P_{II} = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos 30^\circ.$$

При  $\varphi=60^\circ$  показания ваттметров будут равны:

$$P_I = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ - 60^\circ) = 0,866 U_{\text{л}} I_{\text{л}},$$

$$P_{II} = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ + 60^\circ) = 0,$$

т. е. активная мощность трехфазной цепи измеряется одним ваттметром.

Если  $\varphi > 60^\circ$ , то показания второго ваттметра будут отрицательными, т. е. его стрелка будет отклоняться влево от нуля, так как  $30^\circ + \varphi > 90^\circ$ , а косинусы углов больших  $90^\circ$  отрицательны. Чтобы получить правильное отклонение стрелки ваттметра, следует переключить зажимы его последовательной или параллельной цепи, т. е. переменить направление тока в последовательной или параллельной цепи \* ваттметра; после переключения стрелка ваттметра будет отклоняться нормально вправо от нуля. В этом случае активная мощность цепи трехфазного тока равна не сумме показаний ваттметров, а их разности:

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

При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке фаз по показаниям двух ваттметров можно определить реактивную мощность цепи трехфазного тока. Для этого необходимо взять разность их показаний и умножить на  $\sqrt{3}$ , т. е.

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{3} (P_I - P_{II}) = \sqrt{3} [U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ - \varphi) - U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ + \varphi)] = \\ &= \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi. \end{aligned} \quad (10)$$

---

\* На практике переключают зажимы параллельной цепи ваттметра при помощи переключателя, имеющегося в современных ваттметрах.



По показаниям двух ваттметров можно определить тангенс угла сдвига фаз (следовательно и угол  $\varphi$  между фазным напряжением и фазным током), т. е.

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_I - P_{II}}{P_I + P_{II}}. \quad (11)$$

Следует отметить, что вместо двух однофазных ваттметров в промышленности часто применяют двухэлементный трехфазный ваттметр, который имеет две последовательные и две параллельные цепи (обмотки).

### Измерение активной мощности в цепи трехфазного тока тремя ваттметрами

Метод трех ваттметров применяется в трехфазной четырехпроводной цепи, так как метод двух ваттметров в данном случае неприменим. На рис. 118 показана схема соединения приборов.

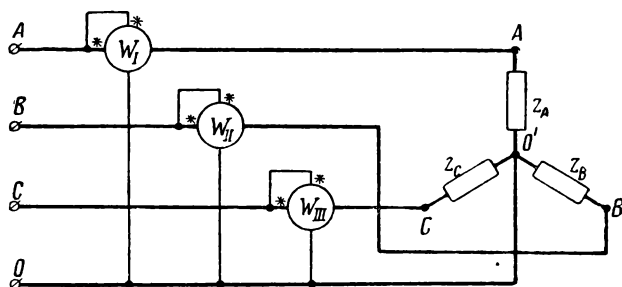


Рис. 118. Схема измерения активной мощности в трехфазной четырехпроводной цепи тремя ваттметрами

ров для измерения активной мощности в трехфазной четырехпроводной цепи. Активная мощность трехфазной цепи равна сумме показаний трех ваттметров:

$$P = P_I + P_{II} + P_{III}. \quad (12)$$

Вместо трех однофазных ваттметров часто применяют трехэлементный трехфазный ваттметр.

### Опыт измерения активной мощности в цепи трехфазного тока

Измерение активной мощности в трехпроводной цепи трехфазного тока при симметричной (равномерной) нагрузке фаз одним ваттметром. Измерение активной мощности при соедине-

нии приемников звездой производят по схеме рис. 119. В этой схеме  $P$  — трехполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $A_A$ ,  $A_B$  и  $A_C$  — амперметры, измеряющие линейные токи;  $V$  — вольтметр со щупами, измеряющий фазные напряжения;  $W$  — ваттметр, измеряющий активную мощность одной фазы.

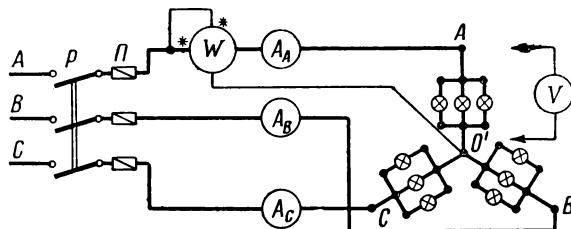


Рис. 119. Схема испытания измерения активной мощности одним ваттметром в трехфазной цепи при соединении ламп накаливания звездой при симметричной (равномерной) нагрузке фаз

Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , устанавливаем симметричную нагрузку фаз и записываем показания приборов в табл. 25, а.

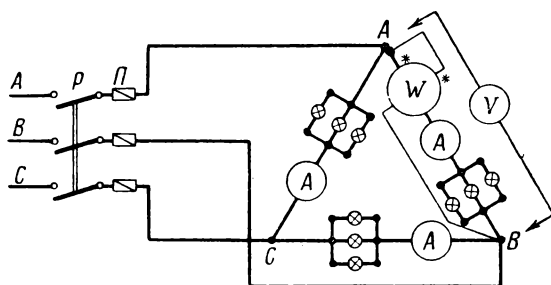


Рис. 120. Схема испытания измерения активной мощности одним ваттметром в трехфазной цепи при соединении ламп накаливания треугольником при симметричной (равномерной) нагрузке фаз

После этого соединяем лампы накаливания треугольником, как показано на рис. 120. Затем, включив рубильник  $P$ , устанавливаем симметричную нагрузку фаз, как и в предыдущем опыте. Записываем показания приборов в табл. 25б. При помощи трех активных сопротивлений  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  создаем искусственную нейтральную (нулевую) точку, как показано на

рис. 121. При этом необходимо соблюдать следующее условие:  $r_{wV} + r_1 = r_2 = r_3$ . Опыт производится так же, как и в предыдущих опытах, т. е. включив рубильник  $P$ , устанавливаем симметричную нагрузку фаз и записываем показания приборов в табл. 25 а. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 25 а) определим активную мощность каждой фазы и мощность трехфазной цепи по формулам:

$$\left. \begin{aligned} P_A &= U_A I_A; \quad P_B = U_B I_B; \quad P_C = U_C I_C; \\ P &= P_A + P_B + P_C = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Сравниваем результаты, полученные по формуле (13), с формулой  $P = 3P_w$ .

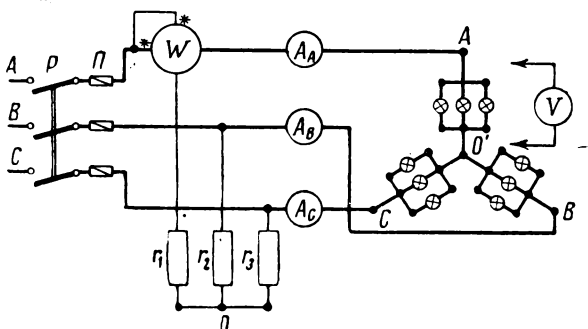


Рис. 121. Схема испытания измерения активной мощности в трехфазной цепи одним ваттметром с искусственной нулевой точкой при соединении ламп накаливания звездой при симметричной нагрузке фаз

**Измерение активной мощности в трехпроводной цепи трехфазного тока двумя ваттметрами.** Измерение активной мощности производится по схеме рис. 122 следующим образом.

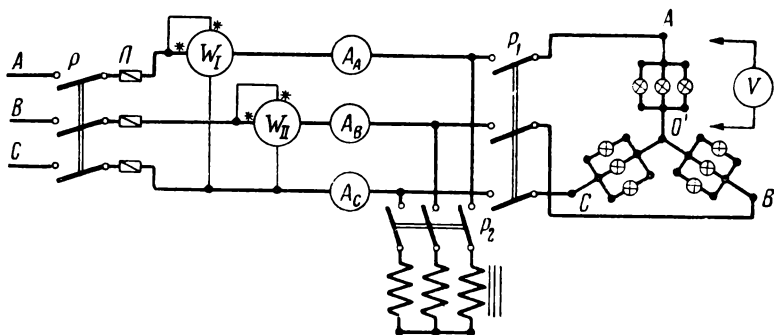


Рис. 122. Схема испытания измерения активной мощности двумя ваттметрами при соединении приемников звездой



Включив рубильники  $P$  и  $P_1$  (рубильник  $P_2$  выключен), устанавливаем симметричную (равномерную) нагрузку фаз и записываем показания приборов в табл. 26.

В этом опыте необходимо убедиться в том, что показания ваттметров одинаковы:

$$P_I = P_{II},$$

реактивная мощность трехфазной цепи равна нулю:

$$Q = \sqrt{3} (P_I - P_{II}) = 0,$$

активная мощность трехфазной цепи равна сумме показаний ваттметров

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

и эта мощность должна быть равна сумме активных мощностей всех фаз, т. е.

$$P = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C$$

и

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_I - P_{II}}{P_I + P_{II}} = 0.$$

Здесь  $P_I$  мощность, показываемая ваттметром  $W_I$ ; и  $P_{II}$  мощность, показываемая ваттметром  $W_{II}$ .

Затем устанавливаем несимметричную нагрузку фаз и записываем показания приборов в табл. 26. После этого устанавливаем симметричную нагрузку фаз (при помощи ламп накаливания), включаем рубильник  $P_2$  и записываем показания приборов в табл. 27.

При симметричной нагрузке фаз необходимо произвести не менее трех измерений. Первое измерение производится при  $\varphi < 60^\circ$ , второе измерение при  $\varphi = 60^\circ$  и третье измерение при  $\varphi > 60^\circ$ . Изменение угла  $\varphi$  осуществляется изменением индуктивного сопротивления реактивной катушки при помощи стального сердечника. Коэффициент мощности цепи определяется по следующей формуле:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} UI}, \quad (14)$$

где  $U$  — линейное напряжение;

$I$  — линейный ток.

**Измерение активной мощности в четырехпроводной цепи трехфазного тока.** Измерение активной мощности производится

Таблица 26

№ п/п	Режим нагрузки	Измерено										Вычислено		Примечание
		$U_A$		$U_B$	$U_C$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_I$	$P_{II}$	$P = P_I + P_{II}$	$P = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C$		
		$C_V =$			$C_A =$			$C_W =$						
		дел.	в	дел.	в	дел.	а	дел.	а	дел.	вт			
		дел.	в	дел.	в	дел.	а	дел.	а	дел.	вт			
1	Симметричная													
2	Несимметричная													

Таблица 27

№ п/п	Режим нагрузки	Измерено										Вычислено						Примечание
		$U_{AB}$		$U_{BC}$	$U_{CA}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_I$	$P_{II}$	$P$	$Q$	$U$	$\text{tg}\varphi$	$\varphi$	$\cos\varphi$		
		$C_V =$			$C_A =$			$C_W =$			$C_W =$			$C_W =$				
		дел.	в	дел.	в	дел.	а	дел.	а	дел.	вт	дел.	вт	дел.	вт	дел.	вт	
		дел.	в	дел.	в	дел.	а	дел.	а	дел.	вт	дел.	вт	дел.	вт	дел.	вт	
1	Симметричная ( $\varphi < 60^\circ$ )																	
2	Симметричная ( $\varphi = 60^\circ$ )																	
3	Симметричная ( $\varphi > 60^\circ$ )																	

по схеме рис. 123 следующим образом. Включив рубильники  $P$  и  $P_0$ , устанавливаем несимметричную (неравномерную) нагрузку фаз и записываем показания приборов в табл. 28.

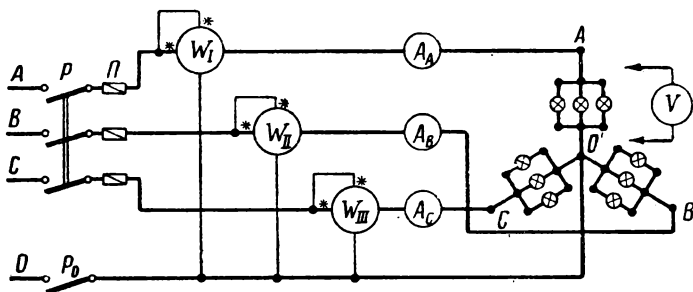


Рис. 123. Схема испытания измерения активной мощности в трехфазной четырехпроводной цепи тремя ваттметрами

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 119, и произвести измерение активной мощности при симметричной нагрузке фаз.
3. Собрать схему, изображенную на рис. 120, и произвести измерение активной мощности при симметричной нагрузке фаз, при этом нагрузку фаз следует установить такой же, как и в предыдущем опыте.
4. Собрать схему, изображенную на рис. 121, и произвести измерение активной мощности при симметричной нагрузке фаз; при этом нагрузку фаз следует установить такой же, как и в предыдущих опытах. Полученный результат сравнить с результатом пунктов 2 и 3.
5. Собрать схему, изображенную на рис. 122, и произвести два измерения (при выключенном рубильнике  $P_2$ ): одно из них при симметричной нагрузке фаз, а другое при несимметричной нагрузке фаз. После этого включить рубильник  $P_2$  и произвести три измерения при симметричной нагрузке фаз. Первое измерение произвести при  $\varphi < 60^\circ$ , второе измерение — при  $\varphi = 60^\circ$  и третье измерение — при  $\varphi > 60^\circ$ .
6. Собрать схему, изображенную на рис. 123, и произвести измерения при несимметричной нагрузке фаз.

Таблица 28

п/п №	Измерено										Вычислено		Примечание		
	$U_A$			$U_B$			$U_C$			$I_A$	$I_B$	$I_C$		$P = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C$	
	$C_V =$			$C_A =$			$C_W =$			$P_I$	$P_{II}$	$P_{III}$			
	дел.	в	дел.	в	дел.	в	дел.	в	дел.	в	дел.	в			
1															
2															

Таблица 29

№ п/п	Измерено						Вычислено		Примечание
	U		I	P		cos φ	cos φ'		
	C <sub>V</sub> =		C <sub>A</sub> =	C <sub>W</sub> =					
дел.	θ	дел.	a	дел.	вт				
1									
2									
3									



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких случаях можно измерить активную мощность в трехпроводной трехфазной цепи одним ваттметром?

2. Найти угол  $\varphi$  сдвига фаз между фазным напряжением и фазным током, активную и реактивную мощности трехфазной цепи, если измерение активной мощности производится по методу двух ваттметров.

3. Когда показания двух ваттметров будут равны (при измерении мощности по методу двух ваттметров)?

4. В каком случае мощность трехфазной цепи будет учитываться одним ваттметром, а показание второго ваттметра будет равно нулю?

5. При каком условии показание одного из ваттметров будет отрицательным, если измерение мощности производится по методу двух ваттметров?

6. Что будет показывать ваттметр, если последовательную цепь его включить в линейный провод  $B$ , а параллельную цепь ваттметра подключить к линейным проводам  $A$  и  $C$ ?

## РАБОТА № 23

### ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

#### Цель работы

Целью работы является ознакомление с устройством электродинамических фазометров, их включением в сеть и измерением коэффициента мощности  $\cos \varphi$  цепи.

#### Общие сведения

Коэффициент мощности в однофазной цепи переменного тока можно определить на основании показаний вольтметра, амперметра и ваттметра, т. е.

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

где  $U$  — напряжение на зажимах цепи, измеряемое вольтметром;

$I$  — ток в цепи, измеряемый амперметром;

$P$  — мощность цепи, измеряемая ваттметром.

Зная  $\cos \varphi$ , можно найти угол  $\varphi$  сдвига фаз между током и напряжением.

Основными недостатками данного метода являются: отсчет показаний по трем измерительным приборам, погрешность в определении складывается из погрешностей вольтметра, амперметра и ваттметра,  $\cos \varphi$  получается не непосредственно, а определяется по формуле (15). Измерение угла  $\varphi$  сдвига фаз между током и напряжением или коэффициента мощности  $\cos \varphi$  производится специальными приборами, называемыми *фазометрами*. В настоящее время наибольшее распространение получи-

ли фазометры электродинамической, ферродинамической и электромагнитной систем. Мы рассмотрим только фазометр электродинамической системы. Фазометр этой системы состоит из одной или двух последовательно соединенных неподвижных катушек  $K-K$  (рис. 124) и двух подвижных катушек 1 и 2, жестко скрепленных между собой под некоторым углом (например, под углом  $\gamma = 60^\circ$  у фазометра типа ЭЛФ) на одной оси. На этой же оси укреплена также указательная стрелка прибора. Подвижные катушки, расположенные внутри неподвижных катушек, включаются в цепь параллельно, а неподвижные ка-

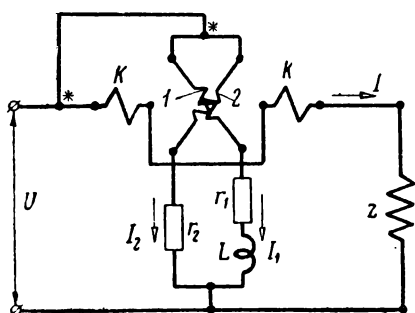


Рис. 124. Схема включения однофазного электродинамического фазометра

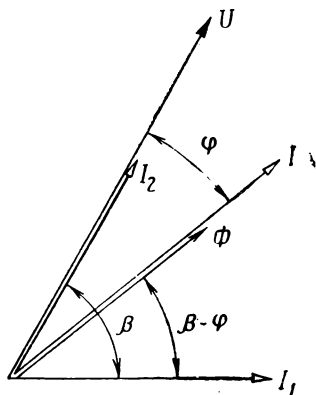


Рис. 125. Векторная диаграмма к схеме рис. 124

тушки — последовательно. Последовательно с подвижной катушкой 1 включены активное сопротивление  $r_1$  и индуктивность  $L$ , а последовательно с катушкой 2 — большое активное сопротивление  $r_2$ . На рис. 125 изображена векторная диаграмма фазометра для случая, когда вектор тока  $\bar{I}$  в последовательной цепи отстает от вектора напряжения  $\bar{U}$  на угол  $\varphi$ . Вектор магнитного потока  $\bar{\Phi}$ , создаваемый током  $I$ , совпадает с ним по фазе, так как данный фазометр не имеет стали. Вектор тока  $\bar{I}_1$  в подвижной катушке 1 отстает от вектора напряжения  $\bar{U}$  на угол  $\beta$ , а вектор тока  $\bar{I}_2$  в подвижной катушке 2 совпадает по фазе с вектором  $\bar{U}$ , так как индуктивным сопротивлением катушки можно пренебречь по сравнению с активным сопротивлением всей цепи. Так как подвижная часть фазометра не имеет никаких приспособлений для создания противодействующего момента, то при отсутствии токов в катушках фазометра стрелка его может занимать любое положение. Принцип действия

прибора основан на взаимодействии магнитного потока  $\Phi$ , создаваемого последовательными катушками, с токами  $I_1$  и  $I_2$  подвижных катушек. Вращающий момент, действующий на катушку 1,

$$M_1 = c_1 I_1 \cos(\beta - \varphi) \cos \alpha \quad (16)$$

и на катушку 2,

$$M_2 = c_2 I_2 \cos \varphi \cos(\gamma - \alpha), \quad (17)$$

где  $\alpha$  — угол между плоскостью подвижной катушки \* 1 и осью неподвижных катушек  $K-K$ ;

$\gamma$  — угол между плоскостями подвижных катушек;

$c_1$  и  $c_2$  — конструктивные постоянные.

Так как обмотки подвижных катушек намотаны в противоположных направлениях, то вращающие моменты  $M_1$  и  $M_2$  направлены в противоположные стороны и под влиянием разности этих вращающих моментов подвижная часть повернется на определенный угол и займет положение, при котором моменты уравниваются, т. е.

$$M_1 = M_2$$

или

$$c_1 I_1 \cos(\beta - \varphi) \cos \alpha = c_2 I_2 \cos \varphi \cos(\gamma - \alpha).$$

Если  $c_1 = c_2$ , т. е. обе катушки одинаковы, то предыдущее уравнение можно представить так:

$$\frac{I_1 \cos(\beta - \varphi)}{I_2 \cos \varphi} = \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{\cos \alpha}. \quad (18)$$

Если  $I_1 = I_2$  и  $\beta = \gamma$ , то

$$\alpha = \varphi.$$

Это соотношение показывает, что угол поворота  $\alpha$  подвижной части фазометра равен углу  $\varphi$  сдвига фаз между векторами тока  $I$  и напряжения  $U$  и не зависит от значений тока и напряжения. Следовательно, шкалу фазометра можно градуировать непосредственно в значениях угла  $\varphi$  или коэффициента мощности  $\cos \varphi$ . В первом случае шкала будет равномерной, а во втором — неравномерной. Так как на практике важнее знать коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , а не угол  $\varphi$  сдвига фаз, то для получения более равномерной шкалы подвижные катушки 1 и 2 закрепляются под углом  $\gamma \neq \beta$ .

Из формулы (18) видно, что при перемене знака угла  $\varphi$ , т. е. характера нагрузки (индуктивная или емкостная нагрузка) в цепи, изменяется знак угла отклонения подвижной части фазо-

---

\* В некоторых фазометрах последовательно с подвижной катушкой  $I$  включается только одно активное сопротивление.

метра. Поэтому электродинамические фазометры часто имеют двустороннюю шкалу с нулем посередине. Левая часть шкалы предназначена для измерений при емкостной нагрузке, правая — при индуктивной нагрузке. Так как в подвижной катушке 1 имеется индуктивное сопротивление  $\omega L$ , то показания фазометра зависят от частоты.

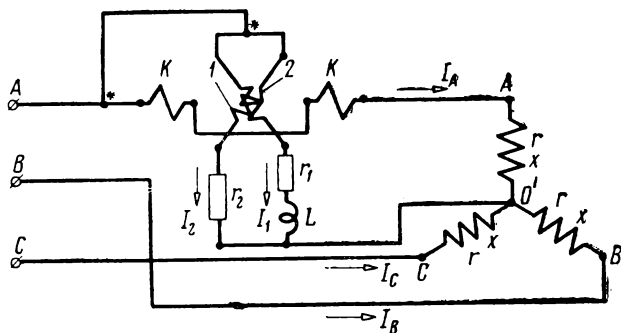


Рис. 126. Схема измерения однофазным фазометром коэффициента мощности в трехфазной симметричной цепи

Киевский приборостроительный завод выпускает однофазные лабораторные электродинамические фазометры типа ЭЛФ, у которых подвижные обмотки 1 и 2 скреплены между собой под углом  $\gamma = 60^\circ$  и векторы токов  $\bar{I}_1$  и  $\bar{I}_2$  сдвинуты между собой на угол  $\beta = 60^\circ$ . В симметричной трехфазной цепи, если приемник

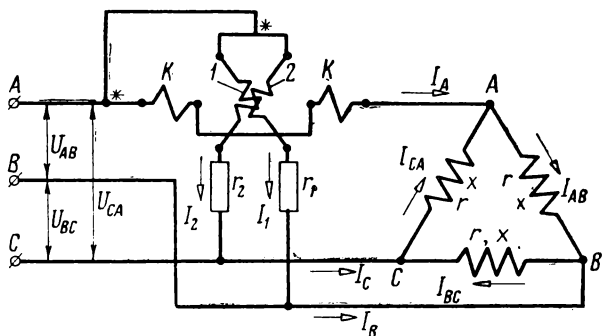


Рис. 127. Схема включения трехфазного фазометра

соединен звездой и нейтральная (нулевая) точка доступна, измерение коэффициента мощности  $\cos \varphi$  можно произвести однофазным фазометром, как показано на рис. 126. Если приемник соединен звездой и нейтральная точка недоступна, или приемник соединен треугольником с невыведенными концами фаз на

щиток, то измерение коэффициента мощности производится трехфазным фазометром. Трехфазный фазометр отличается от однофазного только тем, что вместо индуктивного сопротивления в цепь подвижной катушки  $I$  включено активное сопротивление (рис. 127). Сдвиг между векторами токов  $\bar{I}_1$  и  $\bar{I}_2$  в этом фазометре равен  $60^\circ$ . В трехфазном фазометре, так же, как и в однофазном, на подвижную часть прибора действуют два вращающих момента, направленных в противоположные стороны: первый от взаимодействия тока  $I_1$  с магнитным потоком  $\Phi$ , второй от взаимодействия тока  $I_2$  с магнитным потоком  $\Phi$ .

В зависимости от выбранного предела измерения по току обмотки неподвижных катушек  $K-K$  как в однофазном, так и в трехфазном фазометре, могут быть соединены при помощи переключателя или последовательно или параллельно.

### Измерение коэффициента мощности фазометром

**Измерение коэффициента мощности в однофазной цепи переменного тока.** Измерение коэффициента мощности в однофазной цепи переменного тока производится по схеме рис. 128. В

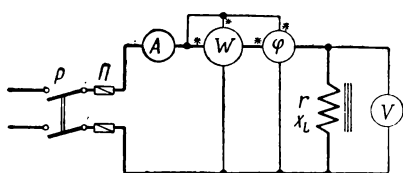


Рис. 128. Схема измерения коэффициента мощности однофазным фазометром

этой схеме:  $P$  — двухполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $V$  — образцовый вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах цепи;  $W$  — образцовый ваттметр, измеряющий мощность цепи;  $A$  — образцовый амперметр, измеряющий ток в цепи;  $\varphi$  — фазометр. Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , за-

писываем показания приборов в табл. 29 (см. стр. 163).

Постепенно выдвигая стальной сердечник из катушки произвести еще три или четыре измерения. Зная показания ваттметра, вольтметра и амперметра, определить коэффициент мощности цепи по формуле (15) и сравнить его с показанием фазометра.

**Измерение коэффициента мощности в симметричной трехфазной цепи.** При симметричной системе напряжения и симметричной (равномерной) нагрузке фаз измерение коэффициента мощности может быть произведено однофазным фазометром, если приемник соединен звездой и нейтральная точка доступна (рис. 129). Если приемник соединен треугольником и концы фаз не выведены на щиток (или приемник соединен звездой с недоступной нейтральной точкой), то измерение коэффициента мощности производится трехфазным фазометром, как показано

на рис. 130. Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , устанавливаем симметричную нагрузку фаз и записываем показания приборов в табл. 30.

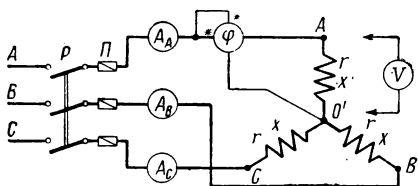


Рис. 129. Схема испытания измерения коэффициента мощности в трехфазной симметричной цепи однофазным фазометром

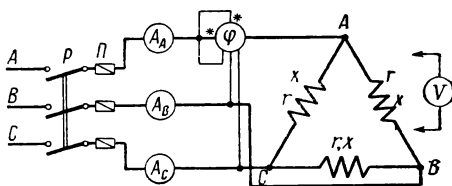


Рис. 130. Схема измерения трехфазным фазометром коэффициента мощности в трехфазной симметричной цепи

Таблица 30

№ п/п	Измерено												Примечание	
	$U_{AB}$		$U_{BC}$		$U_{CA}$		$I_A$		$I_B$		$I_C$			$\cos \varphi$
	$C_V=$						$C_A=$							
	дел.	в	дел.	в	дел.	в	дел.	а	дел.	а	дел.	а		—
1														
2														
3														

В качестве нагрузки может быть применен трехфазный асинхронный двигатель или реактивная катушка со стальным сердечником. Изменяя нагрузку асинхронного двигателя или индуктивное сопротивление катушки при помощи стального сердечника, произвести три или четыре измерения.

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 128, и произвести три или четыре измерения.
3. На основании показаний ваттметра, вольтметра и амперметра, определить коэффициент мощности цепи и сравнить его с показанием фазометра.
4. Собрать схему, изображенную на рис. 129 или 130, и произвести три или четыре измерения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите устройство и принцип действия электродинамического фазометра.
2. Как определяются коэффициенты мощности для однофазной и трехфазной цепей, если известны показания амперметра, вольтметра и ваттметра?
3. Нарисуйте схему включения фазометра в цепь однофазного тока.
4. Как можно измерить коэффициент мощности приемника, соединенного звездой, с доступной нулевой точкой при симметричной нагрузке, если имеется однофазный фазометр?
5. Почему повышение коэффициента мощности электрических установок приводит к экономии электрической энергии?
6. Какие причины вызывают ухудшение коэффициента мощности электрических установок?

## РАБОТА № 24

### ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОДИНАРНЫМ МОСТОМ

#### Цель работы

Целью работы является ознакомление с конструкцией одинарных мостов (мостов постоянного тока) и измерением сопротивлений с помощью мостов.

#### Общие сведения

Принципиальная схема одинарного моста изображена на рис. 131. Мост состоит из трех магазинов сопротивлений  $r_2$ ,  $r_3$

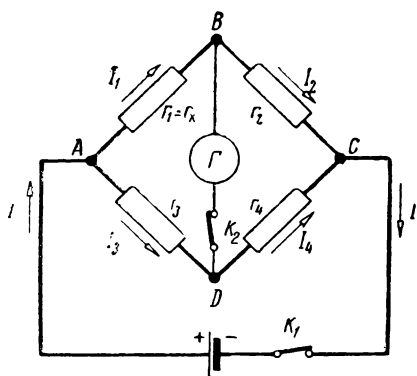


Рис. 131. Принципиальная схема одинарного моста

и  $r_4$ , которые вместе с измеряемым сопротивлением  $r_1 = r_x$  образуют замкнутый четырехугольник  $ABCD$ . Сопротивления  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  и  $r_4$  называются *плечами моста*. В одну из диагоналей моста включается чувствительный магнитоэлектрический гальванометр, а в другую — аккумуляторная батарея (или гальванический элемент). Процесс измерения сопротивлений заключается в том, что нужно подобрать такие значения сопротивлений  $r_2$ ,  $r_3$  и  $r_4$ , чтобы при

замкнутых ключах  $K_1$  и  $K_2$  ток через гальванометр не проходил. Так как в данном случае потенциалы точек  $B$  и  $D$  будут

одинаковы, то

$$U_{AB} = U_{AD} \text{ или } r_1 I_1 = r_3 I_3,$$

$$U_{BC} = U_{DC} \text{ или } r_2 I_2 = r_4 I_4.$$

Разделив одно равенство на другое, получим:

$$\frac{r_1 I_1}{r_2 I_2} = \frac{r_3 I_3}{r_4 I_4}.$$

При равновесии моста ток через гальванометр не проходит, поэтому

$$I_1 = I_2 \text{ и } I_3 = I_4.$$

Тогда предыдущее уравнение примет следующий вид:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}$$

или

$$r_1 r_4 = r_2 r_3. \quad (19)$$

Это уравнение и определяет равновесие одинарного моста. Мосты, в которых выполнено это условие, носят название *уравновешенных*. Предположим, как было сказано выше, что неизвестным сопротивлением является  $r_1 = r_x$ , а сопротивления  $r_2$ ,  $r_3$  и  $r_4$  известны, тогда неизвестное сопротивление  $r_x$  можно определить из формулы (19)

$$r_x = r_1 = r_2 \frac{r_3}{r_4}. \quad (20)$$

Следует отметить, что если поменять местами источник питания и гальванометр, то равновесие моста не нарушится и поэтому формула (20) останется справедливой и в этом случае. Из формулы (20) видно, что равновесие моста может быть достигнуто изменением величины сопротивления  $r_2$  при постоянном отношении  $\frac{r_3}{r_4}$  или изменением отношения  $\frac{r_3}{r_4}$  при постоянном значении сопротивления  $r_2$ .

### Измерение сопротивления одинарным мостом

**Измерение сопротивления одинарным мостом завода «Электроприбор».** На рис. 132 изображена схема внутренних соединений одинарного моста завода «Электроприбор», где  $r_x$  — измеряемое сопротивление, которое присоединяется к зажимам  $x - x$ ;

$r_2$ ,  $r_3$  и  $r_4$  — плечи моста;



$a$  — ключ (кнопка) гальванометра;  
 $b$  — ключ аккумуляторной батареи;  
 $DC$  — добавочное сопротивление, которое при помощи штепселя, помещаемого в гнездо  $e$ , включается последовательно с гальванометром, чтобы предохранить подвижную часть гальванометра от больших бросков, когда мост в начале опыта неуравновешен.

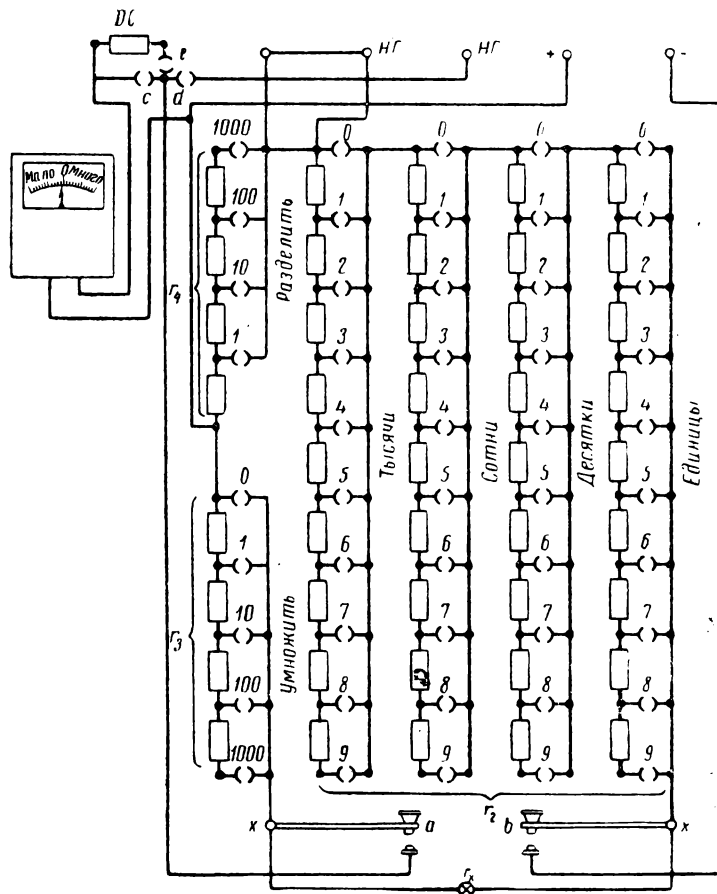


Рис. 132. Схема одинарного моста завода «Электроприбор»

Мост может применяться и с отдельным гальванометром, который должен быть присоединен к зажимам  $НГ$ . К зажимам «+» и «—» присоединяется источник питания — аккумуляторная батарея.

Так как наибольшей чувствительностью одинарного моста при его равновесии является равенство сопротивлений всех плеч ( $r_x=r_2=r_3=r_4$ ), то при известном порядке измеряемой величины сопротивления остальных плеч берем такими, чтобы удовлетворить этому условию или приблизиться к нему. Желательно при равновесии моста использовать все четыре декады сопротивления  $r_2$ , т. е. единицы, десятки, сотни и тысячи ом. Если же измеряемое сопротивление неизвестно, то сопротивления  $r_3$  и  $r_4$  берем равными 1000 ом, штепсель декады с обозначением «тысячи» вставляем в гнездо 1, а штепсели других декад вставляем в гнезда, обозначенные 0, как показано на рис. 132. Штепсель гальванометра вставляем в гнездо  $e$ . В этом случае последовательно с гальванометром включается добавочное сопротивление для уменьшения тока в гальванометре в начальный момент уравнивания. Если применяется наружный гальванометр, который присоединяется к зажимам  $HГ$ , то штепсель вставляется в гнездо  $d$ . Для уменьшения толчков тока в начальный момент уравнивания следует предусмотреть наружное добавочное сопротивление. Затем нажимаем ключ (кнопку)  $b$  и на небольшой промежуток времени замыкаем ключ  $a$ , включающий гальванометр. По отклонению стрелки гальванометра мы видим, нужно ли увеличить или уменьшить сопротивление  $r_2$ . Добиваемся такого положения, чтобы стрелка гальванометра была приблизительно на нуле. После этого вынимаем штепсель гальванометра из гнезда  $e$ , т. е. выключаем добавочное сопротивление  $ДС$ , вставляем его в гнездо  $c$  и снова добиваемся такого положения, чтобы стрелка гальванометра была на нуле. Если при данном отношении плеч  $\frac{r_3}{r_4}$  мы не получим равновесия моста, то следует изменить отношение плеч и добиваться равновесия моста, как было сказано выше. Величина измеряемого сопротивления определяется по формуле (20). Следует обратить особое внимание, что при включении сначала замыкаем ключ  $b$ , а затем ключ  $a$ , а при выключении, наоборот, размыкаем сначала ключ  $a$ , потом ключ  $b$ .

При точных измерениях измерение одной и той же величины производят несколько раз и истинное значение измеряемого сопротивления определяется как среднее арифметическое отдельных измерений. При помощи моста измеряем сопротивление двух вольтметров — один из них магнитоэлектрической системы, а другой электромагнитной системы. Зная номинальные напряжения вольтметров и их сопротивления, можно определить мощности, потребляемые вольтметрами, по формуле

$$P = \frac{U_v^2}{r_v}, \quad (21)$$

где  $U_n$  — номинальное напряжение вольтметра;  
 $r_v$  — сопротивление вольтметра.

Результаты измерений и подсчетов записываем в табл. 31.

Таблица 31

№ п/п	Измеряемый объект	Измерено			Вычислено		Примечание
		$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_x$	$P$	
		ом	ом	ом	ом	вт	
1							
2							

### Измерение сопротивления линейным (реохордным) мостом.

На рис. 133 показана схема реохордного моста. Из формулы (20) видно, что равновесие моста можно получить двумя спо-

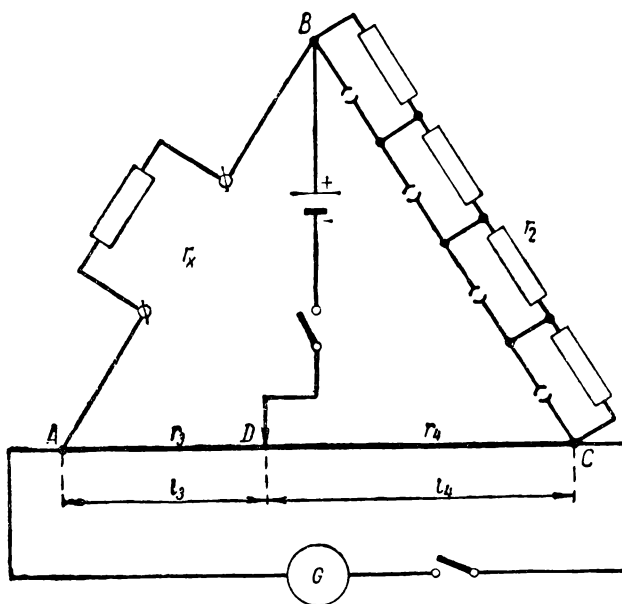


Рис. 133. Схема линейного (реохордного) моста

собами: 1) изменением величины сопротивления  $r_2$  при постоянном отношении  $\frac{r_3}{r_4}$ ; 2) изменением отношения  $\frac{r_3}{r_4}$  при постоян-

ном значении сопротивления  $r_2$ . Мосты последнего типа называются *линейными (реохордными) мостами*. Плечи  $r_3$  и  $r_4$  в этих мостах выполняются в виде реохорда, представляющего собой натянутую вдоль шкалы тонкую проволоку с большим удельным сопротивлением. По проволоке скользит подвижный контакт  $D$ , положение которого отсчитывается по шкале, расположенной под проволокой. К точкам  $B$  и  $C$  приключается штепсельный или рычажный магазин сопротивлений  $r_2$ . Отношение сопротивлений  $\frac{r_3}{r_4}$  можно заменить отношением длин этих участков, т. е.

$$\frac{r_3}{r_4} = \frac{\rho \frac{l_3}{s}}{\rho \frac{l_4}{s}} = \frac{l_3}{l_4}, \quad (22)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление калиброванной проволоки  $AC$ ;

$s$  — площадь поперечного сечения проволоки;

$l_3$  и  $l_4$  — отрезки длины калиброванной проволоки.

Это отношение указывается на шкале моста. В этом случае формула (20) примет следующий вид:

$$r_x = r_2 \frac{l_3}{l_4}. \quad (23)$$

Равновесие моста достигается путем перемещения скользящего контакта  $D$ , вследствие чего изменяется отношение  $\frac{l_3}{l_4}$ . Чтобы уменьшить погрешность, желательно равновесия моста достигать при положении скользящего контакта на средней части проволоки, т. е. при  $l_3 = l_4$ .

Измеряемое сопротивление, как видно из формулы (23), определяется умножением сопротивления  $r_2$  на показания реохорда. На рис. 134 показана схема переносного моста типа ММВ, а на рис. 135 — чертеж верхней панели этого моста. Реохордом этого моста является проволока  $a-c$  диаметром 0,3 мм. Последовательно с источником питания (батарей) включено сопротивление в 15 ом. Измеряемое сопротивление присоединяется к зажимам  $r_x$ . Плечо сравнения (образцовое сопротивление)  $r_2$  представляет собой рычажный магазин сопротивлений, состоящий из пяти последовательно соединенных катушек, сопротивления которых равны 0,5—5—50—500—5000 ом. Мост имеет пять пределов измерения: 0,05—5; 0,5—50; 5—500; 50—5000; 500—50 000 ом. На панели моста размещены ручка реохорда с лимбом 4, ручка рычажного переключателя (коммутатора) 3, головка корректора гальванометра, кнопка 2 для включения

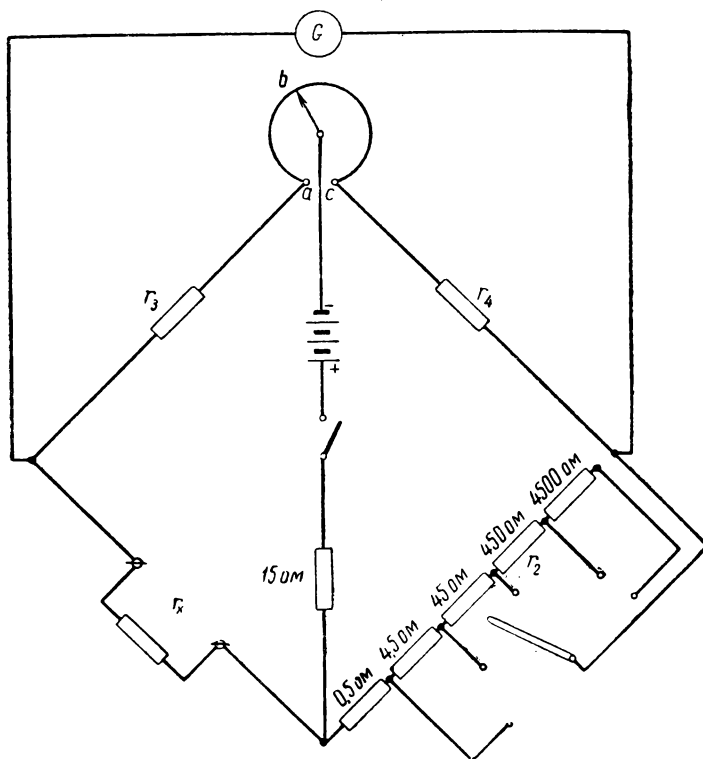


Рис. 134. Схема моста типа ММВ

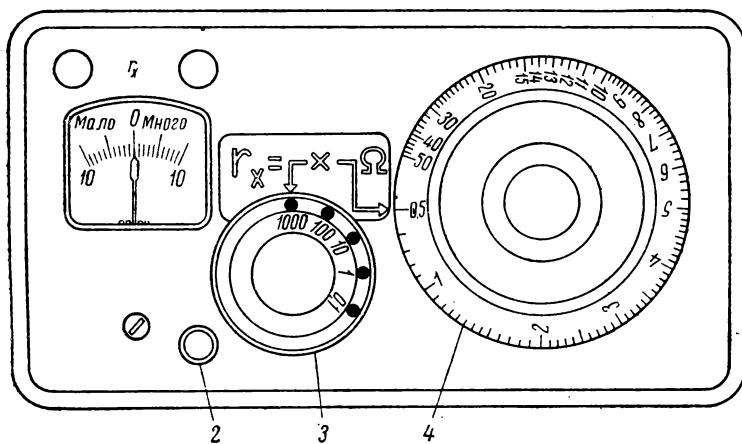


Рис. 135. Верхняя панель моста типа ММВ

батарей, два зажима для присоединения измеряемого сопротивления.

На лимбе 4 реохорда имеются деления от 0,5 до 50. Ручка реохорда насажена на ось, к нижней части которой прикреплен ползунок (скользящий контакт). При повороте ручки реохорда ползунок скользит по калиброванной проволоке. Положение ползунка определяется по шкале реохорда. На ручке рычажного переключателя пределов (коммутатора) 3 нанесены цифры: 0,1; 1; 10; 100 и 1000. Ручка коммутатора насажена на ось, к нижней части которой прикреплена щетка. При повороте коммутатора щетка скользит по поверхности контактов катушек сопротивления. Опыт измерения сопротивления на этом мосте производится следующим образом. Присоединяем измеряемое сопротивление к зажимам  $r_x$  и устанавливаем рычажный переключатель пределов на ожидаемое сопротивление. Затем нажимаем кнопку для батарей и вращаем ручку реохорда до тех пор, пока гальванометр не покажет нуль. Измеряемое сопротивление определяется умножением показания реохорда на коэффициенты 0,1; 1; 10; 100; 1000.

### **Порядок проведения работы**

1. Ознакомиться с конструкцией моста и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 132 или 134.
3. Измерить сопротивление двух вольтметров (или двух сопротивлений).
4. Определить мощности, потребляемые вольтметрами.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Опишите устройство одинарного моста.
2. Какой порядок включения источника питания и гальванометра в схеме моста?
3. От чего зависит чувствительность моста?
4. Какие существуют типы мостов постоянного тока?

## **РАБОТА № 25**

### **ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПРОВОДОВ МЕГОММЕТРОМ**

#### **Цель работы**

Целью работы является ознакомление с устройством мегомметра, измерением сопротивления изоляции электрической ли-

нии и измерением сопротивления изоляции обмоток электрических машин.

### Общие сведения

Сопротивление изоляции проводов с течением времени изменяется под действием влаги, механических повреждений, химических влияний среды и т. п. Поэтому состояние изоляции электрической сети, электрических машин и др. играет важную роль при эксплуатации ее. Плохая изоляция проводов может вызвать утечку тока, короткое замыкание, а при стечении некоторых обстоятельств может возникнуть пожар. Измерение сопротивления изоляции производится перед началом эксплуатации электрической установки, а также периодически, в течение всего срока эксплуатации сети.

Электротехническими правилами и нормами предусмотрено следующее:

измерение сопротивления изоляции следует производить по возможности при напряжении, равном рабочему напряжению, и, во всяком случае, при напряжении не менее 100 в;

при измерении изоляции следует определять сопротивление изоляции не только между проводами и землей, но также между каждым из двух проводов разного потенциала, при этом все лампы, электрические двигатели и прочие приемники, а также трансформаторы должны быть отделены от проводов, вся арматура должна быть присоединена, все предохранители вставлены, а выключатели замкнуты;

состояние изоляции установки должно быть таково, чтобы утечка тока на любом участке между двумя предохранителями или за последним предохранителем при рабочем напряжении не превышала одного миллиампера, т. е. сопротивление изоляции такого участка должно быть не менее 1000 ом, умноженных на число вольт рабочего напряжения (например, 220 000 ом при 220 в рабочего напряжения); воздушные провода, наружные устройства и части устройств, расположенных в сырых помещениях, могут не удовлетворять этим требованиям.

Согласно ГОСТ 183—55 сопротивление изоляции  $r_{из}$  обмоток электрической машины в мегомах относительно ее корпуса и сопротивления изоляции между обмотками должно быть не ниже значения, получаемого по формуле

$$r_{из} = \frac{U_n}{1000 + \frac{S_n}{100}}, \quad (24)$$

где  $U_n$  — номинальное напряжение обмотки машины, в;  
 $S_n$  — номинальная мощность машины, ква.

Мы рассмотрим измерение сопротивления изоляции при помощи мегомметра М-1101. Этот мегомметр служит для измерения больших сопротивлений и применяется при испытаниях изоляции сетей, обмоток машин, трансформаторов и других электрических установок между собой и относительно земли. Эти мегомметры изготавливаются с номинальным значением напряжения (в разомкнутой цепи) 100, 500 и 1000 в. Мегомметр можно применять для измерения изоляции цепей, не находящихся под напряжением.

На рис. 136 изображена принципиальная схема мегомметра М-1101. Рабочая (отклоняющая) рамка 2 включена последовательно с измеряемым сопротивлением и добавочными сопротивлениями  $r_2$  и  $r_3$  к зажимам генератора. К этим же зажимам генератора присоединена через добавочное сопротивление  $r_1$  устанавливающая (противодействующая) рамка 1. Как видно из схемы, ток  $I_1$  в противодействующей рамке не зависит от измеряемого сопротивления, а ток  $I_2$  в рабочей рамке зависит от измеряемого сопротивления. Так как измерителем является двухрамочный магнитоэлектрический логометр, измеряющий отношение двух токов, то показания прибора не зависят от напряжения генератора и его шкала градуируется непосредственно в мегомах или килоомах. Генератор вращается от руки за рукоятку, при этом скорость вращения должна быть около 120 об/мин. При вращении якоря в его обмотке индуцируется переменная электродвижущая сила, которая при помощи коллектора выпрямляется. Как было сказано выше, показания прибора в широких пределах не зависят от напряжения генератора, а следовательно от скорости вращения рукоятки, но несмотря на это генератор снабжается специальным центробежным регулятором. Регулятор устроен так, что при скорости вращения рукоятки свыше 120 об/мин напряжение генератора практически остается постоянным. Для того чтобы исключить влияние поверхностных токов утечки, выведен третий зажим Э (экран). На крышке прибора показаны два положения переключателя, которые отмечены надписями: МΩ и кΩ. Если переключатель находится в положении МΩ, то измеряемое сопротивление соединено последовательно с рабочей рамкой. Мы получаем последовательную схему мегомметра (омметра — логометра).

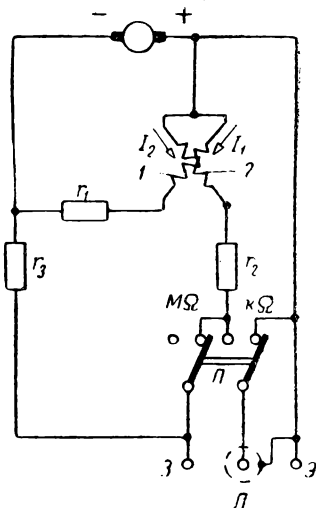


Рис. 136. Принципиальная схема мегомметра (омметра — логометра) типа М-1101



Если же переключатель находится в положении  $\kappa\Omega$ , то измеряемое сопротивление включается параллельно с цепью рабочей рамки. Мы получаем параллельную схему мегомметра (омметра — логометра). В этом случае предел измерения мегомметра уменьшается.

### Измерение сопротивления изоляции мегомметром

**Измерение сопротивления изоляции проводов относительно земли.** Измерение сопротивления изоляции может быть произведено по схемам, показанным на рис. 137. Как видно из схем, измерение сопротивления изоляции может быть произведено без экранирования и с экранированием от токов утечки. Экраниро-

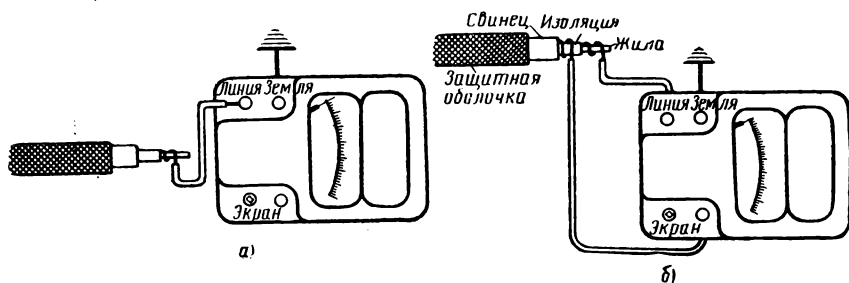


Рис. 137. Схемы включения мегомметра (омметра — логометра) типа М-1101:

а — измерение сопротивления изоляции без зажима «экран», б — измерение сопротивления изоляции с зажимом «экран»

ванием пользуются при измерении больших сопротивлений, например изоляции кабеля. Опыт измерения сопротивления изоляции производится следующим образом. Обесточиваем линию, подлежащую испытанию. Производим проверку исправности прибора. Для этого вращаем рукоятку генератора при разомкнутых зажимах и следим, чтобы стрелка прибора установилась на отметку  $\infty$  шкалы мегомов, если переключатель находится в положении  $M\Omega$ , или отметку 0 той же шкалы мегомов, если переключатель находится в положении  $\kappa\Omega$ . Если это не соблюдается, то прибор неисправен. Затем присоединяем поочередно испытываемые провода к зажиму\* «линия», а зажим «земля» — к заземленному проводнику. Вращаем рукоятку генератора со скоростью приблизительно 120 об/мин и производим отсчет по шкале прибора. Результаты наблюдений записываем в табл. 32.

\* Обычно на мегомметрах зажим «линия» обозначается буквой Л, а зажим «земля» — буквой З, как показано на рис. 136.

Таблица 32

№ п/п	Фаза	Величина сопротивления изоляции провода относительно земли $r_{из}$	Примечание
		<i>Мом</i>	
1	A		
2	B		
3	C		
4	O		

Если измерение сопротивления изоляции производится по схеме рис. 137, б, то опыт производится следующим образом. Переключатель ставим в положение *МО*, жилу кабеля присоединяем к зажиму «линия», а зажим «земля» заземляем. На оголенную изоляцию кабеля наматываем несколько витков голой проволоки и присоединяем ее к зажиму «экран» мегомметра. Вращаем рукоятку генератора со скоростью приблизительно 120 об/мин и производим отсчет по шкале прибора.

**Измерение сопротивления изоляции обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя.** Опыт производится следующим образом. Присоединяем зажим «линия» к одной фазе обмотки статора, а зажим «земля» — к корпусу машины. Вращаем рукоятку генератора со скоростью приблизительно 120 об/мин и производим отсчет по шкале прибора. Аналогичные измерения производим с двумя другими фазами обмоток статора. Результаты измерений записываем в табл. 33.

Таблица 33

№ п/п	Величина сопротивления изоляции обмоток фаз статора относительно корпуса $r_{из}$ , <i>Мом</i>			Номинальные данные двигателя	Примечание
	фаза I	фаза II	фаза III		
1					

Измерение сопротивлений изоляции между обмотками статора трехфазного асинхронного двигателя производится следующим образом. Присоединяем к зажиму «линия» фазу I, а к зажиму «земля» фазу II статора. Вращаем рукоятку генератора со скоростью приблизительно 120 об/мин и производим отсчет по шкале прибора. Аналогичные измерения производим и с другими фазами. Результаты измерений записываем в табл. 34.

Т а б л и ц а 34

$\lambda_{\text{из}}$ п/п	Величина сопротивления изоляции между обмотками (фазами) статора $r_{\text{из}}$ , <i>Мом</i>			Примечание
	фазы I—II	фазы II—III	фазы III—I	
1				

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с устройством мегомметра.
2. Измерить сопротивления изоляции проводов относительно земли.
3. Измерить сопротивление изоляции между проводами.
4. Измерить сопротивления изоляции обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя относительно корпуса.
5. Измерить сопротивления изоляции между обмотками статора трехфазного асинхронного двигателя.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите устройство и принцип действия мегомметра типа М-1101.
2. Почему перед началом эксплуатации электрической сети, а также периодически, в течение всего срока эксплуатации сети, производится измерение изоляции?
3. Как производится измерение изоляции проводов относительно земли и между проводами?
4. Как производится измерение сопротивления изоляции обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя относительно корпуса?
5. Как производится измерение сопротивления изоляции между обмотками статора трехфазного асинхронного двигателя?

## Глава VII

### ТРАНСФОРМАТОРЫ

РАБОТА № 26

#### ИСПЫТАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

##### Цель работы

Целью работы является изучение конструкции и принципа действия однофазного трансформатора, а также методов испытания трансформатора, т. е. ознакомление с опытами холостого хода, короткого замыкания и путем непосредственной нагрузки трансформатора. На основании полученных данных опыта сделать вывод об исправности трансформатора.

##### Общие сведения

*Трансформатором* называется статический электромагнитный аппарат, в котором переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток другого напряжения (частота при этом остается неизменной). Процесс подобного преобразования энергии называют *трансформацией*. Следует отметить, что всякий трансформатор является аппаратом обратимым и может служить как для повышения, так и для понижения напряжения. Если трансформатор предназначен для повышения напряжения, то он называется *повышающим*, а если для понижения, то *понижающим*.

По числу фаз различают трансформаторы однофазные и многофазные (обычно трехфазные). На рис. 138 изображена принципиальная схема однофазного двухобмоточного трансформатора, причем для наглядности обмотки показаны на разных стержнях, а на самом деле эти обмотки располагают на одном стержне. *Первичной обмоткой* называется та обмотка, к которой электрическая энергия подводится, а *вторичной обмоткой* называется та обмотка, от которой электрическая энергия отводится. *Обмоткой высшего напряжения* (ВН) называется обмотка, приключенная к сети более высокого напряжения, а обмотка, приключен-

ная к сети с меньшим напряжением, называется *обмоткой низшего напряжения* (НН).

Согласно ГОСТ 401—41 каждый трансформатор снабжается щитком, на котором указываются: 1) наименование министерства; 2) наименование и адрес завода-изготовителя; 3) обозначение типа; 4) ГОСТ 401—41; 5) заводской номер; 6) год выпуска;

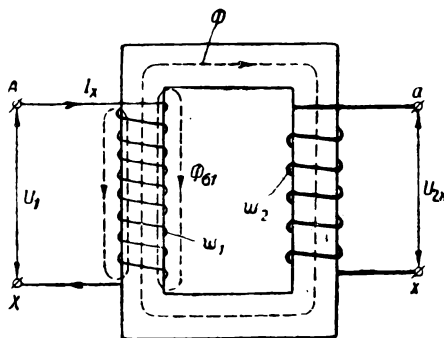


Рис. 138. Принципиальная схема однофазного двухобмоточного трансформатора со стальным сердечником

7) число фаз \*; 8) частота в герцах; 9) род установки (внутренняя или наружная); 10) номинальная мощность в кВа; 11) схема и группа соединения обмоток; 12) напряжения номинальные и напряжения ответвлений обмоток в в или кВ и номинальные токи в а; 13) напряжения короткого замыкания в %; 14) способ охлаждения; 15) полный вес трансформатора в кг или т; 16) вес масла в кг или т\*\*;

17) вес выемной части в кг или т; 18) положения переключателя, обозначенные на его приводе.

### Опыт холостого хода трансформатора

*Холостым ходом трансформатора* называется такой режим его работы, когда к зажимам одной из обмоток, например первичной, подводится номинальное напряжение при номинальной частоте, а вторичная обмотка разомкнута. Работа трансформатора основана на принципе взаимной индукции. Если к зажимам А—Х первичной обмотки (рис. 138) приложено напряжение  $U_1$ , то под действием этого напряжения по первичной обмотке будет проходить ток холостого хода  $I_x$ , который создаст переменный магнитный поток  $\Phi$  в сердечнике трансформатора и поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  первичной обмотки. Поток  $\Phi$ , сцепляющийся с обеими обмотками, индуцирует в первичной обмотке э. д. с. самоиндукции:

$$E_1 = 4,44w_1f\Phi_m \quad (1)$$

\* Эти данные относятся к трехфазному трансформатору.

\*\* Обычно в электротехнических лабораториях при испытаниях применяются трансформаторы воздушного охлаждения.

а во вторичной обмотке э. д. с. взаимной индукции \*

$$E_2 = 4,44\omega_2 f \Phi_m, \quad (2)$$

где  $E_1$  — э. д. с., индуцируемая в первичной обмотке, в;  
 $E_2$  — э. д. с., индуцируемая во вторичной обмотке, в;  
 $\omega_1$  и  $\omega_2$  — числа витков первичной и вторичной обмоток;  
 $f$  — частота переменного тока, гц;  
 $\Phi_m$  — амплитуда магнитного потока, вб.

Разделив одно уравнение на другое, получим коэффициент трансформации э. д. с. или просто коэффициент трансформации трансформатора:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (3)$$

Так как ток холостого хода  $I_x$  составляет только от 10 до 2,2% от номинального тока \*\*, то падением напряжения в первичной обмотке трансформатора в виду его малой величины можно пренебречь, поэтому э. д. с., индуцируемая в первичной обмотке, будет приблизительно равна напряжению  $E_1 \approx U_1$ , а  $E_2 = U_{2x}$ . В этом случае формулу (3) можно представить так:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \approx \frac{U_1}{U_{2x}}. \quad (4)$$

Согласно ГОСТ 401—41 коэффициентом трансформации трансформатора называется отношение номинальных напряжений, т. е. отношение напряжений на зажимах обмоток трансформатора при холостом ходе. Обычно берется отношение высшего напряжения к низшему. Мощность холостого хода трансформатора расходуется на потери в стали сердечника трансформатора (магнитные потери) и потери в меди первичной обмотки (электрические потери):

$$P_x = P_{ст} + P_{м1} = P_{ст} + r_1 I_x^2, \quad (5)$$

где  $P_{ст}$  — потери в стали сердечника трансформатора, вт;  
 $P_{м1} = r_1 I_x^2$  — потери в меди первичной обмотки, вт;  
 $r_1$  — активное сопротивление первичной обмотки, ом.

Так как при холостом ходе трансформатора потери  $r_1 I_x^2$  в меди первичной обмотки очень малы по сравнению с мощностью холостого хода  $P_x$ , то ими можно пренебречь и считать, что мощность холостого хода тратится на потери в стали, состоящие из потерь на гистерезис  $P_r$  и потерь на вихревые токи  $P_{в.т}$

$$P_x \approx P_{ст} = P_r + P_{в.т} \quad (6)$$

---

\* В дальнейшем вместо терминов «э. д. с. самоиндукции» и «э. д. с. взаимной индукции» будем употреблять термины «э. д. с. первичной обмотки» и «э. д. с. вторичной обмотки».

\*\* Чем больше мощность трансформатора, тем меньше ток холостого хода.

Коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора равен:

$$\cos \varphi_x = \frac{P_x}{U_1 I_x} . \quad (7)$$

Следовательно, опыт холостого хода трансформатора дает возможность определить коэффициент трансформации  $k$  и потери  $P_{ст}$  в стали сердечника трансформатора.

**Схема соединения и проведение опыта.** На рис. 139 изображена схема для определения коэффициента трансформации трансформатора. В этой схеме  $V_1$  — вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах первичной обмотки;  $V_2$  — вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах вторичной обмотки. Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , записываем показания вольтметров  $V_1$  и  $V_2$  в табл. 35; при этом частота должна быть равна номинальной. Следует отметить, что при определении коэффициента трансформации необязательно устанавливать номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки. Согласно ГОСТ 3484—55 подводимое напряжение не должно превышать номинального напряжения трансформатора, но и не должно быть чрезмерно малым. Оно может быть от одного до нескольких десятков процентов номинального напряжения. Причем меньшие значения относятся к трансформаторам большей мощности, а большие значения — к трансформаторам меньшей мощности.

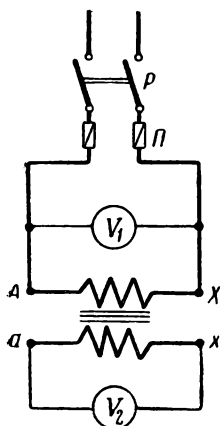


Рис. 139. Схема для определения коэффициента трансформации однофазного трансформатора

Т а б л и ц а 35

№ п/п	Измерено				Вычислено	Примечание
	$U_1$		$U_{2x}$		$k = \frac{U_1}{U_{2x}}$	
	$C_V =$		$C_V =$			
	дел.	в	дел.	в		

Зная показания вольтметров, определяем коэффициент трансформации по формуле (4).

На рис. 140 изображена схема для опыта холостого хода трансформатора. Из схемы видно, что в первичную цепь включены амперметр  $A_1$  для измерения тока холостого хода  $I_x$ , вольтметр  $V_1$  для измерения напряжения  $U_1$  на зажимах первичной обмотки, ваттметр  $W$  для измерения потерь холостого хода  $P_x$ , автотрансформатор  $AT$  для регулирования напряжения на зажимах первичной обмотки.

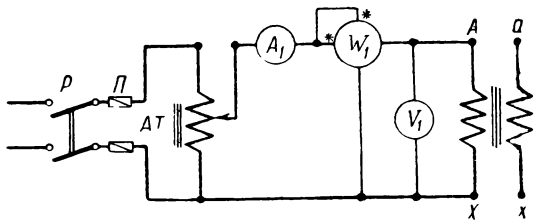


Рис. 140. Схема опыта холостого хода однофазного трансформатора

Амперметр и ваттметр следует взять для токов (10—15%)  $I_{1н}$ . Так как при холостом ходе трансформатора коэффициент мощности  $\cos \varphi_x$  небольшой, то для измерения потерь холостого хода рекомендуется применять специальный ваттметр, который предназначен для измерения мощности при малых значениях коэффициента мощности. Опыт производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , автотрансформатором устанавливаем номинальное напряжение  $U_1=U_{1н}$  на зажимах первичной обмотки трансформатора при номинальной частоте, при этом вторичная обмотка должна быть разомкнута. Показания приборов записываем в табл. 36.

Т а б л и ц а 36

№ п/п	Измерено						Вычислено	Примечание
	$U_1$		$I_x$		$P_x$		$\cos \varphi_x = \frac{P_x}{U_1 I_x}$	
	$C_V =$		$C_A =$		$C_W =$			
	дел.	в	дел.	а	дел.	вт		

### Опыт короткого замыкания трансформатора

С помощью опыта короткого замыкания трансформатора можно определить сопротивления обмоток, напряжение коротко-



го замыкания и потери в меди обмоток трансформатора. Схемы для опыта короткого замыкания трансформатора изображены на рис. 141. В этих схемах амперметр и ваттметр\* должны быть выбраны на номинальный ток первичной обмотки, а вольтметр берется для напряжения, равного 5—11% номинального. Опыт короткого замыкания может производиться или в холодном состоянии трансформатора, когда температура его обмоток прак-

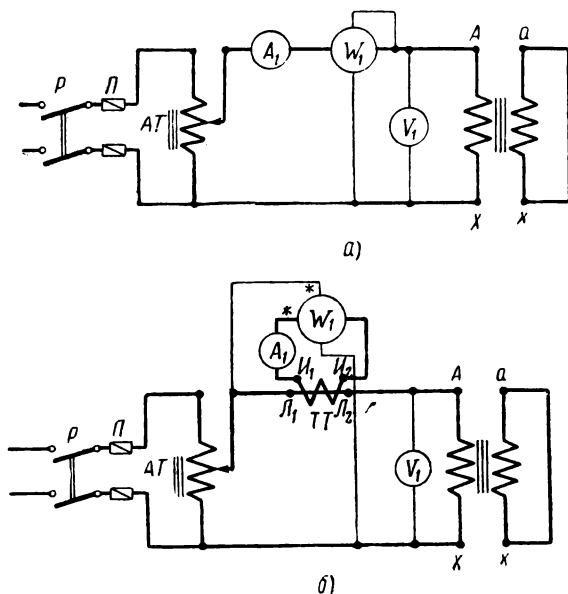


Рис. 141. Схемы опыта короткого замыкания однофазного трансформатора

тически не отличается от температуры окружающей среды, или при температуре, соответствующей нормальным условиям работы трансформатора. Опыт короткого замыкания трансформатора производится следующим образом. Вторичная обмотка (обычно низшего напряжения) замыкается накоротко коротким проводником с большим сечением, а к первичной обмотке (высшего напряжения) при помощи автотрансформатора или реактивной катушки подводится при номинальной частоте такое пониженное напряжение  $U_{1к}$ , при котором токи в обмотках равны номинальным\*\*. Показания приборов записываем в табл. 37.

\* При применении измерительного трансформатора тока показания ваттметра  $W_1$  и амперметра  $A_1$  необходимо умножить на номинальный коэффициент трансформации трансформаторного тока.

\*\* Номинальными токами, первичным и вторичным, называются токи, указанные на щитке и определяемые из соответствующих номинальных значений мощности и напряжений (ГОСТ 401—41).

Таблица 37

№ п/п.	Измерено						Вычислено												Примечание																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	$U_{1к}$		$I_{1к}$		$P_{1к}$		$\vartheta$	$z_k$	$r_k$	$x_k$	$\cos\varphi_k$	$r_k \vartheta_n$	$z_k \vartheta_n$	$u_k$	$u_a$	$u_p$	$P_k$																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	$C_V =$		$C_A =$		$C_W =$																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	дел.	в	дел.	а	дел.	вт												град.		ом	ом	ом	—	ом	ом	°/о	°/о	°/о	вт																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	дел.	в	дел.	а	дел.	вт												град.		ом	ом	ом	—	ом	ом	°/о	°/о	°/о	вт																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											</

Если опыт короткого замыкания производился не при номинальном токе, а немного меньшем (но не менее чем  $\frac{1}{4}$  номинального тока трансформатора), то потери короткого замыкания и напряжение короткого замыкания приводят к номинальному току трансформатора по формулам:

$$P_{1к} = P_k' \left( \frac{I_{1н}}{I'} \right)^2, \quad U_{1к} = U'_{1к} \frac{I_{1н}}{I'}, \quad (8)$$

где  $P_k'$  и  $U'_{1к}$  — потери и напряжение короткого замыкания, измеренные при опыте;

$I'$  — ток, при котором производился опыт.

Так как напряжение короткого замыкания равно 5,5—10,5% от номинального напряжения, то магнитный поток мал ( $U_{1к} \equiv \Phi$ ) и потери в стали, пропорциональные квадрату потока (магнитной индукции), незначительны и ими можно пренебречь. В этом случае можно приближенно считать, что мощность короткого замыкания (или просто потери короткого замыкания) расходуется на потери в меди обмоток трансформатора, т. е.

$$P_{1к} = r_k I_{1к}^2, \quad (9)$$

откуда

$$r_k = \frac{P_{1к}}{I_{1к}^2},$$

где  $r_k = r_1 + k^2 r_2$  — активное сопротивление короткого замыкания трансформатора;

$r_1$  — активное сопротивление первичной обмотки;

$k$  — коэффициент трансформации;

$r_2$  — активное сопротивление вторичной обмотки.

Полное сопротивление короткого замыкания трансформатора:

$$z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}. \quad (10)$$

Зная  $z_k$  и  $r_k$ , можно найти индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора:

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}, \quad (11)$$

где  $x_k = x_1 + k^2 x_2$ ;

$x_1$  — индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки;

$x_2$  — индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки.

Коэффициент мощности при опыте короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{r_k}{z_k} \quad \text{или} \quad \cos \varphi_k = \frac{P_{1k}}{U_{1k} I_{1k}}. \quad (12)$$

Если опыт короткого замыкания трансформатора производится в холодном состоянии, то согласно ГОСТ 3484—55 сопротивления короткого замыкания трансформатора необходимо привести к номинальной температуре  $\vartheta_n$  обмотки. Обычно эту температуру принимают равной  $75^\circ$  (ГОСТ 401—41). Следовательно, активное сопротивление короткого замыкания будет равно:

$$r_{k\vartheta_n} = r_k k_1, \quad (13)$$

где  $k_1 = \frac{\vartheta_n + 235}{\vartheta + 235}$ ;

$\vartheta$  — температура обмоток при опыте короткого замыкания.

Полное сопротивление короткого замыкания трансформатора:

$$z_{k\vartheta_n} = \sqrt{r_{k\vartheta_n}^2 + x_k^2}, \quad (14)$$

так как можно считать, что  $x_k$  от температуры не зависит.

Номинальное напряжение короткого замыкания \*

$$U_k = z_{k\vartheta_n} I_{1n}. \quad (15)$$

Обычно напряжение короткого замыкания  $U_k$  выражается в процентах от номинального напряжения той обмотки, со стороны которой производились измерения при опыте короткого замыкания:

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1n}} 100\% = \frac{z_{k\vartheta_n} I_{1n}}{U_{1n}} 100\%. \quad (16)$$

---

\*  $I_{1k} = I_{1n}$ .

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания определяются по формулам:

$$u_a = \frac{r_{кз} I_{1н}}{U_{1н}} 100\% = \frac{r_{кз} I_{1н}^2}{U_{1н} I_{1н}} 100\% = \frac{P_{к}}{S_{н}} 100\%. \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} u_p &= \frac{x_{к} I_{1н}}{U_{1н}} 100\% \\ \text{или} \quad u_p &= \sqrt{u_{к}^2 - u_a^2}, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где  $P_{к} = k_1 P_{1к}$  — потери короткого замыкания трансформатора при номинальной температуре обмоток, *вт*;  
 $P_{1к}$  — потери короткого замыкания трансформатора при температуре, при которой производился опыт, *вт*;  
 $S_{н}$  — номинальная полная мощность трансформатора, *ва*.

### Внешняя характеристика однофазного трансформатора

Внешняя характеристика однофазного трансформатора представляет собой зависимость напряжения  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки от тока  $I_2$  вторичной цепи при неизменном номинальном напряжении  $U_{1н}$  на зажимах первичной обмотки, при неизменной номинальной частоте  $f$  и при неизменном коэффициенте мощности  $\cos \varphi_2$  нагрузки:

$$U_2 = f(I_2) \text{ при } U_1 = U_{1н} = \text{const}, f = \text{const и } \cos \varphi_2 = \text{const}.$$

Схемы для снятия внешней характеристики показаны на рис. 142. В этих схемах  $P$  и  $P_1$  — двухполюсные рубильники;  $P_2$  — однополюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $AT$  — автотрансформатор для регулирования напряжения;  $TT$  — трансформатор тока;  $A_1$  и  $A_2$  — амперметры, измеряющие токи в первичной и вторичной обмотках трансформатора;  $V_1$  и  $V_2$  — вольтметры, измеряющие напряжения на зажимах первичной и вторичной обмоток;  $W_1$  и  $W_2$  — ваттметры, измеряющие мощность, подводимую к трансформатору и отдаваемую им.

Снятие внешней характеристики для чисто активной нагрузки ( $\cos \varphi_2 = 1$ ) производится следующим образом. Включив первичную обмотку под номинальное напряжение при номинальной частоте и при разомкнутой вторичной обмотке (рубильники  $P_1$  и  $P_2$  разомкнуты), записываем показания приборов в табл. 38. Затем включаем рубильник  $P_1$  (при этом рубильник  $P_2$  должен быть разомкнут) и постепенно увеличиваем нагрузку (уменьшением сопротивления реостата во внешней цепи или включением ламп

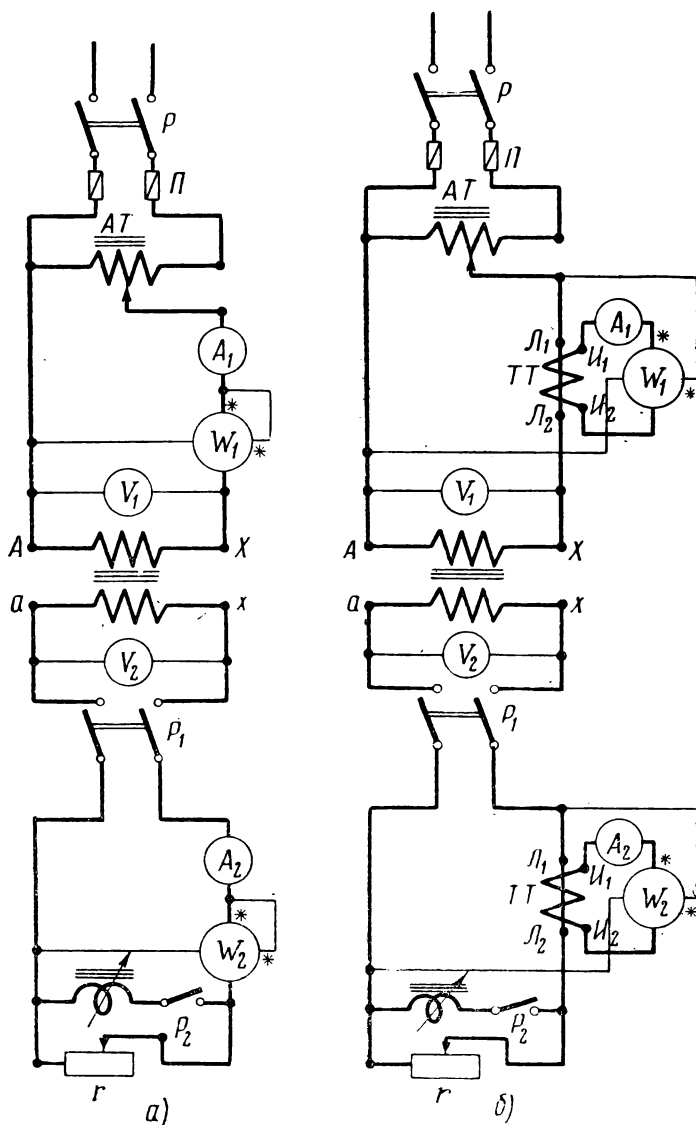


Рис. 142. Схемы для снятия внешних характеристик однофазного трансформатора:

*а* — при помощи ваттметра, *б* — при помощи трансформатора тока и ваттметра

накаливания) от нуля до номинальной \* или немного больше номинальной. Во время опыта напряжение на зажимах первичной обмотки и частота должны быть неизменными. При каждом изменении нагрузки записываем показания приборов в табл. 38.

Таблица 38

№ п/п	И з м е р е н и о								Вычислено			Примечание				
	$U_1$		$I_1$		$P_1$		$U_2$		$I_2$		$P_2$		$\cos \varphi_1$	$\cos \varphi_2$	$\eta$	
	$C_V =$		$C_A =$		$C_W =$		$C_V =$		$C_A =$		$C_W =$					
	дел.	в	дел.	а	дел.	вт	дел.	в	дел.	а	дел.		вт	—	—	‰
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																

Снятие внешней характеристики для индуктивной (смешанной) нагрузки ( $\cos \varphi_2 = 0,8$ ) производится так же, как и для чисто активной нагрузки (рубильники  $P_1$  и  $P_2$  включены), но отличается от последней только тем, что во время опыта коэффициент мощности  $\cos \varphi_2$  поддерживается постоянным \*\* и определяется по формуле

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{U_2 I_2}. \quad (19)$$

На основании полученных данных опыта строим внешние характеристики (рис. 143). Внешняя характеристика показывает, как изменяется напряжение  $U_2$  при изменении нагрузки, т. е. с увеличением нагрузки напряжение падает.

Кроме того, падение напряжения при одном и том же токе зависит также от коэффициента мощности  $\cos \varphi_2$ ; чем меньше  $\cos \varphi_2$ , тем больше падение напряжения. При помощи внешней характеристики можно определить

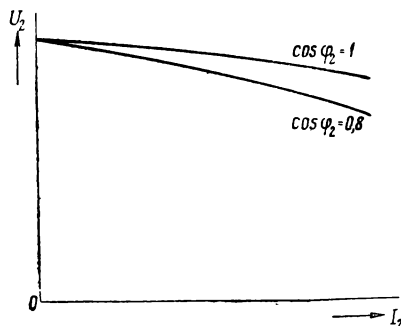


Рис. 143. Внешние характеристики однофазного трансформатора при  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$

\* Номинальной нагрузкой трансформатора называется нагрузка номинальным током (ГОСТ 401—41).

\*\* Изменением индуктивности катушки при помощи стального сердечника и регулированием сопротивления реостата  $r$ .

процентное изменение (потерю) напряжения по формуле

$$\Delta U^0/\% = \frac{U_{2x} - U_2}{U_{2x}} 100, \quad (20)$$

где  $U_{2x}$  — напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора при холостом ходе;

$U_2$  — напряжение на зажимах вторичной обмотки при нагрузке.

Коэффициент полезного действия трансформатора можно определить по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%, \quad (21)$$

где  $P_1$  — мощность, подводимая к трансформатору;

$P_2$  — мощность, отдаваемая трансформатором.

### **Определение коэффициента полезного действия трансформатора по данным опытов холостого хода и короткого замыкания**

Чтобы определить коэффициент полезного действия (к. п. д.) по данному методу, необходимо произвести два опыта: опыт холостого хода и опыт короткого замыкания. При опыте холостого хода определяем потери  $P_{ст} \approx P_x$  в стали сердечника трансформатора для номинального напряжения  $U_{1н}$ , которые остаются постоянными при всех нагрузках трансформатора. При опыте короткого замыкания определяем потери  $P_k$  в обмотках трансформатора для номинальной нагрузки. Эти потери изменяются пропорционально квадрату тока или то же самое, квадрату нагрузки трансформатора при условии, что напряжение  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки при изменении нагрузки практически можно считать постоянным ( $U_2 \approx \text{const}$ ). Согласно ГОСТ 401—41 к. п. д. при номинальной нагрузке определяется косвенным методом по формуле

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{2н}}{P_1} 100\% = \frac{P_{2н}}{P_{2н} + P_x + P_k} 100\% = \\ &= \left( 1 - \frac{P_x + P_k}{P_{2н} + P_x + P_k} \right) 100\%, \end{aligned} \quad (22)$$

где  $P_{2н} = S_n \cos \varphi_2$  — номинальная активная мощность, отдаваемая трансформатором;

$S_n$  — номинальная полная мощность трансформатора.

Коэффициент полезного действия для любой нагрузки определяется по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_K} 100\% = \left(1 - \frac{P_x + \beta^2 P_K}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_K}\right) 100\%, \quad (23)$$

где  $P_2 = \beta S_H \cos \varphi_2$  — мощность, отдаваемая трансформатором;  
 $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$  — коэффициент загрузки трансформатора.

Задаваясь различными значениями коэффициента загрузки, например  $\beta = \frac{1}{4}, \frac{2}{4}, \frac{3}{4}, \frac{4}{4}$  и  $\frac{5}{4}$ , определить для каждой нагрузки коэффициент полезного действия трансформатора. На основании полученных данных построить кривую  $\eta = f(P_2)$ , как показано на рис. 144.

#### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с трансформатором и записать данные его щитка и данные измерительных приборов, необходимых для выполнения работы.

2. Собрать схему рис. 139. Измерить напряжения  $U_1$  и  $U_{2x}$  на зажимах обмоток трансформатора. Определить коэффициент трансформации трансформатора.

3. Собрать схему рис. 140 для опыта холостого хода трансформатора. Измерить  $U_1 = U_{1H}$ ,  $I_x$ ,  $P_x$ . Вычислить  $\cos \varphi_x$ .

4. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 141, для опыта короткого замыкания трансформатора. Подвести к первичной обмотке трансформатора такое пониженное напряжение  $U_{1K}$ , чтобы  $I_{1K} = I_{1H}$ . Измерить  $I_{1K}$ ,  $U_{1K}$ ,  $P_{1K}$ . Вычислить  $r_K$ ,  $z_K$ ,  $x_K$ ,  $\cos \varphi_K$ ,  $u_K$ ,  $u_a$ ,  $u_p$ . Если опыт короткого замыкания трансформатора производился в холодном состоянии, то необходимо измерить температуру окружающей среды  $\vartheta$  и привести величины:  $r_K$ ,  $z_K$ ,  $u_a$ ,  $u_K$  и  $P_K$  к номинальной температуре обмоток трансформатора.

5. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 142. Снять внешнюю характеристику трансформатора для чисто активной нагрузки ( $\cos \varphi_2 = 1$ ). Поддерживать неизменными  $U_1$  и  $f$ . Измерить  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $U_2$ ,  $I_2$  и  $P_2$ . Вычислить  $\Delta U\%$ ,  $\cos \varphi_1$  и  $\eta$  для всех измерений. Построить внешнюю характеристику  $U_2 = f(I_2)$ .

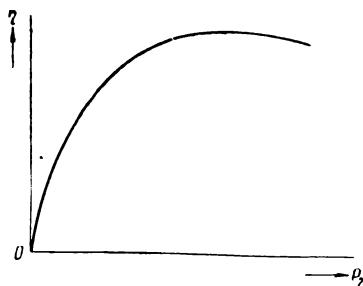


Рис. 144. Кривая зависимости к. п. д.  $\eta$  трансформатора от полезной мощности  $P_2$



Снять внешнюю характеристику для индуктивной (смешанной) нагрузки. Поддерживать неизменными  $U_1$ ,  $f$  и  $\cos \varphi_2$ .

Произвести те же измерения и вычисления, как и для чисто активной нагрузки. Построить внешнюю характеристику  $U_2 = f(I_2)$ .

6. Определить коэффициент полезного действия по методу холостого хода и короткого замыкания для  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$ .

7. Построить кривые  $\eta = f(P_2)$  для  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните устройство и принцип действия трансформатора?
2. Назначение трансформатора.
3. Где устанавливаются повышающие и понижающие трансформаторы?
4. Как можно отличить в трансформаторе по внешним признакам обмотку высшего напряжения от обмотки низшего напряжения?
5. Что называется коэффициентом трансформации?
6. Что такое опыт холостого хода трансформатора? Объясните, какие величины определяются из опыта холостого хода.
7. Что называется опытом короткого замыкания трансформатора? Объясните, какие величины определяются из опыта короткого замыкания.
8. Что называется внешней характеристикой трансформатора?
9. Почему при увеличении нагрузки, чисто активной или индуктивной (смешанной), происходит уменьшение напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора?
10. Напишите формулу коэффициента полезного действия трансформатора.
11. Почему ГОСТ рекомендует определять к. п. д. трансформатора косвенным методом?
12. Постройте векторную диаграмму трансформатора для чисто активной нагрузки.
13. Постройте векторную диаграмму для индуктивной (смешанной) нагрузки.
14. Как включается измерительный трансформатор тока? Почему нельзя оставлять вторичную обмотку трансформатора тока разомкнутой?

### РАБОТА № 27

#### ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ТРЕМЯ ОДНОФАЗНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

#### Цель работы

Целью работы является исследование схем трансформирования трехфазного тока тремя однофазными трансформаторами.

#### Общие сведения

Для трансформирования трехфазного тока применяются или трехфазные трансформаторы или «трехфазные группы»\*, состоя-

---

\* Вместо термина «трехфазная группа» применяется термин «трансформаторная группа» или «групповой трансформатор».

щие из трех совершенно одинаковых однофазных трансформаторов. Трехфазная группа обычно дороже трехфазного трансформатора, имеет немного меньший к. п. д. и занимает больше места. Трехфазная группа имеет некоторые преимущества при больших мощностях, где условия транспорта и надежность при эксплуатации играют важную роль. Наибольшее применение на практике получили трехфазные стержневые трансформаторы.

Трехфазные трансформаторы согласно ГОСТ 401—41 должны иметь на щитке указание о группе соединения обмоток и обозначение выводов на крышке буквами  $A, B, C$  и  $X, Y, Z$  начал и концов для обмоток высшего напряжения и  $a, b, c$  и  $x, y, z$  соответственно для обмоток низшего напряжения. Начало и конец обмотки высшего напряжения однофазного трансформатора обозначаются буквами  $A$  и  $X$ , а обмотки низшего напряжения буквами  $a$  и  $x$ . В этом случае образование трехфазной группы из однофазных трансформаторов не представляет никаких затруднений. На практике могут быть случаи, когда у однофазных трансформаторов отсутствуют обозначения и неизвестно направление намотки обмоток. В таких случаях не следует произвольно делать соединения между зажимами трансформаторов, так как это может привести к коротким замыканиям обмоток. Первичные обмотки между собой могут быть соединены любыми концами, а вторичные — только вполне определенным образом. Ниже мы рассмотрим способы, указывающие на правильность или неправильность соединения обмоток.

### Соединение однофазных трансформаторов в трехфазную группу по схеме звезда — звезда

Обозначив зажимы первичных обмоток однофазных трансформаторов буквами  $A_1X_1, A_2X_2, A_3X_3$ , а зажимы вторичных обмоток буквами  $a_1x_1, a_2x_2, a_3x_3$ , соединяем первичные обмотки по схеме звезда (рис. 145) и приключаем при помощи рубильника к сети. Соединив два произвольных конца  $a_1$  и  $a_2$  вторичных обмоток двух трансформаторов, измеряем вольтметром напряжение между оставшимися свободными концами  $x_1$  и  $x_2$ . Если показание вольтметра равно  $\sqrt{3} U_\phi$ , то соединение концов  $a_1$  и  $a_2$  сделано правильно; если же показание вольтметра равно  $U_\phi$ , то концы одной из обмоток следует пересоединить. После того как мы нашли правильное соединение двух фаз, присоединяем любым концом (например, концом  $a_3$ ) к общей точке  $a_1a_2$  третью фазу  $a_3—x_3$  (рис. 146) и измеряем вольтметром напряжения между свободными концами  $x_1—x_2, x_2—x_3$  и  $x_1—x_3$ . Если показания вольтметра во всех случаях равны  $\sqrt{3} U_\phi$ , то звезда составлена правильно. Если же показания вольтметра между

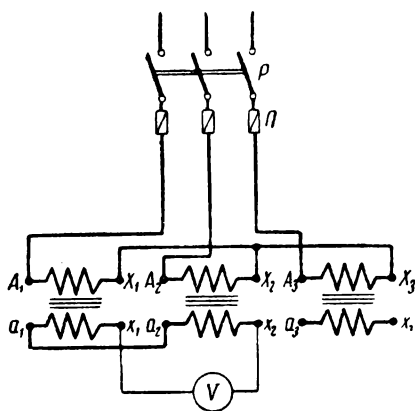


Рис. 145. Схема для определения начал и концов обмоток трансформаторов

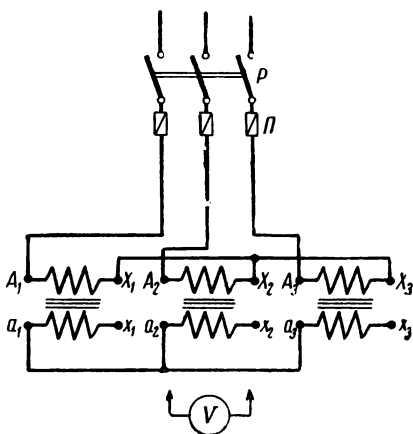
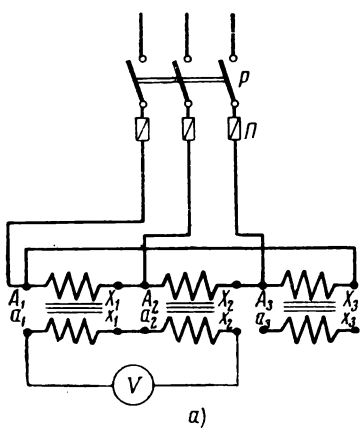
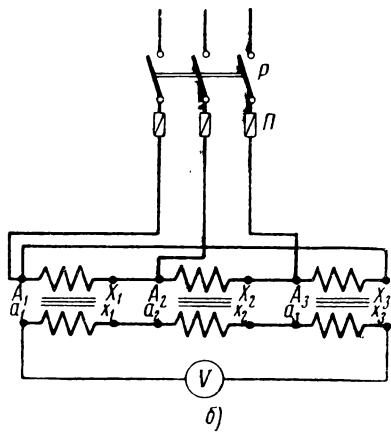


Рис. 146. Схема для определения начал и концов обмоток трансформаторов



а)



б)

Рис. 147. Схемы для определения начал и концов обмоток трансформаторов:

а — для первого и второго трансформаторов, б — для третьего трансформатора

концами  $x_2 - x_3$  и  $x_1 - x_3$  равны  $U_\phi$ , то концы третьей фазы следует пересоединить. Все сделанные соединения зажимов и измерения напряжений записываем в табл. 39.

### **Соединение трех однофазных трансформаторов в трехфазную группу по схеме треугольник — треугольник**

Первичные обмотки однофазных трансформаторов соединяем треугольником и приключаем при помощи рубильника  $P$  к сети. Соединив два конца  $x_1$  и  $a_2$  двух вторичных обмоток, измеряем вольтметром напряжение между оставшимися свободными концами  $a_1$  и  $x_2$ . Если показание вольтметра равно  $U_\phi$  (рис. 147, а), то концы  $x_1$  и  $a_2$  соединены правильно; если же показание вольтметра равно  $\sqrt{3} U_\phi$ , то концы одной обмотки следует пересоединить. Затем к одному из концов  $a_1$  или  $x_2$  присоединяем любой конец третьей фазы (рис. 147, б) и измеряем вольтметром напряжение между оставшимися свободными концами. Если показание вольтметра равно нулю, то эти концы можно соединить; если же показание вольтметра равно  $2 U_\phi$ , то третья фаза присоединена неправильно, а чтобы получить правильное соединение, необходимо концы ее пересоединить. Все сделанные соединения зажимов и измерения напряжений записываем в табл. 39.

### **Соединение однофазных трансформаторов в трехфазную группу по схеме звезда — треугольник**

Первичные обмотки однофазных трансформаторов соединяем звездой и приключаем при помощи рубильника к сети. Соединения зажимов вторичных обмоток и измерения напряжений производятся так же, как при схеме треугольник — треугольник. Но имеются следующие отличия от схемы треугольник — треугольник: все измеряемые напряжения будут иметь величину в  $\sqrt{3}$  раз меньшую; при неправильном присоединении третьей фазы к двум правильно соединенным фазам показание вольтметров на зажимах разомкнутого треугольника будет равно  $2U_\phi$ , а при правильном присоединении третьей фазы показание вольтметра на зажимах разомкнутого треугольника может отличаться от нуля, но не более 40—60% фазного напряжения обмотки. Это происходит вследствие наличия третьих гармонических электродвижущих сил. Все сделанные соединения зажимов и измерения напряжений записываем в табл. 39.

### **Порядок проведения работы**

1. Ознакомиться с однофазными трансформаторами и записать данные щитков и вольтметра.

[illegible]

Таблица 40

[illegible]

2. Произвести соединение однофазных трансформаторов в трехфазную группу по схеме звезда — звезда.

3. Произвести соединение однофазных трансформаторов в трехфазную группу по схеме треугольник — треугольник.

4. Произвести соединение однофазных трансформаторов в трехфазную группу по схеме звезда — треугольник.

Опыты холостого хода и короткого замыкания и снятие внешней характеристики производятся так же, как и в работе № 28.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие существуют способы трансформации трехфазного тока?

2. Какие основные преимущества и недостатки трехфазной группы перед трехфазным трансформатором?

3. Как произвести соединение однофазных трансформаторов в трехфазную группу по схеме звезда — звезда, если отсутствуют обозначения зажимов обмоток трансформаторов?

4. Как произвести соединение однофазных трансформаторов в трехфазную группу по схеме треугольник — треугольник, если отсутствуют обозначения зажимов обмоток трансформаторов?

## РАБОТА № 28

### ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

#### Цель работы

Целью данной работы является изучение конструкции трехфазного трансформатора и испытание его опытами холостого хода и короткого замыкания и путем непосредственной нагрузки его.

#### Коэффициент трансформации трехфазного трансформатора

Под коэффициентом трансформации  $k$  трехфазных трансформаторов, как и однофазных трансформаторов, понимается отношение фазного напряжения  $U_{1\phi}$  обмотки высшего напряжения к фазному напряжению  $U_{2\phi x}$  обмотки низшего напряжения при холостом ходе трансформатора:

$$k = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi x}}. \quad (24)$$

Это отношение всегда больше единицы. Согласно ГОСТ 401—41 определение коэффициента трансформации производят на всех ответвлениях (если таковые имеются) обмоток и для всех фаз. Следует отметить, что при определении коэффициента трансформации трехфазного трансформатора надо еще знать способ сое-

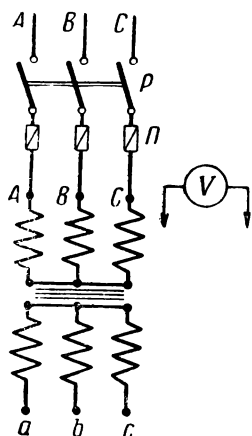


Рис. 148. Схема для определения коэффициента трансформации трехфазного трансформатора

динения его обмоток\*. Так, например, если обмотки трансформатора соединены звездой, то можно измерять первичные и вторичные напряжения или фазные или линейные и подставлять их в формулу (24). Определение коэффициента трансформации производится по схеме рис. 148 следующим образом. Включаем первичную обмотку трансформатора под номинальное напряжение (последнее может быть и меньше номинального) при номинальной частоте, а вторичная обмотка разомкнута. Измеряем напряжения на зажимах обмоток трансформатора. Показания приборов записываем в табл. 40.

Среднее значение коэффициента трансформации равно:

$$k = \frac{k_A + k_B + k_C}{3} . \quad (25)$$

### Опыт холостого хода трехфазного трансформатора

Схемы для опыта холостого хода показаны на рис. 149. Амперметры и ваттметры должны быть взяты для токов до (10—15%)  $I_{\text{н}}$ , а вольтметр на номинальное напряжение  $U_{\text{н}}$ .

Опыт холостого хода производится следующим образом. Включив рубильник  $P$ , индукционным регулятором  $ИР$  устанавливаем номинальное напряжение\*\* на зажимах первичной обмотки при номинальной частоте, а вторичная обмотка должна быть разомкнута. Показания приборов записываем в табл. 41.

Так как трансформатор имеет несимметричную магнитную цепь, то амперметры следует включать во все три фазы (ГОСТ 3484—55). Ток холостого хода трехфазного трансформатора определяется как среднее арифметическое значение токов трех фаз, т. е.

$$I_x = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} . \quad (26)$$

\* На практике часто определяют *линейный коэффициент трансформации*, который представляет собой отношение номинальных линейных напряжений. В этом случае не нужно знать, как соединены обмотки трансформатора.

\*\* Если напряжение сети не изменяется и равно номинальному напряжению трансформатора, то опыт холостого хода производится по схеме рис. 149, в.

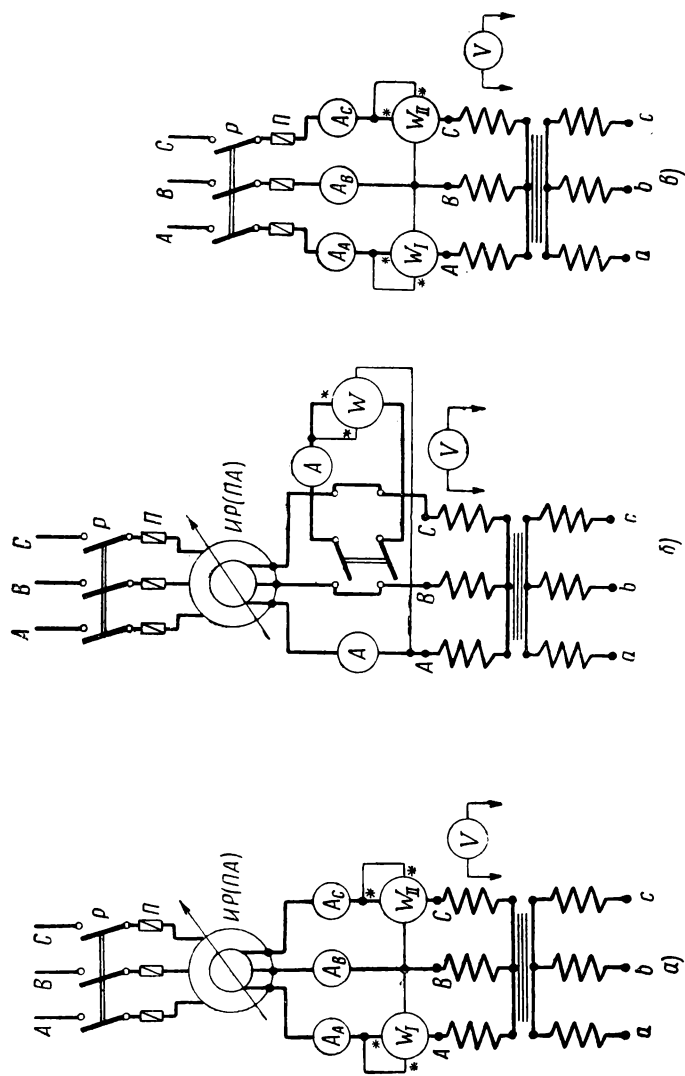


Рис. 149. Схемы опыта холостого хода трехфазного трансформатора:  
а — при помощи двух ваттметров, б — при помощи одного ваттметра с ваттметровым переключателем,  
в — при помощи двух ваттметров без индукционного регулятора



[illegible]

Таблица 42

[illegible]

Напряжение, приложенное к трансформатору при опыте холостого хода, определяется как среднее арифметическое трех измеренных линейных напряжений:

$$U_1 = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3} . \quad (27)$$

ГОСТ 3484—55 допускает также за подводимое напряжение принимать линейное напряжение на зажимах \*  $A - C$  ( $a - c$ ). Ввиду того что мощности отдельных фаз различаются по величине, измерение мощности холостого хода или просто потерь холостого хода трансформатора следует производить по методу двух ваттметров и определять по формуле

$$P_x = P_I \pm P_{II} . \quad (28)$$

Знак минус берется тогда, когда стрелка одного из ваттметров отклоняется в обратную сторону.

Коэффициент мощности холостого хода определяется по формуле

$$\cos \varphi_x = \frac{P_x}{\sqrt{3} U_1 I_x} . \quad (29)$$

Так как потери в меди первичной обмотки очень малы, то можно считать, что потери холостого хода расходуются на потери  $P_{ст}$  в стали сердечника трансформатора:

$$P_x \approx P_{ст} = P_\Gamma + P_{в.т} , \quad (30)$$

где  $P_\Gamma$  — потери на гистерезис;  
 $P_{в.т}$  — потери на вихревые токи.

### Опыт короткого замыкания трансформатора

Схемы для опыта короткого замыкания показаны на рис. 150. Амперметры и ваттметры \*\* необходимо брать на номинальный первичный ток  $I_{1н}$  для схем рис. 150,  $a, б, в$ , вольтметр на напряжение (5—15%)  $U_{1н}$ .

Опыт короткого замыкания производится следующим образом. Перед включением рубильника  $P$  следует убедиться, что индукционный регулятор  $ИР$  установлен в такое положение, чтобы напряжение на зажимах его было наименьшее, близкое к нулю,

---

\* ГОСТ рекомендует подводить напряжение к обмотке низшего напряжения, а обмотка высшего напряжения при опыте холостого хода остается разомкнутой. Обычно в учебных лабораториях делают наоборот, т. е. подводят напряжение к обмотке высшего напряжения.

\*\* При применении измерительных трансформаторов тока показания ваттметров  $W_I$  и  $W_{II}$  необходимо умножить на номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока.

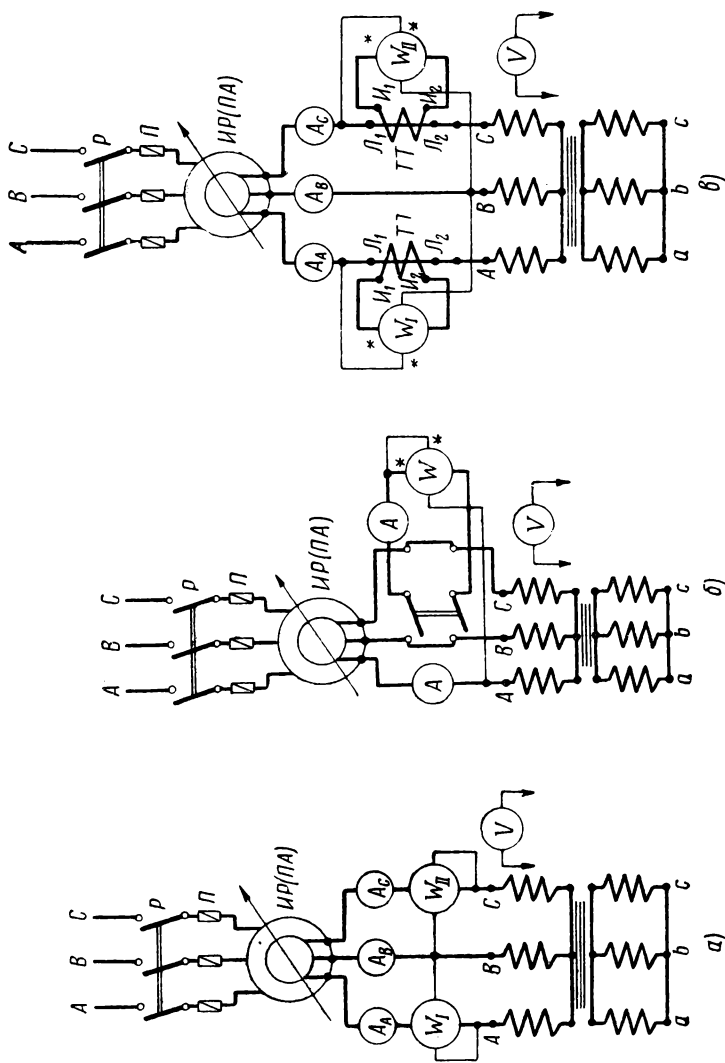


Рис. 150. Схемы опыта короткого замыкания трехфазного трансформатора:  
а — при помощи двух ваттметров, б — при помощи одного ваттметра с ваттметровым переключателем, в — при помощи двух ваттметров и трансформаторов тока

затем, включив рубильник  $P$ , постепенно увеличиваем напряжение от минимального до  $U_{1к}$ , при котором токи в обмотках трансформатора будут равны номинальным. Показания приборов записываем в табл. 42.

Согласно ГОСТ 3484—55 ток и напряжение при опыте короткого замыкания определяют как среднее арифметическое показание приборов всех трех фаз, т. е.

$$I_{1к} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3},$$

$$U_{1к} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}.$$

Так как потери в стали при опыте короткого замыкания очень малы, то можно считать, что мощность (потери) короткого замыкания расходуется на потери в меди обмоток трансформатора, т. е.

$$P_{1к} = P_k = 3r_k I_{1к}^2 = P_I + P_{II}, \quad (31)$$

откуда активное сопротивление короткого замыкания одной фазы трансформатора

$$r_k = \frac{P_{1к}}{3I_{1к}^2}, \quad (32)$$

где  $r_k = r_1 + k^2 r_2$ ;

$r_1$  — активное сопротивление фазы первичной обмотки;

$r_2$  — активное сопротивление фазы вторичной обмотки;

$k$  — коэффициент трансформации.

Полное сопротивление короткого замыкания одной фазы трансформатора

$$z_k = \frac{U_{1к}}{\sqrt{3} I_{1к}}. \quad (33)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания одной фазы трансформатора

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}, \quad (34)$$

где  $x_k = x_1 + k^2 x_2$ ;

$x_1$  — индуктивное сопротивление рассеяния фазы первичной обмотки;

$x_2$  — индуктивное сопротивление рассеяния фазы вторичной обмотки.

Коэффициент мощности при коротком замыкании:

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi_k &= \frac{P_{1к}}{\sqrt{3} U_{1к} I_{1к}} \\ \cos \varphi_k &= \frac{r_k}{z_k} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

или

Если опыт короткого замыкания производится в холодном состоянии, то согласно ГОСТ 3484—55 параметры короткого замыкания  $r_k$ ,  $z_k$ , напряжение короткого замыкания  $u_k$  и его активная составляющая  $u_a$  и мощность короткого замыкания  $P_{1к}$  следует привести к номинальной температуре  $\vartheta_n$  обмоток трансформатора (см. работу № 26). Определение величин  $u_k$ ,  $u_a$  и  $u_p$  производится только для одной фазы, так же как для однофазного трансформатора (см. работу № 26).

### Внешняя характеристика трехфазного трансформатора

Внешняя характеристика трехфазного трансформатора, как и внешняя характеристика однофазного трансформатора, представляет собой зависимость напряжения  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки от тока  $I_2$  вторичной цепи при постоянном номинальном напряжении  $U_{1н}$  на зажимах первичной обмотки, при постоянной номинальной частоте  $f$  и при постоянном коэффициенте мощности  $\cos \varphi_2$  нагрузки:

$$U_2 = f(I_2)$$

при

$$U_1 = U_{1н} = \text{const}, f = \text{const} \text{ и } \cos \varphi_2 = \text{const}.$$

Схемы для снятия внешних характеристик показаны на рис. 151. Внешняя характеристика при симметричной (равномерной) активной нагрузке ( $\cos \varphi_2 = 1$ ) снимается следующим образом. Включив первичную обмотку под номинальное напряжение при номинальной частоте (вторичная обмотка разомкнута), записываем показания приборов в табл. 43.

$$\begin{aligned} \text{Примечание. В этой таблице } U_1 &= \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}; \\ U_2 &= \frac{U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}}{3}; P_1 = P_I + P_{II}; \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 I_1}; \\ P_2 &= P_I' + P_{II}'; I_1 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}; I_2 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}; \\ \eta &= \frac{P_2}{P_1} \cdot 100. \end{aligned}$$

Затем, включив рубильник  $P_1$ , постепенно увеличиваем нагрузку от нуля до номинальной (или немного больше номинальной). Снятие внешней характеристики при индуктивной (смешанной) нагрузке ( $\cos \varphi_2 = 0,8$ ) производится так же, как и в первом случае, т. е. первый отсчет по приборам производим при холостом ходе трансформатора, затем, включив рубильник  $P_1$ , устанавливаем некоторую активную нагрузку, после этого включаем рубильник  $P_2$  и при помощи сердечника в катушке устанавли-

И з м е р е н о															
$U_{AB}$		$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$P_I$	$P_{II}$	$P_{II}'$
$C_V =$		$C_V =$		$C_V =$		$C_V =$		$C_A =$		$C_A =$		$C_A =$		$C_W =$	
дел.	в	дел.	в	дел.	в	дел.	в	дел.	а	дел.	а	дел.	а	дел.	в
дел.	в	дел.	в	дел.	в	дел.	в	дел.	а	дел.	а	дел.	а	дел.	в
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															

Продолжение табл. 43

В ы ч и с л е н о									
$U_1$		$U_2$	$I_1$	$I_2$	$P_1$	$P_2$	$\cos \varphi_1$	$\eta$	Примечание
в	в	в	а	а	вт	вт	—	о/о	
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									

ваем общий ток  $I_2$  такой величины, чтобы коэффициент мощности  $\cos \varphi_2$  был бы равен 0,8. Коэффициент мощности определяется по формуле

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} U_2 I_2}.$$

Если  $\cos \varphi_2$  получается больше заданного, то уменьшаем немного активную нагрузку и увеличиваем щель (воздушный зазор) в сердечнике катушки. Если же, наоборот,  $\cos \varphi_2$  меньше заданного, то увеличиваем активную нагрузку и уменьшаем щель в сердечнике катушки.

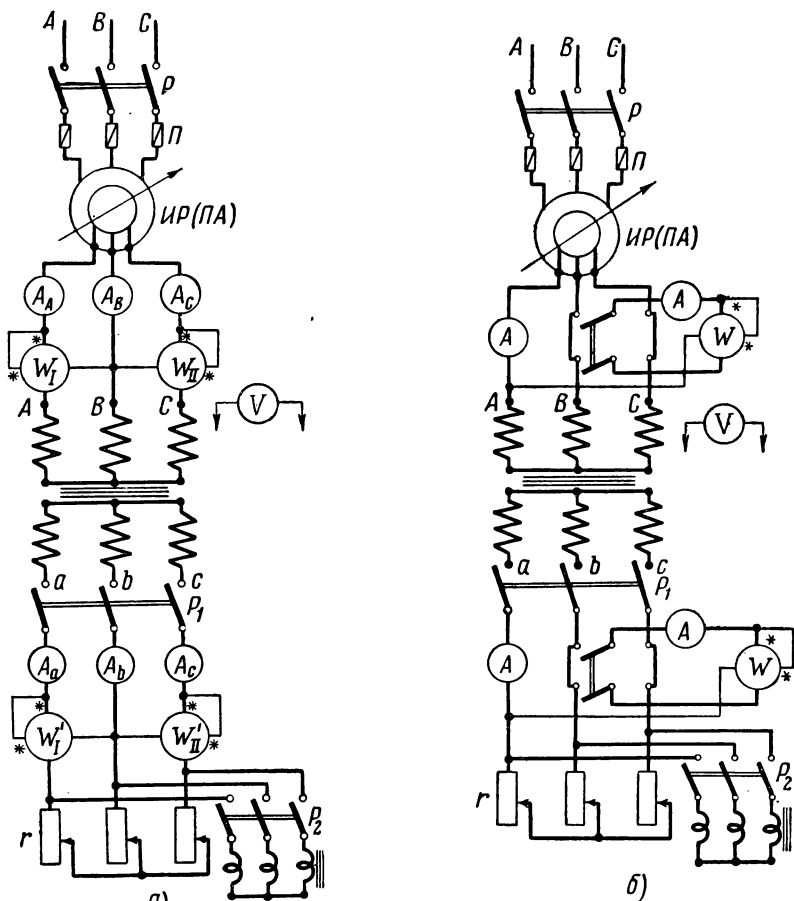
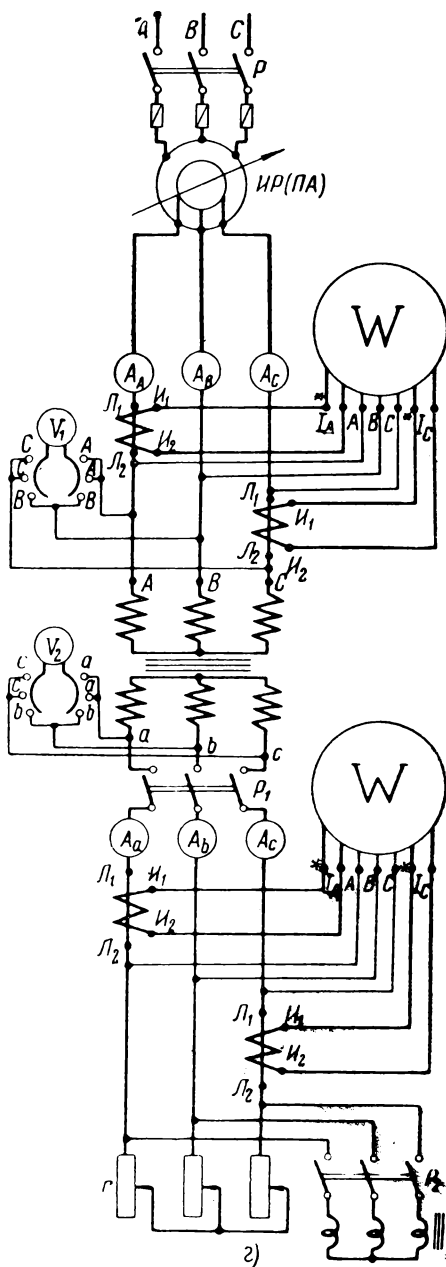
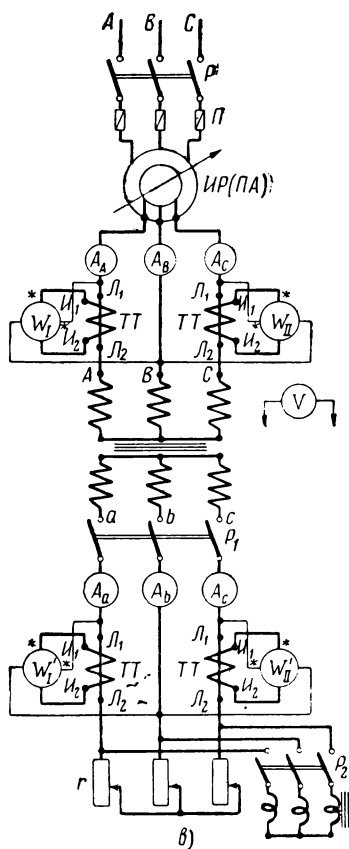


Рис. 151. Схемы для снятия внешних  
а — при помощи двух ваттметров, б — при помощи одного ваттметра с ваттметровым  
помощи трехфазного



характеристик трехфазного трансформатора:  
 переключателем,  $\delta$  — при помощи двух ваттметров и трансформаторов тока,  $\varepsilon$  — при  
 ваттметра и трансформаторов тока



Затем постепенно увеличиваем нагрузку до номинальной и каждый раз при помощи индуктивной катушки устанавливаем ток  $I_2$  такой величины, чтобы коэффициент мощности во время опыта был постоянным ( $\cos \varphi_2 = 0,8 = \text{const}$ ).

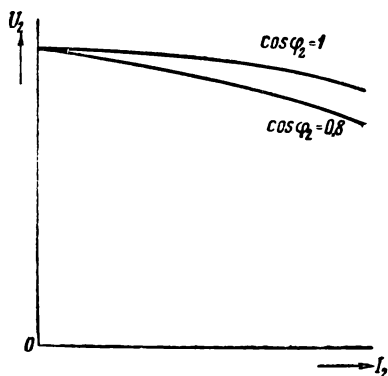


Рис. 152. Внешние характеристики трехфазного трансформатора при  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$

Во время опыта  $U_1$  и  $f$  должны быть также неизменными. При каждом изменении нагрузки записываем показания приборов в табл. 43. На основании полученных данных опыта строим внешние характеристики (рис. 152).

Как видно из кривых, напряжение на зажимах вторичной обмотки с увеличением нагрузки падает. Кроме того, падение напряжения при одном и том же токе зависит также от коэффициента мощности  $\cos \varphi_2$  нагрузки. Изменение напряжения определяется по формуле

$$\Delta U\% = \frac{U_{2x} - U_2}{U_{2x}} 100,$$

где  $U_{2x}$  — напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора при холостом ходе;

$U_2$  — напряжение на зажимах вторичной обмотки при нагрузке.

## Коэффициент полезного действия трехфазного трансформатора

Коэффициент полезного действия для трехфазного трансформатора, так же как для однофазного трансформатора, может быть определен прямым или косвенным методом. В первом случае (по данным внешней характеристики)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%,$$

где  $P_2$  — мощность, отдаваемая трансформатором;

$P_1$  — мощность, подводимая к трансформатору.

Во втором случае (по данным опыта холостого хода и опыта короткого замыкания)

$$\eta = \left( 1 - \frac{P_x + \beta^2 P_k}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k} \right) 100\%,$$

где  $P_x \approx P_{ст}$  — потери в стали сердечника трансформатора, которые приближенно равны потерям холостого хода при  $U_1 = U_{1н}$ ;

$P_k \approx P_m$  — потери в меди обмоток трансформатора, которые приближенно равны потерям короткого замыкания при  $I_{1к} = I_{1н}$ ;

$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}}$  — коэффициент загрузки трансформатора, при этом предполагаем, что при всех нагрузках

$$U_2 = U_{2н};$$

$S_n = \sqrt{3} U_{2н} I_{2н}$  — номинальная полная мощность трансформатора.

Чтобы построить кривую  $\eta = f(P_2)$ , следует задаваться различными значениями коэффициента загрузки, например  $\beta = 1/4, 2/4, 3/4, 4/4$  и  $5/4$ . Определение к. п. д. косвенным методом рекомендуется ГОСТ 3484—55.

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с трансформатором и записать данные его шитка и измерительных приборов, необходимые для производства работы.

2. Собрать схему рис. 148 для определения коэффициента трансформации. Измерить напряжения на зажимах обмоток трансформатора  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}, U_{ab}, U_{bc}$  и  $U_{ca}$ . Определить коэффициент трансформации  $k$ .

3. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 149, для опыта холостого хода. Измерить  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}; I_A, I_B, I_C; P_I$  и  $P_{II}$ . Вычислить  $U_1, I_x, P_x$  и  $\cos \varphi_x$ .

4. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 150, для опыта короткого замыкания трансформатора. Подвести к первичной обмотке трансформатора такое пониженное напряжение  $U_{1к}$ , чтобы  $I_{1к} = I_{1н}$ . Измерить  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}, I_A, I_B, I_C, P_I$  и  $P_{II}$ . Вычислить  $z_k, r_k, x_k; \cos \varphi_k; u_k, u_a, u_p$  и  $P_k$ . Если опыт короткого замыкания трансформатора производился в холодном состоянии, то необходимо измерить температуру окружающей среды  $\theta$  и привести величины  $r_k, z_k, u_a, u_k$  и  $P_k$  к номинальной температуре  $\theta_n$  обмоток трансформатора.

5. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 151.

Снять внешнюю характеристику трансформатора для симметричной (равномерной) активной нагрузки ( $\cos \varphi_2 = 1$ ). Поддерживать неизменными  $U_1$  и  $f$ . Измерить  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}, U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}, I_A, I_B, I_C, I_a, I_b, I_c, P_I, P_{II}, P_I'$  и  $P_{II}'$ . Вычислить

$\Delta U\%$ ,  $\cos \varphi_1$  и  $\eta$  для всех измерений. Построить внешнюю характеристику  $U_2=f(I_2)$ .

Снять внешнюю характеристику для индуктивной (смешанной) нагрузки ( $\cos \varphi_2=0,8$ ). Поддерживать неизменными  $U_1$ ,  $f$  и  $\cos \varphi_2$ . Произвести те же измерения и вычисления, что и при активной нагрузке. Построить внешнюю характеристику  $U_2=f(I_2)$ .

6. Определить к. п. д. по методу холостого хода и короткого замыкания для  $\cos \varphi_2=1$  и  $\cos \varphi_2=0,8$ .

7. Построить кривые  $\eta=f(P_2)$  для  $\cos \varphi_2=1$  и  $\cos \varphi_2=0,8$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как соединяются обмотки трехфазных трансформаторов?
2. Как определяется коэффициент трансформации трансформатора, если первичные обмотки соединены звездой, а вторичные — треугольником?
3. Что называется линейным коэффициентом трансформации трансформатора?
4. Почему измеряются токи во всех трех фазах?

### РАБОТА № 29

#### ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

##### Цель работы

Целью работы является изучение условий включения трансформаторов на параллельную работу и исследование параллельной работы трехфазных трансформаторов.

##### Общие сведения

Если график нагрузки подстанции переменный, то на подстанции обычно устанавливаются не один, а несколько трансформаторов, которые работают параллельно на общую сеть. При минимальной нагрузке подстанции работает только один трансформатор, а по мере увеличения нагрузки приключаются остальные. Параллельная работа трансформаторов дает возможность уменьшить потери энергии. Если параллельно включенные трансформаторы при разных режимах работы нагружаются пропорционально их номинальным мощностям и в их обмотках не возникают уравнивающие токи, то такой режим работы трансформаторов мы будем называть *идеальным*.

На параллельную работу трансформаторы можно включить только при выполнении следующих условий:

1) номинальные первичные и вторичные напряжения трансформаторов должны быть равны:

$$U_{11} = U_{111} = \dots = U_{1n}, \quad (36)$$

$$U_{21} = U_{211} = \dots = U_{2n}. \quad (37)$$

Это условие сводится к тому, что коэффициенты трансформации трансформаторов должны быть равны:

$$k_I = k_{II} = \dots = k_n; \quad (38)$$

2) напряжения короткого замыкания трансформаторов должны быть равны:

$$u_{KI} = u_{KII} = \dots = u_{Kn}; \quad (39)$$

3) трехфазные трансформаторы должны принадлежать к одной и той же группе соединений.

При несоблюдении первого и третьего условий в обмотках трансформаторов возникают уравнильные токи, которые в отдельных случаях, особенно при несовпадении групп, могут достигать величины тока короткого замыкания. Согласно ГОСТ 401—41 для трансформаторов с коэффициентом трансформации меньше 3 допускается разница в коэффициентах трансформации не больше 1%; для всех прочих трансформаторов — не более 0,5%. При несоблюдении второго условия нагрузки между трансформаторами распределяются непропорционально их номинальным мощностям. Так как ни один из параллельно работающих трансформаторов не должен нагружаться выше своей номинальной мощности, то несоблюдение второго условия приводит к снижению суммарной допустимой мощности параллельно работающих трансформаторов, т. е. если параллельно работают два трансформатора, то один из них будет нагружен меньше своей номинальной мощности. Так как напряжения короткого замыкания трансформаторов почти всегда отличаются друг от друга, то согласно ГОСТ 401—41 номинальные напряжения короткого замыкания не должны отличаться от их арифметического среднего значения более чем на  $\pm 10\%$ . Следует избегать включения на параллельную работу трансформаторов, мощности которых отличаются друг от друга больше чем в отношении 3:1. Чтобы не было перегрузки меньшего трансформатора, следует стремиться к тому, чтобы он имел большее напряжение короткого замыкания.

### **Параллельная работа трехфазных трансформаторов**

Как было сказано выше, если на параллельную работу включены трансформаторы, принадлежащие к одной и той же группе соединений обмоток, то при равенстве коэффициентов трансформации и напряжений короткого замыкания уравнильный ток в трансформаторах будет равен нулю и нагрузка между трансформаторами будет распределяться прямо пропорционально их номинальным мощностям. На рис. 153 показана схема для исследования параллельной работы двух трехфазных двухобмоточ-

ных трансформаторов. В этой схеме  $P, P_1, P_2, P_3, P_4$  — трехполюсные рубильники;  $\Pi$  — предохранители;  $A_1, A_2$  и  $A_3$  — амперметры, измеряющие линейные токи нагрузки (сети). Измерения линейных токов в первичных и вторичных цепях трансформаторов производятся одним амперметром, так как мы предполагаем, что трансформаторы симметричны и нагрузка всех фаз под-

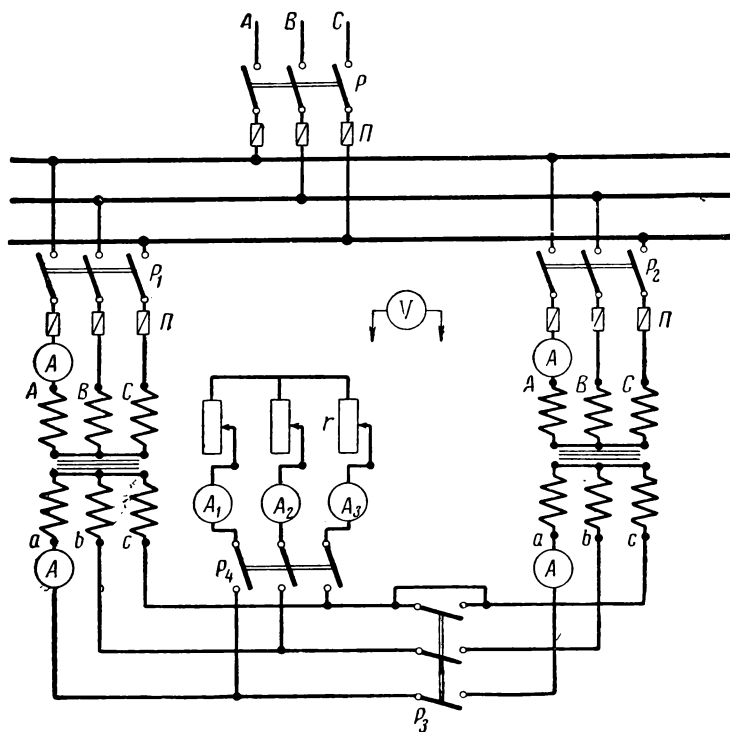


Рис. 153. Схема параллельной работы двух трехфазных двухобмоточных трансформаторов

держивается симметричной (равномерной). Равномерность нагрузки\* фаз проверяется тремя амперметрами. Измерение первичных и вторичных напряжений производится одним вольтметром со щупами. Нагрузкой трансформаторов является чисто активная нагрузка, создаваемая тремя проволочными реостатами (или лампами накаливания). Опыт производится следующим образом. Включив рубильники  $P, P_1$  и  $P_2$ , измеряем напряжения на зажимах вторичных обмоток обоих трансформаторов и убеж-

\* Нагрузка (реостаты) может быть соединена треугольником.

дается в том, что напряжения  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$  и  $U_{ca}$  обоих трансформаторов одинаковы. После этого следует проверить, что трансформаторы принадлежат к одной группе соединений. Для этого соединяем проводом два зажима рубильника  $P_3$ , как показано на рис. 153, измеряем напряжения между одноименными зажимами первого и второго трансформаторов, т. е. между  $b$  и  $b$ ,  $a$  и  $a$ . Если показания вольтметра равны нулю\*, то трансформаторы принадлежат к одной группе соединения. После этого можно включить рубильник  $P_3$ . Затем включаем рубильник  $P_4$  и постепенно увеличиваем нагрузку до номинальной для обоих трансформаторов. При каждом изменении нагрузки записываем показания приборов в табл. 44.

Таблица 44

№ п/п	Измерено							Вычислено	Примечание
	$U_1$	$U_2$	Трансформатор I	Трансформатор II	Нагрузка				
			$I_I$	$I_{II}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_c$	
	$\varnothing$	$\varnothing$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	

В этой таблице  $U_1$  — первичное линейное напряжение;  $U_2$  — вторичное линейное напряжение;  $I_I$  — вторичный линейный ток первого трансформатора;  $I_{II}$  — вторичный линейный ток второго трансформатора;  $I_c = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$  — среднее арифметическое значение линейного тока нагрузки (сети). На основании полученных данных опыта и подсчета (табл. 44) построить зависимости  $I_I = f(I_c)$  и  $I_{II} = f(I_c)$ .

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с трансформаторами и записать данные их щитков и данные измерительных приборов.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 153.
3. Нагрузить трансформаторы активной симметричной нагрузкой. Число измерений взять не менее восьми.
4. На основании полученных данных опыта и подсчета (согласно табл. 44) построить зависимости  $I_I = f(I_c)$  и  $I_{II} = f(I_c)$ .

\* Необходимо предварительно проверить исправность вольтметра.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Когда применяется параллельная работа трансформаторов?
  2. Какие условия включения на параллельную работу трехфазных трансформаторов?
  3. Можно ли соединить параллельно трансформаторы с обмотками: звезда — звезда и звезда — треугольник?
  4. Каким условиям должны удовлетворять параллельно соединяемые трансформаторы для того, чтобы они нагружались пропорционально их номинальным мощностям?
  5. Начертите векторную диаграмму параллельно работающих трансформаторов.
-

## Глава VIII

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### РАБОТА № 30

## ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОНТАКТНЫМИ КОЛЬЦАМИ (ФАЗНЫМ РОТОРОМ)

### Цель работы

Целью работы является определение начал и концов фаз (обмоток) статора, изучение пуска в ход трехфазного асинхронного двигателя с контактными кольцами и снятие рабочих характеристик.

### Общие сведения

*Асинхронным двигателем* называется двигатель переменного тока, у которого скорость вращения ротора при постоянной частоте тока в сети изменяется в зависимости от нагрузки. Асинхронные двигатели получили широкое применение на практике.

На щитке асинхронного двигателя указываются следующие номинальные величины:

- 1) мощность (полезная на валу), *квт*;
- 2) линейное напряжение, *в* (если возможно соединение обмоток и звездой и треугольником, то указываются два напряжения);
- 3) линейный ток, *а* (если возможно применение двух напряжений, то указываются два значения тока);
- 4) частота, *гц*;
- 5) скорость вращения ротора, *об/мин*;
- 6) к. п. д.;
- 7) коэффициент мощности (косинус угла сдвига фаз между напряжением и током фазы обмотки статора);
- 8) напряжение на контактных кольцах (при неподвижном роторе) и ток в фазе обмотки ротора (при номинальном режиме) для двигателя с контактными кольцами.



Кроме того, на щитке указываются схемы соединений обмоток статора, режим работы (продолжительный, повторно-кратковременный или кратковременный), для которого предназначен двигатель, а также полный вес двигателя, кг.

Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: неподвижной — статора и вращающейся — ротора. Их сердечники собираются из листов электротехнической стали, которые изолируются лаком. Это делается для того, чтобы уменьшить вихревые токи в стали сердечников.

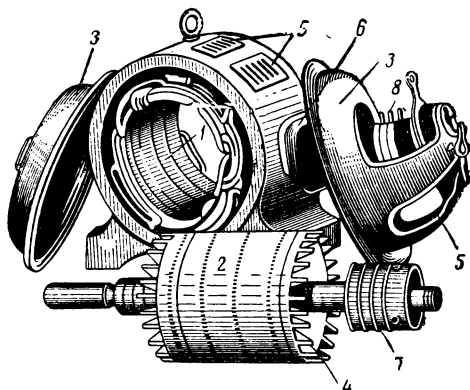


Рис. 154. Асинхронный двигатель с контактными кольцами (фазным ротором) в разобранном виде:

1 — статор, 2 — ротор, 3 — подшипниковые щиты, 4 — вентилятор, 5 — отверстия для входа и выхода охлаждающего воздуха, 6 — коробка, прикрывающая зажимы, 7 — контактные кольца, 8 — щеткодержатели и щетки

В зависимости от устройства ротора асинхронные двигатели могут быть с контактными кольцами (с фазным ротором) и с короткозамкнутым ротором. На рис. 154 показан асинхронный двигатель с контактными кольцами в разобранном виде.

Обмотки статора соединяются треугольником или звездой. Обмотки ротора у асинхронных двигателей с контактными кольцами обычно соединяются звездой. При прохождении трехфазного тока по обмоткам статора создается вращающееся магнитное поле, которое пересекает как обмотки статора, так и обмотки ротора и индуцирует в них э. д. с. Под действием э. д. с. обмоток ротора в них проходят токи.

Взаимодействие вращающегося магнитного потока с токами ротора создает электромагнитный момент, вращающий ротор двигателя. Если  $p$  — число пар полюсов двигателя,  $f_1$  — частота тока статора, то скорость вращения магнитного поля (синхронная скорость) будет равна:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}. \quad (1)$$

Если  $n_2$  — скорость вращения ротора двигателя (*об/мин*), то скорость вращения магнитного поля относительно ротора ( $n_1 - n_2$ ) называется *скоростью скольжения*, а отношение этой скорости к скорости вращения магнитного поля называется *скольжением*:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2)$$

или

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%. \quad (3)$$

В момент пуска двигателя, когда скорость вращения ротора  $n_2 = 0$ , скольжение равно единице.

Э. д. с., индуцируемая в фазе обмотки статора, определяется по формуле

$$E_1 = 4,44k_{об1}\omega_1 f_1 \Phi, \quad (4)$$

где  $k_{об1}$  — обмоточный коэффициент обмотки статора;

$\omega_1$  — число последовательно соединенных витков фазы обмотки статора;

$\Phi$  — магнитный поток, *вб*.

Э. д. с., индуцируемая в фазе обмотки ротора, когда ротор неподвижен:

$$E_2 = 4,44k_{об2}\omega_2 f_1 \Phi, \quad (5)$$

где  $k_{об2}$  — обмоточный коэффициент обмотки ротора;

$\omega_2$  — число последовательно соединенных витков фазы обмотки ротора.

Частота э. д. с. и тока в роторе будет равна:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot \frac{pn_1}{60} = sf_1. \quad (6)$$

Э. д. с., индуцируемая в фазе обмотки ротора при вращении его:

$$E_{2s} = 4,44k_{об2}\omega_2 f_2 \Phi = E_2 s. \quad (7)$$

Ток в фазе обмотки ротора, когда ротор неподвижен (при пуске):

$$I_2 = \frac{E_2}{z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + (\omega_1 L_2)^2}}, \quad (8)$$

где  $z_2$  и  $r_2$  — полное и активное сопротивление фазы обмотки ротора;

$x_2 = \omega_1 L_2 = 2\pi f_1 L_2$  — индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора, когда ротор неподвижен;

$L_2$  — индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора, обусловленная полем рассеяния.

Ток в фазе обмотки ротора, когда ротор вращается:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{z_{2s}} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + s^2 x_2^2}}. \quad (9)$$

Разделив числитель и знаменатель на скольжение  $s$ , получим

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}}. \quad (10)$$

Процесс преобразования подводимой к двигателю электрической энергии в механическую энергию на валу двигателя можно хорошо иллюстрировать при помощи так называемой *энергетической диаграммы* асинхронного двигателя (рис. 155). Если  $U_{1\phi}$  — напряжение, приложенное к фазе обмотки статора,  $I_{1\phi}$  — ток в фазе обмотки статора,  $\cos \varphi_1$  — коэффициент мощности двигателя, то мощность, подводимая к двигателю, будет равна:

$$P_1 = 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1. \quad (11)$$

Если из подводимой мощности  $P_1$  вычесть электрические потери\* в обмотке статора

$$P_{M1} = 3r_1 I_{1\phi}^2, \quad (12)$$

где  $r_1$  — активное сопротивление фазы обмотки статора, и потери от гистерезиса и вихревых токов в ста-

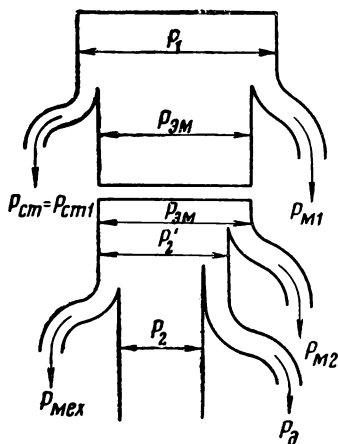


Рис. 155. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

\* Потери в меди обмотки статора.

ли статора  $P_{ст1}$ , то получим электромагнитную мощность

$$P_{эм} = P_1 - P_{м1} - P_{ст1}. \quad (13)$$

Электромагнитная мощность при помощи вращающегося магнитного поля передается со статора на ротор. Если из электромагнитной мощности вычесть электрические потери в обмотке ротора

$$P_{м2} = 3r_2 I_2^2 \quad (14)$$

и потери в стали ротора  $P_{ст2}$ , то получим полную механическую мощность  $P_2'$ , развиваемую двигателем:

$$P_2' = P_{эм} - P_{м2} - P_{ст2}. \quad (15)$$

Так как при нормальных условиях работы асинхронного двигателя со скольжением  $s=1\div5\%$  (ввиду малой частоты перемагничивания  $f_2=sf_1=0,5\div2,5$  гц) потери в стали\*  $P_{ст2}$  ротора очень малы, то ими можно пренебречь. В этом случае полная механическая мощность, развиваемая двигателем, будет равна:

$$P_2' = P_{эм} - P_{м2}. \quad (16)$$

Так как в асинхронном двигателе имеются механические потери  $P_{мех}$  и добавочные потери  $P_d$ , то, вычитая эти потери из полной механической мощности, развиваемой двигателем, мы получим полезную мощность на валу двигателя

$$P_2 = P_2' - P_{мех} - P_d \quad (17)$$

или

$$P_2 = P_1 - \Sigma P, \quad (17')$$

где  $\Sigma P$  — оумма всех потерь в двигателе, т. е.

$$\Sigma P = P_{м1} + P_{м2} + P_{ст} + P_{мех} + P_d.$$

Механические потери состоят из потерь на трение в подшипниках и на контактных кольцах и на трение вращающихся частей о воздух. Добавочные потери возникают в обмотках и стали двигателя, последние состоят из пульсационных (вызываемых пульсациями магнитного потока) и поверхностных потерь, возникающих в зубцах статора и ротора.

Коэффициент полезного действия двигателя равен:

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} \\ \eta &= \frac{P_2}{P_1} 100\%. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

---

\* Так как потерями в стали ротора  $P_{ст2}$  мы пренебрегли, то можно считать, что потери в стали двигателя приближенно равны потерям в стали статора двигателя, т. е.  $P_{ст1} \approx P_{ст}$ .

Электромагнитный момент, или просто вращающий момент, развиваемый двигателем, равен:

$$M_{\text{эм}} = k_M I_2 \Phi \cos \psi_2, \quad (19)$$

где  $k_M$  — постоянный коэффициент для данного двигателя;  
 $\psi_2$  — угол сдвига фаз между э. д. с. и током ротора.

Вращающий момент, развиваемый двигателем, при установленном режиме работы ( $n_2 = \text{const}$ ), уравнивается моментом холостого хода  $M_x$  и полезным моментом  $M$  на валу двигателя, т. е.

$$M_{\text{эм}} = M_x + M. \quad (20)$$

Зная полезный момент на валу двигателя, можно определить полезную мощность на валу двигателя:

$$P_2 = 9,81 \omega_2 M = 9,81 \frac{2\pi n_2}{60} \cdot M = 1,028 M n_2, \quad (21)$$

где  $n_2$  — скорость вращения ротора (двигателя), об/мин;  
 $\omega_2$  — угловая скорость вращения ротора.

Определим электромагнитный момент через электрические потери в обмотке ротора. Потери в обмотке ротора равны:

$$\begin{aligned} P_{\text{м2}} = P_{\text{эм}} - P_2' &= \omega_1 M_{\text{эм}} - \omega_2 M_{\text{эм}} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \omega_1 M_{\text{эм}} = \\ &= s \omega_1 M_{\text{эм}} = s P_{\text{эм}}, \end{aligned} \quad (22)$$

откуда

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{м2}}}{s \omega_1}, \quad (23)$$

т. е. электромагнитный момент прямо пропорционален электрическим потерям в обмотке ротора.

### Определение начал и концов фаз (обмоток) статора

Чтобы определить начало и конец каждой фазы (обмотки) трехфазного асинхронного двигателя, необходимо сначала при помощи контрольной лампы \* (или вольтметра) определить зажимы каждый из фаз (обмоток). Для этого мы собираем схему, как показано на рис. 156, и двумя проводами по очереди подключаем сеть к двум зажимам двигателя. Если лампа загорится (или вольтметр покажет напряжение), то эти зажимы принадлежат одной и той же обмотке, если же лампа не загорится (или показание вольтметра равно нулю), то эти зажимы принадлежат разным обмоткам.

---

\* Напряжение лампы должно быть равно напряжению сети.

После того как определим зажимы всех обмоток, мы приступаем к определению начала и конца двух обмоток. ГОСТ 183—55 рекомендует начала обмоток (фаз) обозначать буквами  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$ , а концы их соответственно буквами  $C4$ ,  $C5$  и  $C6$ . Для этого задаемся началами и концами обмоток. Затем соединяем последовательно две обмотки, как показано на рис. 157, а, и включаем в сеть переменного тока, а к зажимам третьей обмотки присоединяем лампу (или вольтметр).

Если лампа загорится (или вольтметр покажет напряжение), то конец первой обмотки  $C4$  соединен с началом второй обмотки  $C2$ . Если же лампа не загорится (или показание вольтметра приблизительно равно нулю), то конец первой обмотки  $C4$  соединен с концом второй  $C5$  (рис. 157, б). Аналогичным образом находят начало и конец третьей обмотки.

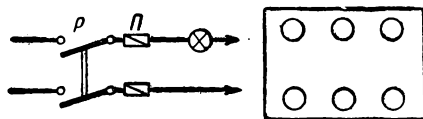


Рис. 156. Схема для определения фаз (обмоток) трехфазного асинхронного двигателя

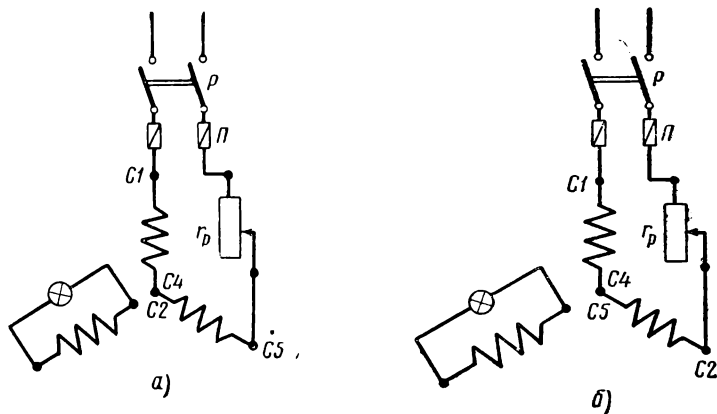


Рис. 157, а и б. Схемы для определения начал и концов фаз (обмоток) трехфазного асинхронного двигателя

### Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя

Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя представляют собой зависимость мощности  $P_1$ , потребляемой двигателем, тока  $I_1$ , коэффициента мощности  $\cos \phi_1$ , к. п. д.  $\eta$ , вращающего момента  $M$ , скорости вращения  $n_2$  и скольжения  $s$  от полезной мощности  $P_2$  на валу двигателя при неизмен-

ном напряжении  $U_1$  на зажимах двигателя и при неизменной частоте  $f_1$ :

$$P_1, I_1, \cos \varphi_1, \eta, M, n_2, s = f(P_2) \text{ при } U_1 = U_{1н} = \text{const} \\ \text{и } f_1 = \text{const.}$$

На рис. 158 показаны схемы для снятия рабочих характеристик. Согласно ГОСТ 7217—59 линейное напряжение, приложенное к двигателю, следует измерять тремя вольтметрами или одним вольтметром с переключателем. Линейный ток двигателя следует измерять тремя амперметрами, а мощность, потребляемую двигателем, следует измерять двумя ваттметрами\*, или трехфазным ваттметром.

Снятие рабочих характеристик производится следующим образом. Включив пусковой реостат в цепь ротора, замыкаем рубильник  $P$  и по мере разгона (разворачивания) двигателя сопротивление пускового реостата постепенно выводится.

Когда процесс пуска двигателя закончен (сопротивление пускового реостата полностью выключено), обмотка ротора замыкается накоротко, а щетки поднимаются при помощи специального механизма (если он имеется).

Двигатель нагружается при помощи тормоза или генератора\*\* постоянного тока независимого или параллельного возбуждения. Первый отсчет по приборам производим при нагрузке двигателя на 10% выше номинальной.

Скорость вращения двигателя измеряется при помощи тахометра. Затем нагрузку двигателя постепенно уменьшаем до нуля. При каждом изменении нагрузки показания приборов записываем в табл. 45. Действительное линейное напряжение определяется как среднее арифметическое из трех измеренных значений:

$$U_1 = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}. \quad (24)$$

Действительный линейный ток определяется как среднее арифметическое из трех измеренных значений:

$$I_1 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}. \quad (25)$$

---

\* Смотри \*\* сноску на стр. 205.

\*\* Если нагрузка двигателя производится при помощи генератора постоянного тока, то в табл. 45 вместо  $G$  следует записывать напряжение  $U_r$  на зажимах генератора и ток  $I_r$  генератора. Мощность, отдаваемая генератором, равна:  $P_r = U_r I_r$ .

Полезная мощность на валу двигателя определяется по формуле  $P_2 = \frac{P_r}{\eta_r}$ , где  $\eta_r$  — к. п. д. генератора, который должен быть известен для различных нагрузок.

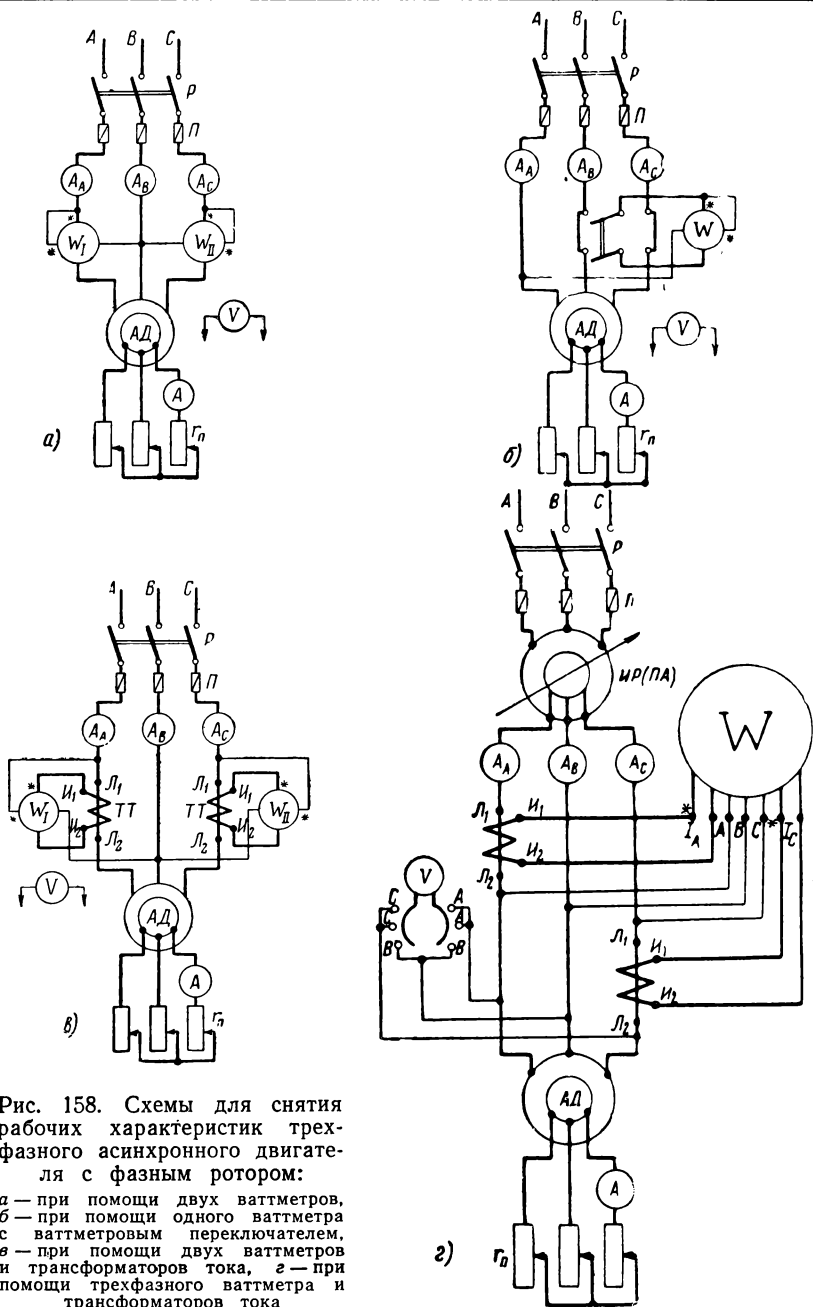




Таблица 45

[illegible]

Мощность, потребляемая двигателем, определяется как алгебраическая сумма показаний двух ваттметров:

$$P_1 = P_I \pm P_{II}. \quad (26)$$

Знак минус в формуле берется тогда, когда стрелка одного из ваттметров отклоняется влево от нуля. Чтобы получить правильное отклонение стрелки ваттметра, следует переключить зажимы его последовательной или параллельной цепи, т. е. переменить направление тока в последовательной или параллельной цепи ваттметра\*; после переключения стрелка ваттметра будет отклоняться нормально вправо от нуля. Коэффициент мощности двигателя равен:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{I,1}}. \quad (27)$$

Полезный момент на валу двигателя определяется по формуле

$$M = Gl \ [\kappa \Gamma \mathcal{M}], \quad (28)$$

где  $G$  — вес пружа (сила) на тормозе, кг;

$l$  — плечо тормоза,  $m$ .

Зная скорость вращения  $n_2$  двигателя и полезный момент  $M$ , можно определить полезную мощность  $P_2$  на валу двигателя:

$$P_2 = 1,028 M n_2.$$

\* На практике переключают зажимы параллельной цепи ваттметра при помощи переключателя, имеющегося в современных ваттметрах.

Определение скольжения  $s$  и к. п. д.  $\eta$  производится по формулам (3) и (18). На основании полученных данных опыта и подсчета (согласно табл. 45) строим рабочие характеристики, как показано на рис. 159.

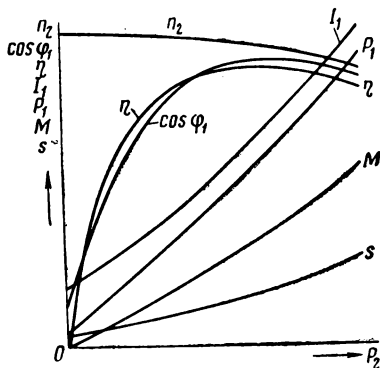


Рис. 159. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя

### Изменение направления вращения двигателя

Для того чтобы изменить направление вращения двигателя, следует переключить две какие-либо фазы статора, так как в этом случае изменяется направление вращения магнитного поля.

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с устройством асинхронного двигателя с контактными кольцами и пускового реостата, записать данные щитка двигателя и измерительных приборов.
2. Определить начала и концы фаз (обмоток) статора.
3. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 158.
4. Снять рабочие характеристики.
5. На основании данных опыта и подсчета (согласно табл. 45) построить рабочие характеристики.
6. Изменить направление вращения двигателя.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните устройство и принцип работы асинхронного двигателя.
2. Что называется скольжением и как оно изменяется при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке?
3. Почему ток холостого хода у асинхронных двигателей больше, чем у трансформаторов?

4. Как и почему изменяется коэффициент мощности асинхронного двигателя при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке?
5. Как влияет увеличение воздушного зазора на ток холостого хода и коэффициент мощности асинхронного двигателя?
6. Для чего применяется пусковой реостат у двигателей с контактными кольцами?
7. Напишите формулу для тока в фазе обмотки ротора, когда ротор неподвижен и когда он вращается?
8. Как изменяется скорость вращения двигателя при увеличении нагрузки?
9. Как изменяется к. п. д. двигателя при изменении нагрузки?
10. Какие имеются потери мощности в асинхронном двигателе при его работе?
11. Почему потери в стали ротора по сравнению с потерями в стали статора малы?
12. Напишите формулу электромагнитного момента асинхронного двигателя?
13. Почему потребляемую мощность двигателя (ГОСТ 7217—54) рекомендуется измерять методом двух ваттметров или трехфазным ваттметром?
14. Как изменить направление вращения асинхронного двигателя?
15. Что означает надпись 220/380 *в* на щитке асинхронного двигателя?
16. Как нужно соединить обмотки статора двигателя, если на щитке имеется надпись 220/380 *в*, а напряжение сети равно 220 *в*?

## РАБОТА № 31

### ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

#### Цель работы

Целью работы является изучение пуска в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и снятие рабочих характеристик при соединении обмоток статора звездой и треугольником.

#### Общие сведения

Асинхронные короткозамкнутые двигатели в настоящее время получили широкое применение на практике, так как они проще и надежнее в эксплуатации, имеют более высокий коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  и к. п. д.  $\eta$  и дешевле, чем двигатели с контактными кольцами. На рис. 160 показан асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде. Принцип действия асинхронных двигателей рассмотрен в предыдущей работе. Мы более подробно рассмотрим способы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

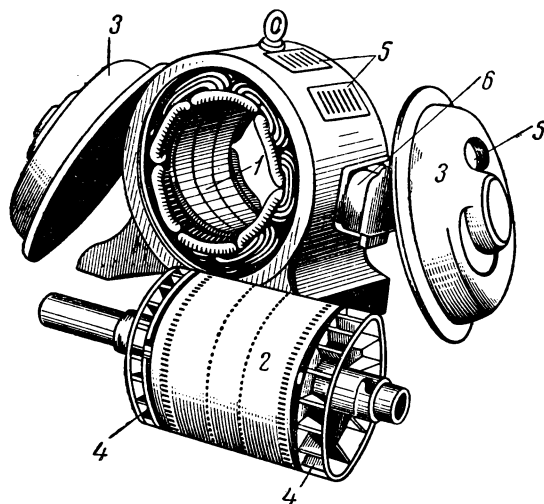


Рис. 160. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде:

1 — статор, 2 — ротор, 3 — подшипниковые щиты, 4 — вентилятор, 5 — отверстия для входа и выхода охлаждающего воздуха, 6 — коробка, прикрывающая жазимы

### Пуск в ход асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

**Прямое включение в сеть.** Этот способ пуска двигателей в настоящее время находит широкое применение на практике. Он применяется тогда, когда имеется мощная сеть, так как начальный пусковой ток у этих двигателей обычно равен:

$$I_n = (4 \div 7) I_{1н},$$

где  $I_n$  — начальный пусковой ток, или просто пусковой ток двигателя;

$I_{1н}$  — номинальный ток двигателя.

На рис. 161, а показана схема непосредственного включения в сеть асинхронного двигателя \*. Чтобы не произошло перегорания предохранителей, защищающих двигатель, пуск двигателей можно произвести при помощи переключателя  $\Pi_1$  контроллерного типа, как показано на рис. 161, б. Пуск двигателя производится следующим образом. Включаем рубильник  $P$ . Если опыт производится по схеме рис. 161, б, то переключатель  $\Pi_1$  (контроллер) ставим в положение пуск. Когда двигатель нач-

\* Ротор асинхронного двигателя на рис. 161, а не показан.

нет вращаться, ручку переключателя (контроллера)  $\Pi_1$  ставим в положение «работа». В начальный момент пуска необходимо записать показание амперметра и вольтметра в табл. 46.

Таблица 46

№ п/п	Способ пуска	Измерено		Вычислено	Примечание
		$U$	$I_{\Pi}$		
		$\text{в}$	$\text{а}$	$\frac{I_{\Pi}}{I_{1н}}$	
1					
2					
3					
4					

**Пуск в ход с переключением обмоток статора со звезды на треугольник.** Этот способ пуска применяется тогда, когда требуется уменьшить пусковой ток. Если  $U_{\text{л}}$  линейное напряжение,

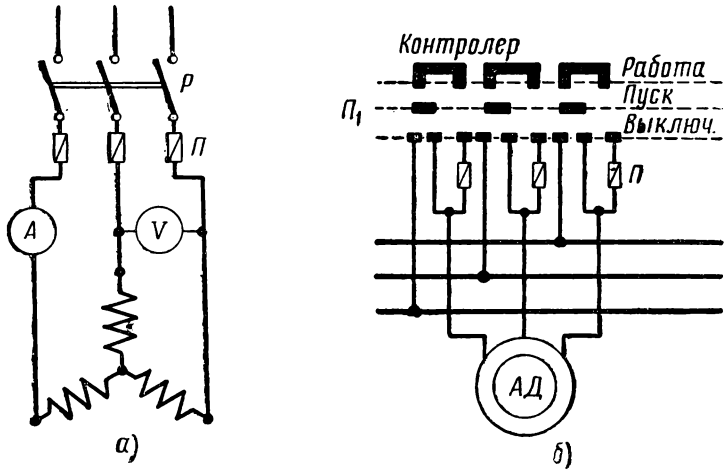


Рис. 161. Схемы пуска короткозамкнутого двигателя:  
а — непосредственное включение двигателя в сеть, б — включение двигателя в сеть при помощи контроллера

то напряжение на зажимах фазы обмотки статора при соединении звездой будет равно:

$$U_{\text{фз}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}, \quad (29)$$

при соединении треугольником:

$$U_{\text{ф}\Delta} = U_{\text{л}}. \quad (30)$$



Пуск двигателя производится следующим образом. Переключатель  $\Pi_1$  ставим в нижнее положение, при этом обмотки статора соединены звездой. Когда скорость вращения двигателя будет близка к номинальной, переключатель  $\Pi_1$  из положения  $\Delta$  ставим в положение  $\Delta$ , при этом обмотки статора будут соединены треугольником. В начальный момент пуска необходимо записать показания амперметра и вольтметра в табл. 46.

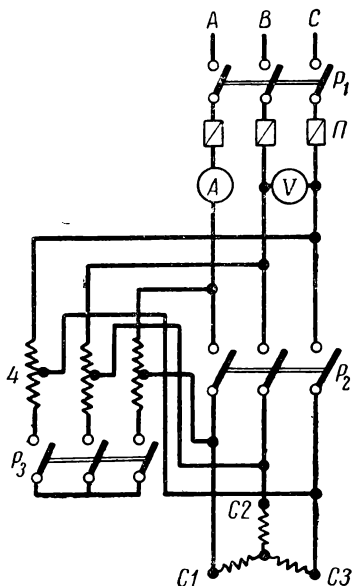


Рис. 164 Схема пуска короткозамкнутого двигателя при помощи автотрансформатора

Если асинхронный двигатель нормально работает при соединении обмоток треугольником, а нагрузка составляет менее 40% номинальной, то в этом случае для улучшения коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$  следует его обмотки соединить звездой.

**Пуск в ход при помощи реактора.** На рис. 163 изображена схема пуска двигателя с помощью реактора. В этой схеме  $P_1$  и  $P_2$  — трехполюсные рубильники;  $\Pi$  — предохранители;  $R$  — реактор. Реактор включается последовательно с обмоткой статора. При помощи реактора мы понижаем подводимое напряжение, вследствие чего уменьшается пусковой ток  $I_n$ . Основным недостатком этого способа пуска двигателей является значительное понижение пускового момента. Поэтому данный способ следует применять тогда, когда пусковой момент не имеет существенного значения. Пуск двигателя производится следующим образом.

Сначала включаем рубильник  $P_1$ , а затем, по достижении двигателем скорости вращения, близкой к номинальной, включаем рубильник  $P_2$ . В начальный момент пуска следует записать показания амперметра и вольтметра в табл. 46.

**Пуск в ход при помощи автотрансформатора.** На рис. 164 показана схема пуска двигателя с помощью автотрансформатора. При помощи автотрансформатора понижают подводимое напряжение до  $(0,5—0,7) U_{1н}$ , где  $U_{1н}$  — номинальное напряжение на зажимах двигателя. Пуск двигателя производится следующим образом. Включив рубильник  $P_3$ , затем включаем рубильник  $P_1$ . Когда двигатель будет иметь скорость вращения, близкую к номинальной, выключаем рубильник  $P_3$  и включаем

рубильник  $P_2$ . В начальный момент пуска двигателя необходимо записать показания амперметра и вольтметра в табл. 46. Следует отметить, что пусковые автотрансформаторы отличаются от обычных тем, что они предназначаются для кратковременной нагрузки. Если производится пуск двигателя большой мощности, то вместо рубильников применяют выключатели (например, масляные выключатели).

### Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя

Рабочие характеристики представляют собой зависимость мощности  $P_1$ , потребляемой двигателем, тока  $I_1$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$ , к. п. д.  $\eta$ , вращающего момента  $M$ , скорости вращения  $n_2$ , скольжения  $s$  от полезной мощности  $P_2$  на валу двигателя при неизменном напряжении  $U_1$  на зажимах двигателя и при неизменной частоте  $f_1$ :

$$P_1, I_1, \cos \varphi_1, \eta, M, n_2, s = f(P_2)$$

при  $U_1 = U_{1н} = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$ .

Схемы для снятия рабочих характеристик изображены на рис. 165. В этих схемах  $P$  — трехполюсный рубильник;  $\Pi$  — предохранители;  $A_A, A_B$  и  $A_C$  — амперметры, измеряющие линейные токи;  $V$  — вольтметр со щупами, измеряющий линейные напряжения;  $W_I$  и  $W_{II}$  — ваттметры, измеряющие активную мощность;  $\Pi_1$  — трехполюсный переключатель;  $ТТ$  — трансформатор тока. Рабочие характеристики следует снять при соединении обмоток звездой или треугольником в зависимости от данных щитка двигателя, учитывая напряжение сети. Снятие рабочих характеристик производится следующим образом. Включив двигатель в сеть, первый отсчет по приборам делаем при нагрузке двигателя на 10—15% выше номинальной. Нагрузкой асинхронного двигателя может быть тормоз или генератор постоянного тока независимого или параллельного возбуждения. Затем нагрузку постепенно уменьшаем до нуля. При каждом изменении нагрузки записываем показания приборов в табл. 47.

На основании полученных данных опыта (согласно табл. 47) определяем следующие величины. Действительное линейное напряжение определяется как среднее арифметическое из трех измеренных значений:

$$U_1 = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}.$$

Действительный линейный ток определяем как среднее арифметическое из трех измеренных значений:

$$I_1 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}.$$



[illegible]

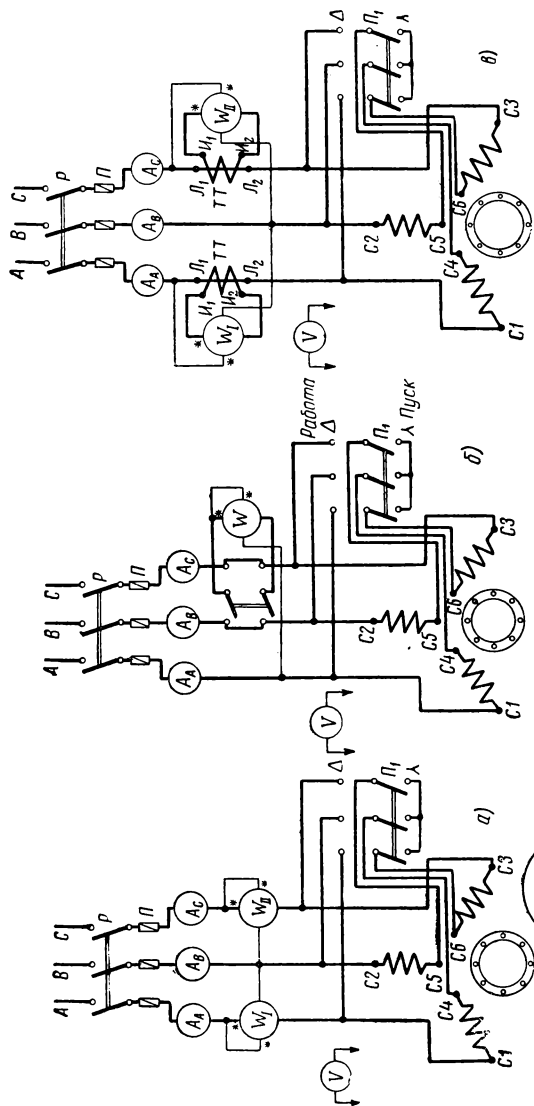
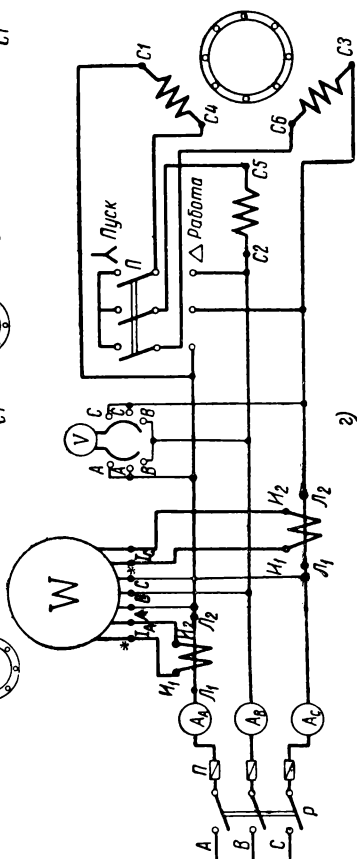


Рис. 165. Схемы для снятия рабочих характеристик трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором путем переключения со звезды на треугольник:

а — при помощи двух ваттметров, б — при помощи одного ваттметра, в — при помощи трех ваттметров и трансформаторов тока, г — при помощи трансформаторов тока



Мощность, подводимая к двигателю, определяется как алгебраическая сумма показаний двух ваттметров\*:

$$P_1 = P_I \pm P_{II}.$$

Коэффициент мощности двигателя равен:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 I_1}.$$

Полезный вращающий момент определяется по формуле

$$M = lG \text{ [кгм]},$$

где  $l$  — плечо тормоза, м;

$G$  — вес груза, кг.

Зная вращающий момент  $M$  и скорость вращения  $n_2$  двигателя, можно определить полезную мощность  $P_2$  на валу двигателя по формуле

$$P_2 = 1,028 M n_2 \approx 1,03 M n_2.$$

Коэффициент полезного действия двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%.$$

Скольжение равно:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%,$$

где  $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$  — скорость вращения магнитного поля (синхронная скорость);

$p$  — число пар полюсов двигателя.

На основании полученных данных опыта и подсчета (согласно табл. 47) построить рабочие характеристики.

### Изменение направления вращения двигателя

Для того чтобы изменить направление вращения двигателя, необходимо переключить две какие-либо фазы двигателя.

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с конструкцией трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и записать данные его щитка и технические данные измерительных приборов.

---

\* Если снятие рабочих характеристик производится по схемам рис. 165, в, г, то показания ваттметров умножаются на номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока.

2. Произвести пуск в ход двигателя прямым включением двигателя в сеть по схеме рис. 161, *а* или 161, *б*.

3. Произвести пуск в ход двигателя с переключением обмоток статора со звезды на треугольник по схеме рис. 162.

4. Произвести пуск в ход двигателя посредством реактора по схеме рис. 163.

5. Произвести пуск в ход двигателя посредством автотрансформатора по схеме рис. 164.

6. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 165, *а*, *б*, *в* или 165, *г*.

7. Снять рабочие характеристики.

8. На основании полученных данных опыта и подсчета (согласно табл. 47) построить рабочие характеристики.

9. Изменить направление вращения двигателя.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему пусковой ток больше номинального?

2. Когда применяется прямое включение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на сеть?

3. Как производится пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при помощи переключателя контроллерного типа?

4. Когда применяется пуск в ход с переключением обмоток статора со звезды на треугольник?

5. Начертите схему пуска в ход асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при помощи реактора. Когда применяется данный способ пуска двигателей?

6. Начертите схему пуска в ход асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при помощи автотрансформатора. Когда применяется данный способ пуска двигателей?

### РАБОТА № 32

#### УПРАВЛЕНИЕ ТРЕХФАЗНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ ПОМОЩИ МАГНИТНОГО ПУСКАТЕЛЯ

#### Цель работы

Целью работы является изучение конструкций магнитных пускателей и получение навыков в пуске, остановке и реверсировании (изменении направления вращения) асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при помощи магнитных пускателей.

#### Общие сведения

Мы рассмотрим только магнитные пускатели серии *П*. Следует отметить, что в настоящее время разработаны более усовершенствованные магнитные пускатели и в ближайшее время начнется их производство. Магнитные пускатели серии *П* пред-

назначены для дистанционного пуска непосредственным включением в сеть, а некоторые типы и для реверсирования трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Магнитные пускатели различаются:

по величинам (габаритам) предназначенных для различных мощностей управляемых электродвигателей;

по роду защиты от окружающей среды (открытые и защищенные);

нереверсивные и реверсивные;

с тепловым реле и без них;

по номинальному напряжению втягивающих катушек (127, 220, 380 и 500 в);

по количеству и виду дополнительных блок-контактов.

Тип пускателя обозначается буквой *П* (пускатель) и тремя цифрами, из которых первая указывает величину, вторая — исполнение пускателя по роду защиты от окружающей среды и третья — исполнение (реверсивное, неререверсивное, с тепловыми реле или без них).

### **Управление трехфазными асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором**

На рис. 166, *а* показана схема управления трехфазным асинхронным короткозамкнутым двигателем с неререверсивным магнитным пускателем, а на рис. 166, *б* показана развернутая схема магнитного пускателя. Главная цепь электродвигателя показана жирными линиями, а цепь управления — тонкими.

Пуск двигателя производится следующим образом. Включив рубильник *Р*, нажимаем кнопку «пуск», катушка контактора *К* получает питание и притягивает якорь, на котором укреплены подвижные контакты. Нормально открытые контакты контактора *К* в силовой (главной) цепи замыкаются и присоединяют статор двигателя *Д* к сети. Одновременно в цепи управления закрывается нормально открытый блок — контакт *К*, шунтирующий кнопку «пуск», что дает возможность отпустить эту кнопку, не прерывая питания катушки *К*. Кнопка «пуск» под действием пружины возвращается в исходное положение.

Остановка двигателя производится следующим образом. Нажимаем на кнопку «стоп», при этом разрывается цепь питания катушки контактора *К* и нормально открытые контакты открываются и отключают двигатель от сети. Одновременно с нормально открытыми контактами контактора открываются контакты блок-контакта.

Следует отметить, что магнитная система пускателя обеспечивает нормальную работу при напряжении в сети в пределах от 0,85 до 1,0 от номинального.

При исчезновении напряжения в сети или значительном снижении его магнитный пускатель отключает двигатель от сети. При появлении напряжения самопроизвольное включение магнитного пускателя (а следовательно и двигателя) предотвращается

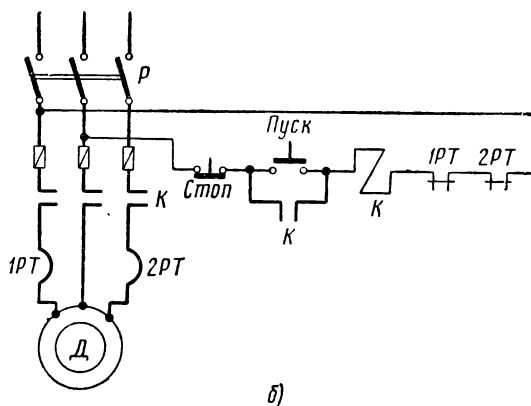
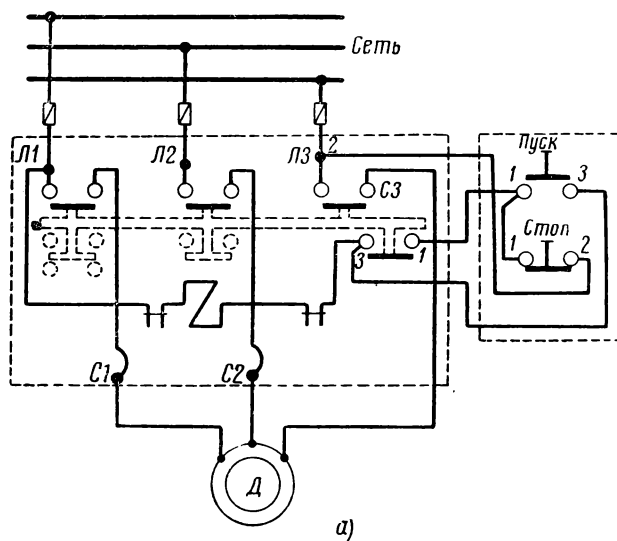


Рис. 166. Схемы управления трехфазным асинхронным короткозамкнутым двигателем с магнитным пускателем:  
а — монтажная, б — развернутая (принципиальная)

щается блок-контактом, включенным в цепь катушки контактора.

Защита двигателей от перегрузки (не свыше 10—20% номинальной нагрузки) осуществляется двумя тепловыми реле. Кон-  
16—2546

такты обоих тепловых реле включены последовательно с катушкой контактора и при срабатывании одного из тепловых реле электродвигатель отключается от сети магнитным пускателем. После срабатывания тепловых реле включение магнитного пускателя возможно через 3—4 мин, для этого следует нажать кнопку «возврат» (находящуюся на стенке кожуха магнитного пускателя) и тепловые реле придут в исходное положение.

Предохранители служат для защиты от коротких замыканий. Если по технологическому процессу требуется изменять направление вращения производственного механизма, то схема управления асинхронным двигателем осуществляется с помощью реверсивного магнитного пускателя.

На рис. 167, а показана схема управления асинхронным короткозамкнутым двигателем с реверсивным магнитным пускателем, а на рис. 167, б показана развернутая схема реверсивного магнитного пускателя.

Реверсивный магнитный пускатель представляет собой два контактора: *КВ* — контактор вперед и *КН* — контактор назад, которые управляются соответствующими кнопками. Защита двигателя от перегрузки осуществляется двумя тепловыми реле *1РТ* и *2РТ*, а для защиты от коротких замыканий применяются предохранители.

Чтобы не произошло одновременного включения контакторов *КВ* и *КН*, в схеме предусмотрены электрическая блокировка с помощью нормально закрытых блок-контактов *КВ* и *КН*, вследствие чего исключается возможность одновременного включения контакторов *КВ* и *КН*. Кроме электрической блокировки, предусматривается также механическая блокировка.

Включение двигателя производится следующим образом. Включив рубильник *Р*, нажимаем кнопку «вперед», катушка контактора *КВ* получает питание и, замыкая нормально открытые контакты в главной цепи, включает двигатель в сеть. Нормально открытый блок-контакт контактора *КВ* замыкается, шунтируя кнопку «вперед», а поэтому ее можно отпустить. Чтобы двигатель вращался в противоположном направлении, следует нажать кнопку «назад», в этом случае питание подается на катушку контактора *КН* и двигатель присоединяется к сети с переключением двух фаз. Остановка двигателя производится нажатием на кнопку «стоп», при этом разрывается цепь питания любой из катушек *КВ* или *КН*.

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с устройством магнитных пускателей и аппаратурой, необходимой для выполнения работы, и записать их технические данные.

2. Собрать схему, изображенную на рис. 166.

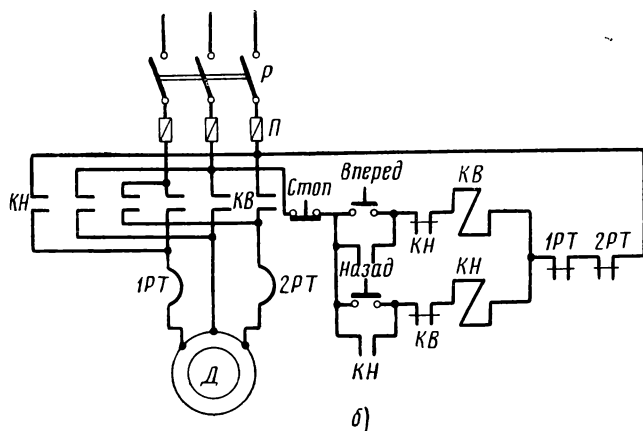
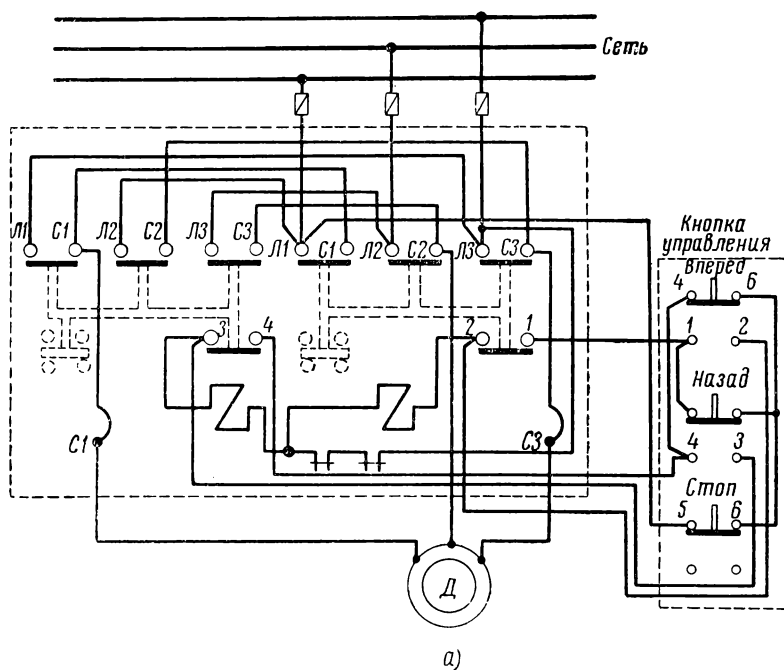


Рис. 167. Схемы управления трехфазным асинхронным короткозамкнутым двигателем с реверсивным магнитным пускателем:  
 а — с блокировкой при помощи кнопок управления, б — с блокировкой при помощи НЗ блок-контактов



3. Произвести пуск и остановку трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

4. Собрать схему, изображенную на рис. 167.

5. Произвести пуск трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором сначала в одном направлении, а затем в другом и остановить двигатель.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Начертите схему нереверсивного магнитного пускателя и расскажите принцип работы его.

2. Каково назначение тепловых реле?

3. Начертите схему реверсивного магнитного пускателя и объясните принцип работы его.

### РАБОТА № 33

#### ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

##### Цель работы

Целью работы является ознакомление с конструкцией трехфазного синхронного генератора и снятие характеристик: холостого хода, внешней и регулировочной.

##### Общие сведения

*Синхронной машиной* называется машина переменного тока, скорость вращения которой независимо от нагрузки пропорциональна частоте тока в сети.

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (34)$$

где  $p$  — число пар полюсов синхронной машины;

$n$  — скорость вращения ротора, об/мин;

$f$  — частота тока в сети.

Так как частота тока в сети остается постоянной, то скорость вращения синхронной машины не меняется. Синхронная машина может быть выполнена как с неподвижными полюсами и вращающимся якорем, так и с неподвижным якорем и вращающимися полюсами. Обмотка, в которой индуцируется э. д. с., называется *обмоткой якоря*. Так как синхронные машины строятся на линейное напряжение до 20 кВ (в отдельных случаях может быть 30—35 кВ) и на токи несколько тысяч ампер, то при таких условиях работа контактных колец становится ненадежной. Поэтому в настоящее время почти исключительно применяются синхронные машины с вращающимися полюсами и неподвижным якорем. Синхронные машины малой

мощности могут строиться с неподвижными полюсами и вращающимся якорем. Неподвижная часть синхронной машины называется *статором*, а вращающаяся часть — *ротором*. Синхронная машина возбуждается постоянным током, который подводится к обмотке возбуждения или от сети постоянного тока или от генератора постоянного тока, называемого *возбудителем* \*. Возбудитель находится обычно на одном валу с синхронной машиной.

Синхронные машины могут быть двух типов: неявнополюсные, т. е. машины с неявно выраженными полюсами; явнополюсные, т. е. машины с явно выраженными полюсами. Неявнополюсная машина применяется при больших скоростях вращения ( $p=1$  и  $p=2$ ). Явнополюсная машина применяется при числе пар полюсов  $p \geq 3$ .

Синхронные машины, как и любые электрические машины, могут работать как генераторами, так и двигателями. Если синхронный генератор приводится во вращение паровой турбиной, то он называется турбогенератором. Так как паровые турбины принадлежат к числу быстроходных машин, то турбогенераторы имеют неявнополюсное исполнение. Если синхронный генератор приводится во вращение гидравлической турбиной, то он называется *гидрогенератором*.

Обмотки синхронных машин соединяются звездой или треугольником. Начала обмоток обозначаются буквами *A*, *B* и *C*, а концы их буквами *X*, *Y* и *Z*. Э. д. с., индуцируемая в фазе обмотки якоря (статора), определяется по формуле

$$E = 4,44k_{об}f\omega\Phi, \quad (35)$$

где  $k_{об}$  — обмоточный коэффициент обмотки якоря;

$\omega$  — число последовательно соединенных витков фазы обмотки якоря;

$\Phi$  — магнитный поток на полюс, вб.

Полезная (отдаваемая) мощность трехфазного синхронного генератора определяется по формуле

$$P_2 = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi, \quad (36)$$

где  $U_{\phi}$  и  $U_{\text{л}}$  — фазное и линейное напряжения;

$I_{\phi}$  и  $I_{\text{л}}$  — фазный и линейный токи;

$\cos \varphi$  — коэффициент мощности нагрузки.

Коэффициент полезного действия синхронного генератора есть отношение полезной (отдаваемой) мощности синхронного генератора к подводимой к нему мощности:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P}, \quad (37)$$

---

\* В настоящее время нередко применяют выпрямители.

где  $P_2$  — полезная (отдаваемая) мощность синхронного генератора;

$P_1$  — мощность, подводимая к синхронному генератору;

$\Sigma P$  — сумма всех потерь.

### Характеристика холостого хода трехфазного генератора

*Характеристика холостого хода* трехфазного синхронного генератора представляет собой зависимость фазной э. д. с.  $E_x$  генератора от тока возбуждения  $I_b$  при постоянной номинальной скорости вращения  $n_n$  (или частоте  $f$ ) и при токе нагрузки  $I=0$  (при разомкнутой внешней цепи):

$$E_x = f(I_b) \text{ при } n = n_n = \text{const и } I = 0.$$

Так как при холостом ходе э. д. с., индуцируемая в фазе обмотки, равна напряжению ( $E_x = U_x$ ), то  $U_x = f(I_b)$  при  $n = n_n = \text{const}$  и  $I = 0$ .

Снятие характеристики холостого хода производится по одной из схем, изображенных на рис. 168, а, б, в, г. В этих схемах  $P_1$  и  $P_2$  — трехполюсные рубильники;  $P$  и  $P_b$  — двухполюсные рубильники;  $\Pi$  — предохранители;  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  — амперметры, измеряющие линейные токи;  $A$  — амперметр, измеряющий ток возбуждения синхронного генератора;  $V$  — вольтметр со щупами, измеряющий фазное и линейные напряжения;  $W_I$  и  $W_{II}$  — ваттметры, измеряющие активную мощность;  $TT$  — трансформатор тока;  $OB$  — обмотка возбуждения;  $r$  — регулировочный реостат в цепи возбуждения синхронного генератора;  $r_n$  — пусковой реостат;  $r_{pr}$  — регулировочный реостат в цепи возбуждения двигателя параллельного возбуждения.

Амперметры и вольтметр, включенные в схему двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, служат только для контроля величины нагрузки двигателя.

Опыт снятия характеристики холостого хода производится следующим образом. Посредством двигателя постоянного тока параллельного возбуждения\* синхронный генератор приводится во вращение с номинальной скоростью вращения\*\*  $n_n$ , которая во время опыта поддерживается постоянной.

Первый отсчет по приборам производим при разомкнутой цепи возбуждения (рубильник  $P_b$  не включен), так как вследствие остаточного магнетизма в обмотке якоря (в статоре) индуцируется э. д. с. Затем включаем рубильник  $P_b$ , при этом регулировочный реостат должен быть полностью включен, и делаем второй отсчет по приборам.

---

\* О пуске двигателя постоянного тока параллельного возбуждения и регулировании его скорости вращения см. работу № 35.

\*\* Номинальная скорость вращения указывается на его шитке.

После этого, постепенно выводя реостат  $r$ , мы будем увеличивать ток возбуждения  $I_v$  до такой величины, чтобы напряжение на зажимах генератора было бы больше номинального на 20—30%. Затем при помощи реостата  $r$  начинаем постепенно уменьшать ток возбуждения до нуля, т. е. последний отсчет по приборам производим при разомкнутой цепи возбуждения (рубильник  $P_v$  выключен). При каждом изменении тока возбуждения записываем показания приборов в табл. 48.

Таблица 48

№ п/п	Измерено										Примечание
	$I_B$		$E_X = U_X$		$U_{AB} = E_{AB}$		$U_{BC} = E_{BC}$		$U_{CA} = E_{CA}$		
	$C_A =$		$C_V =$								
	дел.	$a$	дел.	$b$	дел.	$b$	дел.	$b$	дел.	$b$	
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

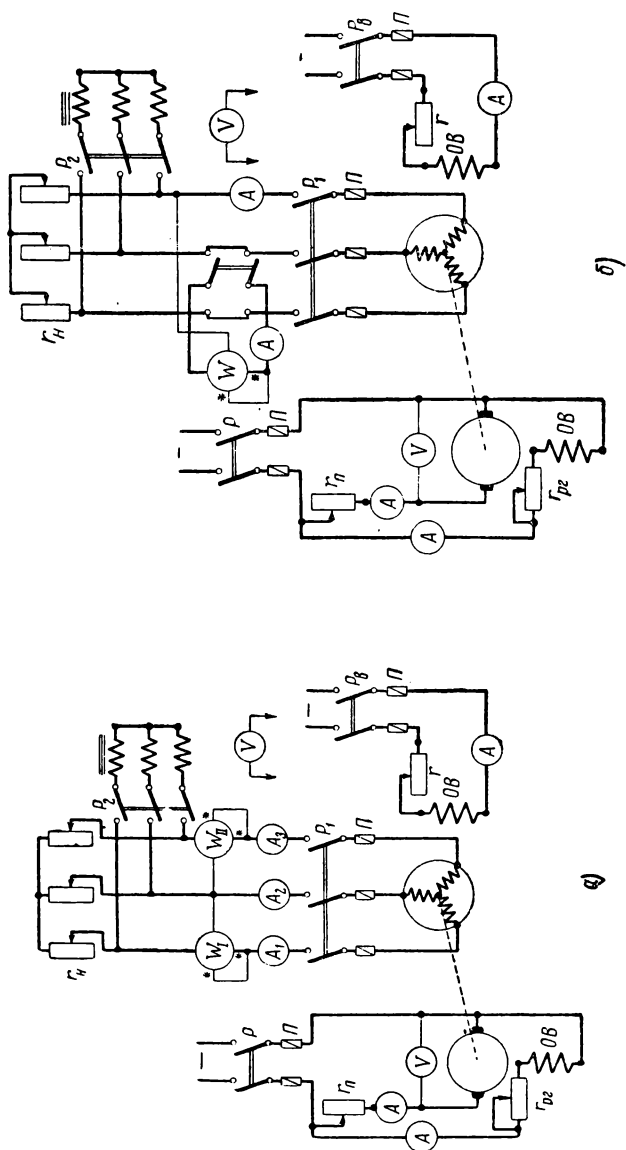
При снятии характеристики холостого хода проверяем симметричность обмотки якоря (статора), для этого измеряем вольтметром все три линейные напряжения (линейные э. д. с.). Если фазные э. д. с. генератора синусоидальные, то будем иметь  $\frac{E_{\Delta}}{E_x} = \sqrt{3}$ . Если же форма кривой фазной э. д. с. не синусоидальна, то  $\sqrt{3} E_x > E_{\Delta}$ .

Если при снятии характеристики скорость вращения  $n_n$  не поддерживается постоянной, то при каждом изменении тока возбуждения следует записывать скорость вращения  $n'$ . Затем полученные значения э. д. с.  $E_x'$  пересчитываем на номинальную скорость вращения  $n_n$  по формуле

$$E_x = E_x' \frac{n_n}{n'}, \quad (38)$$

где  $E_x'$  — э. д. с., индуцируемая в фазе обмотки якоря (статора), при скорости вращения  $n'$ ;

$E_x$  — э. д. с., индуцируемая в фазе обмотки статора, при номинальной скорости вращения  $n_n$ .



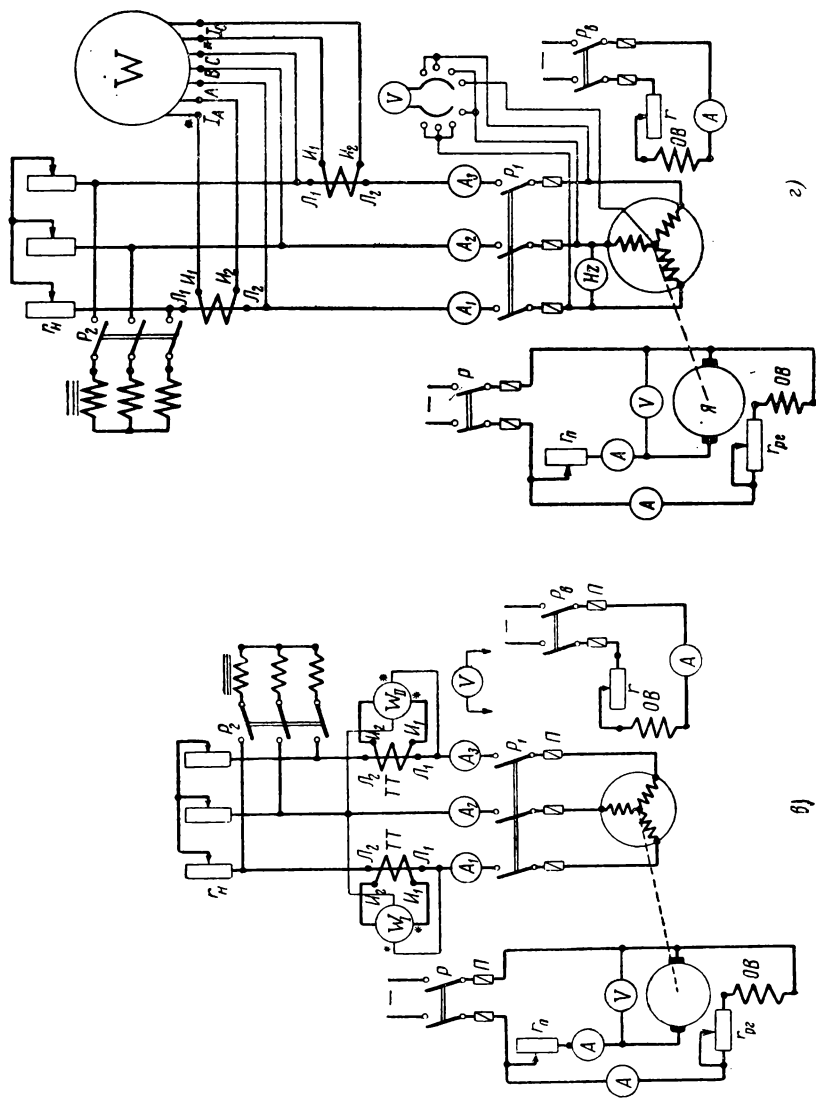


Рис. 168. Схемы для снятия характеристик трехфазного синхронного генератора:  
 а — при помощи двух ваттметров, б — при помощи одного ваттметра с ваттметровым переключателем, в — при помощи двух ваттметров и трансформаторов тока, г — при помощи трехфазного ваттметра и трансформаторов тока

На основании полученных данных опыта строим характеристику холостого хода, как показано на рис. 169. Из кривой рис. 169 видно, что вначале э. д. с. возрастает почти прямолинейно. Затем с увеличением тока возбуждения наступает магнитное насыщение стали и увеличение потока рассеяния, поэтому повышение э. д. с. происходит значительно медленнее и кривая характеристики холостого хода в этой части имеет загиб в виде колена, а при сильных насыщениях она снова переходит в почти прямую линию, но с меньшим наклоном по отношению к оси абсцисс.

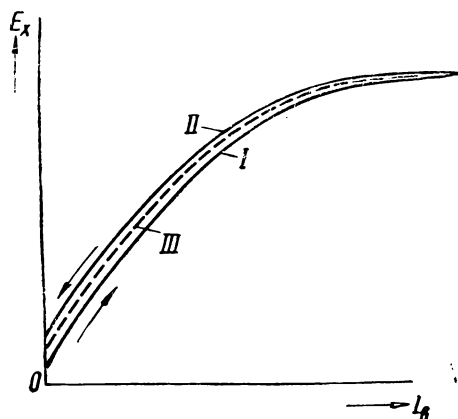


Рис. 169. Характеристика холостого хода трехфазного синхронного генератора

Вследствие явления гистерезиса магнитной цепи генератора кривая II не совпадает с кривой I. За практическую кривую характеристики холостого хода принимают среднюю кривую III, проведенную между кривыми I и II.

## Внешняя характеристика трехфазного синхронного генератора

*Внешняя характеристика* трехфазного синхронного генератора представляет собой зависимость напряжения  $U$  на зажимах генератора от тока  $I$  нагрузки при постоянном токе возбуждения  $I_b$ , при постоянной номинальной скорости вращения  $n_n$  и при постоянном коэффициенте мощности  $\cos \varphi$  нагрузки:  $U = f(I)$  при  $I_b = \text{const}$ ,  $n = n_n = \text{const}$  и  $\cos \varphi = \text{const}$ .

Снятие внешней характеристики производится по одной из схем, изображенных на рис. 168, а, б, в, г. Опыт снятия внешней характеристики при чисто активной нагрузке производится следующим образом. При помощи двигателя постоянного тока параллельного возбуждения генератор приводится во вращение с номинальной скоростью  $n_n$ , которая во время опыта поддерживается постоянной. При разомкнутой внешней цепи в цепи возбуждения реостатом  $r$  устанавливаем такой ток, чтобы при холостом ходе напряжение на зажимах генератора было номинальным. Во время опыта ток в цепи возбуждения поддерживается постоянным.

Затем включаем рубильник  $P_1$ , постепенно нагружаем генератор до номинального тока или немного больше активной на-

грузкой (рубильник  $P_2$  разомкнут). При каждом изменении тока  $I$  нагрузки записываем показания приборов в табл. 49.

Опыт снятия внешней характеристики при индуктивной (смешанной) нагрузке при  $\cos \varphi = 0,8$  производится следующим образом. В цепи возбуждения реостатом  $r$  устанавливаем ток такой величины, чтобы напряжение на зажимах генератора при холостом ходе было равно номинальному. Затем, включив рубильники  $P_1$  и  $P_2$ , постепенно увеличиваем ток нагрузки от нуля до номинального или немного больше. Во время опыта  $\cos \varphi$  поддерживается постоянным и определяется по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} UI}, \quad (39)$$

где  $U = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}$  — линейное напряжение;

$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$  — линейный ток;

$P = P_1 \pm P_{II}$  — мощность, отдаваемая генератором во внешнюю цепь.

Если снятие внешней характеристики производится по схемам рис. 168, *в* и *г*, то показания ваттметров умножаются на номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока.

Если  $\cos \varphi$  получается больше заданного, то следует уменьшить активную нагрузку и увеличить воздушный зазор (щель) в сердечнике реактивной катушки. Если же наоборот,  $\cos \varphi$  меньше заданного, то следует увеличить активную нагрузку и уменьшить воздушный зазор в сердечнике реактивной катушки. При каждом изменении нагрузки записываем показания приборов в табл. 49.

На основании полученных данных строим внешние характеристики, как показано на рис. 170, *а*. Из этих кривых видно, что напряжение на зажимах генератора с увеличением нагрузки уменьшается, и чем меньше  $\cos \varphi$ , тем меньше напряжение генератора.

Уменьшение напряжения генератора с увеличением нагрузки вызывается двумя причинами:

падением напряжения в активном и реактивном сопротивлении обмотки якоря (статора);  
реакцией якоря\*.

Внешнюю характеристику можно снять и другим способом, т. е. генератор нагружаем до номинального тока, а реостатом  $r$

---

\* При емкостной нагрузке с увеличением тока нагрузки напряжение на зажимах генератора возрастает, это объясняется подмагничивающим действием реакции якоря.



[illegible]

Таблица 50

[illegible]

в цепи возбуждения устанавливаем такой ток, чтобы напряжение на зажимах генератора было номинальным. Ток возбуждения  $I_{в.н}$ , который устанавливается в этом случае, называется *номинальным*. Затем постепенно уменьшаем нагрузку генератора до нуля. Во время опыта ток возбуждения, скорость вращения и коэффициент мощности ( $\cos \varphi = 0,8$ ) поддерживаются постоянными. При каждом изменении нагрузки показания приборов записываем в табл. 49.

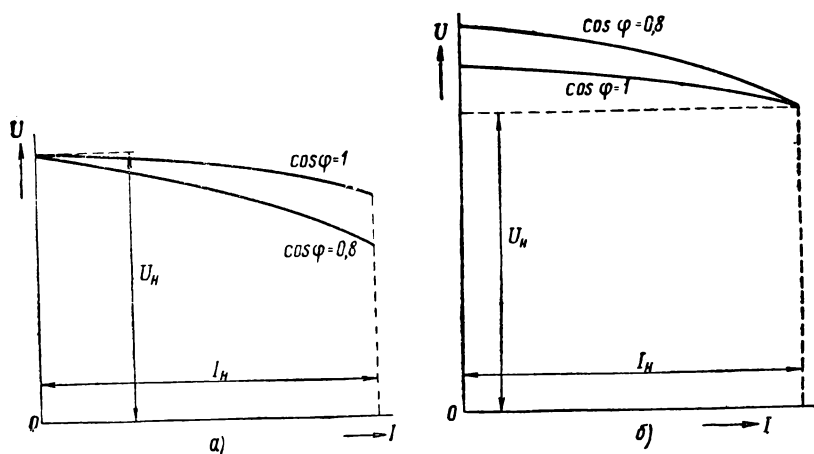


Рис. 170. Внешние характеристики трехфазного синхронного генератора при  $\cos \varphi = 1$  и  $\cos \varphi = 0,8$ :  
 а — при изменении нагрузки от 0 до номинальной, б — при изменении нагрузки от номинальной до 0

Если при снятии внешней характеристики скорость вращения не остается постоянной, то полученные значения напряжений  $U'$  приводятся к номинальной скорости вращения по формуле

$$U = U' \frac{n_n}{n'}, \quad (40)$$

где  $U'$  — напряжение на зажимах генератора при скорости вращения  $n'$ ;

$U$  — напряжение на зажимах генератора при номинальной скорости вращения  $n_n$ .

На основании полученных данных строим внешние характеристики (рис. 170, б), из которых видно, что напряжение на зажимах генератора с уменьшением нагрузки увеличивается. Имея внешнюю характеристику (рис. 170, а) генератора, можно определить в процентах относительное понижение напряже-

ния при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки по формуле

$$\Delta U\%_0 = \frac{U_{н.х} - U}{U_{н.х}} \cdot 100, \quad (41)$$

где  $U_{н.х}$  — напряжение на зажимах генератора при холостом ходе, равное номинальному;

$U$  — напряжение на зажимах генератора при номинальной нагрузке.

Относительное повышение напряжения в процентах при переходе от режима номинальной нагрузки к режиму холостого хода (рис. 170, б) определяется по формуле

$$\Delta U\%_0 = \frac{U_x - U_n}{U_n} \cdot 100, \quad (42)$$

где  $U_x$  — напряжение на зажимах генератора при холостом ходе;

$U_n$  — номинальное напряжение на зажимах генератора при номинальной нагрузке.

### Регулировочная характеристика трехфазного синхронного генератора

*Регулировочная характеристика* трехфазного синхронного генератора представляет собой зависимость тока возбуждения  $I_b$  от тока  $I$  нагрузки при неизменном номинальном напряжении  $U_n$  на зажимах генератора, при постоянной номинальной скорости вращения  $n_n$  и при постоянном коэффициенте мощности  $\cos \varphi$ :  $I_b = f(I)$  при  $U = U_n = \text{const}$ ,  $n = n_n = \text{const}$  и  $\cos \varphi = \text{const}$ .

Снятие регулировочных характеристик производится по одной из схем, изображенных на рис. 168, а, б, в, г. Снятие регулировочной характеристики для чисто активной нагрузки (при  $\cos \varphi = 1$ ) производится следующим образом. При помощи двигателя постоянного тока параллельного возбуждения генератор приводится во вращение с номинальной скоростью  $n_n$ , которая во время опыта поддерживается постоянной.

В цепи возбуждения устанавливаем такой ток, чтобы при холостом ходе (т. е. при разомкнутой внешней цепи) напряжение генератора было равно номинальному. Затем включаем рубильник  $P_1$ , постепенно нагружаем генератор до номинального тока или немного больше активной нагрузкой (рубильник  $P_2$  разомкнут). Во время опыта напряжение на зажимах генератора поддерживается неизменным и равным номинальному (при помощи реостата  $r$  в цепи возбуждения). При каждом изменении тока  $I$  нагрузки записываем показания приборов в табл. 50.

Регулировочная характеристика при индуктивной (смешанной) нагрузке при  $\cos \varphi = 0,8$  снимается так же, как и при активной нагрузке, но отличается только тем, что во время опыта коэффициент мощности поддерживается постоянным.

На основании полученных данных (согласно табл. 50) строим регулировочные характеристики, как показано на рис. 171. Из изображенных кривых видно, чтобы напряжение генератора оставалось постоянным при изменении нагрузки, нужно при увеличении нагрузки ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  увеличивать, а при уменьшении нагрузки — уменьшать. Кроме того, увеличение тока возбуждения  $I_{\text{в}}$  при одном и том же токе  $I$  нагрузки зависит также от коэффициента мощности  $\cos \varphi$ . Чем меньше  $\cos \varphi$ , тем больше ток возбуждения (при индуктивном характере нагрузки).

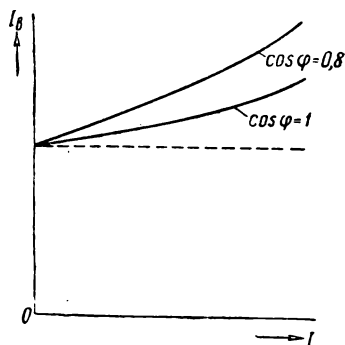


Рис. 171. Регулировочные характеристики трехфазного синхронного генератора

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с устройством трехфазного синхронного генератора и записать данные его щитка и данные измерительных приборов.
2. Собрать одну из схем, изображенных на рис. 168, а, б, в, г.
3. Снять характеристику холостого хода.
4. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 48) построить характеристику холостого хода.
5. Снять внешние характеристики при активной нагрузке (при  $\cos \varphi = 1$ ) и при индуктивной (смешанной) нагрузке (при  $\cos \varphi = 0,8$ ).
6. На основании полученных данных опыта и подсчета (согласно табл. 49) построить внешние характеристики.
7. Снять регулировочные характеристики при активной нагрузке (при  $\cos \varphi = 1$ ) и при индуктивной нагрузке (при  $\cos \varphi = 0,8$ ).
8. На основании полученных данных опыта и подсчета (согласно табл. 50) построить регулировочные характеристики.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется синхронной машиной?
2. Опишите устройство синхронного генератора и принцип его работы.

3. Что называется турбогенератором?
  4. Что называется гидрогенератором?
  5. Напишите формулу для э. д. с., индуцируемой в фазе обмотки якоря (статора).
  6. Что такое реакция якоря?
  7. Начертите внешние характеристики синхронного генератора для чисто активной нагрузки ( $\cos \varphi = 1$ ) и для индуктивной (смешанной) нагрузки ( $\cos \varphi < 1$ ).
  8. Почему при индуктивной (смешанной) нагрузке напряжение на зажимах генератора при том же токе нагрузки будет меньше, чем при чисто активной нагрузке?
  9. Напишите формулу полезной мощности трехфазного синхронного генератора.
  10. Напишите формулу коэффициента полезного действия трехфазного синхронного генератора.
  11. Почему при одном и том же токе нагрузки ток в цепи возбуждения синхронного генератора должен быть больше при индуктивной (смешанной) нагрузке ( $\cos \varphi < 1$ ), чем при чисто активной нагрузке ( $\cos \varphi = 1$ )?
-

## Глава IX

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### РАБОТА № 34

#### ИСПЫТАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

##### Цель работы

Целью работы является ознакомление с конструкцией генератора постоянного тока параллельного возбуждения и снятие характеристик: холостого хода, внешней и регулировочной.

##### Общие сведения

На рис. 172 показана машина постоянного тока в разобранном виде. Машина постоянного тока состоит из двух частей: неподвижной части, которая служит для создания магнитного потока, и вращающейся части, называемой *якорем*. По аналогии с машинами переменного тока неподвижную часть следовало бы называть статором, а вращающуюся часть — ротором, но эти термины в настоящее время не находят широкого применения.

Неподвижная часть машины постоянного тока состоит из: главных или основных полюсов, которые служат для создания основного магнитного потока;

дополнительных полюсов, которые служат для безыскровой работы щеток на коллекторе;

станины.

Якорь состоит из:

зубчатого сердечника якоря;

уложенной на нем обмотки;

коллектора;

щеточного аппарата.

Сердечники главных полюсов собираются из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5—1 мм. На сердечнике полюса помещается обмотка возбуждения, по которой проходит постоянный ток.

Дополнительные полюса устанавливаются между главными полюсами. Сердечники дополнительных полюсов выполняются массивными, а при резко переменной нагрузке делаются из листовой стали.

Обмотка дополнительных полюсов соединяется последовательно с обмоткой якоря. Станина является неподвижной частью машины, к которой крепятся главные и дополнительные

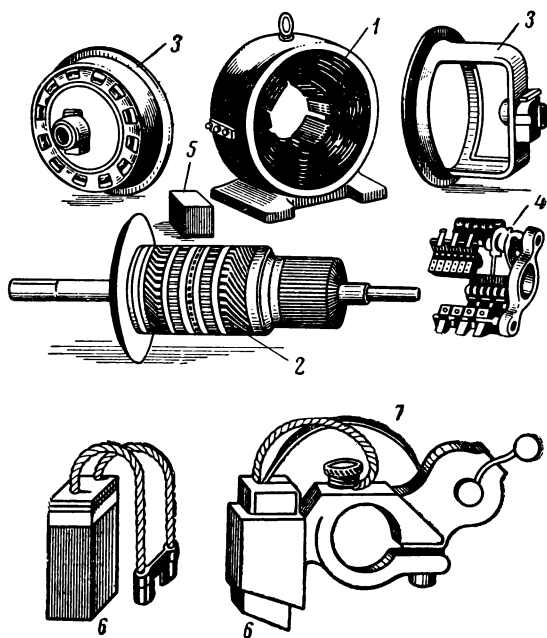


Рис. 172. Машина постоянного тока в разобранном виде:

1 — станина, 2 — якорь, 3 — подшипниковые щиты, 4 — траверса со щеткодержателями, 5 — крышка, прикрывающая зажимы, 6 — щетка, 7 — пружина

полюса. Станина выполняется из стали или чугуна. Сердечник якоря собирается из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Листы между собой изолируются лаком или бумагой. Это делается для того, чтобы уменьшить потери от вихревых токов. Обмотка якоря присоединяется к коллектору, который делается из медных пластин. Пластины коллектора изолируются друг от друга и от корпуса коллектора миканитом.

Чтобы отводить ток от вращающегося коллектора или подводить к нему ток, применяется щеточный аппарат, который со-

стоит из щеток, щеткодержателей, щеточных пальцев и щеточной траверсы.

Машины постоянного тока, как и машины переменного тока, могут работать как генераторами, так и двигателями. По способу возбуждения генераторы постоянного тока делятся на генераторы независимого возбуждения и генераторы с самовозбуждением. У генератора с независимым возбуждением обмотка возбуждения питается от постороннего источника, например от аккумуляторной батареи или от другого генератора постоянного тока. У генераторов с самовозбуждением обмотка возбуждения питается от самого генератора.

Генераторы с самовозбуждением делятся на генераторы параллельного возбуждения, у которых обмотка возбуждения подключается параллельно к обмотке якоря; генераторы последовательного возбуждения, у которых обмотка возбуждения соединяется последовательно с обмоткой якоря; генераторы смешанного возбуждения, у которых имеются две обмотки возбуждения — параллельная и последовательная.

Мы рассмотрим только генератор параллельного возбуждения. Э. д. с., индуцируемая в обмотке якоря \*, равна:

$$E = \frac{pN}{60a} n \Phi = k_E n \Phi, \quad (1)$$

где  $p$  — число пар полюсов генератора;  
 $N$  — число активных проводников обмотки якоря;  
 $a$  — число пар параллельных ветвей обмотки якоря;  
 $n$  — скорость вращения генератора, *об/мин*;  
 $\Phi$  — полезный магнитный поток одного полюса, пересекаемый обмоткой якоря, *вб*;  
 $k_E = \frac{pN}{60a}$  — постоянный коэффициент для данного генератора.

Напряжение на зажимах генератора определяется по формуле

$$U = E - r_{\text{я}} I_{\text{я}}, \quad (2)$$

где  $U$  — напряжение на зажимах генератора;  
 $E$  — э. д. с., индуцируемая в якоре;  
 $I_{\text{я}}$  — ток в обмотке якоря;  
 $r_{\text{я}}$  — сопротивление цепи якоря;  
 $r_{\text{я}} I_{\text{я}}$  — падение напряжения в цепи якоря.

Из формулы (2) найдем ток в якоре:

$$I_{\text{я}} = \frac{E - U}{r_{\text{я}}}. \quad (3)$$

---

\* В дальнейшем вместо термина «э. д. с., индуцируемая в обмотке якоря», будем употреблять термин «э. д. с., индуцируемая в якоре».



Ток в обмотке возбуждения определяется по формуле

$$I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{в}}} = \frac{U}{r_{\text{в}} + r_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{в}} = r_{\text{в}} + r_{\text{пр}}$  — сопротивление цепи возбуждения генератора;

$r_{\text{в}}$  — сопротивление обмотки возбуждения;

$r_{\text{пр}}$  — сопротивление регулировочного реостата.

Ток нагрузки (внешней цепи) определяется по формуле

$$I = \frac{U}{r}, \quad (5)$$

где  $r$  — сопротивление нагрузки.

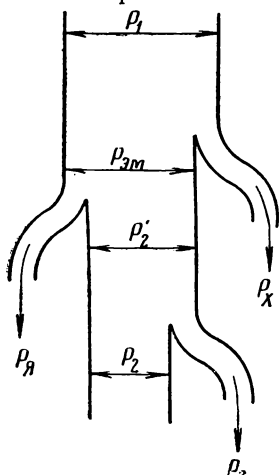


Рис. 173. Энергетическая диаграмма генератора параллельного возбуждения

Зная ток  $I$  нагрузки и ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ , можно определить ток в якоре по формуле

$$I_{\text{я}} = I + I_{\text{в}}. \quad (6)$$

Процесс преобразования механической энергии в электрическую в генераторе постоянного тока параллельного возбуждения хорошо можно иллюстрировать при помощи так называемой *энергетической диаграммы* (рис. 173). Если  $M_1$  — момент на валу первичного двигателя,  $\omega$  — угловая скорость вращения якоря генератора, то механическая мощность  $P_1$ , подводимая к генератору от первичного двигателя, будет равна:

$$P_1 = M \omega. \quad (7)$$

При вращении генератора без нагрузки, т. е. при холостом ходе, в нем возникают механические потери  $P_{\text{мех}}$  и потери в стали  $P_{\text{ст}}$ , которые равны мощности холостого хода:

$$P_{\text{х}} = P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}. \quad (8)$$

Если из мощности  $P_1$ , подводимой к генератору, вычесть мощность холостого хода  $P_{\text{х}}$ , то получим электромагнитную мощность:

$$P_{\text{эм}} = EI_{\text{я}} = P_1 - P_{\text{х}} = P_1 - (P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}). \quad (9)$$

Вычитая электрические потери (потери в меди) в цепи якоря  $r_{\text{я}} I_{\text{я}}^2$  из электромагнитной мощности  $P_{\text{эм}}$ , мы получим мощность, развиваемую якорем:

$$P_2' = P_{\text{эм}} - r_{\text{я}} I_{\text{я}}^2. \quad (10)$$

Полезная (отдаваемая) мощность генератора меньше мощности  $P_2'$ , развиваемой якорем, на величину потерь в цепи возбуждения  $P_b = UI_b$ :

$$P_2 = UI = P_2' - P_b = P_2' - UI_b, \quad (11)$$

где  $P_2$  — полезная мощность, т. е. мощность, отдаваемая генератором в сеть;

$I$  — ток во внешней цепи (нагрузки);

$U$  — напряжение на зажимах генератора.

Коэффициент полезного действия генератора равен отношению полезной мощности  $P_2$  генератора к мощности  $P_1$ , подводимой к нему:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (12)$$

или

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% \quad (12')$$

### Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения

*Характеристика холостого хода* генератора параллельного возбуждения представляет собой зависимость э. д. с.  $E_x$ , индуцируемой в якоре, от тока возбуждения  $I_b$  при постоянной номинальной скорости вращения  $n_n$  и при токе во внешней цепи, равном нулю (при разомкнутой внешней цепи):

$$E_x = f(I_b) \text{ при } n = n_n = \text{const и } I = 0.$$

На рис. 174 показана схема соединения генератора параллельного возбуждения для снятия его характеристик. В этой схеме  $Я$  — якорь генератора параллельного возбуждения;  $ОВ$  — обмотка возбуждения;  $r_{\text{рг}}$  — регулировочный реостат в цепи возбуждения;  $P$  и  $P_1$  — двухполюсные рубильники;  $P_b$  — однополюсный рубильник;  $П$  — предохранители;  $A$  и  $A_b$  — амперметры, измеряющие ток нагрузки  $I$  и ток возбуждения  $I_b$ ;  $V$  — вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах генератора;  $r$  — нагрузочный реостат (или лампы накаливания);  $ДПВ$  — двигатель постоянного тока параллельного возбуждения\*, который служит первичным двигателем;  $r_n$  — пусковой реостат. Амперметры и вольтметр, включенные в схему двигателя параллельного возбуждения, служат только для контроля величины нагрузки двигателя. Опыт снятия характеристики холо-

---

\* Вместо двигателя постоянного тока параллельного возбуждения иногда применяют асинхронный двигатель.

стого хода производится следующим образом. При помощи двигателя постоянного тока параллельного возбуждения генератор приводится во вращение с номинальной скоростью, которая измеряется тахометром и во время опыта поддерживается постоянной. Внешняя цепь при снятии характеристики холостого хода остается разомкнутой, т. е. рубильник  $P$  не включен.

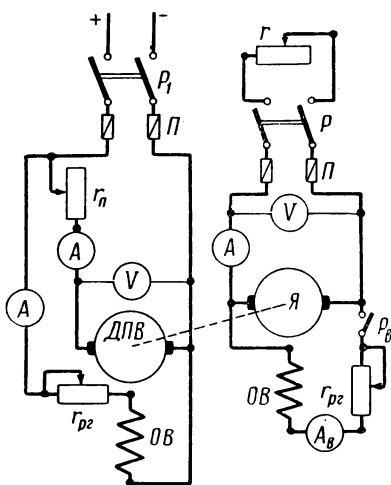


Рис. 174. Схема соединения генератора параллельного возбуждения и приводного двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Первый отсчет по приборам делаем при разомкнутой цепи возбуждения (рубильник  $P_v$  разомкнут). Так как генератор обладает остаточным магнетизмом, то при  $I_v=0$  в якоре индуктируется э. д. с. Затем включаем рубильник  $P_v$ , при этом реостат  $r_{pg}$  должен быть полностью включен, и постепенно увеличиваем ток возбуждения только в одном направлении — от нуля до такой величины, при которой напряжение на зажимах генератора будет равно  $(1,2-1,25) U_n$ . После этого начинаем постепенно уменьшать ток возбуждения до нуля, т. е. вводим реостат  $r_{pg}$ . Последний отсчет по приборам делаем при разомкнутом рубильнике  $P_v$ . При каждом изменении

тока возбуждения записываем показания приборов в табл. 51.  
Таблица 51

№ п/п	Измерено					Примечание
	$E_x \approx U_x$		$I_v$		$n = n_n$	
	$C_V =$		$C_A =$			
	дел.	а	дел.	а	об/мин	
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

Если при снятии характеристики холостого хода скорость вращения генератора не остается постоянной, то необходимо одновременно с отчетом показаний по приборам измерять также скорость вращения (число оборотов) генератора. Затем полученные значения э. д. с.  $E_x'$  пересчитываем на номинальную скорость вращения по формуле

$$E_x = E_x' \frac{n_n}{n'}, \quad (13)$$

где  $E_x$  — э. д. с., индуцируемая в якоре при номинальной скорости вращения  $n_n$ ;

$E_x'$  — э. д. с., индуцируемая в якоре при скорости вращения  $n'$ .

На основании полученных данных (согласно табл. 51) строим характеристику холостого хода, как показано на рис. 175.

Из кривой  $I$  видно, что э. д. с. вначале возрастает почти прямолинейно, а затем с увеличением тока возбуждения наступает магнитное насыщение стали. Вследствие этого поток рассеяния возрастает и увеличение э. д. с. происходит значительно медленнее. Кривая  $II$  вследствие явления гистерезиса магнитной цепи генератора лежит выше кривой  $I$ . Поэтому при снятии характеристики холостого хода следует изменять ток плавно и только в одном направлении, т. е. увеличивать или уменьшать.

За практическую кривую характеристики холостого хода принимают среднюю кривую  $III$ , проведенную между обеими ветвями. По кривой  $III$  характеристики холостого хода (рис. 175) можно определить ток возбуждения генератора, соответствующий номинальному напряжению на зажимах его при холостом ходе и номинальной скорости вращения  $n_n$  (отрезок  $OA$  на рис. 175).

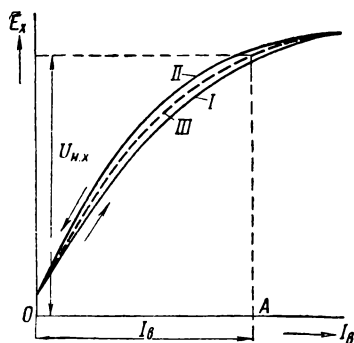


Рис. 175. Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения

### Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения представляет собой зависимость напряжения  $U$  на зажимах генератора от тока  $I$  нагрузки при постоянном сопротивле-

нии  $R_b$  цепи возбуждения и при постоянной номинальной скорости вращения  $n_n$ :

$$U = f(I) \text{ при } R_b = r_b + r_{pr} = \text{const и } n = n_n = \text{const.}$$

Схема для снятия внешней характеристики генератора параллельного возбуждения изображена на рис. 174.

Опыт снятия внешней характеристики производится следующим образом. При помощи двигателя постоянного тока параллельного возбуждения генератор приводится во вращение с номинальной скоростью  $n_n$ , которая во время опыта поддерживается постоянной. Затем в цепи возбуждения устанавливаем такой ток, чтобы напряжение на зажимах генератора при холостом ходе было равно номинальному. После этого начинаем постепенно нагружать генератор до номинального тока или немного больше, т. е. уменьшаем сопротивление нагрузки. Число измерений следует взять не менее восьми.

При каждом изменении тока нагрузки записываем показания приборов в табл. 52.

Т а б л и ц а 52

№ п/п	Измерено							Вычислено		Примечание
	$U$		$I$		$I_b$		$n = n_n$	$E = U + r_a I_a$	$UI$	
	$C_V =$		$C_A =$		$C_A =$					
	дел.	в	дел.	а	дел.	а	об/мин	в	вт	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

Если  $U_{н.х}$  — номинальное напряжение на зажимах генератора при холостом ходе, а  $U$  — напряжение при номинальном токе нагрузки, то отношение

$$\Delta U = \frac{U_{н.х} - U}{U_{н.х}} 100\% \quad (14)$$

называется *относительным понижением (падением) напряжения*. Внешнюю характеристику генератора можно снять и другим способом.

Генератор приводится во вращение с номинальной скоростью  $n_n$ , которая во время опыта поддерживается постоянной. Затем нагружаем генератор до номинального тока  $I_n$  при номинальном напряжении. Ток возбуждения  $I_{в.н.}$ , который получается в этом случае, называется *номинальным*. Записав показания приборов при номинальной нагрузке, начинаем постепенно уменьшать ее путем увеличения сопротивления внешней цепи (нагрузки) до бесконечности, т. е. до холостого хода. Последний способ снятия внешней характеристики рекомендуется ГОСТ 183—55.

Если  $U_n$  — номинальное напряжение на зажимах генератора при номинальном токе нагрузки, а  $U_x$  — напряжение на зажимах генератора при холостом ходе, то отношение

$$\Delta U = \frac{U_x - U_n}{U_n} 100\% \quad (15)$$

называется *повышением напряжения генератора*.

Согласно ГОСТ 183—55 *номинальным изменением напряжения* генератора называется изменение напряжений на его зажимах при изменении нагрузки от номинальной до нуля, при сохранении номинальной скорости вращения и при сохранении номинального сопротивления цепи возбуждения.

На рис. 176 показаны внешние характеристики генератора параллельного возбуждения: кривая  $I$  — внешняя характеристика при изменении нагрузки от нуля до номинальной, кривая  $II$  — внешняя характеристика при изменении нагрузки от номинальной до нуля. Из кривой  $I$  видно, что напряжение генератора с увеличением нагрузки не остается постоянным, а уменьшается.

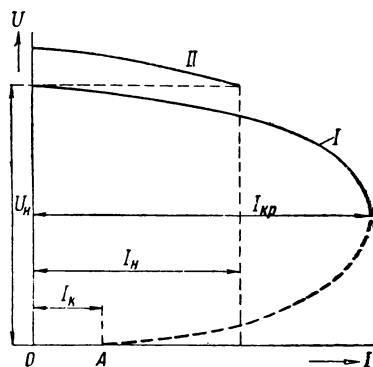


Рис. 176. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

Уменьшение напряжения на зажимах генератора происходит от трех причин:

1) падения напряжения в цепи якоря  $r_{я}I_{я}$ , т. е. из формулы  $U = E - r_{я}I_{я}$  видно, что с увеличением тока  $I_{я}$  в якоре напряжение генератора уменьшается;

2) реакции якоря, которая при правильно поставленных щетках всегда оказывает размагничивающее действие на поток полюсов, т. е. немного уменьшает поток  $\Phi$ ;

3) уменьшения тока возбуждения.

Уменьшение тока возбуждения происходит вследствие того, что напряжение  $U$  генератора с увеличением нагрузки падает от первых двух причин, а поэтому при постоянном сопротивлении цепи возбуждения  $R_v$  ток возбуждения будет уменьшаться, что видно из формулы

$$I_v = \frac{U}{R_v}.$$

Вследствие уменьшения тока возбуждения произойдет уменьшение магнитного потока  $\Phi$ , а следовательно и э. д. с.  $E = k_{en}\Phi$ , благодаря чему произойдет дополнительное уменьшение напряжения. При уменьшении сопротивления нагрузки ток нагрузки увеличивается до некоторого значения тока, называемого *критическим током*  $I_{кр}$ .

Дальнейшее уменьшение сопротивления нагрузки вызывает не увеличение тока, а уменьшение его. Это происходит оттого, что при критическом токе падение напряжения генератора (оно вызывается тремя причинами), стремящееся к уменьшению тока  $I$ , начинает преобладать над уменьшением сопротивления нагрузки (внешней цепи), стремящейся к увеличению тока  $I$ .

Если сопротивление нагрузки (внешней цепи) равно нулю, то генератор замкнут накоротко. В этом случае ток в якоре равнялся бы нулю, если бы не было магнитного потока остаточного магнетизма и внешняя характеристика проходила бы через начало координат. Но так как генератор имеет магнитный поток остаточного магнетизма, то при коротком замыкании проходит ток  $I_k = OA$  и кривая внешней характеристики пересекает ось абсцисс в точке  $A$ . Из кривой  $I$  видно, что короткое замыкание не опасно для генератора, если оно происходит быстро. Если же сопротивление нагрузки уменьшается до нуля в течение продолжительного промежутка времени и критический ток генератора в несколько раз больше номинального, то короткое замыкание опасно для якоря генератора. Из кривой  $II$  видно, что при уменьшении нагрузки напряжение на зажимах генератора повышается.

### **Регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения**

*Регулировочная характеристика* генератора параллельного возбуждения представляет собой зависимость тока возбуждения  $I_v$  от тока  $I$  нагрузки при постоянном номинальном напряжении  $U_n$  на зажимах генератора и при постоянной номинальной скорости вращения  $n_n$ :

$$I_v = f(I) \text{ при } U = U_n = \text{const и } n = n_n = \text{const.}$$

Схема для снятия регулировочной характеристики изображена на рис. 174. Опыт снятия регулировочной характеристики про-

изводится следующим образом. Генератор приводится во вращение с номинальной скоростью, которая во время опыта поддерживается постоянной. В цепи возбуждения устанавливаем такой ток, чтобы напряжение генератора при холостом ходе было равно номинальному. Затем постепенно нагружаем генератор до номинального тока или немного больше. После этого постепенно начинаем уменьшать ток нагрузки до нуля. Во время опыта напряжение генератора поддерживается постоянным путем изменения тока в цепи возбуждения. Число измерений сле-

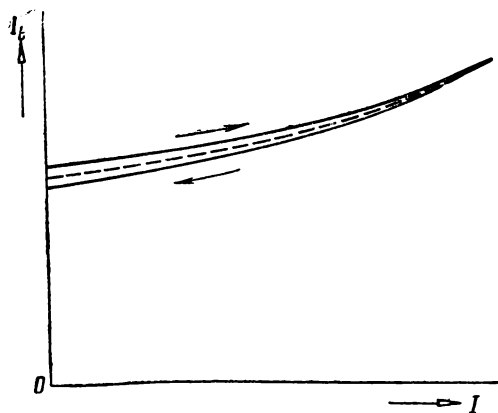


Рис. 177. Регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения

дует взять не менее восьми. Следует отметить, что при увеличении нагрузки, а также при уменьшении ее ток возбуждения следует изменять все время только в одном направлении, т. е. или увеличивать или уменьшать. При каждом изменении тока нагрузки записываем показания приборов в табл. 53. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 53) строим регулировочную характеристику, как показано на рис. 177.

Вследствие гистерезиса мы получаем две ветви: одну — при постепенном увеличении нагрузки, а другую — при уменьшении. За практическую кривую регулировочной характеристики принимаем среднюю, показанную на рисунке пунктирной линией.

Так как обе ветви регулировочной характеристики располагаются очень близко друг к другу, то на практике снимают только одну из них, т. е. восходящую ветвь.

Регулировочная характеристика имеет большое практическое значение, так как она показывает, как надо изменять ток возбуждения при увеличении нагрузки, чтобы при постоянной скорости вращения напряжение на зажимах генератора оставалось постоянным.



Т а б л и ц а 53

№ п/п	Измерено							Примечание
	$I$		$I_B$		$U = U_H = \text{const}$		$n = n_H = \text{const}$	
	$C_A =$		$C_A =$		$C_V =$			
	дел.	$a$	дел.	$a$	дел.	$b$	об/мин	
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с устройством генератора постоянного тока параллельного возбуждения и приводным двигателем, записать данные щитка генератора, пусковых и регулировочных аппаратов и технические данные измерительных приборов.

2. Собрать схему, изображенную на рис. 174.

3. Снять характеристику холостого хода. Число измерений взять не менее восьми.

4. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 51) построить характеристику холостого хода.

5. Снять внешнюю характеристику. Число измерений взять не менее восьми.

6. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 52) построить внешнюю характеристику.

7. Снять регулировочную характеристику. Число измерений взять не менее восьми.

8. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 53) построить регулировочную характеристику.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Начертите схему генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

2. Опишите устройство генератора постоянного тока и принцип его работы.

3. Для какой цели применяются дополнительные полюса?

4. Какое назначение имеет коллектор в генераторе постоянного тока?

5. Условия самовозбуждения генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

6. От каких величин зависит э. д. с., индуцируемая в обмотке якоря?

7. Что такое реакция якоря?
8. Чему равна электромагнитная мощность генератора постоянного тока?
9. Как связано напряжение на зажимах генератора с э. д. с., индуцируемой в обмотке якоря?
10. Почему напряжение на зажимах генератора падает с увеличением нагрузки?
11. Начертите характеристику холостого хода генератора параллельного возбуждения.
12. Для чего и как снимается внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения?
13. Как снимается регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения?

## РАБОТА № 35

### ИСПЫТАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

#### Цель работы

Целью работы является ознакомление с конструкцией двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, изучение пуска двигателя, регулирование скорости вращения, изменения направления вращения и снятие рабочих характеристик.

#### Общие сведения

Двигатели постоянного тока, так же как генераторы постоянного тока, в зависимости от способа включения обмотки возбуждения делятся на двигатели параллельного возбуждения\*, у которых обмотка возбуждения приключается параллельно к обмотке якоря; двигатели последовательного возбуждения, у которых обмотка возбуждения соединяется последовательно с обмоткой якоря; двигатели смешанного возбуждения, у которых имеются две обмотки возбуждения — параллельная и последовательная. Мы рассмотрим двигатель параллельного возбуждения. Э. д. с. \*\*, индуцируемая в обмотке якоря, равна:

$$E = \frac{pN}{60a} n \Phi = k_E n \Phi, \quad (16)$$

где  $p$  — число пар полюсов двигателя;  
 $N$  — число активных проводников обмотки якоря;  
 $a$  — число пар параллельных ветвей обмотки якоря;  
 $n$  — скорость вращения двигателя (якоря), *об/мин*;  
 $\Phi$  — полезный магнитный поток на полюс, пересекаемый обмоткой якоря, *вб*;

$k_E = \frac{pN}{60a}$  — постоянный коэффициент для данного двигателя.

\* Вместо термина «двигатель параллельного возбуждения» употребляется также термин «двигатель независимого возбуждения».

\*\* Так как э. д. с. направлена против тока, то ее называют *обратной э. д. с.* или *противозлектродвижущей силой*.

Напряжение, приложенное к зажимам двигателя, уравновешивается э. д. с., индуктируемой в якоре, и падением напряжения в цепи якоря:

$$U = E + r_{\text{я}} I_{\text{я}}, \quad (17)$$

где  $I_{\text{я}}$  — ток в якоре;

$r_{\text{я}}$  — сопротивление цепи якоря.

Из этой формулы можно определить ток в якоре:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{r_{\text{я}}}. \quad (18)$$

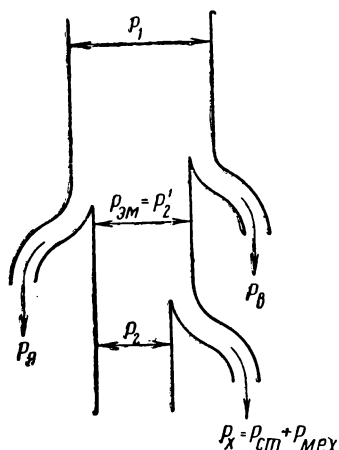


Рис. 178. Энергетическая диаграмма двигателя параллельного возбуждения

Процесс преобразования электрической энергии в механическую энергию в двигателе постоянного тока параллельного возбуждения хорошо можно иллюстрировать при помощи энергетической диаграммы. Мощность, подводимая к двигателю из сети, определяется по формуле

$$P_1 = UI = U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}}), \quad (19)$$

где  $I_{\text{в}}$  — ток возбуждения;

$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}}$  — ток двигателя.

Так как в двигателе имеются потери в цепи возбуждения  $P_{\text{в}} = UI_{\text{в}}$  и потери в цепи якоря  $P_{\text{я}} = r_{\text{я}} I_{\text{я}}^2$ , то, вычитая эти потери из мощности  $P_1$ , подводимой к двигателю, мы получим электромагнитную мощность  $P_{\text{эм}}$  (рис. 178), равную полной механической мощности  $P_2'$ , развиваемой двигателем:

мощности  $P_2'$ , развиваемой двигателем:

$$P_{\text{эм}} = P_2' = P_1 - (UI_{\text{в}} + r_{\text{я}} I_{\text{я}}^2) = U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}}) - (UI_{\text{в}} + r_{\text{я}} I_{\text{я}}^2) = UI_{\text{я}} - r_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 = EI_{\text{я}}. \quad (20)$$

Если из полной механической мощности  $P_2'$ , развиваемой двигателем, вычесть потери в стали  $P_{\text{ст}}$  и механические потери  $P_{\text{мех}}$ , то получим полезную мощность  $P_2$  на валу двигателя:

$$P_2 = P_2' - (P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}}) = P_2' - P_{\text{х}}, \quad (21)$$

где  $P_{\text{х}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}}$  — мощность холостого хода двигателя.

Зная полезный вращающий момент  $M$  на валу двигателя и скорость вращения  $n$  двигателя, можно определить полезную мощность на валу двигателя по формуле

$$P_2 = 9,81 \omega M = 9,81 \frac{2\pi n}{60} M = 1,028 Mn, \quad (22)$$

где  $\omega = \frac{2\pi n}{60}$  — угловая скорость вращения двигателя.

Электромагнитный момент, или просто вращающий момент, развиваемый двигателем, равен:

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega} = \frac{EI_{\text{я}}}{\omega} = \frac{\frac{pN}{60a} n\Phi I_{\text{я}}}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{pN}{2\pi a} I_{\text{я}} \Phi = k_M I_{\text{я}} \Phi, \quad (23)$$

где  $k_M = \frac{pN}{2\pi a}$  — постоянный коэффициент для данного двигателя.

Следовательно, электромагнитный момент прямо пропорционален току якоря  $I_{\text{я}}$  и магнитному потоку  $\Phi$ . Электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$  (при  $n = \text{const}$ ) уравнивается моментом холостого хода  $M_{\text{х}}$  и полезным моментом  $M$  на валу двигателя:

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{х}} + M. \quad (24)$$

Скорость вращения двигателя найдем из формулы (16)

$$n = \frac{E}{k_E \Phi} = \frac{U - r_{\text{я}} I_{\text{я}}}{k_E \Phi}. \quad (25)$$

### Пуск в ход двигателя параллельного возбуждения

Так как при пуске двигателя скорость вращения якоря равна нулю ( $n=0$ ), то э. д. с. ( $E = k_E n\Phi$ ) также равна нулю. Поэтому при включении двигателя непосредственно в сеть, т. е. без добавочного сопротивления, пусковой ток будет равен:

$$I_{\text{я.п}} = \frac{U}{r_{\text{я}}}.$$

Этот ток будет очень большим [ $I_{\text{я.п}} = (50 \div 10) I_{\text{я.н}}$ , где  $I_{\text{я.н}}$  — номинальный ток якоря], так как сопротивление якоря обычно невелико. Чтобы уменьшить пусковой ток последовательно с якорем, включают пусковой реостат. В этом случае пусковой ток будет равен:

$$I_{\text{я.п}} = \frac{U}{r_{\text{я}} + r_{\text{п}}}, \quad (26)$$

где  $r_{\text{п}}$  — сопротивление пускового реостата.

Как только двигатель начнет вращаться, в якорь будет индуцироваться э. д. с., поэтому ток в якорь по мере разгона двигателя будет уменьшаться, т. е.

$$I_{\text{я.п}} = \frac{U - E}{r_{\text{я}} + r_{\text{п}}}. \quad (27)$$

Поэтому с увеличением скорости вращения двигателя сопротивление пускового реостата постепенно выводится. Когда скорость

вращения двигателя будет приблизительно равна номинальной, сопротивление пускового реостата должно быть полностью выведено. Следует отметить, что при пуске двигателя в ход регулировочный реостат в цепи возбуждения должен быть полностью выключен, чтобы иметь максимальный ток возбуждения и максимальный магнитный поток, следовательно, чтобы получить наибольший момент (см. формулу 23).

### Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения представляют собой зависимость скорости вращения  $n$ , вращающего момента  $M$ , тока  $I_{\text{я}}$  якоря и к. п. д.  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  на валу двигателя при постоянном номинальном напряжении  $U_n$  на зажимах его и при постоянном токе возбуждения  $I_{\text{в}}$ :

$$n, M, I_{\text{я}}, \eta = f(P_2) \text{ при } U = U_n = \text{const и } I_{\text{в}} = I_{\text{в.н}} = \text{const.}$$

Иногда рабочие характеристики представляют не в зависимости от  $P_2$ , а от тока  $I_{\text{я}}$ , т. е.  $n, M, P_2, \eta = f(I_{\text{я}})$  при  $U = U_n = \text{const}$  и  $I_{\text{в}} = I_{\text{в.н}} = \text{const}$ .

На рис. 179 показана схема двигателя постоянного тока параллельного возбуждения для снятия рабочих характеристик. Опыт снятия рабочих характеристик производится следующим образом. Пусковой реостат в момент пуска должен быть полностью включен, а регулировочный реостат  $r_p$  должен быть полностью выведен. Включаем рубильник  $P$  и по мере разгона двигателя сопротивление пускового реостата постепенно выводится. Когда двигатель будет иметь скорость вращения, близкую к номинальной, пусковой реостат должен быть полностью выключен.

В начале опыта двигатель нагружаем до номинального тока  $I_n$  (номинального момента) при номинальном напряжении  $U_n$ , а в цепи возбуждения устанавливаем номинальный ток возбуждения  $I_{\text{в.н}}$ , чтобы при данной нагрузке двигателя скорость вращения его была равна номинальной  $n_n$ . Затем нагружаем двигатель до тока  $I = 1,2I_n$  при помо-

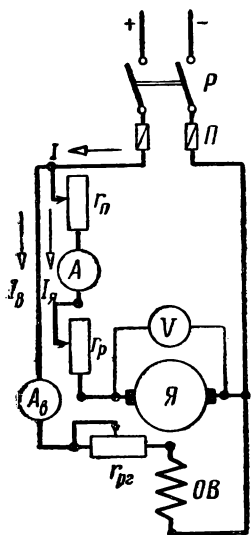


Рис. 179. Схема двигателя параллельного возбуждения.

щи тормоза или при помощи генератора постоянного тока независимого или параллельного возбуждения. После этого постепенно уменьшаем нагрузку двигателя до нуля, т. е. последний отсчет по приборам производим при холостом ходе двигателя. Во время опыта напряжение на зажимах двигателя  $U=U_n$  и ток в цепи возбуждения  $I_b=I_{b,n}$  поддерживаем постоянными. При каждом изменении нагрузки записываем показания приборов в табл. 54.

Т а б л и ц а 54

№ п/п	Измерено								Вычислено				Примечание
	$I_{\text{я}}$		$I_{\text{в}}=I_{\text{в.н}}=\text{const}$		$U=U_{\text{н}}=\text{const}$		$n$	$G$	$M$	$P_2$	$P_1$	$\eta$	
	$C_A=$		$C_A=$		$C_V=$								
	дел.	$a$	дел.	$a$	дел.	$b$	об/мин	кг	кГм	вт	вт	‰	
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													

Рабочие характеристики можно снять и в обратном порядке. Пустив двигатель, как было сказано выше, нагружаем двигатель до номинального тока  $I_n$  (номинального момента) при номинальном напряжении  $U_n$ , а в цепи возбуждения устанавливаем номинальный ток возбуждения  $I_{b,n}$ , чтобы скорость вращения двигателя была равна номинальной  $n_n$ .

Первый отсчет по приборам делаем при холостом ходе двигателя, а затем нагружаем двигатель до номинального тока или немного больше.

Во время опыта ток возбуждения  $I_{b,n}$  и напряжение  $U_n$  на зажимах двигателя поддерживаем постоянными.

Полезный вращающий момент двигателя определяется по формуле

$$M = lG \text{ [кГм]}. \tag{28}$$

Полезная мощность\* на валу двигателя равна:

$$P_2 = 1,028 M n.$$

Из этой формулы видно, что при постоянной скорости вращения  $n$  вращающий момент  $M$  прямо пропорционален полезной мощности  $P_2$  на валу двигателя, т. е. зависимость  $M = f(P_2)$  должна иметь вид прямой линии, выходящей из начала координат.

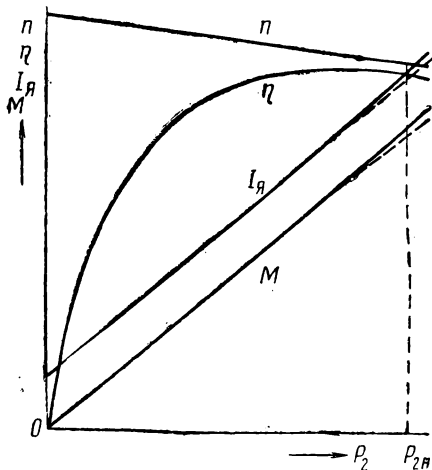


Рис. 180. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Так как с увеличением нагрузки скорость вращения уменьшается, то для получения той же полезной мощности вращающий момент  $M$  должен иметь большее значение, чем при  $n_n = \text{const}$ . Следовательно, зависимость  $M = f(P_2)$  с увеличением нагрузки немного отклоняется от прямой, как показано на рис. 180.

Если мы обратимся к формуле (23), т. е.

$$M_{\text{эм}} = k_M I_{\text{я}} \Phi,$$

то из этой формулы видно, что при постоянном магнитном потоке  $\Phi$ , ток якоря  $I_{\text{я}}$  должен был изменяться прямо пропорционально электромагнитному моменту  $M_{\text{эм}}$ .

Так как магнитный поток  $\Phi$  при увеличении нагрузки немного уменьшается, вследствие размагничивающего действия реакции якоря, то для получения того же момента ток якоря  $I_{\text{я}}$  должен иметь большее значение, чем при постоянном магнитном потоке  $\Phi$  (рис. 180).

\* Если нагрузкой двигателя является генератор постоянного тока, то в табл. 54 вместо  $G$  следует записывать напряжение  $U_{\text{Г}}$  на зажимах генератора и ток  $I_{\text{Г}}$  генератора (нагрузки). Полезная мощность генератора равна:

$$P_{\text{Г}} = U_{\text{Г}} I_{\text{Г}}.$$

Полезная мощность на валу двигателя определяется по формуле

$$P_2 = \frac{P_{\text{Г}}}{\eta_{\text{Г}}},$$

где  $\eta_{\text{Г}}$  — к. п. д. генератора, который должен быть известен для различных нагрузок.

Зная полезную мощность  $P_2$  на валу двигателя и его скорость вращения  $n$ , можно по формуле (22) определить полезный вращающий момент.

**Скоростная характеристика двигателя параллельного возбуждения** представляет собой зависимость скорости вращения  $n$  от тока  $I_{\text{я}}$  якоря (или от полезной мощности  $P_2$  на валу двигателя) при постоянном номинальном напряжении  $U_{\text{н}}$  на зажимах двигателя и при постоянном номинальном токе возбуждения  $I_{\text{в.н}}$ :

$$n = f(I_{\text{я}}) \text{ при } U = U_{\text{н}} = \text{const и } I_{\text{в}} = I_{\text{в.н}} = \text{const.}$$

Скорость вращения двигателя определяется по формуле

$$n = \frac{U - r_{\text{я}} I_{\text{я}}}{k_E \Phi}.$$

Из этой формулы видно, что при постоянных значениях напряжения  $U = U_{\text{н}}$  на зажимах двигателя и токе возбуждения  $I_{\text{в}} = I_{\text{в.н}}$  уменьшение или увеличение скорости вращения двигателя зависит только от двух причин: падения напряжения в цепи якоря  $r_{\text{я}} I_{\text{я}}$  и реакции якоря.

С увеличением нагрузки, а следовательно и тока  $I_{\text{я}}$  якоря, увеличиваются падение напряжения в цепи якоря и реакция якоря. Первая причина вызывает уменьшение, а вторая, наоборот — увеличение скорости вращения двигателя. Обычно для большинства двигателей преобладает падение напряжения в цепи якоря над действием реакции якоря, вследствие чего скорость вращения двигателя с увеличением нагрузки падает (см. рис. 180).

### **Регулирование скорости вращения двигателя параллельного возбуждения**

Если в цепь якоря включено добавочное сопротивление, то скорость вращения двигателя определяется по формуле

$$n = \frac{U - (r_{\text{я}} + r_{\text{п}}) I_{\text{я}}}{k_E \Phi}, \quad (29)$$

где  $r_{\text{п}}$  — сопротивление регулировочного реостата, включенного в цепь якоря.

Эта формула показывает, что регулировать скорость вращения двигателя можно тремя способами:

- изменением напряжения  $U$ , подводимого к двигателю;
- изменением сопротивления цепи якоря;
- изменением магнитного потока  $\Phi$  (тока возбуждения).

Мы рассмотрим последние два способа регулирования скорости вращения.

Если требуется уменьшить скорость вращения двигателя по сравнению с номинальной, то в цепь якоря включают добавочное сопротивление (реостат). Чем больше будет включено в цепь якоря добавочное сопротивление, тем меньше будет скорость вращения для данной нагрузки (рис. 181).



На рис. 181 показаны скоростные характеристики [механические характеристики  $n=f(M)$ ] двигателя при различных добавочных сопротивлениях. При данном способе регулирования скорости вращения полезная мощность на валу двигателя ( $P_2 = 1,028Mn$ ) уменьшается прямо пропорционально скорости вращения  $n$ . Коэффициент полезного действия  $\eta$  уменьшается. Данный способ регулирования скорости вращения неэкономичен вследствие больших потерь в реостате.

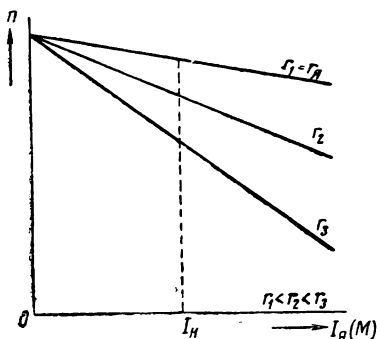


Рис. 181. Скоростные характеристики [механические характеристики  $n=f(M)$ ] двигателя параллельного возбуждения при различных добавочных сопротивлениях в цепи якоря

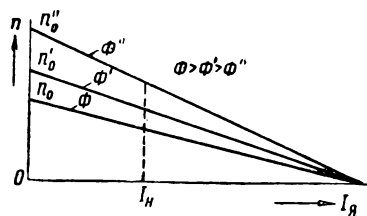


Рис. 182. Скоростные характеристики двигателя параллельного возбуждения при различных магнитных потоках

Опыт производится следующим образом. В цепь якоря включаем добавочное сопротивление (регулируемый реостат)  $r_p$  и постепенно нагружаем двигатель до номинального тока (номинального момента) при помощи тормоза или же генератора постоянного тока независимого или параллельного возбуждения или же наоборот, т. е. устанавливаем номинальный ток двигателя и постепенно нагрузку двигателя уменьшаем до нуля. При каждом изменении нагрузки показания приборов записываем в таблицу.

Если требуется увеличить скорость вращения по сравнению с номинальной, то при помощи регулируемого реостата  $r_p$  в цепи возбуждения мы уменьшаем ток возбуждения, а следовательно уменьшаем магнитный поток  $\Phi$ , вследствие чего скорость вращения двигателя возрастет.

На рис. 182 показаны скоростные характеристики двигателя параллельного возбуждения при различных магнитных потоках. Все скоростные характеристики пересекаются с осью абсцисс в

одной точке. Это легко доказать, если мы обратимся к формуле (25). Так как  $n=0$ , то формула (25) примет следующий вид:

$$0 = \frac{U - I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{k_E \Phi},$$

откуда найдем ток якоря двигателя:

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{r_{\text{я}}} = I_{\text{к}}. \quad (30)$$

Таким образом, при любом магнитном потоке и при скорости вращения двигателя, равной нулю, ток якоря  $I_{\text{я}}$  равен току короткого замыкания двигателя  $I_{\text{к}}$ .

При данном способе регулирования скорости вращения ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  и магнитный поток  $\Phi$  при включении реостата в цепь возбуждения уменьшаются, скорость вращения  $n$  увеличивается, ток  $I_{\text{я}}$  якоря увеличивается обратно пропорционально потоку ( $I_{\text{я}} = \frac{M_{\text{эм}}}{k_M \Phi} = \frac{\text{const}}{\Phi}$ ), мощность, подводимая к двигателю,  $P_1 = U (I_{\text{я}} + I_{\text{в}})$  увеличивается, полезная мощность  $P_2 = 1,028 M n$  увеличивается, а к. п. д. двигателя почти не изменяется. Следовательно, данный способ регулирования скорости вращения экономичен и является лучшим способом регулирования скорости вращения.

В этом случае опыт производится следующим образом. В цепь возбуждения включаем сопротивление регулировочного реостата и нагружаем двигатель, как указано выше. При каждом изменении нагрузки показания приборов записываем в таблицу.

### **Изменения направления вращения двигателя параллельного возбуждения**

Если требуется изменить направление вращения двигателя, то следует изменить направление тока в обмотке возбуждения или в обмотке якоря. Обычно изменяют направление тока в якоря.

### **Порядок проведения работы**

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, записать данные его щитка, пусковых и регулировочных аппаратов и технические данные измерительных приборов.

2. Собрать схему, изображенную на рис. 179.

3. Снять рабочие характеристики.

4. На основании полученных данных опыта и подсчета (согласно табл. 54) построить рабочие характеристики.

5. Снять скоростные характеристики для двух случаев:  
когда в цепь якоря включено добавочное сопротивление (регулируемый реостат);  
когда в цепь возбуждения включено добавочное сопротивление (регулируемый реостат).
6. На основании полученных данных опыта построить скоростные характеристики.
7. Изменить направление вращения двигателя.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На каком принципе основана работа двигателя постоянного тока?
  2. Назовите основные части двигателя постоянного тока и их назначение.
  3. Почему пусковой ток двигателя постоянного тока обычно больше номинального тока?
  4. Объясните, почему по мере разгона двигателя величина тока в цепи якоря уменьшается.
  5. Начертите схему включения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
  6. В каком положении находятся пусковой реостат в цепи якоря и регулируемый реостат в цепи возбуждения в момент пуска двигателя постоянного тока?
  7. Напишите формулу для электромагнитного момента двигателя постоянного тока.
  8. Напишите формулу для скорости вращения двигателя постоянного тока. Какие имеются способы регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения?
  9. Что называется рабочими характеристиками двигателя параллельного возбуждения и как они снимаются?
  10. Что называется скоростной характеристикой двигателя постоянного тока?
  11. Как изменить направление вращения двигателя постоянного тока?
-

## Глава X

# ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

### РАБОТА № 36

### ИСПЫТАНИЕ ДВУХЭЛЕКТРОДНОЙ ЛАМПЫ

#### Цель работы

Целью работы является ознакомление с конструкцией двухэлектродной лампы, исследование ее работы путем снятия характеристик и оценка на основании опытных данных некоторых свойств двухэлектродной лампы.

#### Общие сведения

В настоящее время электронные приборы получили широкое применение в радиотехнике, в телемеханике, в измерительной технике, в телевидении и т. п.

Простейшим типом электронного прибора является двухэлектродная лампа или диод. Если двухэлектродная лампа применяется для преобразования переменного тока в постоянный ток, т. е. для выпрямления тока, то она называется *кенотроном*.

На рис. 183 показано устройство двухэлектродной лампы (диода). Из рисунка видно, что диод представляет собой стеклянную (или металлическую) колбу 1, из которой выкачан воздух; внутри колбы расположены электроды — катод 2 и анод 3.

Работа электронных ламп основана на использовании явления *термоэлектронной эмиссии*, т. е. способности накаливаемого металла испускать со своей поверхности электроны.

Принцип работы двухэлектродной лампы заключается в следующем. Если к аноду присоединить положительный полюс источника э. д. с., например, аккумуляторной батареи, а к катоду — отрицательный, то при прохождении через катод тока катод накаливается и испускает со своей поверхности электроны, которые под действием электрического поля будут притягиваться положительно заряженным анодом и в анодной цепи появляется ток. Если бы анод был заряжен отрицательно по отношению к

катоду (отрицательный полюс источника э. д. с. был бы присоединен к аноду, а положительный к катоду), то электрическое поле стало бы противодействовать движению электронов к аноду, вследствие чего вылетевшие электроны возвращались бы к катоду и ток через лампу не проходил бы. Следовательно, мы можем сделать вывод, что двухэлектродная лампа пропускает ток только в одном направлении — от анода к катоду (так как направление тока принято считать обратным направлению движения электронов).

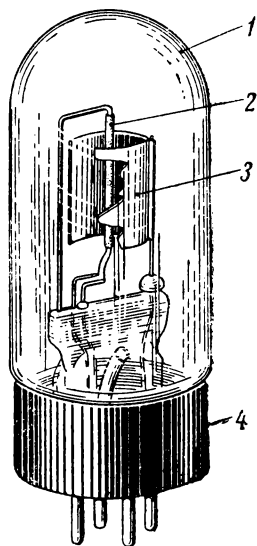


Рис. 183. Устройство двухэлектродной лампы (диода):

1 — колба лампы, 2 — катод, 3 — анод, 4 — цоколь лампы

Двухэлектродные лампы имеют катод или прямого, или косвенного накала. В первом случае ток накала  $I_n$  проходит через катод и нагревает его. Во втором случае ток накала проходит через подогреватель, нагревающий катод в результате лучеиспускания.

На рис. 184 показаны способы включения двухэлектродной лампы с питанием накала постоянным током, а на рис. 185 — способы включения двухэлектродной лампы с питанием накала переменным током. У лампы с прямым накалом амперметр должен быть включен так, как показано на рис. 184, а.

Амперметр измеряет разность тока накала  $I_n$  и половину анодного тока, т. е.  $I_n - \frac{1}{2} I_a$ . Поэтому, чтобы измерить

истинное значение тока накала, следует производить измерение при разомкнутой анодной цепи.

Если двухэлектродная лампа с косвенным накалом (рис. 184, б) имеет два вывода от подогревателя и отдельный вывод от катода, то цепи анода и накала независимы друг от друга.

Если же у лампы с косвенным накалом подогреватель внутри колбы присоединен к катоду, то амперметр должен быть включен так, как это показано на рис. 184, в.

Двухэлектродные лампы с электрически связанными между собой цепями анода и накала следует включать так, чтобы источники э. д. с. анодной цепи и цепи накала находились во встречном соединении (рис. 184, а и в).

Если питание цепи накала производится переменным током, то для двухэлектродной лампы прямого накала выводы катода присоединяются ко вторичной обмотке накального трансформатора

тора (рис. 185, а), а к средней точке вторичной обмотки и к аноду присоединяется анодная цепь.

На рис. 185, б и в изображены схемы, которые поясняют питание цепи накала переменным током в случае вентилей косвенного накала.

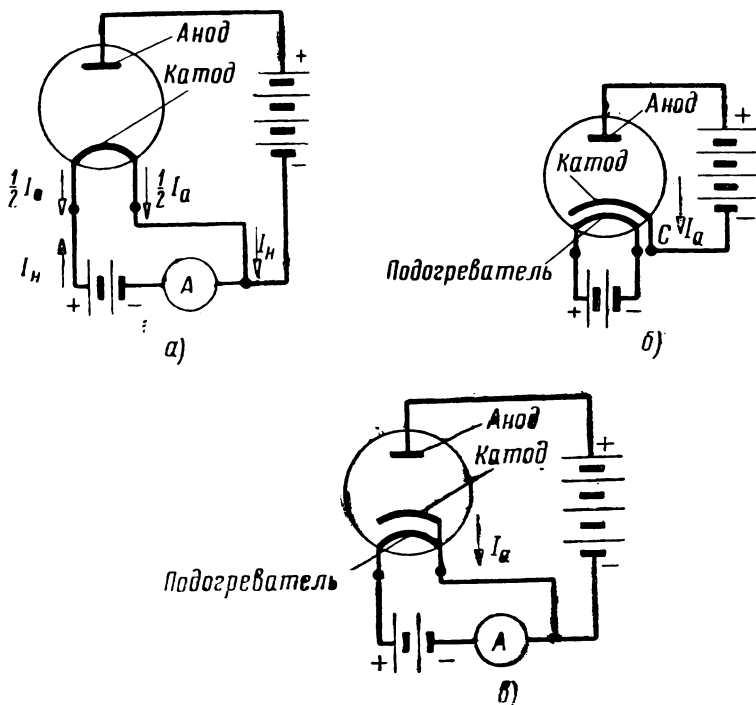


Рис. 184. Способы включения двухэлектродной лампы (диода) с питанием накала постоянным током:

а — с катодом прямого накала, б — с катодом косвенного накала, в — с катодом косвенного накала с подключением к нему внутри колбы подогревателя

Так как характеристики двухэлектродной лампы с накаливаемым катодом зависят от температуры катода, то при снятии характеристик необходимо стремиться к тому, чтобы мощность накала  $P_H$  оставалась постоянной. Поэтому в цепь накала нужно включать регулировочный реостат.

Следует отметить, что превышение мощности накала  $P_H$ , а также мощности  $P_A$ , рассеиваемой на аноде, свыше их номинальных мощностей  $P_{H,н}$  и  $P_{A,н}$  может привести к порче двухэлектродной лампы.

Основной характеристикой двухэлектродной лампы является анодная или вольтамперная характеристика, которая представ-

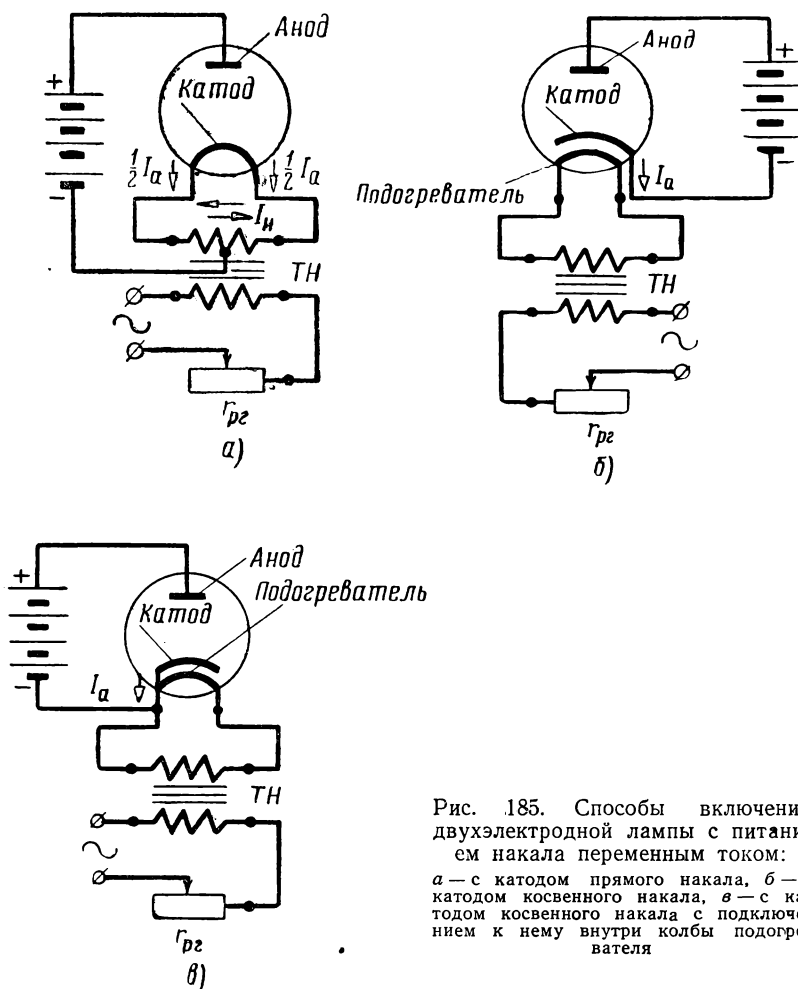


Рис. 185. Способы включения двухэлектродной лампы с питанием накала переменным током:  
 а — с катодом прямого накала, б — с катодом косвенного накала, в — с катодом косвенного накала с подключением к нему внутри колбы подогревателя

ляет собой зависимость анодного тока  $I_a$  от анодного напряжения  $U_a$  при постоянном напряжении накала  $U_n$ :

$$I_a = f(U_a) \text{ при } U_n = \text{const.}$$

Анодный ток  $I_a$  зависит от анодного напряжения  $U_a$  и от напряжения накала  $U_n$ .

### Испытание двухэлектродной лампы

Испытание двухэлектродной лампы (диода) производится по схеме, показанной на рис. 186. В этой схеме  $P_1$  и  $P_2$  — двухполюсные рубильники;  $r_a$  — делитель напряжения, при помощи которого можно изменять анодное напряжение или поддерживать его постоянным;  $r_n$  — регулировочный реостат в цепи накала, при помощи которого можно изменять напряжение накала или поддерживать его постоянным;  $mA$  — миллиамперметр, измеряющий анодный ток;  $V_a$  — вольтметр, измеряющий анодное напряжение;  $V_n$  — вольтметр, измеряющий напряжение накала;  $A_n$  — амперметр, измеряющий ток накала. Прежде чем приступить к испытанию диода, следует ознакомиться с номинальными данными, указанными на щитке диода (напряжение накала  $U_{н,н}$ , ток накала  $I_{н,н}$ , анодное напряжение  $U_{а,н}$ , мощность, рассеиваемая на аноде,  $P_{а,н}$ , вентильная прочность  $U_{вп,н}$ ).

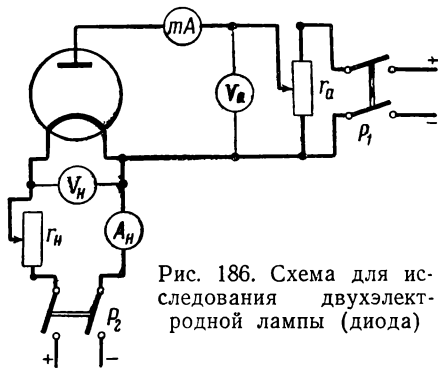


Рис. 186. Схема для исследования двухэлектродной лампы (диода)

Снятие зависимости анодного тока  $I_a$  от напряжения накала  $U_n$  при постоянном анодном напряжении  $U_a$ :  $I_a = f(U_n)$  при  $U_a = \text{const.}$  Опыт производится следующим образом. Включаем сопротивление реостата  $r_n$  полностью, затем замыкаем рубильник  $P_2$  и реостатом  $r_n$  устанавливаем номинальное напряжение накала. Затем включаем рубильник  $P_1$  и делителем напряжения  $r_a$  устанавливаем заданное анодное напряжение  $U_a'$ , которое во время опыта поддерживается постоянным. После этого изменяем реостатом  $r_n$  напряжение накала от номинального до нуля или, наоборот, от нуля до номинального через каждые 0,5 в.

При каждом изменении напряжения накала\* записываем показания приборов в табл. 55. Аналогичным образом снимаем

\* При измерении тока накала  $I_n$  следует анодную цепь выключать.



характеристики  $I_a = f(U_n)$  при двух других значениях анодного напряжения  $U_{a''}$  и  $U_{a,n}$ . При этом необходимо соблюдать следующие условия:

$$U_{a'} < U_{a''} < U_{a,n}.$$

Мощность накала определяется по формуле

$$P_n = U_n I_n. \quad (1)$$

Мощность, рассеиваемая на аноде, определяется по формуле

$$P_a = U_a I_a. \quad (2)$$

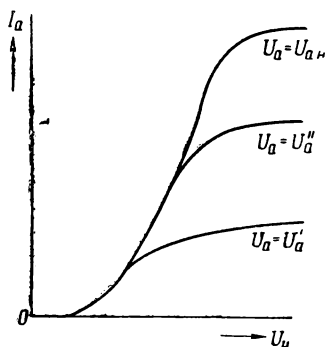


Рис. 187. Кривые зависимости анодного тока  $I_a$  от напряжения накала  $U_n$  при постоянном анодном напряжении  $U_a$ , т. е.  $I_a = f(U_n)$  при  $U_a = \text{const}$

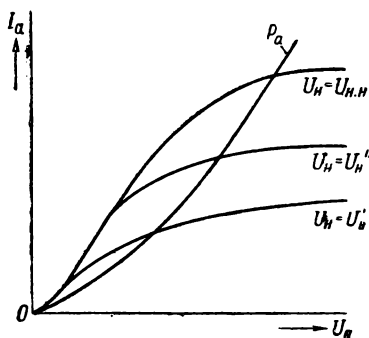


Рис. 188. Анодные характеристики двухэлектродной лампы

На основании полученных данных опыта (согласно табл. 55) строим кривые  $I_a = f(U_n)$ , как показано на рис. 187.

**Снятие анодных (вольтамперных) характеристик  $I_a = f(U_a)$  при  $U_n = \text{const}$ .** Анодные характеристики следует снять при трех значениях напряжения накала, т. е. при  $U_{n'}$ ,  $U_{n''}$  и  $U_{n,n}$ ; при этом необходимо соблюдать следующее условие:  $U_{n'} < U_{n''} < U_{n,n}$ . Снятие анодной характеристики производится следующим образом. Сопротивление реостата  $r_n$  включаем полностью, затем замыкаем рубильник  $P_2$  и реостатом  $r_n$  устанавливаем заданное напряжение накала  $U_{n'}$ , которое во время опыта поддерживается неизменным. Включив рубильник  $P_1$ , делителем напряжения  $r_a$  изменяем анодное напряжение  $U_a$  от 0 до значения  $1,5 U_{a,n}$  через каждые 10 в. При каждом изменении анодного напряжения записываем показания приборов в табл. 56.

Таблица 55

№ п/п	Т и п л а м п ы . . .										Примечание			
	$U_a = U'_a =$					$U_a = U'' =$					$U_a = U_{a.н} =$			
	$U_H$	$I_H$	$I_a$	$P_H$	$P_a$	$U_H$	$I_H$	$I_a$	$P_H$	$P_a$	$U_H$	$I_H$	$I_a$	$P_a$
	$C_V =$	$C_A =$	$C_A =$			$C_V =$	$C_A =$	$C_A =$			$C_V =$	$C_A =$	$C_A =$	
	дел.	в	дел.	а	дел.	дел.	в	дел.	а	дел.	дел.	в	дел.	а
	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														

Таблица 56

№ п/п	Т и п л а м п ы . . .										Примечание			
	$U_H = U'_H =$					$U_H = U'' =$					$U_H = U_{H.н} =$			
	$U_a$	$I_a$	$I_a$	$P_a$	$P_a$	$U_a$	$I_a$	$I_a$	$P_a$	$P_a$	$U_a$	$I_a$	$I_a$	$P_a$
	$C_V =$	$C_A =$	$C_A =$			$C_V =$	$C_A =$	$C_A =$			$C_V =$	$C_A =$	$C_A =$	
	дел.	в	дел.	а	дел.	дел.	в	дел.	а	дел.	дел.	в	дел.	а
	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														

Аналогичным образом снимаются анодные характеристики при напряжениях  $U_n''$  и  $U_{n,n}$ . На основании полученных данных опыта (согласно табл. 56) строим анодные характеристики, как показано на рис. 188. На этом же рисунке строим зависимость мощности  $P_a$ , рассеиваемой на аноде, от анодного напряжения  $U_a$ :  $P_a = f(U_a)$  при  $U_n = U_{n,n}$ .

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.

2. Собрать схему, изображенную на рис. 186.

3. Снять кривые  $I_a = f(U_n)$  для трех значений анодного напряжения  $U_a'$ ,  $U_a''$  и  $U_{a,n}$ ; при этом необходимо соблюдать следующее условие:  $U_a' < U_a'' < U_{a,n}$  (последние задаются преподавателем).

4. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 55) построить семейство характеристик  $I_a = f(U_n)$ .

5. Снять анодные характеристики  $I_a = f(U_a)$  для трех значений напряжения накала  $U_n'$ ,  $U_n''$  и  $U_{n,n}$ ; при этом необходимо соблюдать следующее условие:  $U_n' < U_n'' < U_{n,n}$  (последние задаются преподавателем).

6. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 56) построить анодные характеристики; на этом же рисунке построить кривую  $P_a = f(U_a)$  при  $U_n = U_{n,n}$ .

### Контрольные вопросы

1. Что называется двухэлектродной лампой (диодом) и на каком принципе основана ее работа?

2. Как снимается анодная (вольтамперная) характеристика диода и что она показывает?

## РАБОТА № 37

### ИСПЫТАНИЕ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ ЛАМПЫ

#### Цель работы

Целью работы является ознакомление с конструкцией трехэлектродной лампы, исследование ее работы путем снятия характеристик и оценка на основании опытных данных некоторых свойств трехэлектродной лампы.

#### Общие сведения

Трехэлектродная лампа, называемая *триодом*, отличается от двухэлектродной лампы (диода) наличием управляющего элек-

трודה-сетки, которая располагается между катодом и анодом на пути движения электронов. Сетка обычно имеет вид спирали с неплотно намотанными витками, окружающей катод. На рис. 189 показано устройство трехэлектродной лампы. Если к сетке приложено положительное напряжение (положительный потенциал по отношению к катоду, а потенциал катода условно принимаем равным нулю), то электрическое поле сетки будет складываться с электрическим полем анода и анодный ток будет увеличиваться. Если же к сетке приложено отрицательное напряжение, то электроны будут отталкиваться от сетки и анодный ток уменьшится. При некотором отрицательном сеточном напряжении сетка может задержать все электроны. В этом случае анодный ток будет равен нулю. Таким образом, изменяя сеточное напряжение, можно изменять величину анодного тока, т. е. можно управлять анодным током.

Обычно сетка расположена ближе к катоду, чем анод, поэтому небольшое изменение сеточного напряжения вызывает значительное изменение величины анодного тока.

Основными характеристиками трехэлектродной лампы являются сеточные и анодные характеристики. Эти характеристики могут быть использованы для изучения основных свойств трехэлектродной лампы.

### Сеточные характеристики трехэлектродной лампы

Сеточные характеристики трехэлектродной лампы представляют собой зависимость анодного тока  $I_a$  от сеточного напря-

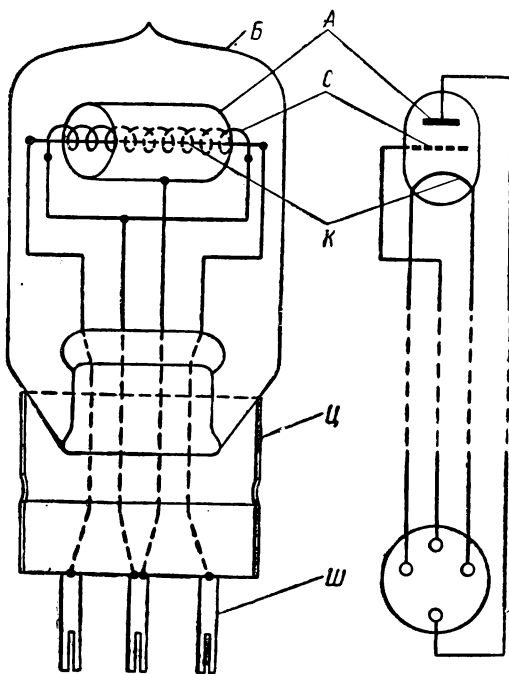


Рис. 189. Устройство трехэлектродной лампы (триода):

А — анод, К — катод, С — сетка, Б — баллон (колба), Ц — цоколь лампы, Ш — штырьки

жения (напряжения на сетке)  $U_c$  при постоянном анодном напряжении  $U_a$  и при постоянном напряжении накала  $U_{н,н}$ :

$$I_a = f(U_c) \text{ при } U_a = \text{const и } U_{н,н} = U_{н,н} = \text{const.}$$

Снятие статических сеточных характеристик триода производится по схеме, показанной на рис. 190. В этой схеме  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  — двухполюсные рубильники;  $\Pi$  — двухполюсный переключатель, при помощи которого можно изменять знак подаваемого на сетку напряжения;  $r_a$  — делитель напряжения при помощи кото-

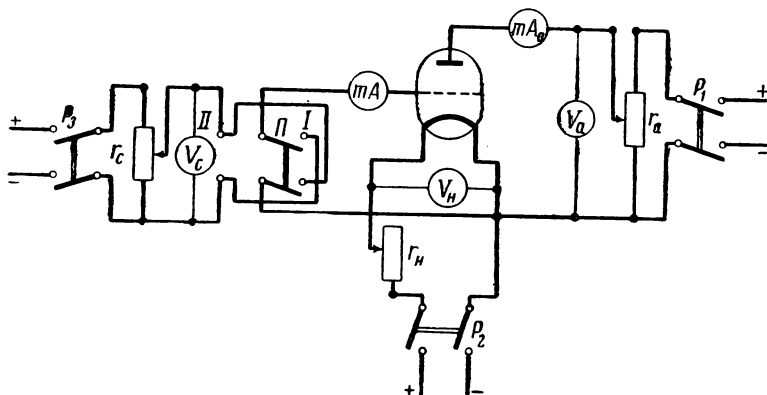


Рис. 190. Схема для исследования трехэлектродной лампы (триода)

рого можно изменять анодное напряжение или поддерживать его постоянным;  $r_c$  — делитель напряжения, при помощи которого можно изменять сеточное напряжение или поддерживать его постоянным;  $r_n$  — регулировочный реостат в цепи накала, при помощи которого поддерживается постоянным напряжение накала;  $mA_a$  — миллиамперметр, измеряющий анодный ток;  $mA$  — миллиамперметр, измеряющий сеточный ток;  $V_a$ ,  $V_c$  и  $V_n$  — вольтметры, измеряющие анодное и сеточное напряжения и напряжение накала. Прежде чем приступить к испытанию триода, следует ознакомиться с номинальными данными, указанными на щитке триода, т. е. напряжением накала  $U_{н,н}$ , анодным напряжением  $U_{а,н}$ , анодным током  $I_{а,н}$ , мощностью  $P_{а,н}$ , рассеиваемой на аноде, и сеточным напряжением  $U_{с,н}$ .

Снятие сеточной характеристики производится следующим образом. Включаем рубильник  $P_2$ , при этом регулировочный реостат  $r_n$  должен быть полностью включен, реостатом  $r_n$  устанавливаем номинальное (нормальное) напряжение  $U_{н,н}$ , которое во время опыта поддерживается постоянным. Затем, включив рубильник  $P_1$ , делителем напряжения  $r_a$  устанавливаем номинальное анодное напряжение  $U_{а,н}$ , которое во время опыта

поддерживается постоянным. После этого, включив рубильник  $P_3$ , переключатель  $\Pi$  ставим в положение  $I$  и делителем напряжения  $r_c$  устанавливаем отрицательное сеточное напряжение такой величины, чтобы анодный ток был равен нулю; в этом случае мощность, рассеиваемая на аноде, будет равна нулю, т. е.

$$P_a = U_a I_a = 0.$$

Затем постепенно уменьшаем отрицательное сеточное напряжение до нуля, при этом через каждые два вольта записываем показания приборов в табл. 57.

После этого ставим переключатель  $\Pi$  в положение  $II$ , т. е. подаем на сетку положительное сеточное напряжение, делителем напряжения  $r_c$  увеличиваем сеточное напряжение от нуля до некоторого значения, при котором  $P_a = 1,5 P_{a.n}$ . Чтобы выяснить влияние величины анодного напряжения на анодный ток, следует снять сеточные характеристики для различных значений анодных напряжений:  $U_a'$ ,  $U_a''$  и  $U_a'''$ . При этом необходимо соблюдать следующее условие:  $U_a'' < U_{a.n}$ ,  $U_a''' > U_{a.n}$  так, чтобы  $U_{a.n} - U_a'' = U_a''' - U_{a.n}$ , а  $U_a' \ll U_{a.n}$ .

Статические сеточные характеристики при анодных напряжениях  $U_a'$ ,  $U_a''$  и  $U_a'''$  снимаются аналогично изложенному выше для  $U_{a.n}$ .

Группа характеристик, снятых при различных значениях анодных напряжений, но при одном и том же напряжении накала, образует семейство характеристик.

Мощность, рассеиваемая на сетке, определяется по формуле

$$P_c = U_c I_c. \quad (3)$$

Мощность, рассеиваемая на аноде, определяется по формуле

$$P_a = U_a I_a. \quad (4)$$

На основании полученных данных (согласно табл. 57) строим статические сеточные характеристики  $I_a = f(U_c)$ , как показано на рис. 191. Из рис. 191 видно, что при увеличении

анодного напряжения по сравнению с номинальным анодным напряжением  $U_{a.n}$  при том же сеточном напряжении ток в цепи будет больше. Таким образом, увеличение или уменьшение анод-

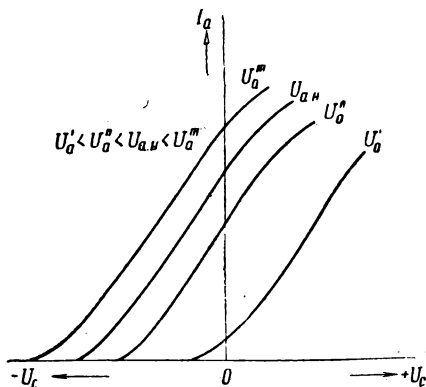


Рис. 191. Сеточные характеристики трех-электродной лампы

№ п/п	Тип лампы . . . $U_{н.н} =$									
	$U_a = U'_a =$					$U_a = U''_a =$				
	$I_a$	$I_c$	$U_c$	$P_a$	$P_c$	$I_a$	$I_c$	$U_c$	$P_a$	$P_c$
	$C_A =$	$C_A =$	$C_V =$			$C_A =$	$C_A =$	$C_V =$		
	дел. ма	дел. ма	дел. в	вт	вт	дел. ма	дел. ма	дел. в	вт	вт
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

ного напряжения сдвигает сеточную характеристику  $I_a = f_1(U_c)$  параллельно ее положению при номинальном напряжении влево или вправо. По статическим сеточным характеристикам можно определить параметры лампы.

### Анодные характеристики трехэлектродной лампы

Анодные характеристики трехэлектродной лампы представляют собой зависимость анодного тока  $I_a$  от анодного напряжения  $U_a$  при постоянном сеточном напряжении  $U_c$  и при постоянном напряжении  $U_n$  накала:

$$I_a = f(U_a) \text{ при } U_c = \text{const и } U_n = U_{н.н} = \text{const.}$$

Снятие статических анодных характеристик производится по схеме, показанной на рис. 190. Опыт проводится следующим образом. Включив рубильник  $P_2$ , реостатом  $r_n$  устанавливаем номинальное напряжение накала, которое во время опыта поддерживается постоянным. Затем включаем рубильник  $P_3$ , переключатель  $\Pi$  ставим в положение  $\Pi$  и делителем напряжения  $r_c$  устанавливаем заданное положительное сеточное напряжение, которое во время опыта поддерживается постоянным. После этого включаем рубильник  $P_1$ , делителем напряжения  $r_a$  изменяем анодное напряжение  $U_a$  (через каждые 20 в) от нуля до наибольшего значения, допустимого для испытуемой лампы, т. е. до  $P_a = 1,5 P_{a.н}$ .

При каждом изменении анодного напряжения записываем показания приборов в табл. 58.

Аналогичным образом снимаем анодные характеристики при заданном отрицательном сеточном напряжении, а также при сеточном напряжении, равном нулю.

Т а б л и ц а 57

[illegible]

Т а б л и ц а 58

[illegible]

На основании полученных данных опыта (согласно табл. 58) строим анодные характеристики  $I_a=f(U_a)$ , как показано на рис. 192.

Как видно из рис. 192, при сеточном напряжении, равном нулю, анодная характеристика начинается из начала координат; при  $U_a = 0$  анодный ток также равен нулю. С увеличением анодного напряжения анодный ток возрастает.

Если к сетке приложено отрицательное сеточное напряжение ( $U_c < 0$ ), то анодная характеристика начинается не из начала координат, а правее начала координат. Это объясняется тем, что отрицательно заряженная сетка не пропускает электроны от катода к аноду, когда анод имеет небольшое положительное на-



пряжение. Поэтому, чтобы получить анодный ток при отрицательном сеточном напряжении, к аноду следует приложить положительное напряжение такой величины, чтобы преодолеть

тормозящее действие отрицательно заряженной сетки. Следовательно, сдвиг анодной характеристики вправо зависит от величины отрицательного сеточного напряжения, т. е. чем больше будет отрицательное сеточное напряжение, тем больше будет сдвиг вправо.

При положительном сеточном напряжении анодные характеристики располагаются левее основной характеристики при  $U_c = 0$ .

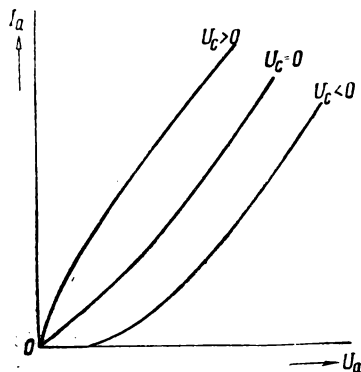


Рис. 192. Анодные характеристики трехэлектродной лампы

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с конструкцией трехэлектродной лампы, аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.

2. Собрать схему, изображенную на рис. 190.

3. Снять семейство сеточных характеристик  $I_a = f(U_c)$  при номинальном напряжении накала и различных значениях анодных напряжений (последние задаются преподавателем).

4. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 57) построить сеточные характеристики.

5. Снять семейство анодных характеристик  $I_a = f(U_a)$  при номинальном напряжении накала и различных значениях сеточных напряжений (последние задаются преподавателем).

6. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 58) построить анодные характеристики.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается трехэлектродная лампа (триод) от двухэлектродной лампы и на каком принципе основана ее работа?

2. Как снимаются сеточные характеристики триода и что они показывают?

3. Как снимаются анодные характеристики триода и что они показывают?

## ИСПЫТАНИЕ ФОТОЭЛЕМЕНТА

## Цель работы

Целью работы является ознакомление с устройством фотоэлементов и снятие характеристик фотоэлементов с внешним фотоэффектом.

## Общие сведения

*Фотоэлементами* называются приборы, служащие для превращения световой энергии в энергию электрического тока. В настоящее время фотоэлементы получили широкое применение в звуковом кино для воспроизведения звука, в телевидении, в фототелеграфировании, в измерительной технике, в автоматическом контроле и регулировании производственных процессов и т. д. Фотоэлементы разделяются на следующие типы:

фотоэлементы с внешним фотоэффектом;

фотоэлементы с внутренним фотоэффектом или фотосопротивления;

фотоэлементы с запирающим слоем или вентильные фотоэлементы (или полупроводниковые фотоэлементы).

Мы рассмотрим только фотоэлементы с внешним фотоэффектом. Явления внешнего фотоэффекта впервые были исследованы русским ученым А. Г. Столетовым.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом представляют собой стеклянную сферическую колбу, из которой удален воздух и внутри которой имеются два электрода — катод и анод.

Катодом называется светочувствительный слой, нанесенный на внутреннюю поверхность колбы и занимающий приблизительно половину ее сферической части.

Анодом является электрод специальной формы, располагаемый внутри колбы и электрически изолированный от катода. Если к электродам фотоэлемента приложено напряжение от отдельного источника э. д. с., то при освещении катода из него вырываются электроны, которые под действием электрического поля движутся от катода к аноду. Следовательно, в цепи фотоэлемента возникает электрический ток, пропорциональный до известной степени интенсивности освещения.

Для усиления фототока внутри самого фотоэлемента в колбу некоторых фотоэлементов вводится небольшое количество газа (аргон). Такие фотоэлементы называются *газонаполненными*.

Вследствие ионизации газа происходит значительное увеличение числа электронов, попадающих на анод, благодаря чему происходит увеличение тока во внешней цепи фотоэлемента.

Фотоэлементы без газового наполнения называются *вакуумными*.

Газонаполненные фотоэлементы по сравнению с вакуумными обладают лишь одним преимуществом — большей чувствительностью за счет газового усиления, по всем же другим характеристикам значительными преимуществами обладают вакуумные фотоэлементы.

### Испытание фотоэлементов

Испытание фотоэлементов производится по схеме, изображенной на рис. 193.

Установка представляет собой полый цилиндр или удлиненную коробку  $K$ , в которой находится испытуемый фотоэлемент  $\Phi$ , диафрагма  $D$  и лампа накаливания  $L$ , служащая точечным источником света. Она может перемещаться вдоль оси цилиндра или коробки и устанавливаться на любом расстоянии от фотоэлемента.

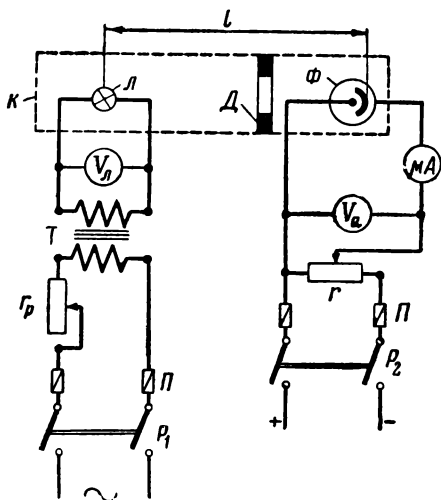


Рис. 193. Схема для исследования фотоэлементов

Напряжение на зажимах лампы поддерживается неизменным при помощи реостата  $r_p$ ; лампа накаливания подключается к зажимам вторичной обмотки трансформатора  $T$ . Напряжение  $U_L$  на зажимах лампы измеряется вольтметром  $V_L$ ; напряжение на фотоэлементе измеряется вольтметром  $V_a$ ; анодный ток (фототок) измеряется микроамперметром  $\mu A$ .

**Световая характеристика.** Световая характеристика представляет собой зависимость анодного тока (фототока)  $I_a$  от падающего светового потока  $F$  при постоянном анодном напряжении (напряжении на фотоэлементе)  $U_a$ :

$$I_a = f(F) \text{ при } U_a = \text{const.}$$

Снимаем две световые характеристики: одну при номинальном анодном напряжении  $U_{a.n.}$ , а другую при напряжении  $U_a = 0,5 U_{a.n.}$ .

Снятие световой характеристики производится следующим образом. Включив рубильник  $P_2$ , делителем напряжения  $r$  уста-

навливаем номинальное анодное напряжение, которое во время опыта поддерживается постоянным, затем включаем рубильник  $P_1$ , реостатом  $r_p$  устанавливаем номинальное напряжение на зажимах лампы, которое во время опыта поддерживается неизменным. Лампу накаливания устанавливаем на расстоянии  $l_1 = 10$  см от вакуумного фотоэлемента. Затем, отодвигая лампу от фотоэлемента по всей длине, записываем расстояние  $l$  и показания приборов в табл. 59. Следует получить не менее восьми точек.

Т а б л и ц а 59

№ п/п	Тип фотоэлемента	$U_L$	$l$	$F$	$U_a = 0,5 U_{a-n} =$	$U_{a-n} =$	Примечание
					$I_a$	$I_a$	
		<i>в</i>	<i>см</i>	<i>лм</i>	<i>мка</i>	<i>мка</i>	

После этого аналогичным образом снимаем световую характеристику для другого заданного анодного напряжения. Зная, что электрическая лампа накаливания создает в фотоэлементе, находящемся на расстоянии  $l_1 = 10$  см, световой поток  $F_0$  (величина  $F_0$  указывается на установке), определяем для всех расстояний световой поток по формуле

$$F = F_0 \left( \frac{l_1}{l} \right)^2 \quad [\text{лм}]. \quad (5)$$

Такой же результат мы получим, если световой поток будем определять по формуле

$$F = I \frac{S}{l^2} \quad [\text{лм}], \quad (6)$$

где  $I$  — сила света эталонной лампы, *св*;

$S$  — площадь фотокатода, в нашем случае площадь отверстия в диафрагме,  $\text{см}^2$ , при этом  $I$  и  $S$  должны быть известны.

На основании полученных данных (согласно табл. 59) строим световые характеристики, как показано на рис. 194. После этого снимаем световые характеристики для газонаполненного фотоэлемента, т. е. все измерения повторяем для газонаполненного фотоэлемента.

**Анодная (вольтамперная) характеристика.** Анодная характеристика представляет собой зависимость анодного тока (фототока)  $I_a$  от анодного напряжения (напряжения на фотоэлементе)  $U_a$  при постоянном световом потоке  $F$ :

$$I_a = f(U_a) \text{ при } F = \text{const.}$$

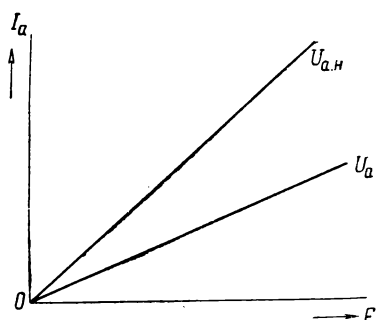


Рис. 194. Световые характеристики фотоэлемента

Опыт производится следующим образом. На расстоянии  $l_1$  от вакуумного фотоэлемента устанавливаем лампу накаливания, включаем рубильник  $P_1$ , устанавливаем заданное напряжение на зажимах лампы накаливания, которое во время опыта поддерживается постоянным. Включив рубильник  $P_2$ , делителем напряжения  $r$  изменяем анодное напряжение через 10—20 в. При каждом анодном напряжении записываем показания приборов в табл. 60.

Таблица 60

№ п/п	Тип фотоэлемента	$U_l$	$l$	$I_a$	$U_a$	Примечание
		в	см	мкА	в	

Следует сделать не менее девяти измерений. После этого лампу накаливания устанавливаем на расстоянии от фотоэлемента  $l_2$ , при этом  $l_2 > l_1$ , и снимаем вторую анодную (вольтамперную) характеристику. На основании полученных данных (согласно табл. 60) строим анодные характеристики, как показано на рис. 195.

После этого снимаем анодные характеристики для газонаполненного фотоэлемента. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 60) строим анодные характеристики для газонаполненного фотоэлемента, как показано на рис. 196.

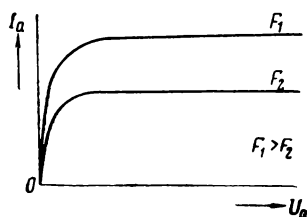


Рис. 195. Вольтамперные характеристики вакуумного фотоэлемента

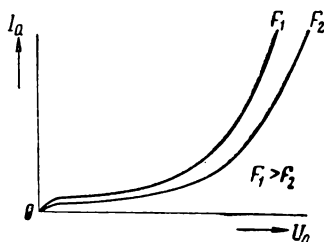


Рис. 196. Вольтамперные характеристики газонаполненного фотоэлемента

### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с устройством вакуумных и газонаполненных фотоэлементов, аппаратурой и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 193.
3. Снять две световые характеристики при номинальном анодном напряжении  $U_{a,n}$  и при напряжении  $U_a = 0,5 U_{a,n}$  для вакуумного фотоэлемента и для газонаполненного фотоэлемента.
4. На основании полученных данных опыта (табл. 59) для каждого фотоэлемента построить световые характеристики.
5. Снять две анодные (вольтамперные) характеристики: для вакуумного фотоэлемента и для газонаполненного фотоэлемента.
6. На основании полученных данных опыта (согласно табл. 60) для каждого фотоэлемента построить анодные характеристики.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется фотоэлементом и на каком принципе основана его работа?
2. На какие типы делятся фотоэлементы?
3. Что называется световой характеристикой фотоэлемента и что она показывает?
4. Как снимаются анодные (вольтамперные) характеристики фотоэлемента и что они показывают?



# ПРИЛОЖЕНИЕ



## УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ (ГОСТ 7624—55) \*

1. В электрических схемах размеры и толщина линий условных обозначений принимаются в зависимости от назначения и общих размеров чертежа схемы. Обмотки, катушки и контакты, находящиеся в главных цепях и в цепях возбуждения, должны вычерчиваться более толстыми линиями, чем находящиеся в цепях управления.

2. Обозначения, данные для горизонтального размещения цепей схемы, при применении их для вертикального размещения цепей поворачиваются на угол  $90^\circ$  против часовой стрелки.

3. При однолинейном изображении, если это требуется, количество проводов (шин, фаз) дается числом черточек, пересекающих под углом  $45^\circ$  обозначение провода на одном из его концов.

4. Все обозначения аппаратов даны в положении отсутствия напряжения во всех цепях схемы и отсутствия всяких внешних механических воздействий на аппараты. Это положение называется нормальным, в соответствии с чем все контакты разделяются на «нормально закрытые» (замкнутые при невозбужденном аппарате и при отсутствии внешнего механического воздействия), сокращенно обозначаемые НЗ, и на «нормально открытые» (разомкнутые при невозбужденном аппарате и при отсутствии внешнего механического воздействия), сокращенно обозначаемые НО.

### 1. Род тока и напряжения



№ п/п	Наименование	Обозначение
1	Постоянный ток **. Напряжение постоянного тока	$\equiv$
2	Переменный ток. Напряжение переменного тока	$\sim$
3	Постоянный и переменный ток (для измерительных приборов, аппаратов и т. п., пригодных для обоих родов тока)	$\equiv \sim$
4	Переменный ток с числом фаз $m$ и частотой $f$ , гц	$m \sim f$
5	Переменный ток трехфазный 50 гц (если на чертеже встречается лишь одна частота 50 гц)	$3 \sim$





\* Частично приводится ГОСТ.

\*\* В настоящее время постоянный ток обозначают —.

№ п/п	Наименование	Обозначение
6	Переменный ток трехфазный 20÷60 гц	$3 \sim 20 \div 60$
7	Положительная полярность	+
8	Отрицательная полярность	-

## 2. Виды соединений обмоток

1	Однофазная обмотка с двумя выводами	I
2	Однофазная обмотка с двумя выводами и с выведенной нейтральной (средней) точкой	
3	Соединение обмоток двух фаз в открытый треугольник (питание от сети трехфазного тока)	$\nabla$
4	Три однофазные обмотки, каждая с двумя выводами	III
5	Трехфазная обмотка с соединением в звезду	$\Upsilon$
6	Трехфазная обмотка с соединением в звезду с выведенной нейтральной (средней) точкой	
7	Трехфазная обмотка с соединением в треугольник	$\Delta$
8	Трехфазная обмотка с соединением трех фаз в разомкнутый треугольник	$\triangleleft$



№ п/п	Наименование	Обозначение
9	Трехфазная обмотка с соединением в зигзаг	
10	Шестифазная обмотка с соединением в многоугольник	
11	Шестифазная обмотка с соединением в звезду с нейтральной (средней) точкой	
12	Шестифазная обмотка с соединением в звезду и с выведенной нейтральной (средней) точкой	

Примечание. Допускается показывать вывод нейтральной (средней) точки как вправо, так и влево.

### 3. Провода, шины и их соединения

№ п/п	Наименование	Обозначение	
		однолинейное	многолинейное
1	Провод электрической цепи		
2	Провод, соединенный с нейтральной (средней) точкой		
3	Провод экранированный		
4	Провода двухпроводной электрической цепи		
5	Провода четырехпроводной электрической цепи трехфазного тока		
6	Соединение электрическое (металлическое), зажим		

№ п/п	Наименование	Обозначение	
		однолинейное	многолинейное
7	Провода пересекающиеся, без электрического (металлического) соединения		
8	Провода пересекающиеся, электрически (металлически) соединенные, и провода ответвляющиеся		
9	Шина		
10	Шины трехфазной четырехпроводной системы		
11	Ответвления от шины		
12	Повреждение изоляции		
13	Земля		
14	Заземление (соединение провода с землей)		
15	Замыкание на землю проводов двух фаз (двойное)		
16	Замыкание проводов трехфазное		
17	Корпус (машины, аппарата и др.)		
18	Пробой изоляции провода на корпус		
19	Соединение провода с корпусом		




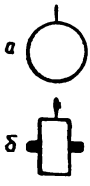

№ п/п	Наименование	Обозначение	
		однолинейное	многолинейное
20	Контакт аппарата, выведенный на сборку зажимов		
21	Перемычка на сборке зажимов		

Примечания. 1. Для обозначения фаз (проводов) сети трехфазного тока высшего напряжения применяются буквы А, В, С и О, а низшего — а, б, с и о.

2. Для проводов постоянного тока применяются обозначения + и —.

3. Для обозначения электрического соединения ж зажима (п. 6) даны два равноправных варианта.

#### 4. Машины вращающиеся

№ п/п	Наименование	Обозначение	
		однолинейное	многолинейное
1	Обмотка * статора (каждой фазы машины переменного тока). Обмотка возбуждения синхронной машины. Обмотка возбуждения машины постоянного тока параллельная (самовозбуждения, независимого возбуждения)		
2	Обмотка ** возбуждения машины постоянного тока последовательная, дополнительных полюсов, компенсационная		
3	Щетка (на коллекторе, на контактном кольце)		
4	Машина вращающаяся (без указания исполнения ротора или якоря). Общее обозначение		

\* Обмотка трансформатора.

\*\* Токовая обмотка измерительного прибора, токовая катушка реле.






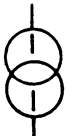


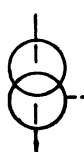
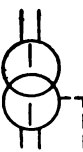

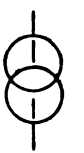


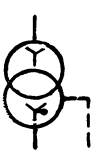
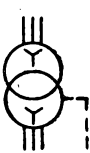
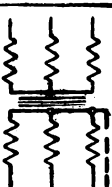
№ п/п	Наименование	Обозначение	
		однолинейное	многолинейное
5	Электродвигатель асинхронный трех- фазный с короткозамкнутым рото- ром		
6	Электродвигатель асинхронный трех- фазный с фазным ротором (допус- кается выводы ротора делать влево или вниз)		
7	Электродвигатель асинхронный трехфаз- ный с фазным ротором и шестью вы- веденными концами фаз обмотки ста- тора (допускается выводы ротора делать влево или вниз, а все выводы статора — вверх)		
8	Сельсин с однофазным статором (до- пускается выводы ротора делать вле- во или вниз)		
9	Сельсин с однофазным ротором (допус- кается выводы ротора делать влево или вниз)		
10	Сельсин дифференциальный (допускает- ся выводы ротора делать влево или вниз)		
11	Синхронная машина трехфазного тока		
12	Синхронная машина трехфазного тока с выведенной нейтральной (средней) точкой с указанием обмотки возбуж- дения		
13	Машина постоянного тока		

№ п/п	Наименование	Обозначение	
		однолинейное	многолинейное
14	Машина постоянного тока с обмотками: смешанного возбуждения (параллельной самовозбуждения и последовательной), дополнительных полюсов и компенсационной		
15	Усилитель электромашинный с поперечным полем и несколькими (например, тремя) обмотками управления		
16	Электродвигатель коллекторный однофазный последовательного возбуждения		
17	Электродвигатель коллекторный однофазный репульсионный		
18	Преобразователь, состоящий из асинхронного электродвигателя трехфазного тока с короткозамкнутым ротором и генератора постоянного тока		

Примечания. 1. Внутри обозначения машины указываются в случае необходимости: а) род машины (генератор — Г, двигатель — Д, возбудитель — В, тахогенератор — ТГ и т. д.); б) род тока, число фаз, соединения обмоток.

2. Допускается в условных обозначениях электрических машин использовать изображение в виде прямоугольника согласно примерам в пп. 4, 11, 13, 18.

## 5. Трансформаторы и автотрансформаторы








№ п/п	Наименование	Обозначение		
		однолинейное	многолинейное	многолинейное с указанием обмоток
1	Обмотка трансформатора			
2	Сердечник трансформатора			
3	Трансформатор однофазный без сердечника			
4	Трансформатор однофазный с сердечником			
5	Вывод нейтральной (средней) точки на одной обмотке у однофазного трансформатора с сердечником			
6	Вывод на одной обмотке у однофазного трансформатора с сердечником			
7	Трансформатор трехфазный, с сердечником, с соединением обмоток: звезда-звезда, с выведенной нейтральной (средней) точкой у одной из обмоток			









№ п/п	Наименование	Обозначение		
		однолинейное	многолинейное	многолинейное с указанием обмотки
8	Автотрансформатор однофаз- ный с сердечником			
9	Автотрансформатор трехфаз- ный, с сердечником, с соеди- нением обмоток в звезду. На обозначениях окружностью допускается делать выводы влево и вниз			
10	Автотрансформатор трехфаз- ный, с сердечником, с выво- дом начал и концов обмоток (с девятью выведенными концами). На обозначениях окружностью допускается делать выводы как вправо, так и влево			
11	Автотрансформатор трехфаз- ный (потенциал-регулятор)			
12	Трансформатор трехфазный по- воротный (фазорегулятор)			
13	Трансформатор тока с одной вторичной обмоткой			

Примечание. При необходимости показать несколько выводов от обмотки, число витков в многолинейных обозначениях с указанием обмоток (п. 6) может быть увеличено.


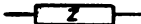
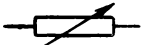
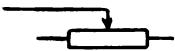
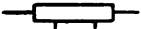


## 6. Приборы измерительные



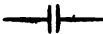

№ п/п	Наименование	Обозначение
1	Обмотка * измерительного прибора—напряжения	
2	Прибор измерительный показывающий	
3	Прибор измерительный регистрирующий (записывающий)	
4	Счетчик	
5	Шунт для измерительного прибора	
6	Амперметр показывающий	
7	Вольтметр показывающий	
8	Ваттметр показывающий	
9	Вольтамперметр реактивный показывающий	
10	Фазометр показывающий	
11	Частотомер показывающий	
12	Омметр показывающий	
13	Синхроноскоп	

\* Катушка напряжения реле.


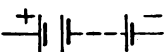
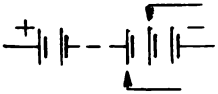
№ п/п	Наименование	Обозначение
14	Амперметр регистрирующий	
15	Вольтметр регистрирующий	
16	Ваттметр регистрирующий	
17	Вольтамперметр реактивный регистрирующий	
18	Ватт-часов-счетчик	
19	Вольтампер-часов-реактивных-счетчик	

## 7. Сопротивления

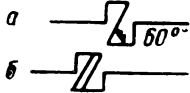

1	Сопротивление нерегулируемое. Общее обозначение. Сопротивление активное. Сопротивление омическое	
2	Сопротивление полное	
3	Сопротивление регулируемое. Общее обозначение	
4	Сопротивление регулируемое без разрыва цепи, со скользящим контактом	
5	Сопротивление с отводами	
6	Сопротивление индуктивное без сердечника	
7	Сопротивление индуктивное с сердечником (дроссель)	

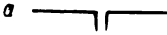
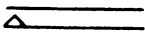
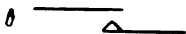
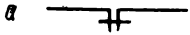
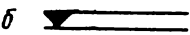

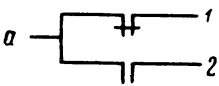
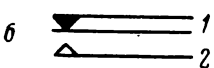
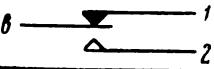
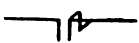
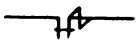
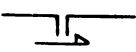
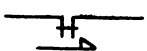
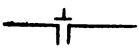
№ п/п	Наименование	Обозначение
8	Дроссель с катушкой подмагничивания (например, с одной)	
9	Реактор	
10	Конденсатор нерегулируемый. Сопротивление емкостное, нерегулируемое	
11	Конденсатор регулируемый. Сопротивление емкостное, регулируемое	

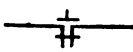
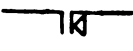

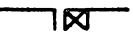
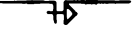


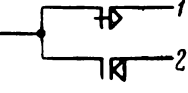
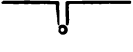
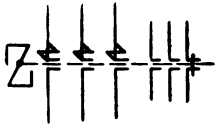

#### 8. Элементы и батареи, гальванические и аккумуляторные





1	Элемент гальванический или аккумуляторный	
2	Батарея из элементов гальванических или аккумуляторных	
3	Батарея из элементов аккумуляторных с двойным элементным коммутатором	

#### 9. Контактторы и реле

1	Катушка контактора <i>а</i> . Для двух параллельно включенных катушек допускается обозначение <i>б</i>	
2	Нагревательный элемент теплового реле	

№ п/п	Наименование	Обозначение
3	Контакт нормально открытый (НО): <i>а</i> — общее; <i>б</i> и <i>в</i> — допустимые в схемах радиотехники и связи	  
4	Контакт нормально закрытый (НЗ): <i>а</i> — общее; <i>б</i> и <i>в</i> — допустимые в схемах радиотехники и связи	  
5	Контакт нормально закрытый (НЗ), пе- рекключающий с цепи первой на цепь вторую, при наличии общей точки: <i>а</i> — общее; <i>б</i> и <i>в</i> — допустимые в схемах радиотехники и связи	  
6	Контакт нормально открытый (НО) с гашением	
7	Контакт нормально закрытый (НЗ) с гашением	
8	Контакт нормально открытый (НО) с защелкой, с электромагнитным воз- вратом. Катушка возврата изобра- жается отдельно	
9	Контакт нормально закрытый (НЗ) с защелкой, с электромагнитным воз- вратом. Катушка возврата изобра- жается отдельно	
10	Контакт нормально открытый (НО) с защелкой, с ручным возвратом	

№ п/п	Наименование	Обозначение
11	Контакт нормально закрытый (НЗ) с защелкой, с ручным возвратом	
12	Контакт нормально открытый (НО) с выдержкой времени при закрывании	
13	Контакт нормально открытый (НО) с выдержкой времени при открывании	
14	Контакт нормально открытый (НО) с выдержкой времени при закрывании и открывании	
15	Контакт нормально закрытый (НЗ) с выдержкой времени при открывании	
16	Контакт нормально закрытый (НЗ) с выдержкой времени при закрывании	
17	Контакт нормально закрытый (НЗ) с выдержкой времени при открывании и закрывании	
18	Контакт нормально закрытый (НЗ), переключающий с цепи первой на цепь вторую, при наличии общей точки, с выдержкой времени при отключении цепи первой и включении цепи второй	
19	Контакт импульсный (проскальзывающий)	
20	Контактор трехполюсный с электромагнитным приводом, с тремя НО главными контактами с гашением, с двумя НО и одним НЗ блок-контактами (для принципиальных схем, если требуется указать главные контакты и блок-контакты, а также тяговую катушку)	
21	Реле — общее обозначение	

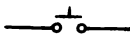

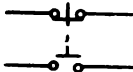


№ п/п	Наименование	Обозначение
22	Реле промежуточное	
23	Реле промежуточное с указателем действия, возвращаемым в нормальное положение от руки	
24	Реле указательное с указателем действия, возвращаемое в нормальное положение от руки	
25	Реле тока с зависимой выдержкой времени	

Примечания. 1. В графическое обозначение реле п. 21 вписывается буквенное обозначение, например: а) реле тока РТ, б) реле напряжения РН, в) реле мощности РМ и т. д. Допускается в буквенное обозначение букву Р не включать (например, вместо РТ писать Т) в случаях, если отсутствие буквы Р не может привести к неясности, например, на схемах, охватывающих исключительно релейную защиту.

2. Изображения искрогасительных катушек в обозначениях пп. 6 и 7 допускаются как справа, так и слева.

3. В схемах искрогасительные катушки у контактов контакторов в главных цепях допускается не показывать, но обязательно показывать в цепях возбуждения и управления.






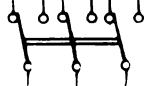




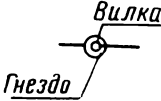

#### 10. Командоаппараты

№ п/п	Наименование	Обозначение
1	Кнопка с самовозвратом с нормально открытым (НО) контактом	
2	Кнопка с самовозвратом с нормально закрытым (НЗ) контактом	
3	Кнопка с самовозвратом, с одним нормально открытым (НО) и одним нормально закрытым (НЗ) контактами	
4	Выключатель путевой или конечный с нормально открытым (НО) контактом	
5	Выключатель путевой или конечный с нормально закрытым (НЗ) контактом	

# 11. Выключатели, переключатели и разъединители

№ п/п	Наименование	Обозначения	
		однолинейное	многолинейное
1	Выключатель мощности трехполюсный автоматический, воздушный (автомат)		
2	Выключатель мощности автоматический, воздушный, например: а) максимального тока — $T >$ б) минимального тока — $T <$ в) минимального напряжения — $H <$		
3	Выключатель мощности трехполюсный неавтоматический, воздушный (без расцепителя)		
4	Выключатель мощности трехполюсный (с гашением дуги в масле или струей масла, воды, воздуха и т. п.)		
5	Выключатель нагрузки трехполюсный с гашением дуги (разъединитель мощности)		
6	Выключатель трехполюсный. Разъединитель трехполюсный		
7	Выключатель двухполюсный с разрядным ножом		
8	Выключатель с одним нормально открытым (НО) и двумя нормально закрытыми (НЗ) контактами		







№ п/п	Наименование	Обозначения	
		однолинейное	многолинейное
9	Переключатель трехполюсный. Разъединитель переключающий, трехполюсный		
			
10	Переключатель трехполюсный		
11	Переключатель трехполюсный без разрыва цепи		
12	Переключатель двухполюсный на четыре цепи (вольтметровый)		
13	Разъединитель однополюсный с заземляющим ножом на одной стороне разъединителя, с меха- нической блокировкой		
14	Штепсельное соединение		
15	Штепсельное соединение в выдви- гаемых разъемных устройствах и аппаратах		

Примечание. Допускается показывать разрядный и заземляющий ножи как вправо, так и влево (пп. 7 и 13).

## 12. Аппараты разные

№ п/п	Наименование	Обозначение
-------	--------------	-------------



### а) Аппараты сигнализации

1	Звонок электрический	
2	Сирена электрическая, гудок, ревун	
3	Лампа сигнальная *	 

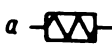




### б) Аппараты защиты от перенапряжений и предохранители

4	Разрядник. Общее обозначение	
5	Разрядник трубчатый	
6	Разрядник вентильный	




\* Над обозначением при необходимости добавляется начальная буква слова, указывающего цвет стекла или сигнализируемое состояние, например Б — белый, К — красный, А — авария, В — включено и т. п.

№ п/п	Наименование	Обозначение
7	Предохранитель пробивной	
8	Предохранитель плавкий	

*в) Электромагниты*






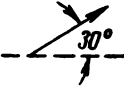

9	Электромагнит с параллельной обмоткой: <i>а</i> — общее, <i>б</i> — допустимое в схемах радиотехники и связи	 
10	Электромагнит с последовательной обмоткой: <i>а</i> — общее, <i>б</i> — допустимое в схемах радиотехники и связи	 
11	Электромагнит трехфазного тока	

*г) Печи электрические*











12	Дуговая печь. Общее обозначение	
13	Печь сопротивления. Общее обозначение	
14	Индукционная печь. Общее обозначение	









*д) Разное*

15	Токосъемник троллейный	
----	------------------------	---




№ п/п	Наименование	Обозначение
16	Токо съемник кольцевой	
17	Плита электромагнитная	
18	Кабельная разделка	
19	Лампа осветительная	
20	Экран	
21	Знак регулирования. Общее обозначение	
22	Знак регулирования, без разрыва цепи, со скользящим контактом	




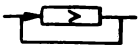
**УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, НАНОСИМЫЕ  
НА ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ  
ЧАСТИ (ГОСТ 1845—59)**

№ п/п	Наименование	Условное обозначение
<b>I. Обозначение принципа действия прибора</b>		
1	Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой	
2	Магнитоэлектрический логометр с подвижными рамками	
3	Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом	
4	Магнитоэлектрический логометр с подвижным магнитом	
5	Электромагнитный прибор	
6	Электромагнитный логометр	
7	Электромагнитный поляризованный прибор	
8	Электродинамический прибор	
9	Электродинамический логометр	
10	Ферродинамический прибор	





№ п/п	Наименование	Условное обозначение
11	Ферродинамический логометр	
12	Индукционный прибор	
13	Индукционный логометр	
14	Магнитоиндукционный прибор	
15	Электростатический прибор	
16	Вибрационный прибор (язычковый)	
17	Тепловой прибор (с нагреваемой проволокой)	
18	Биметаллический прибор	

*Дополнительные обозначения по виду преобразователя*



19	Термопреобразователь изолированный	
20	Термопреобразователь неизолированный	
21	Выпрямитель полупроводниковый	

№ п/п	Наименование	Условное обозначение
22	Выпрямитель электромеханический	
23	Электронный преобразователь	
24	Преобразователь вибрационно-импульсный	
25	Компенсационный преобразователь	

*Примеры применения обозначений 19—25*



26	Термоэлектрический прибор (с изолированным преобразователем и магнитоэлектрическим измерительным механизмом)	
27	Выпрямительный прибор (с полупроводниковым выпрямителем и измерительным механизмом с подвижным магнитом)	
28	Электронный прибор с электростатическим измерительным механизмом	
29	Вибрационно-импульсный прибор с магнитоэлектрическим измерительным механизмом	

*Дополнительные обозначения по защите от магнитных и электрических полей*



30	Защита от внешних магнитных полей (I категория защищенности)	
31	Защита от внешних электрических полей (I категория защищенности)	

№ п/п	Наименование	Условное обозначение
-------	--------------	----------------------




*Примеры применения обозначения 30 и 31*

32	Магнитоэлектрический прибор I категории защищенности от магнитных влияний	
33	Электростатический прибор I категории защищенности от электрических полей	

**II. Обозначения рода тока**

34	Трехфазный ток (общее обозначение)	
35	Трехфазный ток при неравномерной нагрузке фаз	








*Примеры применения обозначения 34 и 35 применительно к трехфазным ваттметрам, варметрам и фазометрам*

36	Прибор с одноэлементным измерительным механизмом	
37	Прибор с двухэлементным измерительным механизмом	
38	Прибор с трехэлементным измерительным механизмом (для четырехпроводной сети)	






**III. Обозначения класса точности, положения прибора, прочности и изоляции**



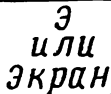




39	Класс точности при нормировании погрешности в процентах от диапазона измерения, например 1,5	1,5
----	--	-----



№ п/п	Наименование	Условное обозначение
40	То же, при нормировании погрешности в процентах от длины шкалы, например 1,5	
41	Горизонтальное положение шкалы	
42	Вертикальное положение шкалы	
43	Наклонное положение шкалы под определенным углом к горизонту, например 60°	
44	Направление ориентировки прибора в земном магнитном поле	
45	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например 2 кВ	
46	Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит	

#### IV. Обозначения зажимов, корректора и арретира

47	Отрицательный зажим	
48	Положительный зажим	
49	Общий зажим (для многопредельных приборов переменного тока и комбинированных приборов)	
50	Зажим постоянного тока (в комбинированных приборах) в зависимости от полярности	
51	Зажим переменного тока (в комбинированных приборах)	

№ п/п	Наименование	Условное обозначение
52	Генераторный (зажим для ваттметров, варметров и фазометров)	
53	Зажим, соединенный с подвижной частью (рамкой) прибора	
54	Зажим, соединенный с экраном	
55	Зажим, соединенный с корпусом	
56	Зажим (винт, шпилька) для заземления	
57	Корректор	
58	Арретир	

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Стр.

Предисловие . . . . .	3
Правила выполнения работ в лаборатории . . . . .	4
<b>Глава I. Постоянный ток . . . . .</b>	<b>7</b>
Работа № 1. Измерение сопротивлений на постоянном токе методом вольтметра и амперметра . . . . .	7
Работа № 2. Определение коэффициента полезного действия нагрева- тельного прибора . . . . .	10
Работа № 3. Последовательное соединение приемников . . . . .	14
Работа № 4. Параллельное соединение приемников . . . . .	18
Работа № 5. Смешанное соединение приемников . . . . .	22
Работа № 6. Испытание аккумуляторов . . . . .	26
Работа № 7. Последовательное, параллельное и смешанное соединение аккумуляторов или гальванических элементов . . . . .	33
<b>Глава II. Электрическая емкость . . . . .</b>	<b>40</b>
Работа № 8. Последовательное и параллельное соединение конденса- торов . . . . .	40
<b>Глава III. Электромагнитная индукция . . . . .</b>	<b>46</b>
Работа № 9. Проверка закона электромагнитной индукции, явления са- моиндукции и взаимной индукции . . . . .	46
<b>Глава IV. Однофазный переменный ток . . . . .</b>	<b>54</b>
Работа № 10. Последовательное соединение активного и индуктивного сопротивлений . . . . .	54
Работа № 11. Последовательное соединение катушек . . . . .	65
Работа № 12. Последовательное соединение активного и емкостного сопротивлений . . . . .	72
Работа № 13. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Резонанс напряжений . . . . .	76
Работа № 14. Параллельное соединение катушки и ламп накаливания (или проволочного реостата) . . . . .	86
Работа № 15. Параллельное соединение ламп накаливания (или про- волочного реостата) и конденсаторов . . . . .	94
Работа № 16. Параллельное соединение катушек . . . . .	97
Работа № 17. Параллельное соединение катушки и конденсаторов. Ре- зонанс токов . . . . .	103
Работа № 18. Измерение мощности в цепи однофазного переменного тока . . . . .	111
Работа № 19. Измерение электрической энергии в цепи однофазного переменного тока и проверка счетчика . . . . .	116

<b>Глава V. Трехфазный переменный ток</b>	126
Работа № 20. Соединение приемников звездой	126
Работа № 21. Соединение приемников треугольником	141
<b>Глава VI. Электрические измерения</b>	151
Работа № 22. Измерение активной мощности в цепи трехфазного тока	151
Работа № 23. Измерение коэффициента мощности	164
Работа № 24. Измерение сопротивлений одинарным мостом	170
Работа № 25. Измерение сопротивления изоляции проводов мегомметром	177
<b>Глава VII. Трансформаторы</b>	183
Работа № 26. Испытание однофазного трансформатора	183
Работа № 27. Трансформирование трехфазного тока тремя однофазными трансформаторами	196
Работа № 28. Испытание трехфазного трансформатора	201
Работа № 29. Параллельная работа трехфазных трансформаторов	214
<b>Глава VIII. Электрические машины переменного тока</b>	219
Работа № 30. Испытание трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	219
Работа № 31. Испытание трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	230
Работа № 32. Управление трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором при помощи магнитного пускателя	239
Работа № 33. Испытание трехфазного синхронного генератора	244
<b>Глава IX. Электрические машины постоянного тока</b>	257
Работа № 34. Испытание генератора постоянного тока параллельного возбуждения	257
Работа № 35. Испытание двигателя постоянного тока параллельного возбуждения	269
<b>Глава X. Электронные приборы</b>	279
Работа № 36. Испытание двухэлектродной лампы	279
Работа № 37. Испытание трехэлектродной лампы	286
Работа № 38. Испытание фотоэлемента	293
Приложение	299

Раскатов Афанасий Иванович

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ.  
М., Профтехиздат, 1962  
328 с, с илл.

6П2.1

Научный редактор А. В. Забавский  
Редактор М. М. Числов  
Художник Н. Н. Степанов  
Техн. редактор М. Н. Персон  
Корректор Г. Д. Лукомская

---

А-00911	Сдано в набор 7/XII 1961 г.	Подп. к печ. 5/IV 1962 г.
Формат бум. 60×90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> ≈20,5 п. л.	В 1 п. л. 33 100 зн.	Уч.-изд. 17 л.
Уч. № 84/5273	Тираж 15 500	Зак. 2546
		Цена 56 коп.

---

Издательство «Профтехиздат». Москва, Центр, Хохловский пер., 7.  
Тип. Профтехиздата. Москва, Хохловский пер., 7

Цена 56 коп.

Архив