

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие



Санкт-Петербург  
2016



Министерство образования и науки Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие



Санкт-Петербург  
2016

УДК 621.3(075.8)

ББК 31. 2я73

Э45

**Рецензенты:**

Кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающего  
и электротехнического оборудования СПбГЛТУ *В. А. Скорняков*  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
электрических систем и сетей СПбПУ *Е. Н. Попков*

**Авторы:**

А. П. Веселовский, С. Ю. Грачев, С. Г. Зверев, И. И. Иванов,  
В. Л. Ларионова, В. В. Маркелов, М. В. Мартыанов, Т. А. Медведева,  
И. С. Савельева, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов, Б. А. Юшин

**Электротехника. Лабораторный практикум** : учеб. пособие / под ред.  
И. И. Иванова. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. — 149 с.

Пособие соответствует государственному образовательному стандарту дисциплины «Электротехника и электроника» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки и специальностям техники и технологии.

Пособие имеет учебно-методическое назначение для выполнения лабораторных работ по электротехнике по дисциплине «Электротехника и электроника».

В пособии в сжатом виде дано изложение теоретических вопросов, относящихся к исследованиям электрических цепей и испытаниям электрических машин постоянного и переменного тока. Даны указания по сборке электрических цепей, по методике проведения лабораторных работ и обработке результатов опытов, приведены программы работ и правила оформления отчетов.

Предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину «Электротехника и электроника».

Табл. 36. Ил. 61.

Печатается по решению

Совета по издательской деятельности Ученого совета  
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

ISBN 978-5-7422-5287-0

© Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, 2016

## Оглавление

<i>Работа 1. ОПИСАНИЕ БЛОКОВ НАСТОЛЬНОЙ МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОДНО- И ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА .....</i>	<i>4</i>
<i>Работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ .....</i>	<i>31</i>
<i>Работа 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ .....</i>	<i>46</i>
<i>Работа 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ.....</i>	<i>65</i>
<i>Работа 5. ИСПЫТАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА .....</i>	<i>94</i>
<i>Работа 6. ИСПЫТАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....</i>	<i>104</i>
<i>Работа 7. ИСПЫТАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА .....</i>	<i>115</i>
<i>Работа 8. ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ .....</i>	<i>130</i>
<i>Работа 9. ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ НА АВТОНОМНУЮ НАГРУЗКУ .....</i>	<i>140</i>

## Работа 1

### ОПИСАНИЕ БЛОКОВ НАСТОЛЬНОЙ МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОДНО- И ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА

Лабораторный стенд разработан и изготовлен английской фирмой Feedback с учетом рекомендаций кафедры электротехники и электроэнергетики СПбГПУ. Общий вид стенда по изучению одно- и трехфазных электрических цепей и электрических машин переменного и постоянного тока приведен на рис. 1.1. Измерение параметров цепей и машин достигается использованием виртуальных или обычных приборов.

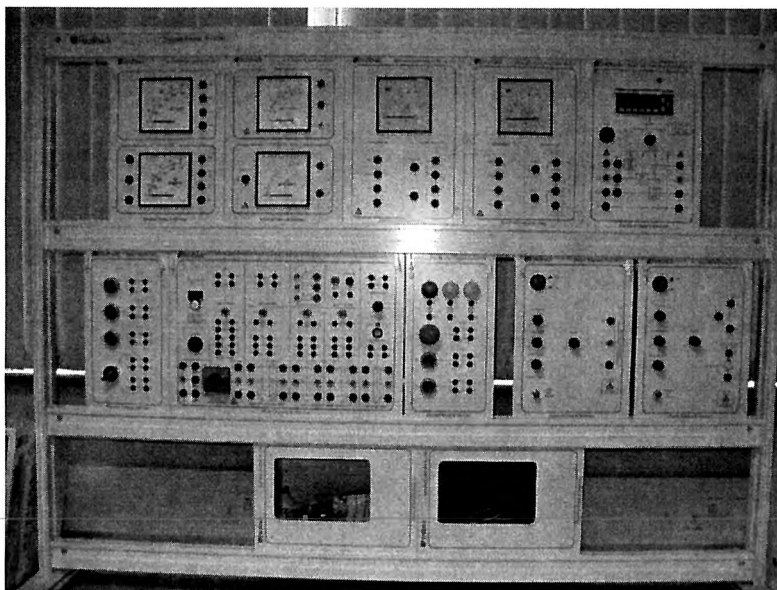


Рис. 1.1. Общий вид стенда

В табл. 1.1 дано перечисление блоков, входящих в комплектацию стенда электрических цепей и электрических машин, а также блоков со стандартными измерительными приборами и приборами с использованием компьютера.

Лабораторный стенд содержит:

1. Источник питания.
2. Трехфазная активная нагрузка.
3. Трехфазная индуктивная нагрузка.
4. Трехфазная емкостная нагрузка.
5. Машина постоянного тока.
6. Асинхронный трехфазный двигатель.
7. Синхронная машина.
8. Лампы для синхронизации.
9. Муфта.
10. Вольтметр и амперметр постоянного тока.
11. Вольтметр и амперметр переменного тока.
12. Ваттметр постоянного и переменного тока.
13. Цифровой мультиметр.
14. Динамометр.
15. Блок управления частотой вращения и тормозным моментом.
16. Набор проводов.
17. Блок защиты машины.
18. Мультиканальный блок входа/выхода.

Система исследований режимов работы электротехнического оборудования отличается от ранее использованного оборудования существенным повышением информационной составляющей (вывод информации на монитор с возможностью подключения активного экрана для детального изучения и анализа группой студентов, аспирантов, сотрудников).

Оборудование позволяет также проводить исследование переходных процессов с оперативным получением информации, что выгодно отличает эти электротехнические системы от ранее используемых на кафедре.

Данное оборудование введено в эксплуатацию с постепенным использованием в учебном процессе. Предполагается задействовать это оборудование для студентов электрических и неэлектрических направлений обучения. По заявкам институтов СПбГПУ количество студентов по дисциплине «Электротехника» для обучения на этом оборудовании достигает 2000 человек в год.

Т а б л и ц а 1.1

**Комплектация стенда электрических цепей и электрических машин со стандартными и основанными на использовании компьютера измерительными приборами**

№ п/п	Наименование	Наименование на англ.яз.	№ модели	Количество (шт) в стенде
1	Рама стенда	System frame	91 - 200	1
2	Источник питания	Power supply	60 - 105	1
3	Машина постоянного тока	Dc Compound Machine	63 - 120	1
4	Асинхронный трехфазный двигатель	Three Phase Squirrel Cage Motor	64 - 501	1
5	Синхронная машина	Three Phase Synchronous Machine	64 - 510	1
6	Трехфазная емкостная нагрузка	Three Phase Capacitive Load	67 - 212	1
7	Трехфазная индуктивная нагрузка	Three Phase Inductive Load	67 - 312	1



Продолжение табл. 1.1

8	Трехфазная активная нагрузка	Three Phase Resistive Load	67 - 142	1
9	Динамометр	Swinging Field Dynamometer	67 - 502	1
10	Цифровой мультиметр	Single & Three Phase Measurements	68 - 100	1
11	Вольтметр и амперметр постоянного тока	Dc Voltmeter & Ammeter	68 - 110	2
12	Вольтметр и амперметр переменного тока	Ac Voltmeter & Ammeter	68 - 117	2
13	Лампы для синхронизации	Synchronising Lamps	68 - 120	1
14	Ваттметр постоянного и переменного тока	Ac/dc Electronic Wattmeter	68 - 200	1
15	Блок управления частотой вращения и тормозным моментом	Torque/Speed control Panel	68 - 441 - 2	1
16	Мультиканальный блок входа/выхода	Multi-Channel I/O Unit	68 - 500 - 1 - USB	1
17	Муфта	Shaft Coupling & Key (12 mm to 12 mm)	68 - 703	1
18	Набор проводов	Lead set	68 - 800	1
19	Блок защиты машины	Machine Guards	91 - 270	1

### 1.1. Рама стенда

Отдельные блоки модульной системы по изучению одно- и трехфазных электрических цепей и электрических машин переменного и постоянного тока (источник питания, электрические нагрузки, виртуальные и обычные приборы) монтируются в специальные направляющие рамы стенда и фиксируются с помощью пластиковых упоров. Ниже на рис. 1.2 представлен чертеж рамы для монтажа отдельных блоков модульной системы.

Блоки могут быть расположены в удобном для пользователя порядке для конкретной лабораторной работы, поскольку они легко могут перемещаться в прорезях планок рамы стенда. Снятие экспериментальных данных в лабораторных работах возможно как с помощью виртуальных, так и обычных приборов. Пример расположения и размещения блоков для этих случаев представлен на рис. 1.3 и 1.4.

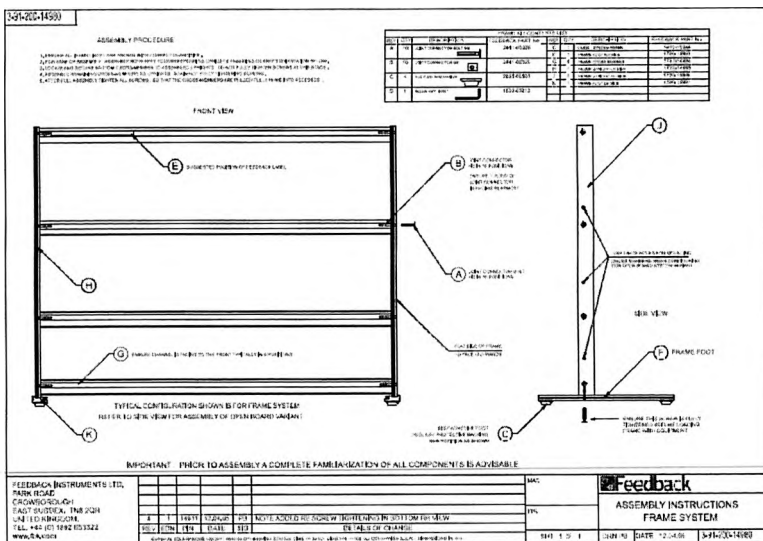


Рис. 1.2. Чертеж рамы

Torque & Speed  
Control Panel 68-441

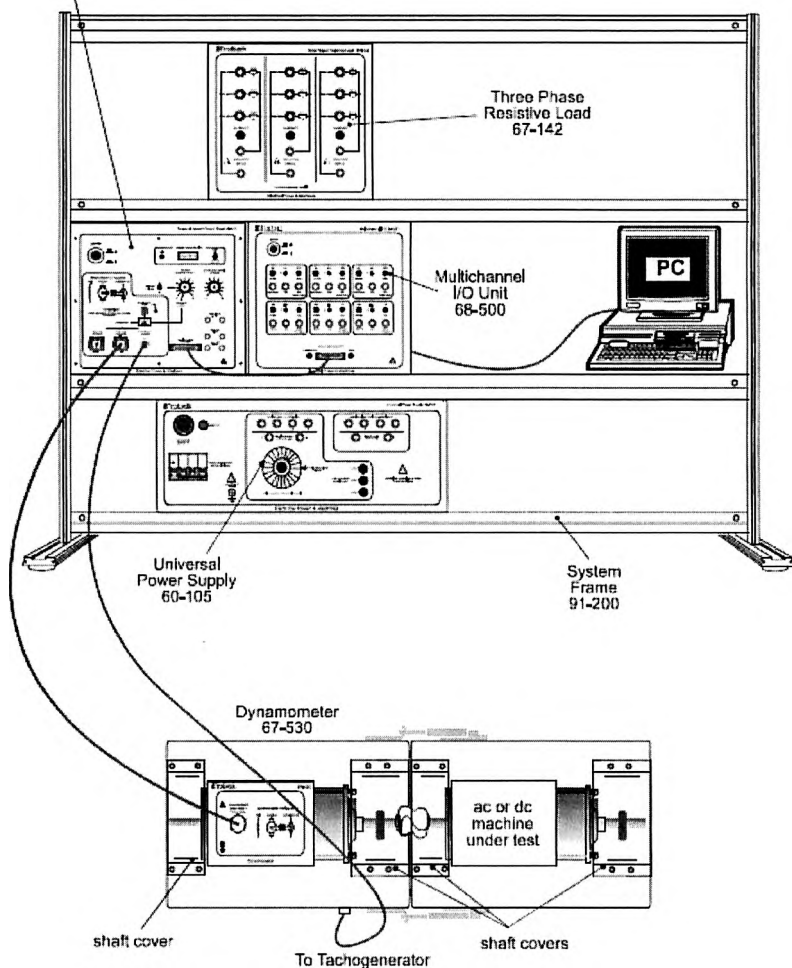


Рис. 1.3. Макет с виртуальными приборами

Torque & Speed  
Control Panel 68-441

2 x dc Voltmeter  
and Ammeter  
68-110

Three Phase  
Resistive Load  
67-142

Electronic single  
and three Phase  
measurement  
68-100

Universal  
Power Supply  
60-105

System  
Frame  
91-200

Dynamometer  
67-530

shaft cover

To Tachogenerator

shaft covers

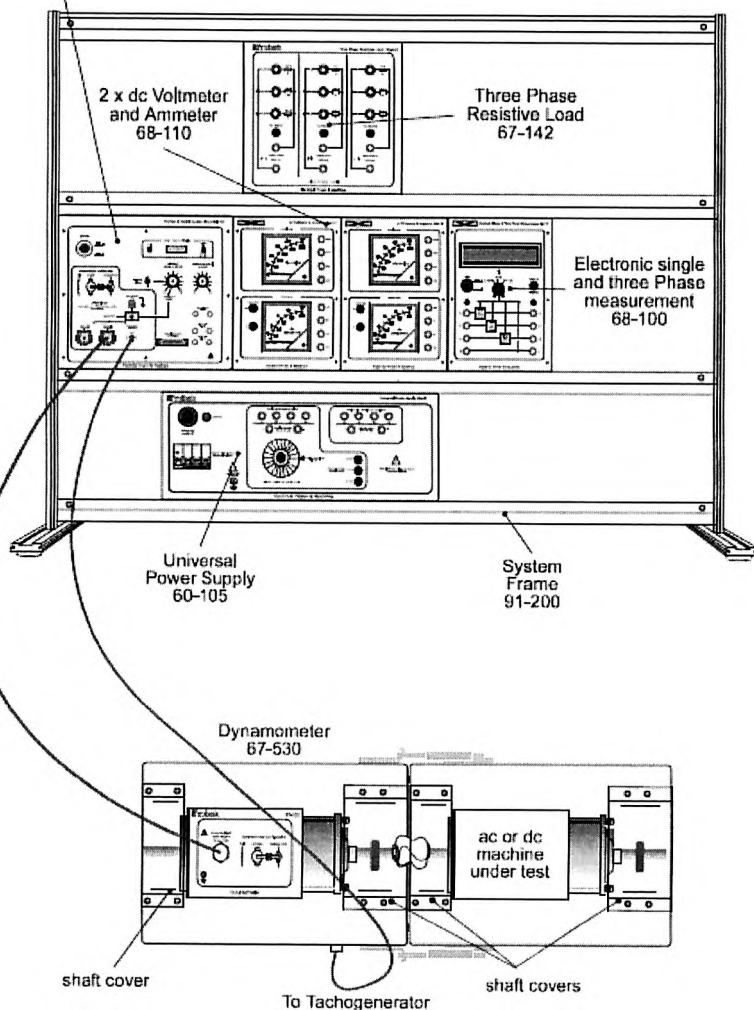


Рис. 1.4. Макет с обычными приборами

## 1.2. Универсальный источник питания

Универсальный источник питания рекомендуется подключать к 3-фазной электрической сети через устройство защиты оборудования УЗО. Источник питания поставляют в комплекте с 3-фазным автоматическим выключателем, предназначенным для обеспечения автоматического отключения в случае перегрузки или случайного прерывания его питания. Блок питания устанавливают между двумя узкими рельсами в нижней области рамы стенда.

В левом верхнем углу передней панели источника питания (рис. 1.5) расположена большая красная кнопка «Аварийное отключение» («Emergency power off»). Путем нажатия на эту кнопку оператор может в случае возникновения чрезвычайной ситуации отключить все блоки, размещенные на раме стенда. Если это произошло, то восстановление работоспособности блока питания осуществляют поворотом кнопки «Аварийное отключение» по часовой стрелке.

Источник питания включают путем нажатия на зеленую кнопку с индикацией включения, а питание на блоки стенда подают путем включения автоматического выключателя.

Источник питания имеет фиксированные выводы как трехфазной системы напряжения, так и постоянного напряжения. Эти выводы размещены на передней панели блока питания. Регулирование переменного и постоянного напряжения осуществляют с помощью вращения ручки регулятора на передней панели.

Средняя часть передней панели содержит.

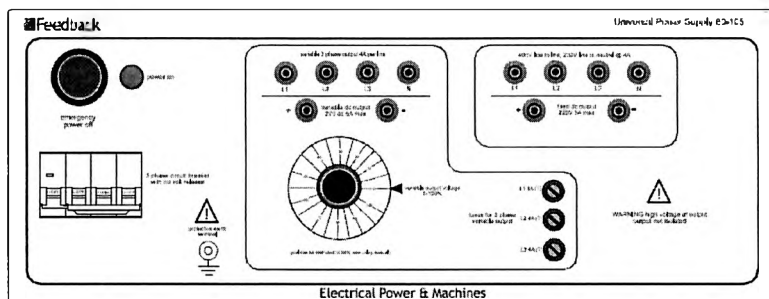
1. Выводы регулируемой трехфазной системы напряжения (линейное напряжение можно изменять от 0 до 400 В, фазное – от 0 до 230 В), допустимый ток – 4 А. Выводы обозначены: *L1* (красный), *L2* (желтый), *L3* (синий) и *N* (черный).

2. Выводы регулируемого постоянного напряжения (можно изменять от 0 до 270 В), допустимый ток – 5 А. Выводы обозначены: + (красный), – (черный).

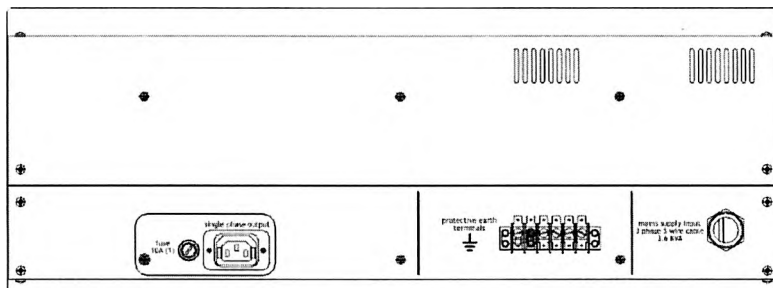
Правая часть передней панели содержит.

1. Выводы фиксированной (нерегулируемой) 3-фазной системы напряжения (линейное напряжение – 400 В, фазное – 230 В), допустимый ток – 4 А. Выводы обозначены: *L1* (красный), *L2* (желтый), *L3* (синий) и *N* (черный).

2. Выводы фиксированного постоянного напряжения – 230 В. Выводы обозначены: + (красный), – (черный).



(a) Front Panel



(b) Rear Panel

Рис. 1.5. Передняя и задняя части источника питания

### 1.3. Машина постоянного тока

Машина постоянного тока на стенде обозначена как блок 63 - 120, ее используют для 220-вольтовых систем постоянного тока.

Общий вид машины постоянного тока и ее верхняя часть с зажимами подключения представлены на рис. 1.6.

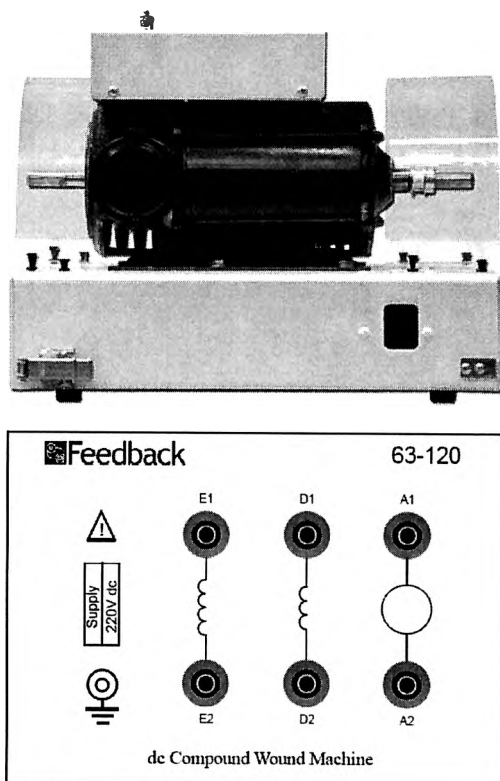


Рис. 1.6. Машина постоянного тока:

*A1 - A2* – обмотка якоря;

*E1 - E2* – параллельная обмотка возбуждения;

*D1 - D2* – последовательная обмотка возбуждения

Машина постоянного тока (двигатель – ДПТ и генератор – ГПТ) может быть использована в режимах схем параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Технические данные:

1. Номинальная мощность: 250 Вт (при непрерывной работе);
2. Номинальная частота вращения: 2000 оборотов в минуту;
3. Максимальная частота вращения: 6000 оборотов в минуту;
4. Требования к напряжению питания: 220 В постоянного тока.

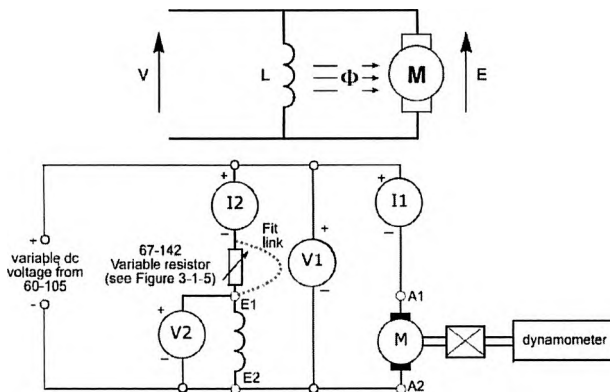


Рис. 1.7. Схема ДПТ параллельного возбуждения

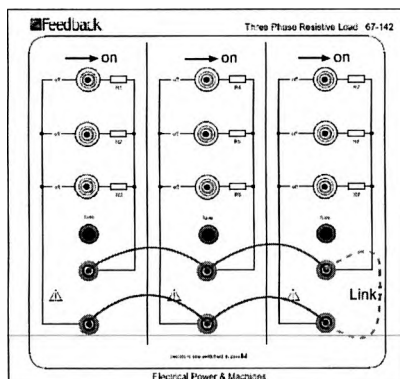


Рис. 1.8. Схема резисторов, включаемых последовательно с обмоткой возбуждения машин параллельного и смешанного возбуждения



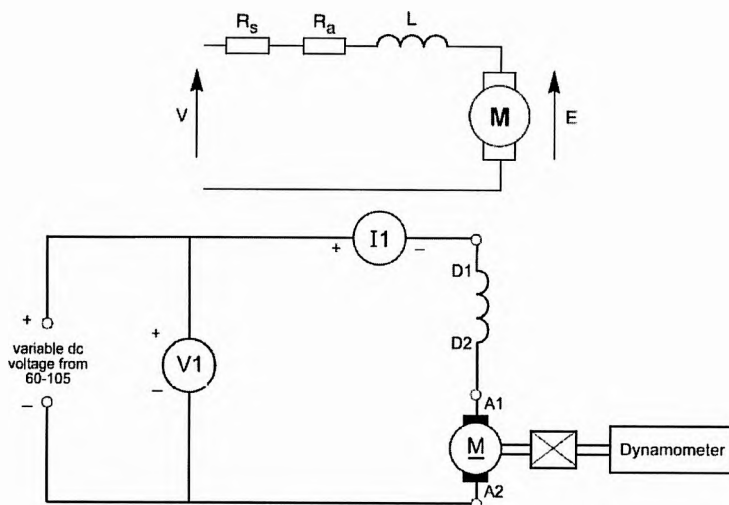


Рис. 1.9. Схема ДПТ последовательного возбуждения

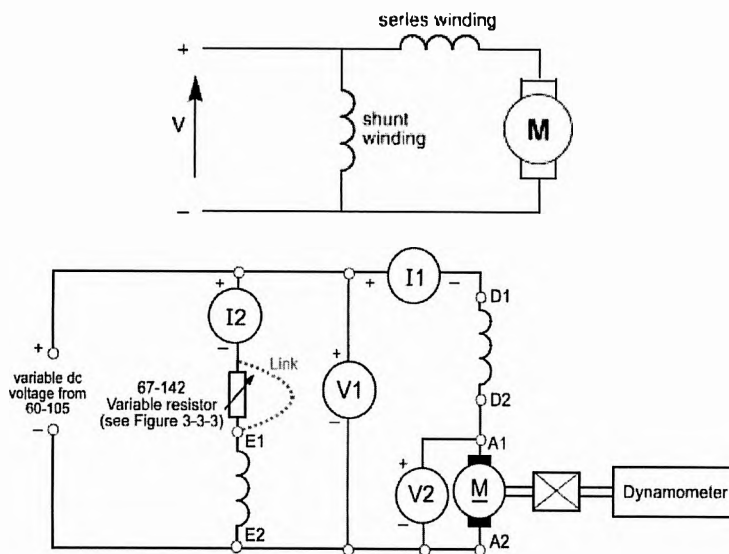


Рис. 1.10. Схема ДПТ смешанного возбуждения

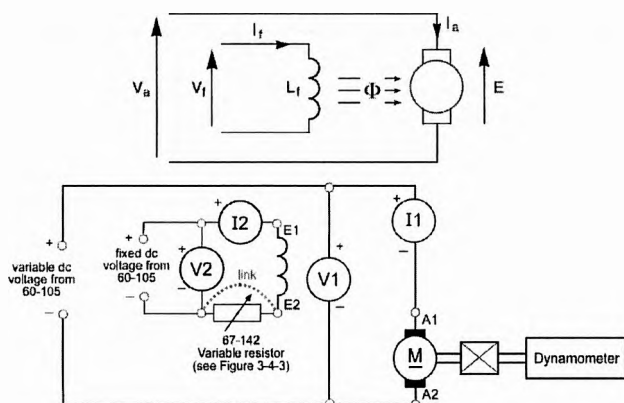


Рис. 1.11. Схема ДПТ независимого возбуждения

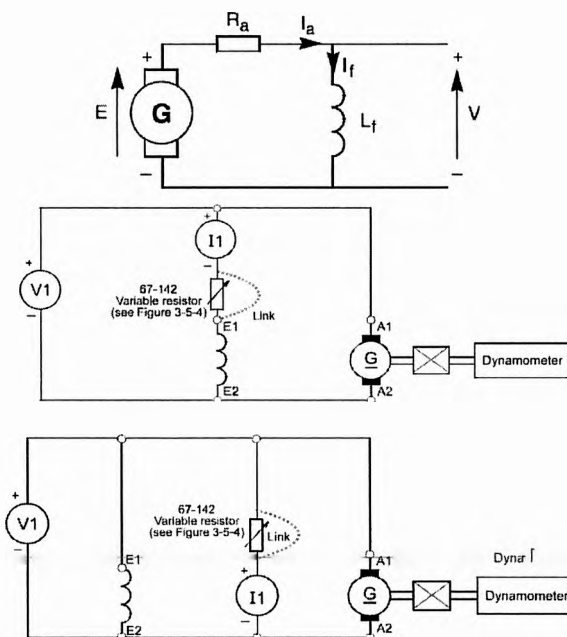


Рис. 1.12. Схема ГПТ параллельного возбуждения

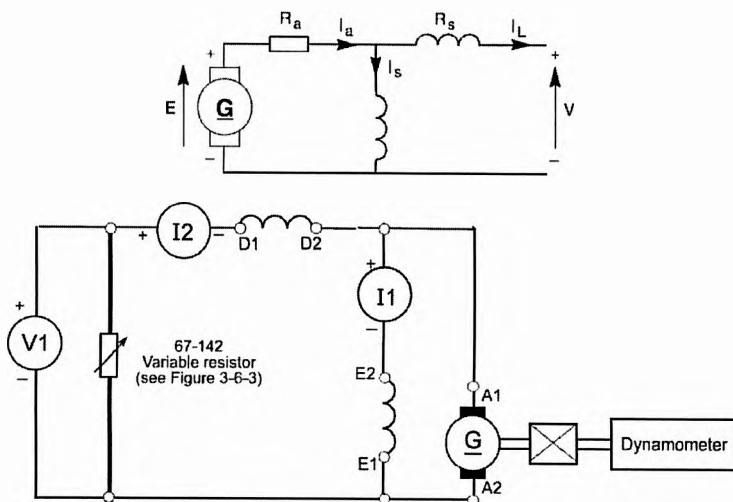


Рис. 1.13. Схема ГПТ смешанного возбуждения

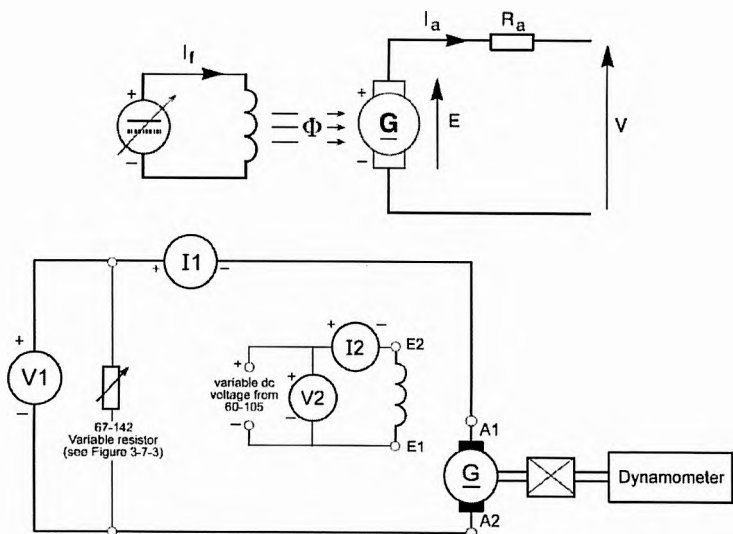


Рис. 1.14. Схема ГПТ независимого возбуждения

#### 1.4. Асинхронный трехфазный двигатель

Двигатель АД используют для 230-вольтовых систем переменного тока, блок АД на стенде обозначен 64 - 501.

Общий вид асинхронного трехфазного двигателя и его верхняя часть с клеммами подключения представлен на рис. 1.15.

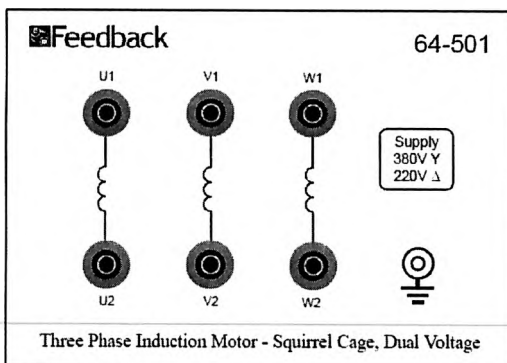
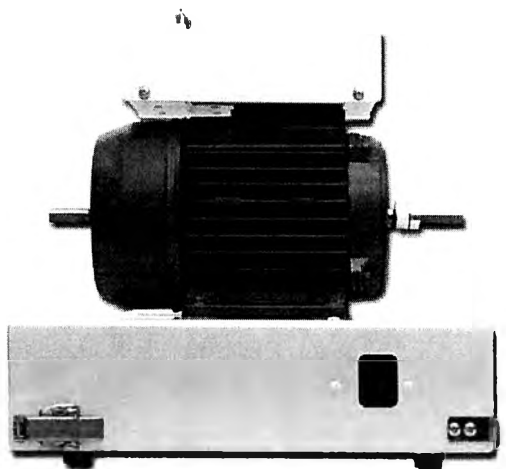


Рис. 1.15. Асинхронный трехфазный двигатель:  
 $U1-U2$  – фаза  $A$ ;  $V1-V2$  – фаза  $B$ ;  $W1-W2$  – фаза  $C$

Технические данные:

1. Номинальная мощность: 250 Вт (при непрерывной работе);
2. Номинальная частота вращения: 2980 оборотов в минуту (при 50 Гц);

3. Требования к электропитанию: 380 В при соединении фаз звездой, 220 В при соединении фаз треугольником.

Статор и ротор показаны на рис. 1.16.

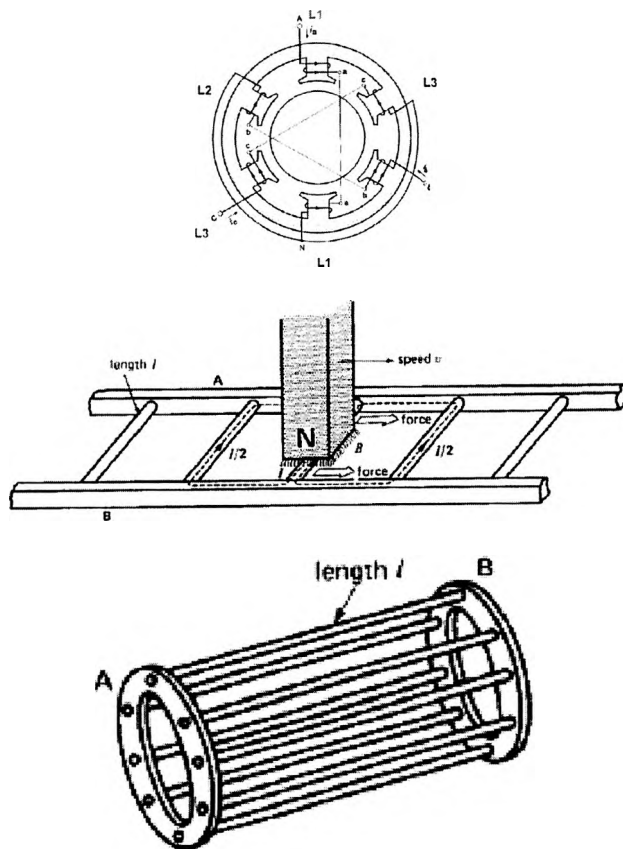


Рис. 1.16. Статор и ротор АД

Torque & Speed  
Control Panel 68-441

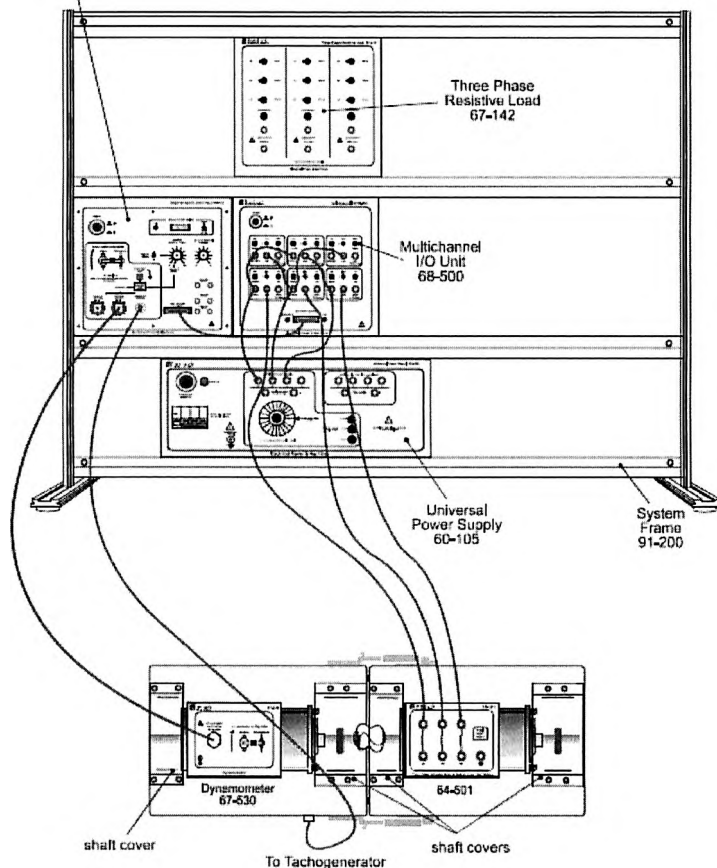


Рис. 1.17. Схема испытания АД с использованием виртуальных приборов

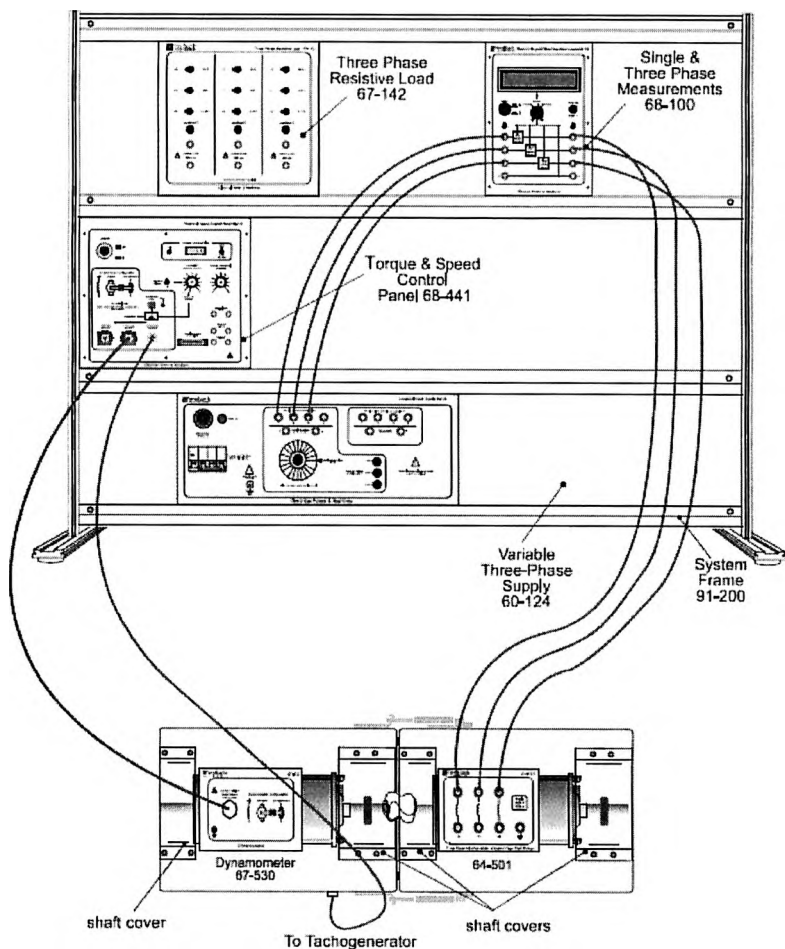


Рис. 1.18. Схема испытания АД с использованием обычных приборов

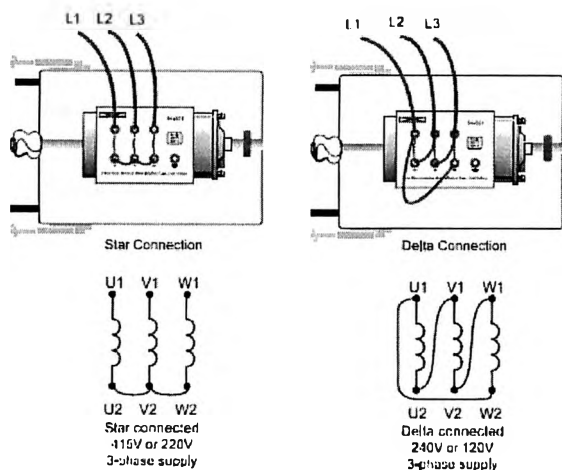


Рис. 1.19. Способы подключения фаз – звездой и треугольником

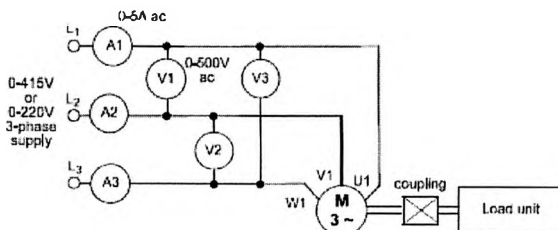


Рис. 1.20. Схема подключения приборов при использовании цифрового мультиметра 68 - 100

### 1.5. Синхронная машина (двигатель/генератор)

Синхронную машину СМ используют для 230-вольтных систем переменного тока (подключают к фазному напряжению 230 В), блок СМ на стенде обозначен 64 - 510.

Общий вид синхронной машины и ее верхняя часть с зажимами подключения представлены на рис. 1.21.



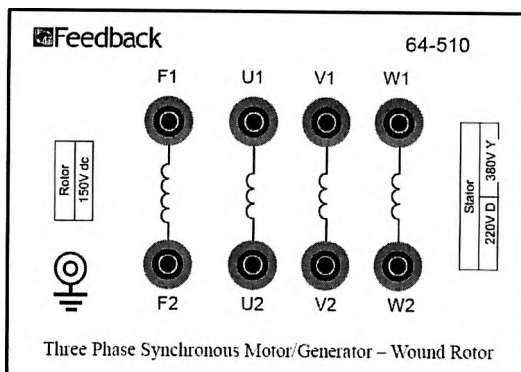
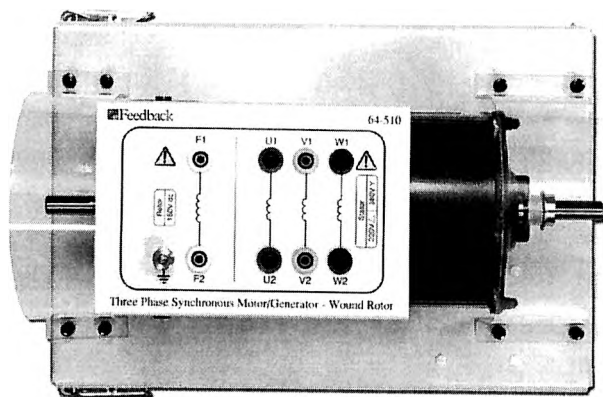


Рис. 1.21. Синхронная машина, вид сверху:

*F1-F2* – обмотка возбуждения (ротора);

*U1-U2* – фаза *A*;

*V1-V2* – фаза *B*;

*W1-W2* – фаза *C*

Технические данные СМ:

1. Может быть использована как двигатель или генератор.
2. Номинальная мощность при напряжении 415/240 В (звезда/треугольник) 300 Вт.

3. Синхронная частота вращения 3000 об/мин при частоте 50 Гц.
4. Требования к электропитанию: 380 В при соединении фаз звездой, 220 В при соединении фаз треугольником.
5. Номинальное напряжение обмотки ротора 150 В, источник постоянного тока.

Корпус СМ обязательно должен быть подключен к зажиму заземления на универсальном источнике питания 60 - 105, для этого используют желто-зеленый провод заземления, входящий в комплект поставки.

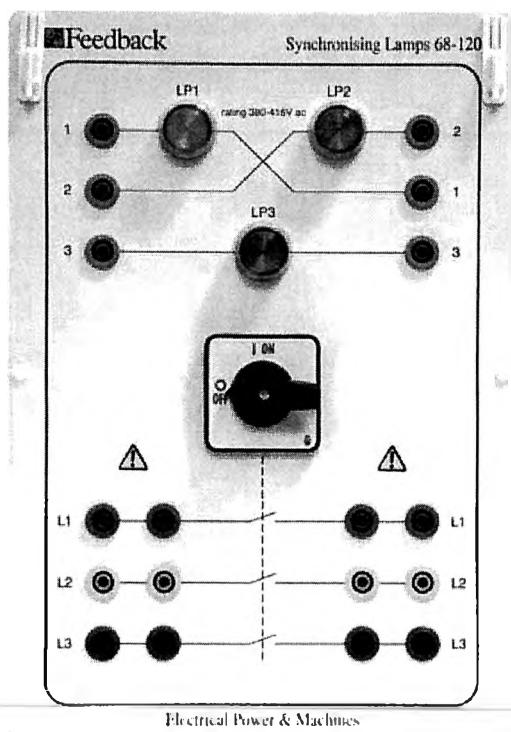


Рис. 1.22. Блок синхронизации с лампами и выключатель

### 1.6. Трехфазная активная нагрузка

Блок трехфазной активной нагрузки используют для 230 вольтовых систем переменного тока.

С помощью данного блока возможен выбор нагрузки для различных устройств (например, трансформатора). Блок трехфазной активной нагрузки состоит из трех групп нагрузочных резисторов, каждая группа содержит три параллельно соединенных резистора, которые с помощью выключателя могут быть включены или выключены из группы. Кроме того, каждая группа может быть соединена последовательно или параллельно одна с другой. Общий вид блока трехфазной активной нагрузки представлен на рис. 1.23.

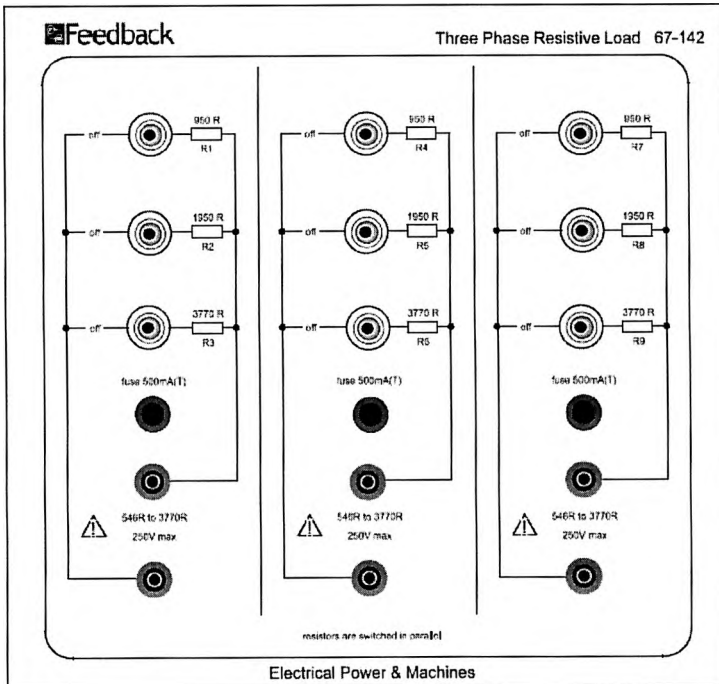


Рис. 1.23. Общий вид блока трехфазной активной нагрузки

Отдельные резисторы в каждой группе имеют значения сопротивления **950, 1950 и 3770 Ом**, что позволяет набрать сопротивление путем подключения и отключения резисторов в группе с помощью тумблеров (колонки 1, 2 и 3), как показано в колонке 4 (табл. 1.2).

Группы могут быть соединены параллельно, что позволяет набрать различные значения сопротивлений. Эти значения показаны в колонках 5 и 6 (табл. 1.2).

Максимальная нагрузка **100 Вт (0,5 А)** на каждую группу резисторов.

Рабочее напряжение блока активной нагрузки **250 В**.

Т а б л и ц а 1.2

**Возможные варианты сопротивлений блока трехфазной активной нагрузки**

1	2	3	4	5	6
Тумблер 1 (верхний)	Тумблер 2 (средний)	Тумблер 3 (нижний)	Сопротивление, Ом		
			Одна груп- па	Две группы, включенных параллельно	Три группы, включенных параллельно
<b>Вкл.</b>	<b>Вкл.</b>	<b>Вкл.</b>	546	274	182
<b>Вкл.</b>	<b>Вкл.</b>	<b>Выкл.</b>	640	320	213
<b>Вкл.</b>	<b>Выкл.</b>	<b>Вкл.</b>	759	380	253
<b>Вкл.</b>	<b>Выкл.</b>	<b>Выкл.</b>	950	475	317
<b>Выкл.</b>	<b>Вкл.</b>	<b>Вкл.</b>	1285	642	428
<b>Выкл.</b>	<b>Вкл.</b>	<b>Выкл.</b>	1950	975	650
<b>Выкл.</b>	<b>Выкл.</b>	<b>Вкл.</b>	3770	1885	1257

**1.7. Трехфазная индуктивная нагрузка**

Блок трехфазной индуктивной нагрузки используют для 230 вольтовых систем переменного тока.

С помощью данного блока возможен выбор реактивной нагрузки для трехфазных цепей или для трехфазных генераторов.

Блок состоит из трех групп индуктивной нагрузки, каждая группа содержит три параллельно соединенных индуктивных элементов со значениями индуктивности 3, 6 и 12 Гн, которые с помощью тумблера могут быть включены или выключены из группы. Кроме того, каждая группа может быть соединена последовательно или параллельно одна с другой для расширения диапазона значений индуктивности. Общий вид блока трехфазной индуктивной нагрузки представлен на рис. 1.24.

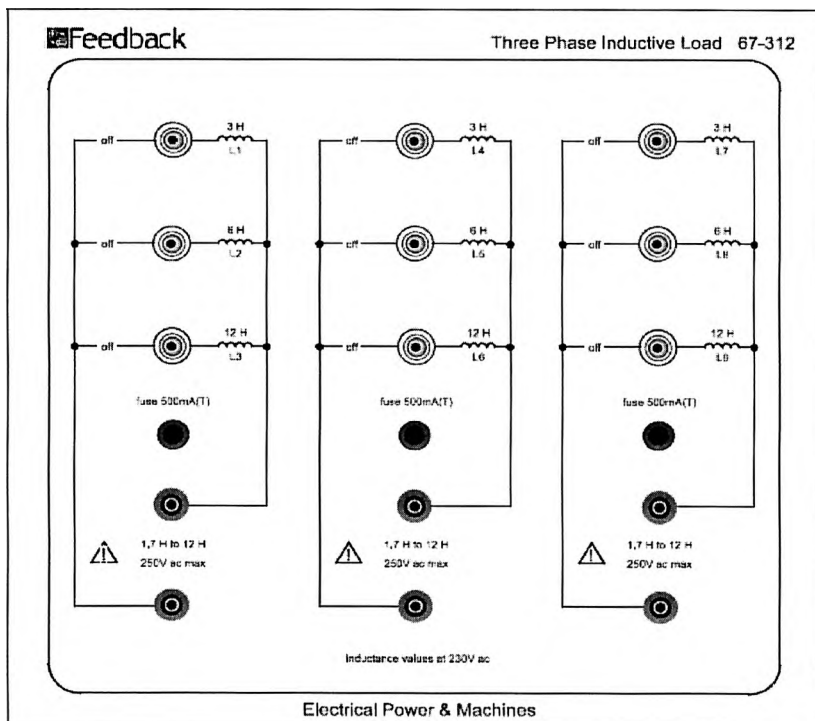


Рис. 1.24. Общий вид блока трехфазной индуктивной нагрузки

Если все выключатели находятся в выключенном положении на любой нагрузочной группе, то фаза цепи разомкнута. Индуктивные нагрузочные группы могут быть подключены звездой для 400-вольтовых трехфазных систем или треугольником для 230-вольтовых трехфазных систем.

Максимальная нагрузка 0,5 А на каждую группу индуктивной нагрузки.

Рабочее напряжение блока индуктивной нагрузки 250 В.

### **1.8. Трехфазная емкостная нагрузка**

Блок трехфазной емкостной нагрузки используют для 230 вольтовых систем переменного тока.

Блок трехфазной емкостной нагрузки состоит из трех групп. Каждая группа содержит три параллельно соединенных конденсатора со значениями емкости 1, 2 и 4 мкФ. Максимальное значение емкости каждой группы составляет 7 мкФ. Общий вид блока трехфазной емкостной нагрузки представлен на рис. 1.25.

Путем подключения данного блока возможен выбор реактивной нагрузки для трехфазных цепей, для трехфазных генераторов и для коррекции коэффициента мощности.

Кроме того, каждая группа может быть соединена последовательно или параллельно одна с другой для расширения диапазона значений емкости. Путем подключения и отключения параллельно соединенных конденсаторов в группе с помощью тумблеров можно набрать следующие значения емкости в группе: 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 мкФ.

Если все выключатели находятся в выключенном положении в любой нагрузочной группе, то фаза цепи разомкнута.

Максимальная нагрузка 0,8 А на каждую группу конденсаторов.

Рабочее напряжение блока емкостной нагрузки 250 В.

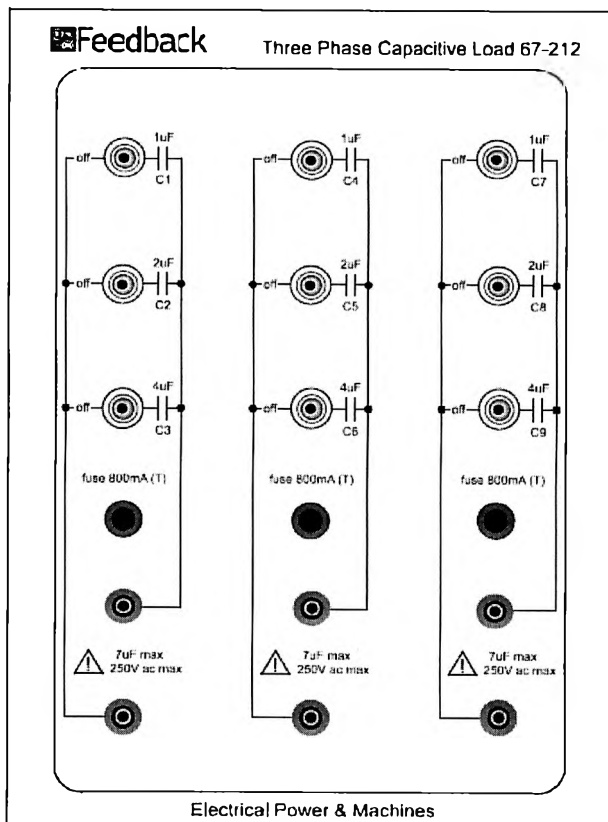


Рис. 1.25. Общий вид блока трехфазной емкостной нагрузки

### 1.9. Динамометр 67 – 530

Технические данные:

1. Номинальная мощность (при непрерывной работе) 250 Вт;
2. Максимальная частота вращения 5000 об/мин.;
3. Может работать в двух режимах: режим создания вращающего момента (как двигатель) и режим создания тормозного момента (как нагрузка).

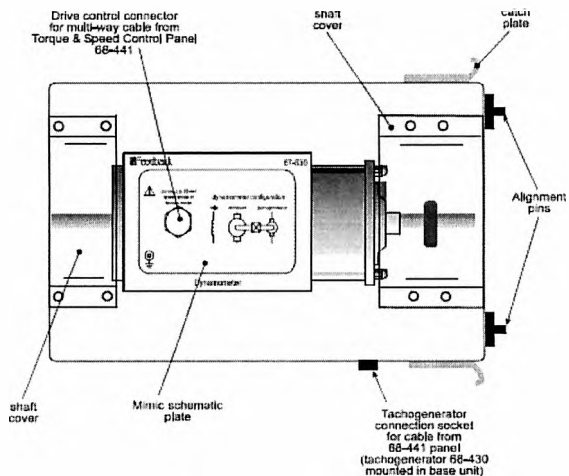


Рис. 1.26. Динамометр (сочетание машины постоянного тока и тахометра)

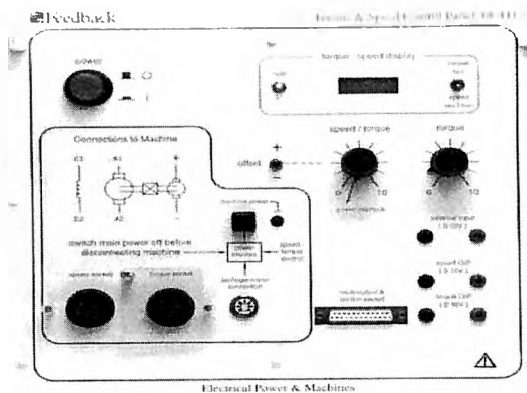


Рис. 1.27. Блок управления частотой вращения и тормозным моментом



## Работа 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ

#### 2. 1. Общие указания

Цель работы – умение использовать законы Ома и Кирхгофа при расчете электрической цепи переменного тока при последовательном соединении приемников с активным сопротивлением  $R$ , индуктивностью  $L$  и емкостью  $C$ , приобретение навыков сборки и исследования электрической цепи.

Работа состоит из двух частей: «Расчет электрической цепи» и «Экспериментальное исследование электрической цепи».

#### 2.2 Расчет электрической цепи

Расчетную часть работы студенты выполняют на основе задания (табл. 2.1), номер которого указывает преподаватель.

Т а б л и ц а 2.1

Расчетные задания

№ задания	$U$ , В	$R$ , Ом	$C$ , мкФ	№ задания	$U$ , В	$R$ , Ом	$C$ , мкФ
1	125	450	3	16	100	475	4
2	120	758	3	17	95	317	4
3	115	640	3	18	90	253	5
4	110	475	4	19	85	213	5
5	105	317	4	20	80	182	5
6	100	253	5	21	125	950	3

Продолжение табл. 2.1

7	95	213	5	22	120	758	3
8	90	182	5	23	115	640	3
9	85	475	4	24	110	640	3
10	80	182	5	25	105	475	4
11	125	950	3	26	100	475	4
12	120	950	3	27	95	317	4
13	115	758	3	28	90	253	5
14	110	640	3	29	85	213	5
15	105	640	4	30	80	182	5

### Указания по расчету

На основе исходных данных задания (см. табл. 2.1) необходимо рассчитать основные величины, указанные в табл. 2.2, в том числе и при резонансе напряжений, принимая изменение индуктивности  $L$  ступенями через 0,5 Гн в пределах от 0,5 до 3 Гн (или других – по указанию преподавателя). Расчетная схема приведена на рис. 2.1.

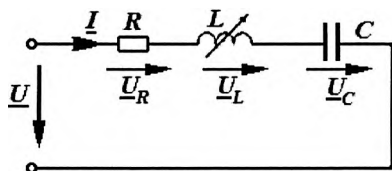


Рис. 2.1. Расчетная схема цепи

Величины, указанные в табл. 2.2, рассчитывают по формулам:

- индуктивное и емкостное сопротивления цепи

$$X_L = \omega L = 2\pi fL; X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC},$$

где  $\omega$  – угловая частота, которая при  $f = 50$  Гц равна  $2\pi 50 = 314$  рад/с. Сопротивления  $X_L$  и  $X_C$  получаются в омах (Ом), если индуктивность  $L$  принимается в генри (Гн), а емкость  $C$  – в фарадах (Ф);

- реактивное сопротивление цепи  $X = X_L - X_C$ , причем  $X > 0$ , если  $X_L > X_C$ ,  $X < 0$ , если  $X_L < X_C$  и  $X = 0$ , если  $X_L = X_C$ ;

- полное сопротивление цепи  $Z = \sqrt{X^2 + R^2}$ ;

- действующее значение тока в цепи  $I = U/Z$ ;

- действующие значения напряжений на приемниках с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями соответственно равны:

$$U_R = RI; U_L = X_L I; U_C = X_C I;$$

- сдвиг фаз между напряжением  $U$  и током  $I$ :

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{\pm X}{R};$$

- коэффициент мощности  $\cos \varphi = R/Z$ ;

- активная, реактивная и полная мощности соответственно равны:

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R; Q = UI \sin \varphi = I^2 X; S = UI = I^2 Z.$$

Резонанс напряжений в цепи имеет место при равенстве сопротивлений  $X_L = X_C$ , откуда определяют резонансную индуктивность, т.е.  $L_{\text{рез}} = X_C / 314$ , вычисляют все требуемые величины и записывают их в строку 4 табл. 2.2, а затем вычисляют и записывают в табл. 2.2 все указанные в ней величины – в строках 1 – 3 при трех значениях индуктивности меньших  $L_{\text{рез}}$ , а в строках 5 – 7 – при индуктивностях больших  $L_{\text{рез}}$ .

При резонансе напряжений  $X_L = X_C$  и, соответственно,

$$X = X_L - X_C = 0, Z = R, U_L = U_C, \text{ угол } \varphi = 0, \text{ а } \cos \varphi = 1.$$

При постоянных значениях напряжения  $U$  и сопротивления  $R$  ток  $I$  и активная мощность  $P$  имеют наибольшие значения:  $I_{\text{рез}} = U/R$ ;

$$P_{\text{рез}} = I_{\text{рез}}^2 R.$$

По расчетным данным строят зависимости тока  $I$ , напряжений  $U_L$ ,  $U_C$  и полного сопротивления  $Z$  от индуктивности  $L$ , как показано на рис. 2.2.

Т а б л и ц а 2.2

### Результаты расчета цепи

№ п/п	Исходные данные: $U = \dots$ В; $R = \dots$ Ом; $C = \dots$ мкФ; $f = 50$ Гц														
	$L$	$X_L$	$X_C$	$X$	$Z$	$I$	$U_R$	$U_L$	$U_C$	$\cos \varphi(PF)$	$\varphi$	$P$	$Q$	$S$	
	Гн	Ом				А	В				град	Вт	В·Ар	В·А	
1	$<L_{рез}$														
2	$<L_{рез}$														
3	$<L_{рез}$														
4	$L_{рез}$														
5	$>L_{рез}$														
6	$>L_{рез}$														
7	$>L_{рез}$														

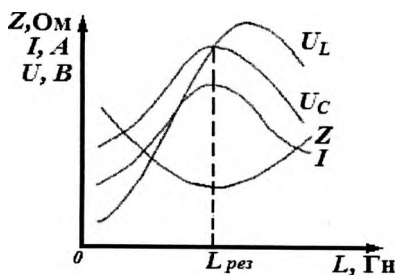


Рис. 2.2. Расчетные зависимости тока  $I$ , напряжений  $U_L$  и  $U_C$ , полного сопротивления  $Z$  от индуктивности  $L$

### 2.3. Схема исследуемой цепи

Схема исследуемой цепи приведена на рис. 2.3.

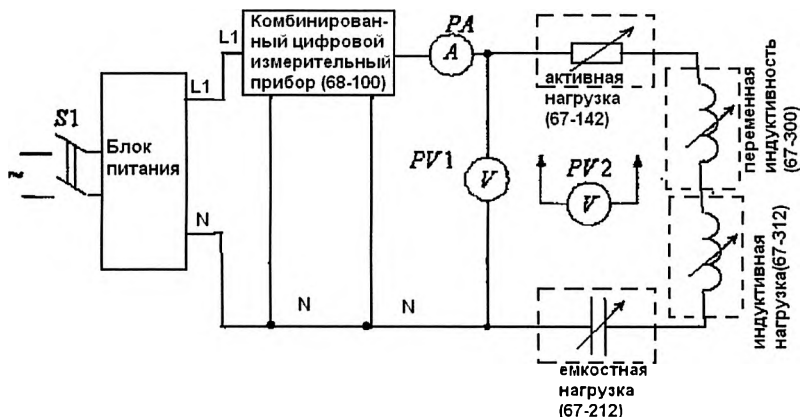


Рис. 2.3. Схема исследуемой цепи

Исследование цепи осуществляют на лабораторном стенде, разработанном и изготовленном английской фирмой Feedback с учетом рекомендаций кафедры электротехники и электроэнергетики СПбГПУ.

Используемое оборудование.

1. Источник питания (блок 60 - 105).
2. Комплект измерительных приборов (блок 68 - 100).
3. Блок активной нагрузки (блок 67 - 142).
4. Блок индуктивной нагрузки (блок 67 - 312).
5. Катушка с переменной индуктивностью (блок 67 - 300).
6. Блок емкостной нагрузки (блок 67 - 212).
7. Вольтметр и амперметр переменного тока (блок 68 - 117).
8. Мультиметр.
9. Комплект проводов.

Как видно из схемы, приведенной на рис. 2.3, исследуемую цепь подключают к фазе источника питания (блок 60 - 105, гнезда L1 и N) переменного тока, с помощью которого можно изменять подводимое к цепи напряжение и поддерживать его на заданном уровне. Для

измерения этого напряжения в цепь включен вольтметр  $PV1$ . На блоке источника напряжения имеется автоматический выключатель и аппараты защиты от аварийных режимов.

Комбинированный цифровой измерительный прибор (КЦИП, блок 68 - 100) позволяет производить измерение активной  $P$ , реактивной  $Q$  и полной  $S$  мощностей, коэффициента мощности  $PF$ , напряжения  $U$ , тока  $I$  и ряда других параметров исследуемой цепи. Выбор режима измерения осуществляют нажатием соответствующих кнопок, расположенных под индикаторным дисплеем.

Для измерения напряжений на активной, индуктивной и емкостной нагрузках служит цифровой мультиметр  $PV2$ .

Активный приемник (или активная нагрузка) представлена тремя группами резисторов, по три параллельно включаемых резистора в каждой группе (рис. 2.4). Аналогичными группами представлены индуктивные и емкостные приемники (рис. 2.4). Кроме того, в состав индуктивной нагрузки входит и блок переменной индуктивности (блок 67 - 300), который следует подключать последовательно с блоком фиксированных индуктивностей (блок 67 - 312).

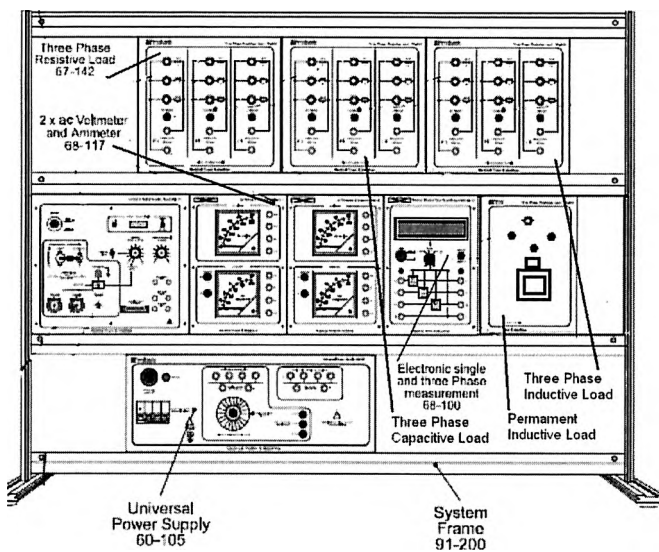


Рис. 2.4. Пример расположения элементов стенда для проведения лабораторной работы

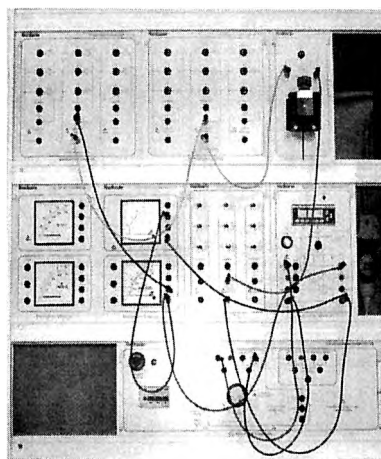


Рис. 2.5. Вариант монтажной схемы соединения элементов электрической цепи

## 2.4. Экспериментальная часть работы

Для экспериментальной проверки бригада студентов выбирает одно расчетное задание. Электрическую цепь собирают в соответствии со схемой (см. рис. 2.3). До включения цепи в сеть устанавливают заданное значение сопротивления  $R$  и заданную емкость  $C$ . При этом заданное значение сопротивления  $R$  получают в результате комбинации параллельно включенных резисторов в блоке активных сопротивлений в соответствии с табл. 2.3.

Т а б л и ц а 2.3

### Значения общих сопротивлений при различных комбинациях параллельно включенных резисторов

№ п/п	$R$ , Ом	Включенные резисторы	№ п/п	$R$ , Ом	Включенные резисторы
1	950	$R_1$	5	317	$R_1, R_4, R_7$
2	758	$R_1, R_3$	6	253	$R_1, R_4, R_7, R_3, R_6, R_8$
3	640	$R_2, R_5, R_8$	7	213	все, кроме $R_3, R_6, R_8$
4	475	$R_1, R_2$	8	182	все

Индуктивный приемник кроме индуктивного сопротивления  $X_K$  обладает еще и активным сопротивлением  $R_K$ , которое обусловлено сопротивлением провода катушки и потерями энергии в стальном сердечнике (от гистерезиса и вихревых токов). Поэтому общее активное сопротивление равно  $R = R_R + R_K$ .

После этого устанавливают такую индуктивность  $L$  приемника, которая является ближайшей меньшей по отношению к расчетной резонансной индуктивности  $L_{рс}$ . Для выбора этой индуктивности можно воспользоваться данными табл. 2.4.



**Значения результирующей индуктивности при различных схемах  
включения элементов постоянной индуктивной нагрузки  
( $L1...L9$ )**

№ п/п	$L$ , Гн	Схема включения *	№ п/п	$L$ , Гн	Схема включения *
1	0,61	$L1...L9$ паралл.	7	3,5	$L1, L2 + L4, L5$
2	1,00	$L1, L2, L4, L5$	8	4,0	$L2, L3$
3	1,50	$L1, L4$	9	4,5	$L1 + L4, L7$
4	2,00	$L1, L2$	10	5,0	$L1, L2 + L4$
5	2,40	$L1, L3$	11	5,40	$L1, L3 + L4$
6	3,00	$L1$	12	6,00	$L2$

(\*) Запятая соответствует параллельному включению, знак «+» – последовательному включению элементов

Убедившись в том, что в момент включения стэнда ручка регулирования выходного напряжения находится в положении «0», включают блок питания с помощью автоматического выключателя и устанавливают заданное напряжение, которое в дальнейшем поддерживают постоянным, контролируя его по вольтметру  $PVI$  или с помощью КЦИП в режиме измерения напряжения. Нажатием кнопки включают комбинированный цифровой измерительный прибор (КЦИП – блок 68 - 100), выбирают режим измерения  $PF$ , т.е. режим коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ). При активно-емкостном характере нагрузки  $\cos\varphi$  индицируется со знаком «-», при активно-индуктивной нагрузке знак «+» не индицируется. Точное значение  $L_{\text{рез}}$  устанавливают, изменяя положение сердечника в катушке переменной индуктивности (блок 67 - 300). При этом наблюдают за показаниями фазометра  $PF$ . При резонансе напряжений напряжение на зажимах исследуемой цепи и ток в цепи совпадают по фазе,  $\cos\varphi = 1$ . Поэтому, изменяя переменную индуктивность, добиваются

режима, при котором  $\cos\varphi = 1$ ,  $L = L_{\text{рс}}$ . В этом положении сердечник фиксируют в катушке.

В табл. 2.5 в строке 4 (для случая резонанса) записывают измеренные значения тока  $I$ , мощностей  $P$ ,  $Q$  и  $S$ , коэффициента мощности  $PF$  ( $\cos\varphi$ ), а также измеренные мультиметром  $PV2$  напряжения  $U_R$  на реостате,  $U_K$  на катушке и  $U_C$  на конденсаторе.

Так как индуктивная катушка обладает и активным сопротивлением  $R_K$ , то при резонансе напряжений напряжение  $U_K$  на катушке будет на несколько вольт (2...3 В) больше напряжения  $U_C$  на конденсаторе. Соответственно, напряжение  $U_R = RI$  на реостате будет меньше расчетного значения, так как активное сопротивление реостата  $R_R$  меньше активного сопротивления  $R$  исследуемой цепи ( $R = R_R + R_K$ ). При этом желательно по показаниям приборов определить коэффициент мощности  $\cos\varphi = P/UI$  и сравнить его значение с показаниями фазометра.

После измерений при резонансе напряжений необходимо провести еще не менее двух-трех измерений при меньших значениях индуктивности и столько же при больших значениях. Для достижения  $L_{\text{min}}$  изменяют число включенных секций блока индуктивной нагрузки и/или изменяют положение сердечника катушки (выдвигают) в блоке переменной индуктивности таким образом, чтобы коэффициент мощности  $PF$  уменьшился до значения  $-0,5...-0,7$ , и проводят все необходимые измерения. После этого производят измерения при 2...3 промежуточных значениях индуктивности.

Аналогичным образом производят измерения и при больших, чем при резонансе, значениях индуктивности (при аналогичных положительных значениях  $PF$ ).

Данные всех измерений записывают в табл. 2.5.

Следует иметь в виду, что при изменении индуктивной нагрузки будет изменяться и ее активное сопротивление  $R_K$  вследствие изменения магнитных потерь в сердечниках и изменения числа подключенных секций. Поэтому указанное в задании (табл. 2.1)

значение активного сопротивления цепи  $R_R$  может существенно отличаться от значений активного сопротивления цепи  $R$ , полученных в результате обработки результатов эксперимента.

Т а б л и ц а 2.5

Результаты измерений и вычислений

№п/п	Исходные данные: $U = \dots \text{В}; R = \dots \text{Ом}; C = \dots \text{мкФ}; f = 50 \text{Гц}$																	
	Результаты измерений									Результаты вычислений								
	$I$	$P$	$U_R$	$U_K$	$U_C$	$\cos\varphi$	$Q$	$S$	$Z$	$R$	$R_R$	$R_K$	$X$	$X_C$	$Z_K$	$X_K$	$L$	$\cos\varphi$
	А	Вт	В			-	В·А	В·Ар	Ом							Гн	-	В·А
1																		
2																		
3																		
4	Р	Е	З	О	Н	А	Н	С										
5																		
6																		
7																		

### 2.5. Обработка результатов измерений

На основе опытных данных необходимо вычислить и записать в табл. 2.5 все указанные в ней величины. Расчетные формулы:

- полное сопротивление всей цепи и катушки, соответственно

$$Z = U/I; Z_K = U_K/I;$$

- активное сопротивление всей цепи, реостата и катушки,  
соответственно

$$R = P/I^2, R_R = U_R/I, R_K = R - R_R;$$

- реактивное сопротивление всей цепи  $X = \pm \sqrt{Z^2 - R^2}$ , причем перед корнем следует принимать знак «плюс», если в цепи преобладает индуктивное сопротивление (когда  $U_L > U_C$ ), и знак «минус», если преобладает емкостное (когда  $U_C > U_L$ );

- емкостное сопротивление цепи  $X_C = U_C/I$ ;

- индуктивное сопротивление катушки  $X_K = X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$ ;

- индуктивность катушки  $L_K = X_K / \omega = X_K / 314$ ;

- коэффициент мощности цепи  $\cos\varphi = P/UI$ ;

- реактивная и полная мощности цепи соответственно

$$Q = UI \sin \varphi; S = UI.$$

По данным табл. 2.5 строят зависимости тока  $I$ , напряжений  $U_K$  и  $U_C$  и полного сопротивления  $Z$  от индуктивности  $L$  (аналогично рис. 2.2). Кроме того, по опытным данным строят три векторные диаграммы напряжений для случаев  $L_{pз}$ ,  $L_{max}$  и  $L_{min}$ .

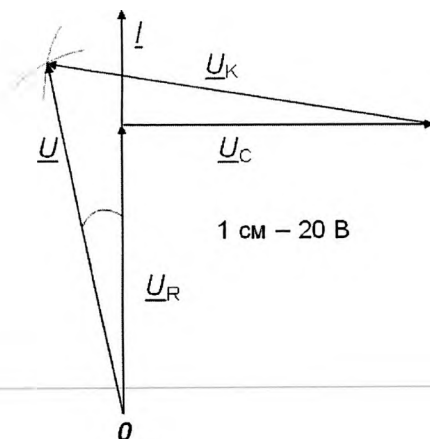


Рис. 2.6. Векторная диаграмма напряжений для  $L = \dots$  Гн

При построении векторных диаграмм напряжений следует помнить, что вектор  $\underline{U}$ , изображающий напряжение на входных зажимах исследуемой цепи, согласно второму закону Кирхгофа, равен сумме векторов, изображающих напряжения на активных, индуктивных и емкостных элементах, т. е.  $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C + \underline{U}_K$ , причем модули этих векторов равны действующим значениям соответствующих напряжений.

На рис. 2.6 приведена векторная диаграмма напряжений, которую строят по опытным данным на основании второго закона Кирхгофа. Чтобы приступить к построению векторной диаграммы, необходимо выбрать масштабы тока  $m_I$  и напряжения  $m_U$  (например,  $m_U = 20$  В/см, т. е. напряжению 20 В соответствует вектор длиной 1 см) и определить длины векторов тока  $\underline{I}$  и напряжений  $\underline{U}_R, \underline{U}_K$  и  $\underline{U}_C$ . При последовательном соединении элементов за начальный вектор принимают вектор тока  $\underline{I}$ , который на рис. 2.6 направлен вертикально вверх. Из точки 0 в масштабе напряжения откладывают вектор напряжения  $\underline{U}_R$  на активном элементе, совпадающий по фазе с вектором тока  $\underline{I}$ . Из конца вектора  $\underline{U}_R$  под углом  $\pi/2$  в сторону отставания по фазе в том же масштабе проводят вектор  $\underline{U}_C$  (угол  $\pi/2$  принимают потому, что конденсатор, практически, обладает только емкостным сопротивлением). Из конца вектора  $\underline{U}_C$  проводят дугу радиусом равным напряжению  $\underline{U}_K$  на индуктивном элементе, а из точки 0 проводят дугу радиусом равным напряжению  $\underline{U}$  на зажимах всей цепи. Точка пересечения этих дуг соответствует концам векторов напряжений  $\underline{U}_K$  и  $\underline{U}$ . Для однозначного определения точки пересечения проводимых дуг следует руководствоваться тем, что активная составляющая напряжения  $\underline{U}_K$  совпадает по фазе с током  $\underline{I}$ .

## 2.6. Программа работы

### *Расчет электрической цепи*

1. На основе исходных данных задания рассчитайте все величины, указанные в табл. 2.2, и запишите в нее результаты.

2. По данным табл. 2.2 постройте зависимости тока  $I$ , напряжений  $U_L$ ,  $U_C$  и полного сопротивления  $Z$  от индуктивности  $L$  (см. рис. 2.2).

### *Экспериментальная часть работы*

3. Соберите цепь, схема которой показана на рис. 2.3.

4. Установите в цепи резонанс напряжений при заданных значениях емкости  $C$  и сопротивления  $R_R$ .

5. При резонансе напряжений измерьте и запишите в табл. 2.5 все указанные в ней величины.

6. Проведите не менее шести аналогичных измерений в цепи при различных значениях индуктивной нагрузки; результаты запишите в табл. 2.5.

7. По опытным данным рассчитайте и запишите в табл. 2.5 значения всех указанных в ней величин.

8. По данным табл. 2.5 постройте те же зависимости (см. рис. 2.2). Сравните расчетные и опытные данные проверяемого задания.

9. По опытным данным постройте три векторные диаграммы напряжений для случаев: резонанса напряжений, максимальной и минимальной индуктивности.

10. Запишите технические данные приборов, использованных при проведении работы.

11. Проведите анализ полученных результатов, в котором оцените расхождения между расчетными значениями напряжений на индуктивной катушке и конденсаторе при резонансе напряжений и значениями, полученными при экспериментальном исследовании цепи, объясните причину этих расхождений; оцените по опытным

данным активную и реактивную составляющие напряжения на индуктивной катушке и ее коэффициент мощности; оцените расхождения между расчетными и измеренными в опыте значениями напряжений на реостате, объясните причину этих расхождений, сравните значения коэффициента мощности, полученные по показаниям ваттметра, вольтметра и амперметра, с показаниями комбинированного цифрового измерительного прибора.

## 2.7. Контрольные вопросы

1. Назовите условие резонанса напряжений.
2. Как определить по показаниям измерительных приборов, что в цепи имеет место резонанс напряжений?
3. Как установить заданные параметры цепи  $C$  и  $R$ ?
4. Как поддерживать напряжение на зажимах исследуемой цепи неизменным?
5. Как установить резонансную индуктивность  $L_{\text{рез}}$ ?
6. Почему расчетное значение активного сопротивления цепи устанавливают при резонансе напряжений?
7. Покажите точки в цепи, к которым следует присоединять вольтметр для измерения напряжений  $U$ ;  $U_R$ ;  $U_K$ ;  $U_C$ ?
8. Что покажет вольтметр при измерении суммарного напряжения на катушке и конденсаторе при резонансе?

## Р а б о т а 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ

#### 3.1. Общие указания

Цель работы – умение использовать законы Ома и Кирхгофа при расчете электрической цепи при параллельном соединении приемников с активным сопротивлением  $R$ , индуктивностью  $L$  и емкостью  $C$ ; приобретение практических навыков сборки и исследования электрических цепей.

Работа состоит из двух частей: «Расчетное и экспериментальное исследование цепи при изменении емкости параллельной ветви» и «Расчетное и экспериментальное исследование цепи при компенсации реактивной мощности». Расчетная часть работы предшествует экспериментальной и выполняется согласно заданию, номер которого указывает преподаватель (табл. 3.1).

#### 3.2. Расчетное и экспериментальное исследование цепи при изменении емкости параллельной ветви

##### *Указания по расчету. Задача 1*

Расчётная схема цепи приведена на рис. 3.1. Исходные данные – напряжение  $U$ , активное сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$  и частота  $f$  (см. табл. 3.1). Необходимо рассчитать величины, приведенные в табл. 3.2, при различных значениях емкости  $C$  конденсатора. При этом расчеты рекомендуется проводить в следующем порядке. Сначала находят резонансную емкость  $C_{\text{рез}}$  из условия равенства реактивных проводимостей ( $1/\omega L = \omega C$ )

$$C_{\text{рез}} = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \approx \frac{1}{314^2 L},$$



где  $L$  – в генри, а  $C_{рез}$  – в фарадах. Полученное значение записывают в строку №4 табл. 3.2.

В общем случае изменение емкости на данном стенде возможно в пределах от 1 до 21 мкФ с шагом 1 мкФ, используя различное число включенных параллельно конденсаторов. При проведении расчетов необходимо взять три значения емкости  $C < C_{рез}$  и три значения емкости  $C > C_{рез}$ . Желательный шаг между емкостями 1,2 или 3 мкФ.

При расчете цепей с параллельным соединением удобнее оперировать не сопротивлениями приемников, а их проводимостями. Для простой цепи (см. рис. 3.1) с параллельным соединением резистора, индуктивного и емкостного элементов, обладающих сопротивлениями  $R$ ,  $X_L$  и  $X_C$  соответственно, их проводимости определяют по соотношениям: активная  $G = 1/R$ , индуктивная  $B_L = 1/X_L = 1/\omega L$  и емкостная  $B_C = 1/X_C = \omega C$ . При этом, чтобы проводимость выражалась в сименсах (См), индуктивность должна быть выражена в генри (Гн), а емкость в фарадах (Ф); угловая частота  $\omega$  при  $f = 50$  Гц равна 314 рад/с. В задаче 1 проводимости  $G$  и  $B_L$  остаются постоянными, а при изменении емкости будет изменяться проводимость  $B_C$ .

Т а б л и ц а 3.1

**Расчетные задания при  $U = 100$  В,  $f = 50$  Гц**

№ задания	Задача 1		Задача 2		
	$R$ , Ом	$L$ , Гн	$P$ , Вт	$\cos \varphi_1$ (PF1)	$\cos \varphi_2$ (PF2)
1	213	3,38	20	0,60	0,932
2	253	2,54	24	0,65	0,933
3	274	2,03	28	0,70	0,909
4	320	1,69	30	0,75	0,943
5	380	1,45	32	0,60	0,803
6	428	1,27	32	0,65	0,865

Продолжение табл. 3.1

7	475	1,13	30	0,70	0,895
8	546	1,015	28	0,75	0,952
9	640	0,845	24	0,60	0,878
10	650	0,845	20	0,65	0,933
11	213	1,015	20	0,70	0,973
12	253	1,13	24	0,75	0,941
13	274	1,27	28	0,60	0,836
14	320	1,45	30	0,65	0,879
15	380	1,69	32	0,70	0,884
16	428	2,03	32	0,75	0,931
17	475	2,54	30	0,60	0,818
18	546	3,38	28	0,65	0,895
19	640	3,38	24	0,70	0,939
20	650	2,54	20	0,75	0,969
21	213	2,03	20	0,60	0,878
22	253	1,69	24	0,65	0,887
23	274	1,45	28	0,70	0,868
24	320	1,27	30	0,75	0,907
25	380	1,13	32	0,60	0,841
26	428	1,015	32	0,65	0,827
27	475	0,845	30	0,70	0,856
28	546	0,845	28	0,75	0,918
29	640	1,015	24	0,60	0,828
30	650	1,13	20	0,65	0,879

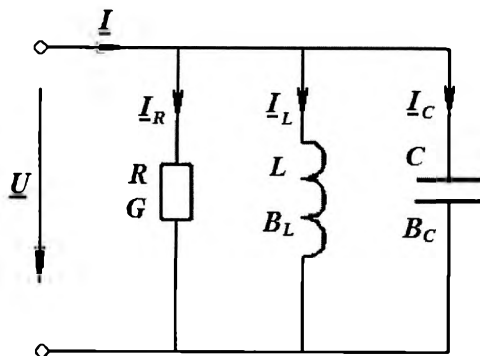


Рис. 3.1. Расчетная схема цепи

Реактивную  $B$  и полную  $Y$  проводимости определяют по формулам:

$$B = B_L - B_C; \quad Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = \sqrt{G^2 + B^2}.$$

Следует иметь в виду, что если  $B_L > B_C$ , то  $B > 0$ , а если  $B_L < B_C$ , то  $B < 0$ .

Токи в ветвях цепи определяют из выражений:

- с активной проводимостью  $I_R = I_a = GU = U/R$ ;
- с индуктивной проводимостью  $I_L = B_L U = U/\omega L$ ;
- с емкостной проводимостью  $I_C = B_C U = \omega CU$ .

Ток в неразветвленной части цепи определяют по первому закону Кирхгофа

$$I = I_R + I_L + I_C,$$

а его действующее значение по закону Ома

$$I = YU.$$

При постоянных значениях  $G$  и  $B_L$  изменение емкости  $C$  или емкостной проводимости  $B_C$  вызывает изменение как значения тока  $I$ , так и угла  $\varphi$  (по значению и по знаку). Изменение знака угла  $\varphi$  означает изменение характера нагрузки. Когда  $\varphi > 0$ , то нагрузка активно-индуктивная; когда  $\varphi < 0$ , то нагрузка активно-емкостная. Угол  $\varphi$  между напряжением  $\underline{U}$  и током  $\underline{I}$  в неразветвленной части цепи

удобно определять по формуле:

$$\varphi = \arctg \frac{B_L - B_C}{G} = \arctg \frac{B}{G}.$$

Т а б л и ц а 3.2

**Результаты расчетов цепи**

№ п/п	Исходные данные: $U = \dots$ В; $R = \dots$ Ом; $L = \dots$ Гн; $f = 50$ Гц													
	$C$	$G$	$B_L$	$B_C$	$B$	$Y$	$I_R$	$I_L$	$I_C$	$I$	$\varphi$	$\cos\varphi$	$P$	$Q$
	мкФ	См					А				град	-	Вт	В·Ар
1	0													
2	2													
3	4													
4	8													
5	16													
6	21													
7	Срез													

Коэффициент мощности зависит от параметров цепи и его рассчитывают по формуле:

$$\cos \varphi = G/Y.$$

Активную  $P$  и реактивную  $Q$  мощности вычисляют по формулам:

$$P = UI \cos \varphi = U^2 G; Q = UI \sin \varphi = U^2 B.$$

Если индуктивная и емкостная проводимости цепи равны ( $B_L = B_C$ ), то в цепи возникает резонанс токов, т.е. режим, при котором токи  $I_L$  и  $I_C$  в ветвях с индуктивной и емкостной проводимостями равны по значению. При этом если  $B_L = B_C > G$ , то значения токов  $I_L = I_C$  могут превышать ток  $I$  в неразветвленной части цепи в  $B_L/G$  раз. При резонансе напряжение  $\underline{U}$  и ток  $\underline{I}$  в неразветвленной части цепи совпадают по фазе ( $\varphi = 0$  и  $\cos \varphi = 1$ ), ток

$I$  имеет наименьшее возможное значение и равен току в ветви с активной проводимостью ( $I = I_a = GU$ ).

Емкость  $C_{\text{рез}}$ , при которой в цепи возникает резонанс токов, можно вычислить из условия равенства реактивных проводимостей ( $1/\omega L = \omega C$ ) по формуле  $C_{\text{рез}} = 1/\omega^2 L$ .

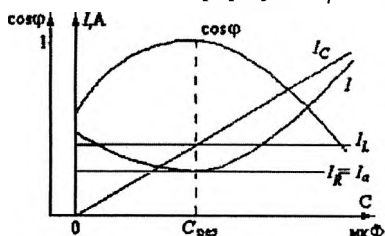


Рис. 3.2. Расчетные зависимости токов  $I$ ,  $I_R$ ,  $I_L$ ,  $I_C$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$  от емкости  $C$  ( $U$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $f = \text{const}$ )

Исходные данные и результаты расчета для различных значений  $C$  от 0 до 21 мкФ (ступенями через 1...3 мкФ – по указанию преподавателя) и  $C = C_{\text{рез}}$  заносят в табл. 3.2. На основании расчетных данных строят график зависимости токов  $I$ ,  $I_R$ ,  $I_L$ ,  $I_C$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$  от емкости  $C$  при постоянных значениях  $U$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $f$  (рис. 3.2).

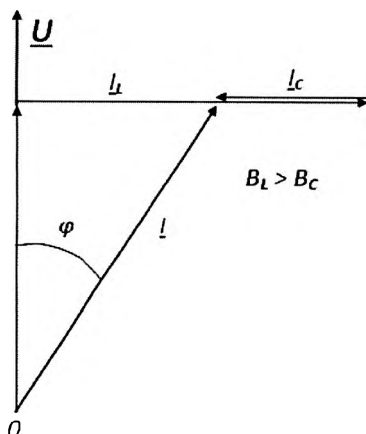


Рис. 3.3. Векторная диаграмма токов при параллельном соединении элементов с  $R$ ,  $L$  и  $C$

По уравнению  $\underline{I} = \underline{I}_L + \underline{I}_C$  на рис. 3.3 построена векторная диаграмма токов. Перед построением векторной диаграммы выбирают масштабы напряжения  $m_U$  и тока  $m_I$  (например,  $m_I = 0,1$  А/см, что означает, что току 0,1 А соответствует отрезок длиной 1 см) и определяют длину вектора напряжения  $\underline{U}$  и длины векторов токов в ветвях с активной проводимостью (с резистором) –  $\underline{I}_R$ , с индуктивной проводимостью –  $\underline{I}_L$  с емкостной проводимостью –  $\underline{I}_C$  и в неразветвленной части цепи –  $\underline{I}$ . За исходный вектор при построении диаграммы принимают вектор напряжения  $\underline{U}$ . В ветви с активной проводимостью ток совпадает по фазе с напряжением, поэтому вектор  $\underline{I}_R$  отложен по вектору  $\underline{U}$ . Ток в ветви с индуктивной проводимостью отстает от напряжения по фазе на  $\pi/2$  и вектор тока  $\underline{I}_L = -jB_L \underline{U}$  откладывают от конца вектора  $\underline{I}_R$  перпендикулярно вектору напряжения  $\underline{U}$  в сторону вращения часовой стрелки. От конца вектора  $\underline{I}_L$  перпендикулярно вектору  $\underline{U}$  в сторону противоположную вращению часовой стрелки откладывают вектор  $\underline{I}_C = jB_C \underline{U}$ , так как ток в ветви с емкостной проводимостью опережает напряжение по фазе на  $\pi/2$ . Вектор тока  $\underline{I}$  в неразветвленной части цепи представляет собой вектор, проведенный из начала вектора  $\underline{I}_R$  к концу вектора  $\underline{I}_C$ .

Диаграмма токов (рис. 3.3) построена для случая, когда  $B_L > B_C$ , и потому вектор тока отстает по фазе от вектора напряжения. Если  $B_L < B_C$ , то вектор тока опережает по фазе вектор напряжения.

### Экспериментальная часть работы

Экспериментальную часть работы проводят с целью проверки предварительных расчетов, используя электрическую цепь, схема которой изображена на рис. 3.4. Исследуемая цепь состоит из трех параллельно включенных приемников (трех ветвей): блока активной нагрузки  $R$ , блока индуктивной нагрузки и катушки переменной

индуктивности  $L$  и блока емкостной нагрузки  $C$ . Помощь в сборке цепи может оказать монтажная схема, приведенная на рис. 3.5.

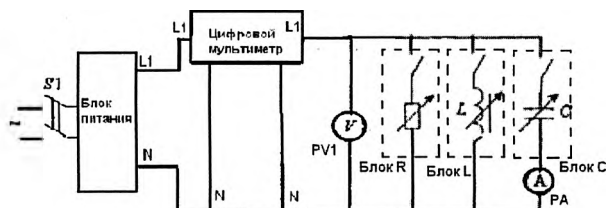


Рис. 3.4. Электрическая схема исследуемой цепи

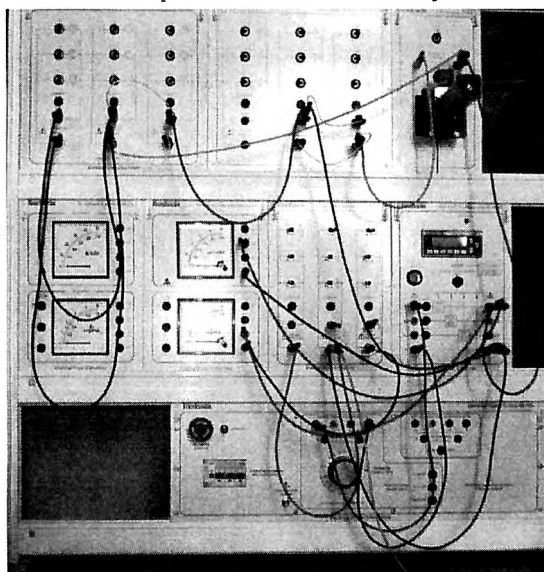


Рис. 3.5. Вид монтажной схемы включения активной, индуктивной и емкостной нагрузок, источника питания и измерительных блоков.

Исследуемую цепь подключают к одной фазе регулируемого источника питания переменного тока (гнезда  $L1$  и  $N$ ), который позволяет изменять подводимое к цепи напряжение и поддерживать неизменным его значение. Для измерения этого напряжения в

электрическую цепь включен вольтметр  $PVI$ . Автоматический выключатель и элементы защиты находятся на блоке источника питания.

Затем собирают основной контур цепи, соединяя выходные гнезда  $L1$  и  $N$  комбинированного цифрового измерительного прибора (КЦИП) с блоками активной нагрузки  $R$ , индуктивной нагрузки и катушкой переменной индуктивности  $L$  и блоком емкостной нагрузки  $C$  с последовательно подключенным к нему амперметром переменного тока (при этом переключатель на панели КЦИП должен стоять в положении «4-wire»).

Для экспериментальной проверки бригада студентов выбирает одно расчетное задание. Выбор значения активного сопротивления блока резисторов  $R$  равного значению сопротивления в выбранном задании осуществляют по табл. 2.3 (в блоке расположено 3 группы по 3 постоянных нерегулируемых резистора, которые могут быть соединены параллельно друг с другом, с номиналами 950, 1950 и 3770 Ом).

Значение индуктивной нагрузки устанавливают с помощью индуктивных элементов с постоянной индуктивностью (3, 6 и 12 Гн), включенных параллельно, либо последовательно друг с другом и индуктивной катушки переменной индуктивностью ( $L_{max} = 0,7$  Гн), которую включают последовательно с блоком постоянных индуктивностей. В табл. 3.3 указаны схемы включения элементов с постоянной индуктивностью и значения результирующей индуктивности. Сначала устанавливают постоянную индуктивность, выбрав из табл. 3.3 ближайшую меньшую по сравнению с заданной. Затем последовательно включают катушку с переменной индуктивностью.

---

Значения емкостной нагрузки устанавливают те же, что были приняты в предварительных расчетах. Первоначально устанавливают емкость  $C_{рез}$ , соответствующую режиму резонанса токов.



**Значения результирующей индуктивности при различных схемах  
включения элементов постоянной индуктивной нагрузки  
( $L1...L9$ )**

№ п/п	$L$ , Гн	Схема включения *	№ п/п	$L$ , Гн	Схема включения *
1	0,61	$L1...L9$ паралл.	7	3,5	$L1, L2 + L4, L5$
2	1,00	$L1, L2, L4, L5$	8	4,0	$L2, L3$
3	1,50	$L1, L4$	9	4,5	$L1 + L4, L7$
4	2,00	$L1, L2$	10	5,0	$L1, L2 + L4$
5	2,40	$L1, L3$	11	5,40	$L1, L3 + L4$
6	3,00	$L1$	12	6,00	$L2$

(\*) Запятая соответствует параллельному включению, знак «+» – последовательному включению элементов

Убедившись в том, что в момент включения стенда ручка регулирования выходного напряжения источника питания находится в положении «0», включают блок питания с помощью автоматического выключателя и устанавливают заданное напряжение, которое в дальнейшем поддерживают постоянным, контролируя по вольтметру  $PV1$ .

Точное значение  $L_{\text{рез}}$  устанавливают, изменяя положение сердечника в катушке переменной индуктивности (блок 67 - 300) и одновременно наблюдая за показаниями комбинированного цифрового измерительного прибора – (КЦИП – блок 68 - 100), включенного в режиме измерения реактивной мощности  $Q$ , что позволяет точнее установить режим резонанса, чем при измерении коэффициента мощности  $PF$  ( $\cos\varphi$ ). При резонансе реактивная мощность  $Q$  равна 0. После этого фиксируют положение сердечника катушки с помощью зажимного винта и не меняют индуктивность ветви на протяжении данного эксперимента. Поскольку в ходе

эксперимента меняют только значение емкостной нагрузки (в цепь которой включен стрелочный амперметр  $PA1$ ), токи в ветвях с индуктивной и активной нагрузками остаются неизменными. Их можно измерить следующим образом: отключив емкостную и индуктивную ветви нагрузок и переведя  $KЦИП$  в режим измерения токов, определяют ток в активной ветви. Отключив активную нагрузку и включив индуктивную нагрузку, определяют ток в индуктивной ветви. Эти значения записывают в соответствующие столбцы табл. 3.4. Затем восстанавливают параллельное подключение всех ветвей нагрузок и определяют с помощью  $KЦИП$  и  $PA1$  значения величин  $I$ ,  $I_C$ ,  $P$ ,  $Q$ ,  $S$  и  $PF$  сначала при  $C = C_{рез}$ , затем при 2 – 3 значениях  $C$  больших и меньших  $C_{рез}$  (по указанию преподавателя).

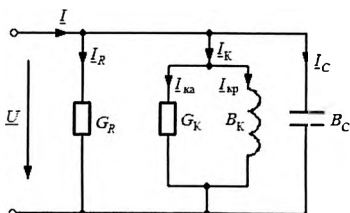


Рис. 3.6. Схема замещения исследуемой цепи

Реальная индуктивная катушка обладает не только индуктивной  $B_L = B_K$ , но и активной  $G_K$  проводимостями, что отражено на схеме замещения исследуемой цепи (рис. 3.6). Поэтому активная проводимость  $G$  исследуемой цепи равна сумме активных проводимостей реостата ( $G_R$ ) и индуктивной катушки ( $G_K$ ), т.е.  $G = G_K + G_R$ .

### Обработка результатов измерений

На основе результатов измерений с учетом схемы замещения цепи (рис. 3.6) все величины, указанные в табл. 3.4, вычисляют по формулам:

- полная проводимость цепи  $Y = I/U$ ;
- активная проводимость цепи  $G = P/U^2$ ;
- реактивная проводимость цепи  $B = \pm\sqrt{Y^2 - G^2}$  (знак «плюс» перед

корнем соответствует индуктивному характеру реактивной проводимости, а знак «минус» – емкостному);

- активная проводимость реостата  $G_R = I_R/U$ ;

- реактивная проводимость конденсатора  $B_C = I_C/U$ ;

- полная проводимость катушки  $Y_K = I_K/U$ ;

- активная составляющая полной проводимости катушки  $G_K = G - G_R$ ;

- реактивная составляющая полной проводимости катушки

$$B_K = B_L = \sqrt{Y_K^2 - G_K^2}.$$

Т а б л и ц а 3.4

### Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Исходные данные: $U = 100 \text{ В}$ ; $R = \dots \text{ Ом}$ ; $L = \dots \text{ Гн}$ ; $f = 50 \text{ Гц}$														
	Результаты измерений							Результаты расчета							
	$C$	$I$	$I_R$	$I_K$	$I_C$	$P$	$\cos\varphi$	$Y$	$G$	$B$	$G_R$	$B_C$	$Y_K$	$G$	$B_L$
	мкФ	А			Вт	-	См								
1															
2															
3															
4	Срез														
5															
6															
7															

Если в цепь включена только одна ветвь с катушкой, то

$$I = I_K; Y = Y_K = I_K/U; G = G_K = P/U^2 \text{ и } B = B_K = \sqrt{Y_K^2 - G_K^2};$$

При включении одной ветви с конденсатором.

$$I = I_C; Y = Y_C = I_C/U; G = G_C = PU^2 \text{ и } B = B_C = \sqrt{Y_C^2 - G_C^2},$$

1 CM - 0,5 A

### 3.3. Расчетное и экспериментальное исследование цепи при компенсации реактивной мощности

Цель работы – расчет необходимой емкости  $C$  конденсатора для повышения коэффициента мощности  $\cos\varphi_1$  до заданного значения  $\cos\varphi_2$  ( $\cos\varphi_2 > \cos\varphi_1$ ) и экспериментальная проверка результатов расчета.

Цель работы – расчет необходимой емкости  $C$  конденсатора для повышения коэффициента мощности  $\cos\varphi_1$  до заданного значения ( $\cos\varphi_2 > \cos\varphi_1$ ) и экспериментальная проверка результатов расчета.

## Указания по расчету. Задача 2

В расчетной схеме цепи, изображенной на рис. 3.8а, активно-индуктивная нагрузка ( $R$ ,  $L$ ) при заданном напряжении  $U$  характеризуется активной мощностью  $P$  и коэффициентом мощности  $\cos\varphi_1$ , значения которых задаются преподавателем (табл. 3.1). Необходимо определить ток приемника  $I_1$ , его активную  $I_a$  и реактивную  $I_p$  составляющие, электрическую емкость конденсатора  $C$ , который необходимо подключить параллельно приемнику (рис. 3.8б), чтобы повысить коэффициент мощности до значения  $\cos\varphi_2$ , указанного в табл. 3.1, а также ток  $I_C$  в конденсаторе и ток  $I_2$  в линии.

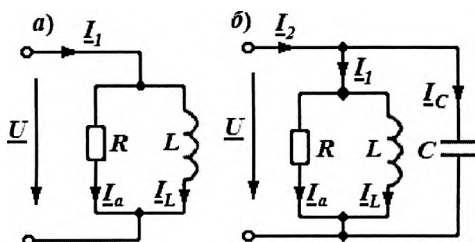


Рис. 3.8. Расчетные схемы активно-индуктивной нагрузки: а – без конденсатора, б – при подключении конденсатора

Значение емкости конденсатора, включаемого для компенсации реактивной составляющей тока  $I_1$  в линии, и, следовательно, повышения коэффициента мощности в сети, можно определить, пользуясь векторной диаграммой рис. 3.9.

Пусть при наличии в цепи активно-индуктивного приемника (рис. 3.8а) ток  $I_1$  в неразветвленной части цепи отстает от напряжения по фазе на некоторый угол  $\varphi_1$ . Если параллельно приемнику подключить конденсатор с емкостью  $C$  (рис. 3.8б) и при этом пренебречь активной проводимостью конденсатора, то ток  $I_2$  в неразветвленной части цепи в этом случае будет равен сумме токов

$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 + \underline{I}_C$ . Этот ток будет сдвинут по фазе относительно напряжения на меньший угол  $\varphi_2$  и коэффициент мощности возрастет до значения  $\cos \varphi_2$ .

Активная составляющая тока  $I_a$  при включении конденсатора не изменится и ее можно выразить как

$$I_a = I_1 \cos \varphi_1 = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{P}{U}.$$

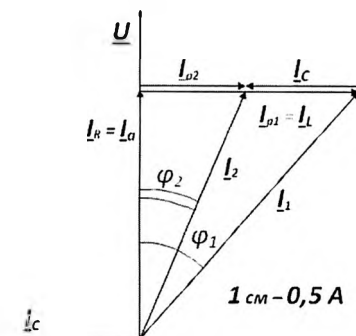


Рис. 3.9. Векторная диаграмма токов при компенсации реактивного тока

Токи  $I_1$  и  $I_2$  в неразветвленной части цепи до и после подключения конденсатора, а также их реактивные составляющие  $I_{p1}$  и  $I_{p2}$ , определяют по выражениям:

$$I_1 = I_a / \cos \varphi_1; I_2 = I_a / \cos \varphi_2,$$

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = I_a \tan \varphi_1; I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = I_a \tan \varphi_2.$$

Ток конденсатора  $I_C = I_{p1} - I_{p2} = I_a (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) / U$ .

Емкость компенсирующего конденсатора

$$C = \frac{I_C}{\omega U} = \frac{P}{\omega U^2} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2).$$

Если при этом мощность  $P$  измеряют в ваттах, а напряжение  $U$  — в вольтах, то емкость  $C$  получают в фарадах.

Результаты расчета задачи 2 до и после компенсации реактивной мощности необходимо занести в табл. 3.5 и используя их построить в масштабе векторную диаграмму токов согласно рис. 3.9.

Т а б л и ц а 3.5

**Результаты расчета по компенсации реактивной мощности**

Схема	Исходные данные: $U = \dots$ В; $P = \dots$ Вт; $\cos\varphi_1 = \dots$ ; $\cos\varphi_2 = \dots$					
	$I_a$	$I_L$	$I_I$	$I_2$	$I_C$	C
	A					мкФ
Без C				-	-	-
с C			-			

**Экспериментальная часть работы**

Опыт по компенсации реактивной мощности проводят, используя ту же исследуемую цепь (см. рис. 3.4). В цепь включают ветви с активной и индуктивной нагрузкой, что соответствует расчетной схеме, изображенной на рис. 3.8, а; устанавливают заданное напряжение (см. табл. 3.1, задача 2) и изменяют значения активной и индуктивной нагрузок таким образом, чтобы коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$  ( $PF_1$ ) и активная мощность  $P$  соответствовали значениям, указанным в табл. 3.1.

Заданные значения мощности  $P$  устанавливают изменяя сопротивление активной нагрузки, а значение  $\cos\varphi_1$  – изменяя индуктивность  $L$  индуктивной нагрузки. При этом следует помнить, что при изменении индуктивности будет изменяться и активная мощность  $P$ . Следует точно установить значение  $\cos\varphi_1$ , а значение  $P$  можно установить близкое к заданному.

Установив данные значения коэффициента мощности и активной мощности, производят измерения, и результаты измерений записывают в табл. 3.6.

**Результаты опыта по компенсации реактивной мощности**

Схема	Исходные данные: $U = \dots$ В; $P = \dots$ Вт; $\cos\varphi_1 = \dots$ ; $\cos\varphi_2 = \dots$					
	Опытные данные					
	$I_R, A$	$I_K, A$	$I_C, A$	$I_1, A$	$I_2, A$	$\cos\varphi_2$
Без $C$			-		-	-
с $C$				-		

Затем включают расчетную компенсирующую емкость конденсатора, предназначенную для повышения коэффициента мощности до  $\cos\varphi_2$  ( $PF_2$ ), что соответствует расчетной схеме на рис. 3.8, б. Результаты измерений заносят в табл. 3.6.

**3.4. Программа работы*****Расчетное и экспериментальное исследование цепи при изменении емкости параллельной ветви (задача 1)***

1. На основании задания (см. табл. 3.1) выполните все расчеты и графические построения (см. разд. «Указания по расчету»). Результаты расчета сведите в табл. 3.2, постройте графические зависимости (см. рис. 3.2) и векторную диаграмму токов (см. рис. 3.3) для одной из строк табл. 3.2, исключая значения емкости  $C = 0$  и  $C = C_{рез}$ .

2. Соберите исследуемую цепь (см. рис. 3.4). Ориентируясь на данные расчета, выберите пределы измерения приборов, рассчитайте их цены делений.



3. Включите исследуемую цепь под напряжение и настройте ее на резонанс при заданных значениях параметров.

4. Произведите необходимые измерения при  $C = C_{\text{рез}}$  и при других значениях емкости, данные измерений запишите в табл. 3.4.

5. По указанию преподавателя проведите измерения для двух случаев, когда в цепи включена одна индуктивная катушка, и один конденсатор с емкостью  $C_{\text{рез}}$ . Результаты измерений запишите в табл. 3.4 (строки 6 и 7).

6. Используя результаты измерений, рассчитайте значения проводимостей и запишите их в табл. 3.4.

7. По опытным данным постройте график зависимости тока  $I$  в неразветвленной части цепи и токов в ветвях  $I_R$ ,  $I_K$  и  $I_C$  от емкости, как показано на рис. 3.2, и векторные диаграммы токов для случаев, когда включены все три ветви при  $B_L = B_C$ ;  $B_L > B_C$  и  $B_L < B_C$ .

8. Запишите технические данные приборов.

9. Проведите анализ полученных результатов, в котором сравните расчетные и экспериментальные данные; оцените расхождения между значениями токов в катушке и в конденсаторе при резонансе токов в экспериментальном исследовании цепи, объясните причину этих расхождений; сравните значение коэффициента мощности  $\cos\varphi(PF)$ , найденное по показаниям ваттметра, вольтметра и амперметра в неразветвленной части цепи, с показаниями комбинированного цифрового измерительного прибора.

### ***Расчетное и экспериментальное исследование цепи при компенсации реактивной мощности (задача 2)***

1. Произведите расчет токов в электрической цепи, схема которой приведена на рис. 3.8, а, а ее параметры указаны в табл. 3.1.

2. Рассчитайте значения емкости  $C$  конденсатора, которая необходима для повышения  $\cos\varphi_1$  до  $\cos\varphi_2$ .

3. Приведите расчет токов в электрической цепи, схема которой

указана на рис. 3.8, б. Данные расчетов запишите в табл. 3.5. Постройте векторную диаграмму токов, как показано на рис. 3.9.

4. В электрической цепи (схема на рис. 3.4) установите заданные параметры (активную мощность  $P$  и  $\cos\varphi_1$ ).

5. Проведите измерения токов, мощности  $P$ ,  $\cos\varphi_1$  в цепи без конденсатора.

6. Включите расчетное значение емкости  $C$  конденсатора и проведите те же измерения. Данные измерений запишите в табл. 3.6.

7. Проведите анализ полученных результатов, в котором сравните заданное значение коэффициента мощности  $\cos\varphi_2(PF_2)$  со значением, полученным в результате эксперимента.

### 3.4. Контрольные вопросы

1. Какими соображениями нужно руководствоваться при выборе электроизмерительных приборов (предел измерения, система измерительного механизма, класс точности и др.)?

2. Как изменять активную, индуктивную и емкостную проводимости цепи?

3. При каком условии в цепи с параллельным соединением электроприемников возникает резонанс токов? Как по показаниям электроизмерительных приборов убедиться в том, что в цепи возник резонанс токов?

4. Как при настройке цепи установить заданное значение индуктивности и активной проводимости цепи?

5. Как проводится экспериментальное исследование цепи (задача 1)?

6. Как проводится опыт по компенсации реактивной мощности (задача 2)?

## Работа 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

#### 4.1. Общие указания

Цель работы – освоение методов расчета трехфазной цепи, получение навыков включения измерительных приборов, коммутирующей аппаратуры, навыков соединения однофазных электроприемников звездой и треугольником, освоение методов измерения в трехфазной цепи, опытное определение соотношений между фазными и линейными напряжениями и токами.

В данной работе в качестве электроприемников используются блоки активной нагрузки 67-142. Работа состоит из двух частей: «Исследование трехфазной цепи при соединении электроприемников звездой»; «Исследование трехфазной цепи при соединении электроприемников треугольником».

Экспериментальному исследованию предшествует теоретический расчет несимметричного электроприемника, который студент выполняет дома.

При выполнении работы необходимо руководствоваться следующими понятиями.

**Фаза нагрузки** – блок активной нагрузки 67-142 ( $R_\Phi$ ).

**Фазное напряжение** ( $U_\Phi$ ) – напряжение между началом и концом фазы (фазой электроприемника является группа резисторов блока активной нагрузки).

Линейные провода обозначены на схемах  $L1$ ,  $L2$  и  $L3$ .

**Линейное напряжение** ( $U_n$ ) – напряжение между линейными проводами, соединяющими начала фаз источника питания и электроприемника.

**Фазный ток** ( $I_\Phi$ ) – ток в фазе.

**Линейный ток** ( $I_n$ ) – ток в линейном проводе.

**Нейтральная точка** – место соединения концов фаз электроприемника *n* (или источника *N*) при соединении их звездой.

**Нейтральный провод** – провод, соединяющий нейтральные точки *N* и *n* источника питания и электроприемника. На электрических схемах его обозначают буквами *N*, *PN* или *PEN*. Нейтральный провод предназначен для выравнивания напряжений на зажимах приемника при неравномерной нагрузке приемника, соединенного звездой. Ток в нейтральном проводе обозначают  $I_N$ .

**Равномерная (симметричная) нагрузка** – нагрузка, при которой активные и реактивные сопротивления всех фаз приемника соответственно равны, в противном случае нагрузка является неравномерной. При равномерной нагрузке трехфазные системы токов и напряжений электроприемника являются симметричными, т.е. во всех фазах токи и напряжения сдвинуты по фазе друг относительно друга на  $2\pi/3$ , активные  $P_\phi$ , реактивные  $Q_\phi$  и полные  $S_\phi$  мощности во всех фазах приемника равны.

В разделе «Описание блоков модульной системы» на рис. 4.1 представлен общий вид стенда и приведено описание блоков.

В данной работе для исследования трехфазной цепи используются следующие блоки:

1. Рама системы 91-200.
2. Универсальный источник питания – Power supply 60-105.
3. Коммутируемые трехфазные нагрузочные резисторы Three Phase Resistive Load 67-142.
4. Типовой комплект проводов для коммутационных панелей Lead set 68-800.
5. Аналоговые измерительные приборы: вольтметр и амперметр переменного тока ac Voltmeter & Ammeter (опция C112) 68-117
6. Цифровой мультиметр Single & Three Phase Measurements (опция C11) 68-100.

7. Два электродинамических ваттметра Electrodynamic Wattmeters (опция CI2) 68-200 или виртуальные измерительные приборы (опция 60-070-VIP).

8. Многоканальный блок ввода / вывода Multichannel I/O 68-500.

9. Программное обеспечение Software Pack 68-912 USB.

Блок трехфазной активной нагрузки состоит из трех фазных групп нагрузочных резисторов, каждая группа содержит три параллельно соединенных резистора, которые с помощью выключателя могут быть включены или выключены из группы. Кроме того, каждая группа может быть соединена последовательно или параллельно одна с другой. Общий вид блока трехфазной активной нагрузки представлен на рис. 4.1.

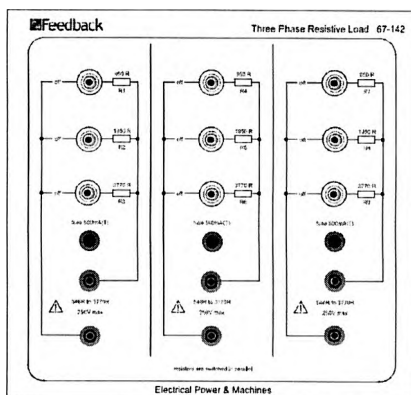


Рис. 4.1. Общий вид блока трехфазной активной нагрузки

Рабочее фазное напряжение, подаваемое на блок резисторов, 120–250 В. Максимальная нагрузка 100 Вт (0,5 А) на каждую фазную группу резисторов. Возможные варианты сопротивлений блока трехфазной активной нагрузки приведены в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

**Возможные варианты сопротивлений  
блока трехфазной активной нагрузки**

Switch 1 (upper)	Switch 2 (middle)	Switch 3 (lower)	Resistance, $\Omega$
			Each Bank
On	On	On	546
On	On	Off	640
On	Off	On	759
On	Off	Off	950
Off	On	On	1285
Off	On	Off	1950
Off	Off	On	3770

В данной работе на каждую фазу подключают по одной группе (Bank) резисторов.

**4.2. Исследование трехфазной цепи при соединении  
электроприемников звездой**

Каждому студенту преподаватель выдает одно задание из табл. 4.2, в которой приведены сопротивления фаз приемников.

**Расчетные задания ( $U_n = 220 \text{ В}$ )**

№ п/п	Сопротивление фаз приемников, Ом			№ п/п	Сопротивление фаз приемников, Ом			№ п/п	Сопротивление фаз приемников, Ом		
	$R_a$	$R_b$	$R_c$		$R_a$	$R_b$	$R_c$		$R_a$	$R_b$	$R_c$
1	548	640	759	11	759	640	548	21	640	759	548
2	950	1285	1950	12	1950	1285	950	22	1285	1950	950
3	548	759	950	13	1285	950	1950	23	640	3770	3770
4	1285	548	759	14	3770	1950	1950	24	759	640	3770
5	1950	759	548	15	950	1950	1285	25	1285	759	640
6	759	548	1285	16	3770	1950	1285	26	3770	759	640
7	548	759	1950	17	1950	3770	950	27	759	640	1285
8	1950	548	759	18	950	1950	3770	28	640	1285	1950
9	950	759	548	19	950	3770	950	29	1285	1950	3770
10	759	548	1950	20	3770	950	1285	30	1950	1285	3770

**Указания по расчету токов при соединении электроприемников звездой с нейтральным проводом (четырёхпроводная сеть)**

Во всех расчетах принимают, что система линейных ( $U_n$ ) и фазных ( $U_\phi$ ) напряжений источника питания симметрична, причем  $U_n = 220 \text{ В}$ , а сопротивления линейных и нейтрального проводов настолько малы, что ими можно пренебречь. Тогда при наличии нейтрального провода потенциал нейтральной точки  $n$  приемника будет всегда равен потенциалу нейтральной точки  $N$  источника питания и система фазных напряжений приемника будет симметричной, то есть действующие значения фазных напряжений приемника и источника равны

$$U_a = U_b = U_c = U_A = U_B = U_C = U_\phi,$$

где  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  – действующие значения фазных напряжений

приемника;  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  – то же, источника питания, а сдвиг по фазе составляет  $2\pi/3$ .

Действующие значения фазных токов электроприемника, обладающего только активным сопротивлением, находят по закону Ома:

$$I_a = \frac{U_a}{R_a}, \quad I_b = \frac{U_b}{R_b}, \quad I_c = \frac{U_c}{R_c}, \quad (1)$$

где  $U_a = U_b = U_c = U_\phi = U_n / \sqrt{3} = 220 / \sqrt{3} = 127 \text{ В}$ ;  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$  – активные сопротивления фаз приемника, указанные в задании (табл. 4.1).

В комплексной форме фазные токи определяют по закону Ома по формулам:

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= \frac{\underline{U}_a}{R_a} = \frac{U_a}{R_a} = I_a, \\ \underline{I}_b &= \frac{U_b e^{-j2\pi/3}}{R_b} = I_b e^{-j2\pi/3} = I_b(-0,5 - j0,867), \\ \underline{I}_c &= \frac{U_c e^{j2\pi/3}}{R_c} = I_c e^{j2\pi/3} = I_c(-0,5 + j0,867), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $e^{\pm j2\pi/3} = -0,5 \pm j0,867$ .

В частном случае, когда электроприемник обладает только активным сопротивлением, система фазных токов состоит из трех токов, отличающихся друг от друга в общем случае по значению, но сдвинутых на угол  $2\pi/3$ , как и векторы фазных напряжений, так как при активном сопротивлении электроприемников токи совпадают по фазе с соответствующими фазными напряжениями.

Ток в нейтральном проводе определяют по первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = I'_N \pm jI''_N, \quad (3)$$



где  $I'_N$  – действительная, а  $I''_N$  – мнимая составляющая тока  $\underline{I}_N$ .

Действующее значение тока в нейтральном проводе находят как модуль  $I_N$ , т.е.  $I = \sqrt{I'^2_N + I''^2_N}$ .

Найденные значения токов записывают в табл. 4.3.



## Результаты расчетов трехфазной цепи

Исходные данные: $U_n = 220 \text{ В}, R_a = \dots \text{ Ом}, R_b = \dots \text{ Ом}, R_c = \dots \text{ Ом}$								
Схема соединения	Расчетные величины							
	Напряжения, В				Токи, А			
	$U_a$	$U_b$	$U_c$	$U_N$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$I_N$
				-				
								-

**Указания по расчету напряжений и токов при соединении  
электроприемников звездой в трехпроводной сети**

В общем случае при неравномерной нагрузке напряжение  $\underline{U}_{nN}$  между нейтральными точками  $n$  и  $N$  электроприемника и источника питания находят по формуле:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}, \quad (4)$$

где  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  – система фазных напряжений источника;  $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$  – комплексные фазные проводимости электроприемника. Для трехпроводной цепи  $\underline{Y}_N = 0$ .

Полагая, что вектор напряжения  $\underline{U}_A$  совпадает с положительным направлением оси вещественных на комплексной плоскости (+1), а его действующее значение равно  $U_A = U_\phi = 127 \text{ В}$ , система фазных напряжений будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= 127, \\ \underline{U}_B &= U_\phi e^{-j2\pi/3} = 127(-0,5 - j0,867) = -63 - j110, \\ \underline{U}_C &= U_\phi e^{j2\pi/3} = 127(-0,5 + j0,867) = -63 + j110. \end{aligned} \quad (5)$$

В случае активной нагрузки  $\underline{Y}_a = G_a$ ,  $\underline{Y}_b = G_b$ ,  $\underline{Y}_c = G_c$ , где  $G_a = 1/R_a$  и т. д. – активные проводимости фаз приемника. После подстановки  $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_C$  в уравнение (4) получим:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{(127G_a - 63(G_b + G_c)) + j110(G_c - G_b)}{G_a + G_b + G_c} = U'_{nN} \pm U''_{nN}. \quad (6)$$

Фазные напряжения приемника находят также в комплексной форме:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN}, \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN}, \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN}, \quad (7)$$

а в табл. 4.3 записывают их действующие значения, т.е. модули этих напряжений, которые находят по формулам:

$$U_{nN} = \sqrt{U'^2_{nN} + U''^2_{nN}} \quad \text{и т. д.}$$

Действующие значения фазных токов определяют по закону Ома для участка цепи:

$$I_a = \frac{U_a}{R_a}, \quad I_b = \frac{U_b}{R_b}, \quad I_c = \frac{U_c}{R_c}. \quad (8)$$

Токи в данном случае совпадают по фазе со своими фазными напряжениями приемника. Найденные значения токов записывают в табл. 4.3.

## Проведение измерений в цепи и обработка результатов измерений

Схемы исследуемых электрических цепей приведены на рис. 4.2. и 4.4. В качестве нагрузки используют группы нагрузочных резисторов, схемы которых показаны на рис. 4.1, а сочетания включенных резисторов указаны в табл. 4.1.

Сначала собирают электрическую цепь при соединении приемников звездой с нейтральным проводом (рис. 4.2). Здесь  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$  – группы параллельных резисторов рис. 4.1. При этом линейное напряжение следует установить равным 220 В, тогда фазное напряжение будет 127 В.

На мультиметре 68-100 переключатель «3-wire – 4wire» установите в положение «4-wire» (четырёхпроводная цепь). Нажмите

кнопку «Program button». Мультиметр перейдет в режим выбора программы измерений. Кнопками ↑ или ↓ выберите режим «3P-4W», затем снова нажмите кнопку «Program button».

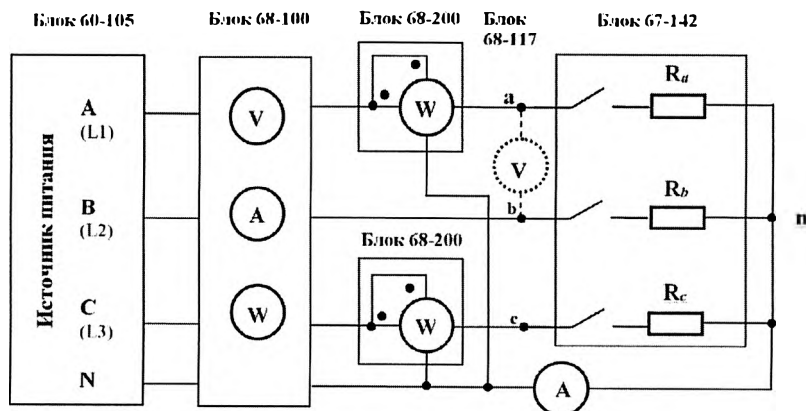


Рис. 4.2. Принципиальная схема трехфазной цепи звезда источника – звезда нагрузки с нейтральным проводом (четырёхпроводная цепь)

В этом случае цифровой мультиметр 68-100, соединенный с блоком нагрузок 67-142, измеряет фазные напряжения  $U_{an}$ ,  $U_{bn}$ ,  $U_{cn}$ , линейные токи  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  и фазные мощности  $P_a$ ,  $P_b$  и  $P_c$ . Для контроля показаний мультиметра между мультиметром и нагрузкой можно включить блоки электродинамических ваттметров 68-200.

Для измерения линейных напряжений  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  можно использовать вольтметры переменного тока из блока 68-117, включаемые поочередно между проводами  $a$  и  $b$ ,  $b$  и  $c$ ,  $c$  и  $a$ .

Перед началом работы устанавливают регулятор напряжения источника питания 60-105 в положение 0%, затем, вращая ручку управления выходным напряжением, устанавливают фазные напряжения на мультиметре 68-100 равные 127 В. Для получения режима равномерной нагрузки устанавливают одинаковые сопротивления групп резисторов на каждой фазе приемника.

Для получения режима неравномерной нагрузки изменяют сопротивления групп по указанию преподавателя, измеряют все величины, указанные в табл. 4.3.

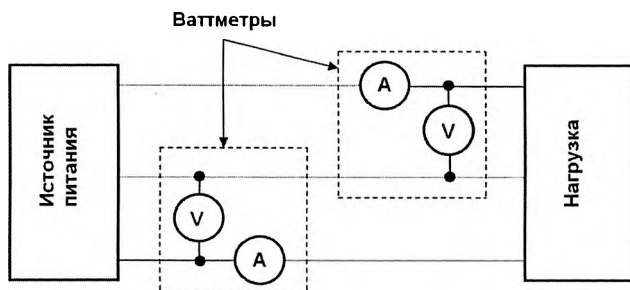


Рис. 4.3. Функциональная схема измерения методом двух ваттметров

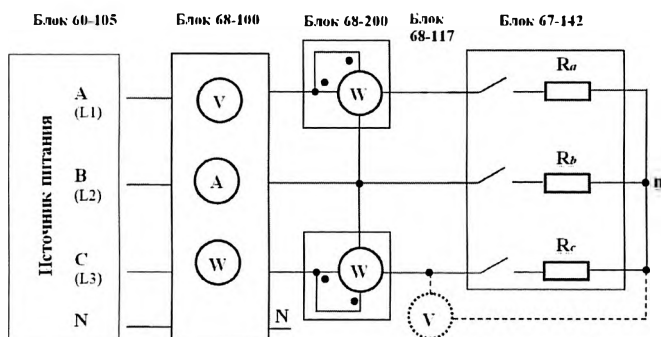


Рис. 4.4. Принципиальная схема трехфазной цепи звезда источника – звезда нагрузки без нейтрального провода (трехпроводная цепь)

На рис. 4.3 представлена функциональная схема измерения мощности методом двух ваттметров. В этой схеме соединение нейтральных точек нагрузки  $n$  и генератора  $N$  не предусмотрено. Следовательно, цепь будет трехпроводной.

Схема электрической цепи при соединении приемников звездой

(трехпроводная цепь) изображена на рис. 4.4.

Выход мультиметра 68-100 соедините со входом электродинамических ваттметров 68-200, измеряющих активную мощность по методу двух ваттметров. Необходимость использования блока 68-200 связана с тем, что при измерении мощности методом двух ваттметров мультиметр 68-100 показывает только суммарную мощность  $P = P' + P''$ .

Для измерения фазного напряжения можно использовать вольтметры переменного тока 68-117, подключаемые поочередно к фазам *an*, *bn*, *cn*. Для измерения фазной мощности следует подключить конец обмотки напряжения ваттметра к нейтральной точке *n*.

Переключатель «3-wire – 4wire» установите в положение «3-wire» (трехпроводная цепь) и выберите режим «3P-3W», как указано выше.

В этом случае цифровой мультиметр 68-100, соединенный с блоком нагрузок 67-142, измеряет линейные напряжения  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  и линейные (фазные) токи  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ .

Процедура измерений та же, что и для четырехпроводной цепи.

Т а б л и ц а 4.4

**Результаты вычислений в трехфазной цепи при соединении  
звездой**

Тип трехфазной цепи	Вид нагрузки	Напряжения, В						Токи, А				Мощности, Вт					
		Линейные			Фазные			Между <i>N</i> и <i>л</i>	Линейные (фазные)			По методу двух ватт- метров	Фазные				
		$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$U_{an}$	$U_{bn}$	$U_{cn}$	$U_N$	$I_{an}$	$I_{bn}$	$I_{cn}$	$I_N$	$P'$	$P''$	$P_u$	$P_b$	$P_c$
Четырех- проводная	Равном							-					-	-			
	Неравном							-					-	-			
	Обрыв фазы							-					-	-			
Трех- проводная	Равном											-					
	Неравном											-					
	Обрыв фазы											-					

По данным лабораторных измерений проводят ряд вычислений, результаты которых заносят в табл. 4.5.

1. Отношения линейных и фазных напряжений. В четырехпроводной сети системы линейных и фазных напряжений приемника симметричны и выполняется отношение  $U_L/U_\phi = \sqrt{3}$  для всех видов нагрузки. Это соотношение между линейными и фазными напряжениями справедливо также при равномерной нагрузке в трехпроводной сети. При неравномерной нагрузке в трехпроводной сети отношения  $U_L/U_\phi$  разные и могут значительно отличаться от  $\sqrt{3}$ .

2. Сопротивления фаз приемника вычисляют с учетом того, что приемник чисто активный, по формуле:

$$Z_\phi = R_\phi = U_\phi / I_\phi \quad . \quad (9)$$

3. Мощность отдельных фаз вычисляют по формуле:

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi}, \quad (10)$$

так как приемник чисто активный,  $\cos \varphi = 1$ . Например,  $P_a = U_a I_a$ .  
Мощность трехфазного приемника равна сумме мощностей фаз,

$$P = \Sigma P_{\phi} = P_a + P_b + P_c. \quad (11)$$

Фазные мощности и их сумму вычисляют для всех опытов.

Для равномерной нагрузки, когда  $P_a = P_b = P_c$ , мощность трехфазного приемника находят по формулам:

$$P = 3P_{\phi}; \quad P = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\phi} \cos \varphi. \quad (12)$$

При равномерной нагрузке и точных измерениях все способы вычисления мощности трехфазного приемника должны дать одинаковый результат, то есть

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

Кроме того, мощность трехфазного приемника при трехпроводной сети определяют по методу двух ваттметров:

$$P = P' + P''. \quad (13)$$

Т а б л и ц а 4.5

### Результаты измерений в трехфазной цепи при соединении звездой

Тип трехфазной цепи	Вид нагрузки	Отношения напряжений			Сопротивления фаз приемника, Ом			Мощности, Вт							
								фазные			Трехфазной цепи				
		$\frac{U_{ab}}{U_a}$	$\frac{U_{bc}}{U_b}$	$\frac{U_{ca}}{U_c}$	$R_a$	$R_b$	$R_c$	$P_a$	$P_b$	$P_c$	$\Sigma P_{\phi}$	$3P_{\phi}$	$\sqrt{3} U_{\lambda} I_{\phi}$	$P' + P''$	
Четырех проводная	Равном														-
	Неравном											-	-	-	
	Обрыв фазы											-	-	-	
Трех проводная	Равном														
	Неравном											-	-		
	Обрыв фазы											-	-		

## Указания по построению векторных диаграмм

По результатам измерений векторные диаграммы напряжений и токов удобно построить методом «засечек», как показано на рис. 4.5. Предварительно следует выбрать масштаб для напряжений и токов. При построении диаграммы напряжений следует учесть, что источник питания имеет симметричную систему линейных и фазных напряжений. Следовательно, система линейных напряжений приемника также будет симметричной, образующей равносторонний треугольник.

При соединении приемников звездой сначала строят треугольник линейных напряжений. Первым горизонтально откладывают вектор напряжения  $\underline{U}_{bc}$ , определяющий вершины  $c$  и  $b$  треугольника. Из точек  $c$  и  $b$  радиусами, равными линейным напряжениям  $\underline{U}_{ca}$  и  $\underline{U}_{ab}$ , соответственно, делают «засечки», пересечение которых определяет вершину  $a$  треугольника линейных напряжений.

Из вершин этого треугольника радиусами, равными соответствующим фазным напряжениям приемника, делают «засечки» внутри треугольника. Точка пересечения этих «засечек» соответствует нейтральной точке  $n$  приемника. Точка  $n$  располагается в центре тяжести треугольника  $abc$  при любой нагрузке в четырехпроводной сети и при равномерной нагрузке в трехпроводной сети. При неравномерной нагрузке в трехпроводной сети точка  $n$  может занимать любое положение. Векторы фазных напряжений  $\underline{U}_a$ ,  $\underline{U}_b$ ,  $\underline{U}_c$  приемника проводят из точки  $n$  в точки  $a$ ,  $b$  и  $c$ .



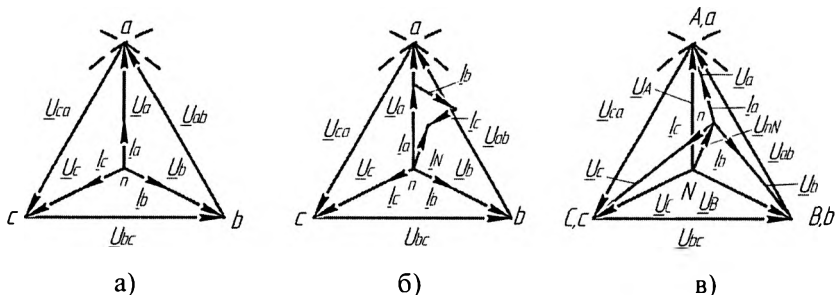


Рис. 4.5. Векторные диаграммы напряжений и токов при соединении приемников звездой:

$a$  – при равномерной нагрузке,  $b$  – при неравномерной нагрузке в 4-проводной цепи,  $в$  – при неравномерной нагрузке в 3-проводной цепи

Для случая неравномерной нагрузки в трехпроводной сети (рис. 4.5, в) необходимо также построить векторы фазных напряжений источника питания, образующих симметричную систему, то есть выходящих из точки  $N$  (центра тяжести треугольника). Вектор напряжения  $\underline{U}_{nN}$  проводят между точками  $N$  и  $n$ .

Так как приемник чисто активный, то при соединении звездой фазные токи совпадают по фазе с фазными напряжениями и их векторы проводят совпадающими с векторами соответствующих фазных напряжений приемника. Для случая неравномерной нагрузки в четырехпроводной сети строят вектор тока  $\underline{I}_N$  в нейтральном проводе (рис. 4.5, б), как векторную сумму фазных токов:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c. \quad (14)$$

### Аварийные режимы

По указанию преподавателя может быть воспроизведен аварийный режим – обрыв фазы в четырехпроводной или трехпроводной сети (рис. 4.6).

Обрыв внутри фазы приемника. Например, для обрыва фазы  $a$

необходимо перевести выключатели резисторов фазы  $a$  в положение «off», тогда ток  $I_a = 0$ . Токи в других фазах зависят от режима нейтрального провода. В четырехпроводной сети потенциал точки  $n$  равен потенциалу нейтральной точки  $N$  источника питания и, следовательно, его значение остается неизменным. Фазные напряжения  $\underline{U}_b$ , и  $\underline{U}_c$  остаются неизменными (по значению и по фазе) и токи  $\underline{I}_b$  и  $\underline{I}_c$  также остаются неизменными. Ток  $\underline{I}_N = \underline{I}_b + \underline{I}_c$  становится равным по значению току  $\underline{I}_a$  в исходном режиме, а по фазе ему противоположен (рис. 4.7, а).

Обрыв внутри фазы  $a$  в трехпроводной сети (выключатели резисторов фазы отключены) изменяет трехфазную цепь таким образом, что приемники фаз  $b$  и  $c$  оказываются включенными последовательно и к ним приложено линейное напряжение  $U_{bc}$ . Напряжение  $\underline{U}_{nN}$  с учетом того, что проводимость  $G_a$  фазы  $a$  равна нулю, а проводимости других фаз равны, то есть  $G_b = G_c = G$ , находим из (4):

$$\underline{U}_{nN} = \frac{(\underline{U}_b + \underline{U}_c)G}{2G} = \frac{-\underline{U}_a}{2} \quad (15)$$

Таким образом, вектор напряжения противоположен вектору  $\underline{U}_a$  (рис. 4.7, б) и точка  $n$ , соответствующая концу вектора  $\underline{U}_{nN}$ , делит вектор напряжения  $\underline{U}_{bc}$  пополам. Следовательно, фазные напряжения приемника  $\underline{U}_b = \underline{U}_c$ , то есть уменьшились в  $2/\sqrt{3}$  раза по сравнению с исходным режимом, а напряжение  $\underline{U}_a = \underline{U}_{na}$  увеличилось в 1,5 раза.

Ток в фазе  $a$  приемника  $\underline{I}_a = 0$ . Токи в фазах  $b$  и  $c$  уменьшились также в  $2/\sqrt{3}$  раза, так как фазные напряжения уменьшились во столько же раз, а сопротивления фаз остались неизменными. По фазе токи  $\underline{I}_b$  и  $\underline{I}_c$  совпадают со своими фазными напряжениями, так как приемник чисто активный.

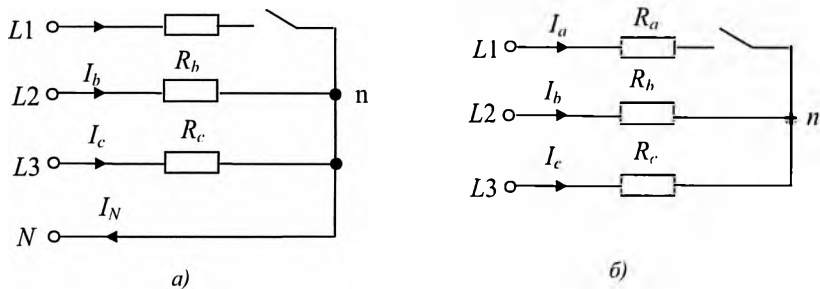


Рис. 4.6. Схемы трехфазного приемника, соединенного звездой, в некоторых аварийных режимах:  
 а – обрыв фазы в 4-проводной цепи; б – обрыв фазы в 3-проводной цепи

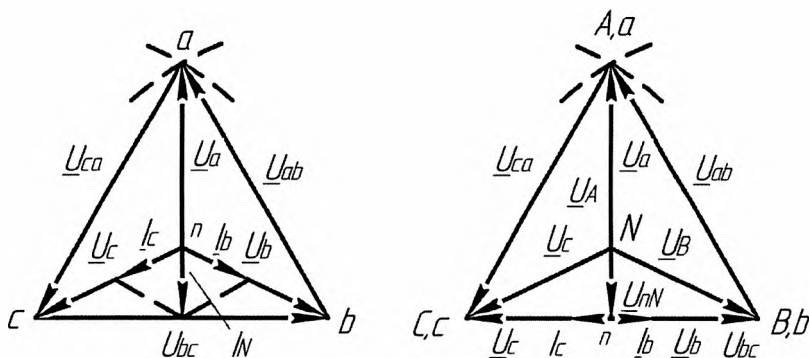


Рис. 4.7. Векторные диаграммы напряжений и токов при соединении приемников звездой:  
 а – обрыв внутри фазы в 4-проводной цепи; б – то же в 3-проводной цепи

### 4.3. Исследование трехфазной цепи при соединении электроприемников треугольником

#### Указания по расчету токов

Каждому студенту преподаватель выдает одно задание из табл. 4.6, в котором приведены параметры цепи. Необходимо рассчитать фазные и линейные токи электроприемника.

Комплексные фазные токи определяют по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{R_{ab}}; \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{R_{bc}}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{R_{ca}}, \quad (16)$$

где  $\underline{U}_{ab}$ ,  $\underline{U}_{bc}$ ,  $\underline{U}_{ca}$  – комплексные фазные (линейные) напряжения, представляющие собой симметричную систему ( $U_\phi = U_\lambda = U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = 220\text{В}$ );  $R_{ab}$ ,  $R_{bc}$ ,  $R_{ca}$  – активные сопротивления фаз приемника, указанные в задании.

Вектор комплексного напряжения  $\underline{U}_{ab}$  принимают совпадающим с положительным направлением оси вещественных. Тогда

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= U_{ab} = U_\lambda = 220, \\ \underline{U}_{bc} &= U_\lambda e^{-j2\pi/3} = 220(-0,5 - j0,867), \\ \underline{U}_{ca} &= U_\lambda e^{j2\pi/3} = 220(-0,5 + j0,867). \end{aligned}$$

Комплексные линейные токи определяют по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = I'_a + jI''_a; \quad \underline{I}_b = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = I'_b + jI''_b; \\ \underline{I}_c &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = I'_c + jI''_c. \end{aligned} \quad (17)$$

Действующие значения фазных и линейных токов равны модулям соответствующих комплексных токов, например:

$$I_{ab} = |\underline{I}_{ab}| = \left| \frac{\underline{U}_{ab}}{R_{ab}} \right| = \frac{U_a}{R_{ab}}, \quad I_a = |\underline{I}_a| = \sqrt{I'^2_a + I''^2_a} \quad \text{и т. д.}$$

Найденные значения фазных и линейных токов записывают в табл. 4.7.

Т а б л и ц а 4.6

**Расчетные задания для исследования трехфазной цепи при соединении приемников треугольником ( $U_{\Delta} = 220 \text{ В}$ )**

№ п/п	Сопротивление фаз приемников, Ом			№ п/п	Сопротивление фаз приемников, Ом			№ п/п	Сопротивление фаз приемников, Ом		
	$R_{ab}$	$R_{bc}$	$R_{ca}$		$R_{ab}$	$R_{bc}$	$R_{ca}$		$R_{ab}$	$R_{bc}$	$R_{ca}$
1	548	640	759	11	759	640	548	21	640	759	548
2	950	1285	1950	12	1950	1285	950	22	1285	1950	950
3	548	759	950	13	3770	1950	1285	23	1285	1950	3770
4	1285	548	759	14	1950	3770	1950	24	1950	3770	950
5	1950	759	548	15	1285	1950	3770	25	1285	950	3770
6	759	548	1285	16	759	1285	1950	26	950	3770	1950
7	548	759	1950	17	3770	1285	1285	27	3770	1285	950
8	1950	548	759	18	1950	1950	950	28	950	3770	1950
9	950	759	548	19	3770	950	3770	29	1950	950	3770
10	759	548	1950	20	950	1285	3770	30	3770	1985	1285

Т а б л и ц а 4.7

**Результаты расчетов трехфазной цепи при соединении приемников треугольником**

Исходные данные: $U_{\Delta} = 220 \text{ В}$ , $R_{ab} = \dots \text{Ом}$ , $R_{bc} = \dots \text{Ом}$ , $R_{ca} = \dots \text{Ом}$						
Схема соединения	Расчетные величины					
	Фазные токи, А			Линейные токи, А		
	$I_{ab}$	$I_{bc}$	$I_{ca}$	$I_a$	$I_b$	$I_c$
$\Delta$						

## Проведение измерений в цепи и обработка результатов измерений

Схема исследования цепи при соединении фаз приемников треугольником представлена на рис. 4.8. Схема включения блоков 60-105, 68-100 и 68-200 остается той же, что и при соединении фаз звездой (рис. 4.4). Последовательно с резисторами фаз приемника (блок 67-142) включают амперметры блока 68-117 или дополнительные амперметры. Сопротивления фазных групп устанавливают не менее 950 Ом, чтобы избежать перегрева блока 67-142. На источнике питания устанавливают линейное напряжение равное 220 В.

Проводят измерения при равномерной и неравномерной нагрузках. Процедура измерений та же, что и при соединении звездой. Данные измерений записывают в табл. 4.8.

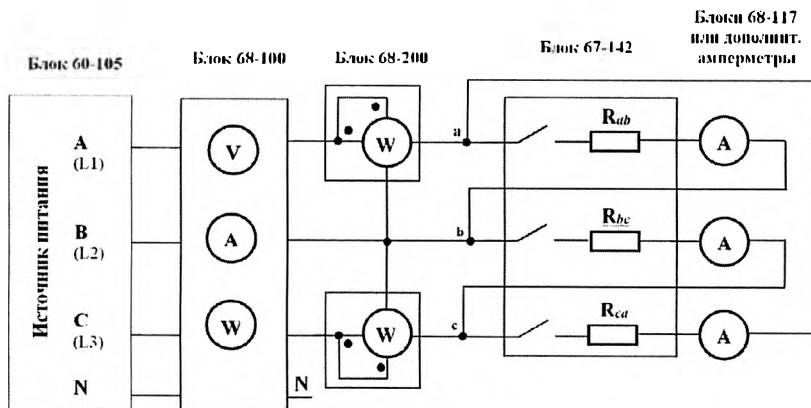


Рис. 4.8. Принципиальная схема трехфазной цепи звезда источника – треугольник нагрузки при измерении методом двух ваттметров

**Результаты измерений в трехфазной цепи при соединении  
приемников треугольником**

Вид нагрузки	Напряжения, В			Токи, А						Мощности, Вт	
	линейные			линейные			фазные			Вт	
	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$I_{ab}$	$I_{bc}$	$I_{ca}$	$P'$	$P''$
Равномерная											
Неравномерная											
Обрыв фазы											
Обрыв провода*											

\* Измерения проводят по указанию преподавателя.

В табл. 4.8 записывают только линейные напряжения, так как при соединении приемников треугольником линейные и фазные напряжения на его зажимах равны.

По указанию преподавателя может быть осуществлен обрыв одной из фаз приемника или обрыв линейного провода (рис. 4.9).

По данным лабораторных измерений выполняют ряд вычислений, результаты которых записывают в табл. 4.9:

1. Вычисляют отношения линейных и фазных токов. При равномерной нагрузке, когда фазы приемника соединены треугольником, отношение токов  $I_s / I_{\phi} = \sqrt{3} = 1,73$  для всех линейных и фазных токов. При неравномерной нагрузке эти отношения могут значительно отличаться от 1,73.

2. Сопротивления фаз приемника вычисляют с учетом того, что приемник чисто активный, по формуле:

$$R_{\phi} = U_{\phi} / I_{\phi} \quad (R_{ab} = U_{ab} / I_{ab} \text{ и т.д.}). \quad (18)$$

3. Мощность отдельных фаз вычисляют по формуле:

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi}, \quad (19)$$

так как для чисто активного приемника  $\cos \varphi = 1$ , например,  $P_{ab} = U_{ab} I_{ab}$  и т.д. Мощность трехфазного приемника равна сумме фазных мощностей

$$P = \Sigma P_{\phi} = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}. \quad (20)$$

Фазную мощность и их сумму вычисляют для всех опытов.

Для случая равномерной нагрузки, когда  $P_{ab} = P_{bc} = P_{ca}$ , мощность трехфазного приемника находят по формулам:

$$P = 3P_{\phi}; P = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi. \quad (21)$$

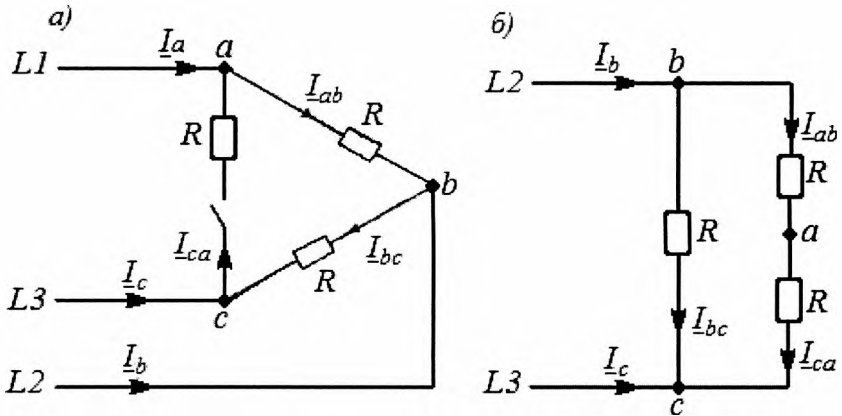


Рис. 4.9. Схемы трехфазного приемника при соединении фаз треугольником в аварийных режимах:  
а – обрыв фазы, б – обрыв линейного провода



Т а б л и ц а 4.9

**Результаты вычислений в трехфазной цепи при соединении  
приемников треугольником**

Вид нагрузки	Отношения токов			Сопротивления фаз приемника, Ом			Мощности, Вт						
							фазные			трехфазной цепи			
	$\frac{I_a}{I_{ab}}$	$\frac{I_b}{I_{ab}}$	$\frac{I_c}{I_{ab}}$	$R_{ab}$	$R_{bc}$	$R_{ca}$	$P_{ab}$	$P_{bc}$	$P_{ca}$	$\Sigma P_{\phi}$	$3P_{\phi}$	$\sqrt{3}U_L I_L$	$P' + P''$
Равномерная													
Неравномерная											—	—	
Обрыв фазы											—	—	
Обрыв провода											—	—	

При равномерной нагрузке и точных измерениях все способы вычисления мощности трехфазного приемника должны дать одинаковый результат.

Кроме того, мощность трехфазного приемника в трехпроводной цепи определяют по методу двух ваттметров:

$$P = P' + P'' \quad (22)$$

**Указания по построению векторных диаграмм**

Построение векторных диаграмм напряжений и токов (рис. 4.10) при соединении приемников треугольником начинают с построения векторной диаграммы напряжений. Поскольку система фазных (линейных) напряжений  $\underline{U}_{ab}$ ,  $\underline{U}_{bc}$ ,  $\underline{U}_{ca}$  принимается симметричной, то ее можно на векторной диаграмме представить симметричной трехлучевой звездой, аналогично векторной диаграмме фазных напряжений источника при соединении звездой. Для удобства построения считают, что начальная фаза напряжений  $\underline{U}_{ab}$  равна нулю, при этом напряжение  $\underline{U}_{ab}$  на векторной диаграмме изображают

вертикальным вектором, совпадающим с положительным направлением оси вещественных на комплексной плоскости, а векторы  $\underline{U}_{bc}$  и  $\underline{U}_{ca}$ , изображающие соответствующие напряжения, будут сдвинуты относительно  $\underline{U}_{ab}$  на угол  $2\pi/3$ .

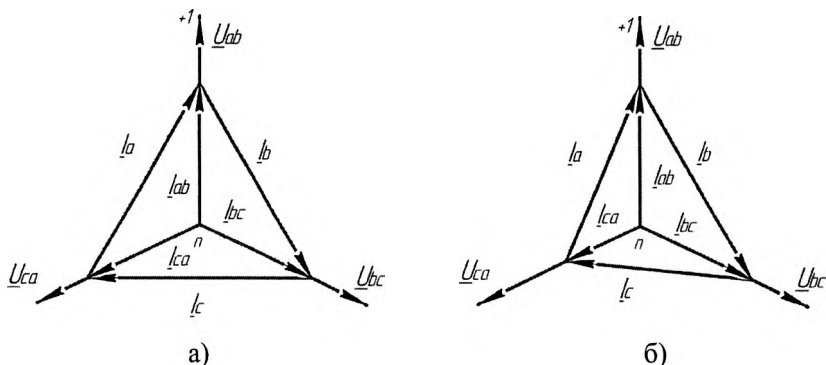


Рис. 4.10. Векторные диаграммы напряжений и токов при соединении приемников треугольником:

*а* – при равномерной нагрузке, *б* – при неравномерной нагрузке

Построение векторной диаграммы токов начинают с построения векторов фазных токов  $\underline{I}_{ab}$ ,  $\underline{I}_{bc}$ ,  $\underline{I}_{ca}$ . Так как нагрузка чисто активная (частный случай), то фазные токи совпадают по фазе с фазными напряжениями, как при равномерной, так и неравномерной нагрузках. Векторы линейных токов строят на основании первого закона Кирхгофа (см. уравнения). Система линейных токов (17)  $\underline{I}_a$ ,  $\underline{I}_b$ ,  $\underline{I}_c$  образует замкнутый треугольник: равносторонний – при равномерной нагрузке (рис. 4.10, *а*) и произвольной формы – при неравномерной нагрузке (рис. 4.10, *б*).

### Аварийные режимы

Обрыв фазы приемника, например, фазы *са* (рис. 4.9, *а*, тумблеры фазы на блоке активной нагрузки устанавливают в

положение «off»). При этом ток в этой фазе  $I_{ca} = 0$ . Токи  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  в других фазах не изменяются ни по значению, ни по фазе, так как фазные напряжения и сопротивления фаз остаются неизменными.

Линейные токи будут равны:

$$I_a = I_{ab} - I_{ca} = I_{ab}; \quad I_c = I_{ca} - I_{bc} = -I_{bc}; \quad I_b = I_{bc} - I_{ab}.$$

Из этих равенств следует, что линейный ток  $\underline{I}_b$  остается равным току в исходном режиме, а токи  $\underline{I}_a$  и  $\underline{I}_c$  по значению становятся равными фазному току, то есть уменьшаются в  $\sqrt{3}$  раз. Векторная диаграмма токов построена на рис. 4.11, а и отличается от векторной диаграммы на рис. 4.10,а тем, что ток  $\underline{I}_{ca} = 0$  и трехлучевая звезда фазных токов переходит в двухлучевую несимметричную звезду.

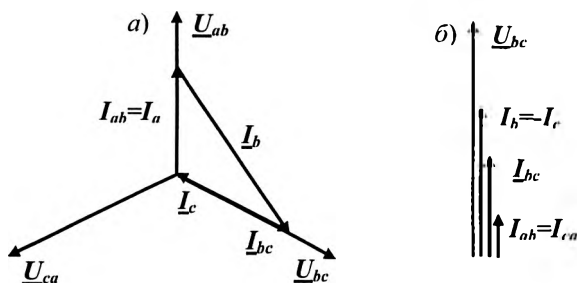


Рис. 4.11. Векторные диаграммы напряжений и токов для аварийных режимов при соединении приемников треугольником:

а – обрыв фазы; б – обрыв линейного провода

*Обрыв линейного провода*, например,  $L1$  (рис. 4.9,б). В этом случае трехфазная цепь преобразуется в однофазную. Однофазный приемник имеет две параллельные ветви. Одна ветвь образована фазой  $bc$ , а вторая – последовательно соединенными фазами  $ab$  и  $ca$ . На эти параллельные ветви подано однофазное напряжение  $\underline{U}_{bc}$ , поэтому для фазы  $bc$  условия не изменились и ток в ней остается равным току в исходном режиме. В фазах  $ab$  и  $ca$  токи  $\underline{I}_{ab}$  и  $\underline{I}_{ca}$  совпадают по фазе с током  $\underline{I}_{bc}$ , т.к. они определяются тем же

напряжением  $\underline{U}_{bc}$ , а сопротивление всех фаз приемника активное. По значению токи  $\underline{I}_{ab}$  и  $\underline{I}_{ca}$  в 2 раза меньше тока  $\underline{I}_{bc}$ , так как эти фазы соединены последовательно:

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{R}; \quad \underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{bc}}{2R}.$$

Векторная диаграмма для этого аварийного режима представлена на рис. 4.11,б, причем для удобства ее построения вектор линейного напряжения  $\underline{U}_{bc}$  проведен вертикально. Векторы токов  $\underline{I}_{bc}, \underline{I}_b, \underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca}$  совпадают по фазе с напряжением  $\underline{U}_{bc}$ . По первому закону Кирхгофа линейный ток  $\underline{I}_b = \underline{I}_{bc} + \underline{I}_{ab} = 1,5\underline{I}_{bc}$ , т.е. линейный ток  $\underline{I}_b$  в  $\sqrt{3}/1,5 = 1,15$  раза стал меньше по сравнению с током в исходном режиме. Ток  $\underline{I}_c$  равен току  $\underline{I}_b$  по значению и противоположен по фазе.

#### 4.4. Работа с виртуальными приборами

На рис. 4.12 представлена схема соединений трехфазной цепи звезда источника – звезда нагрузки при измерении мощности методом двух ваттметров с виртуальными приборами. Между источником и нагрузкой включен многоканальный блок ввода-вывода 68-500. В данном примере подключены каналы мониторинга  $V1, I1, I2$  и  $V3, I3$ . К блоку 68-500 через специальное устройство можно подключить кабель USB для соединения с компьютером. На компьютер могут быть выведены показания виртуальных приборов и круговые диаграммы исследуемой цепи.

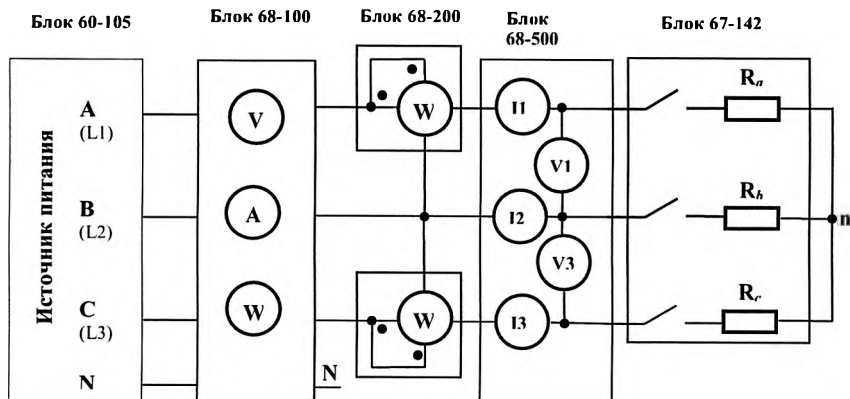


Рис. 4.12. Схема соединений трехфазной цепи звезда источника – звезда нагрузки при измерении методом двух ваттметров с виртуальными приборами

## 4.5. Программа работы

### Исследование трехфазной цепи при соединении электроприемников звездой

1. На основании задания произведите все необходимые расчеты, результаты расчета запишите в табл. 4.3.
2. Соберите трехфазную цепь при соединении приемников звездой в соответствии с электрической схемой, приведенной на рис. 4.2.
3. Включите выключатель и установите равномерную нагрузку (по указанию преподавателя) в четырехпроводной цепи.
4. Измерьте все величины при равномерной нагрузке в четырехпроводной и трехпроводной цепи. Результаты измерений запишите в табл. 4.4.
5. Создайте неравномерную нагрузку в четырехпроводной цепи, причем установите такие сопротивления фаз приемника, при которых

токи в фазах будут равны токам в расчетном задании (табл. 4.2). Измерьте все величины, указанные в табл. 4.4, и запишите в неё результаты измерений.

6. Не изменяя сопротивлений фаз электроприемника, измерьте те же величины в трехпроводной цепи.

7. По указанию преподавателя создайте в цепи аварийные режимы, измерьте все величины, которые измеряли в четырех - и трехпроводной цепях, и результаты измерений запишите в табл. 4.4.

8. По результатам измерений вычислите и запишите в табл. 4.5 все величины, указанные в ней.

9. Постройте векторные диаграммы напряжений и токов для всех исследованных режимов.

10. Запишите основные технические данные приборов.

11. Выполните анализ полученных данных, в котором проведите сравнение теоретических и опытных соотношений между фазными и линейными напряжениями; расчетных и опытных значений тока  $I_N$ ; значений мощностей, вычисленных и измеренных; значений мощностей, полученных разными методами; сделайте вывод о назначении нейтрального провода.

### **Исследование трехфазной цепи при соединении электроприемников треугольником**

1. На основании задания произведите все необходимые расчеты, результаты расчета запишите в табл. 4.7.

2. Соберите трехфазную цепь при соединении электроприемников треугольником в соответствии с электрической схемой, приведенной на рис. 4.8.

3. Включите выключатель питания и установите равномерную нагрузку (по указанию преподавателя).

4. Измерьте все величины при равномерной нагрузке. Результаты измерений запишите в табл. 4.8.

5. Создайте неравномерную нагрузку, причем установите такие

сопротивления фаз приемника, при которых токи в фазах будут равны токам в расчетном задании (табл. 4.7). Измерьте все величины, указанные в табл. 4.8, и запишите в неё результаты измерений.

6. По указанию преподавателя создайте в цепи аварийные режимы. Измерьте и запишите все величины, указанные в табл. 4.8.

7. Обработайте результаты всех измерений и запишите их в табл. 4.9.

8. Постройте векторные диаграммы напряжений и токов для всех исследованных режимов.

9. Запишите основные технические данные приборов.

10. Выполните анализ полученных данных, в котором проведите сравнение теоретических и опытных соотношений между фазными и линейными токами; значений мощностей, вычисленных и измеренных.

#### **4.6. Контрольные вопросы**

1. Как соединить однофазные приемники звездой (треугольником)?

2. Покажите нейтральную точку приемника.

3. Как собрать четырехпроводную или трехпроводную цепь?

4. Какие напряжения и токи называют фазными и линейными и как их измерить при различных способах соединения электроприемников?

5. Какую нагрузку в трехфазной цепи называют равномерной (неравномерной)? Как создать равномерную (неравномерную) нагрузку?

6. При каких условиях применим метод двух ваттметров при измерении мощности трехфазного приемника?

7. Для измерения каких токов (линейных или фазных) при соединении приемников треугольником следует взять амперметр с большим пределом измерения?

## Р а б о т а 5

### ИСПЫТАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 5.1. Общие указания

Цель работы – формирование знаний об устройстве, системах возбуждения и принципе действия генератора постоянного тока (ГПТ), приобретение практических навыков в сборке электрических цепей, опытным исследованием и построении основных характеристик генератора, а также экспериментальное подтверждение теоретических знаний о ГПТ.

Работа ГПТ в установившихся режимах определяется уравнением

$$U = E_{\text{я}} - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{с}}), \quad (5.1)$$

где  $U$  – напряжение генератора;  $E_{\text{я}}$  – электродвижущая сила якоря;  $I_{\text{я}}$  – ток якоря;  $R_{\text{я}}$  – сопротивление цепи якоря, в дальнейшем – сопротивление якоря;  $R_{\text{с}}$  – сопротивление последовательной обмотки возбуждения генератора смешанного возбуждения.

В свою очередь

$$E_{\text{я}} = c_E n \Phi, \quad (5.2)$$

где  $c_E$  – коэффициент, значение которого зависит от конструкции ГПТ;  $n$  – частота вращения якоря;  $\Phi$  магнитный поток.

В лаборатории проводят испытания ГПТ независимого, параллельного и смешанного возбуждения. Для испытаний собирают электрические цепи в соответствии со схемами, изображенными на рис. 5.1.

Для возбуждения генератора параллельного и смешанного возбуждения необходимо выполнение трех условий:

1. Наличие остаточного магнитного потока  $\Phi_{\text{ост}}$ , который при вращении якоря генератора индуцирует в его обмотке остаточную ЭДС  $E_{\text{ост}}$ .

2. Ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  генератора, обусловленный ЭДС  $E_{\text{ост}}$ , должен создавать такой магнитный поток  $\Phi_0$ , чтобы результирующий



магнитный поток  $\Phi = \Phi_0 + \Phi_{ост}$  увеличивался.

3. Сопротивление цепи возбуждения ГПТ, равное сумме сопротивлений обмотки возбуждения  $R_B$ , обмотки якоря  $R_{\text{я}}$  и регулировочного реостата  $R_{\text{рв}}$ , должно быть меньше некоторого критического значения  $R_{\text{кр}}$ :  $R_B + R_{\text{я}} + R_{\text{рв}} < R_{\text{кр}}$ .

Возбуждение генератора проводят на холостом ходу (нагрузка отключена). Выполнение условий возбуждения проверяют по показанию вольтметра, подключенного к якору генератора.

## 5.2. Снятие характеристик генератора

Используемое оборудование:

1. Универсальный источник питания 60-105.
2. Машина постоянного тока 63-120.
3. Блок управления моментом и скоростью 68-441.
4. Механическая нагрузка (динамометр) или приводной ДПТ 67-502.
5. Коммутируемый блок резисторов 67-142.
6. Один вольтметр и один амперметр постоянного тока 68-110.
7. Набор соединительных проводов 68-800.

Паспортные данные ГПТ:

Номинальное напряжение  $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ .

Ток обмотки якоря  $I_{\text{яном}} = 1,2 \text{ А}$ .

Ток возбуждения  $I_{\text{вном}} = 0,2 \text{ А}$ .

Частота вращения  $n_{\text{ном}} = 3000 \text{ об/мин}$ .

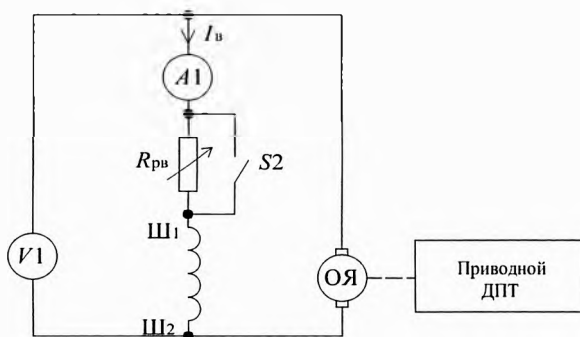


Рис. 5.1, а. Схема ГПТ параллельного возбуждения для снятия характеристики холостого хода

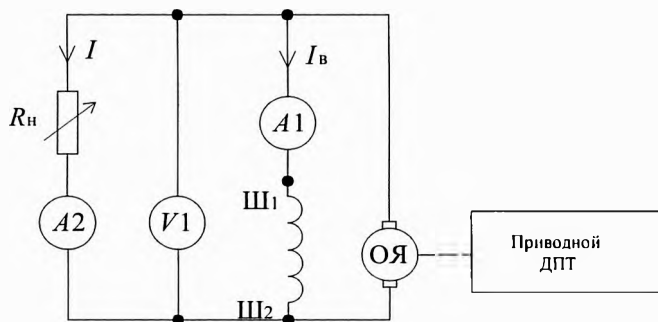


Рис. 5.1, б. Схема ГПТ параллельного возбуждения для снятия внешней характеристики

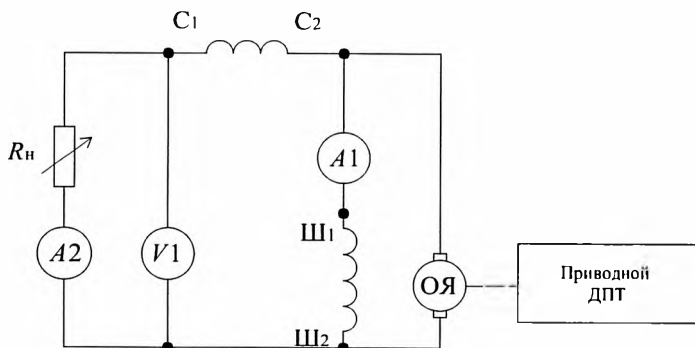


Рис. 5.1, в. Схема ГПТ смешанного возбуждения

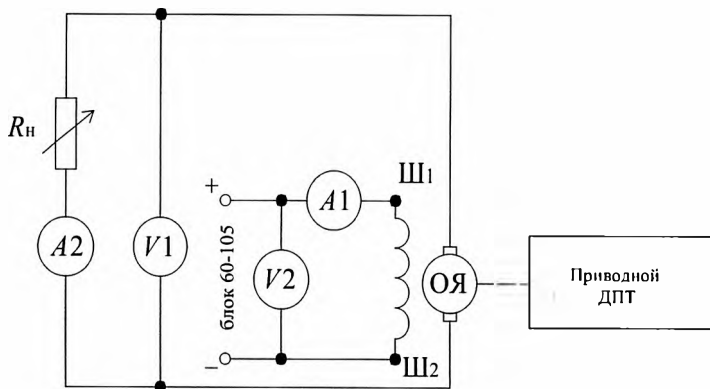


Рис. 5.1, г. Схема ГПТ независимого возбуждения

*Характеристика холостого хода* – зависимость напряжения генератора от тока возбуждения при отсутствии нагрузки и постоянной частоте вращения, т. е.  $U_0 = f(I_{\text{в}})$  при  $n = \text{const}$  и  $I = 0$ .

Выключают все выключатели источника питания, относящиеся к трехфазной цепи. Собирают цепь в соответствии со схемой рис. 5.1, а. В качестве реостата  $R_{\text{рн}}$ , предназначенного для изменения тока возбуждения  $I_{\text{в}}$ , используют блок резисторов 67-142 при параллельном включении всех резисторов (рис. 5.2).

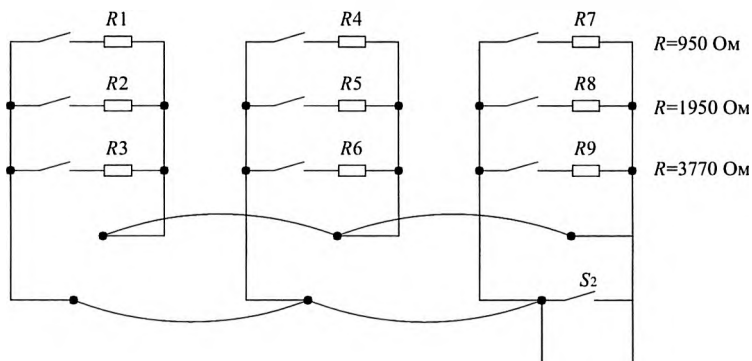


Рис. 5.2. Схема включения коммутируемого блока резисторов

Присоединяют приводной ДПТ к блоку 68-441 управления скоростью вращения. Для перевода блока в режим управления скоростью вращения необходимо соединить силовой кабель приводного ДПТ со штекером «speed» блока 68-441 (левый штекер). На панели блока 68-441 устанавливают переключатель «demand voltage» в положение «+ve». Регуляторы «constant speed or torque» и «torque proportional to speed» поворачивают против часовой стрелки до упора. Регуляторы напряжения универсального источника питания 60-105 поворачивают в положение 0 %.

Якорь ГПТ приводят во вращение следующим образом. Включают (вверх) трехфазный выключатель универсального источника питания 60 - 105. Загорается (зеленый) индикатор питания установки. С помощью блока 68-441 управления скоростью устанавливают частоту вращения приводного ДПТ равной 3000 об/мин. Эту частоту вращения поддерживают в дальнейшем постоянной.

При отключенном резисторе  $R_{рв}$  записывают в табл. 5.1 показание вольтметра  $V1$ . Это остаточная ЭДС  $E_{ост}$ . Затем обмотку возбуждения генератора подключают к обмотке якоря путем

включения резисторов  $R_3$  и  $R_6$ . Если при этом ЭДС якоря  $E_0$  будет уменьшаться по сравнению с  $E_{ост.}$ , то самовозбуждение генератора не произойдет. Необходимо поменять местами провода, присоединенные к зажимам  $E1$  (Ш1) и  $E2$  (Ш2) обмотки возбуждения.

Характеристику холостого хода снимают в следующем порядке. Для снятия восходящей ветви поочередно включают резисторы в порядке, указанном в табл. 5.1. Измеряют ток возбуждения  $I_B$  и напряжение  $U_0$  на обмотке якоря. Последнюю точку снимают, когда все выключатели, включая  $S2$ , включены. Нисходящую ветвь снимают в обратном порядке, т.е. при уменьшении тока возбуждения.

Т а б л и ц а 5.1

**Характеристика холостого хода ГПТ при  $n = \text{const}$  и  $I = 0$**

№ п/п	$R_{pv}$ , Ом	Включенные резисторы	$I_B$ , А	$I_{B*}$	$U_0$			
					восходящая ветвь		нисходящая ветвь	
					В	$U_{0*}$	В	$U_{0*}$
1	$\infty$	все выключены						
2	1885	$R_3$ и $R_6$						
3	1285	$R_2$ и $R_3$						
4	950	$R_1$						
5	640	$R_2$						
6	317	$R_1, R_4$ и $R_7$						
7	253	$R_1, R_4, R_7, R_3, R_6$ и $R_8$						
8	213	все, кроме $R_3$ , $R_6$ и $R_8$						
9	182	все						
10	0	включен $S2$						

По данным испытаний строят характеристику холостого хода ГПТ – графическую зависимость  $U_{0*} = f(I_{B*})$  (восходящую и нисходящую ветви, рис. 5.3.), где

$$I_{B*} = \frac{I_B}{I_{B\text{ном}}}; \quad U_{0*} = \frac{U_0}{U_{0\text{ном}}};$$

$I_{B\text{ном}}$  – номинальный ток возбуждения (при  $U_0 = U_{0\text{ном}}$ ).

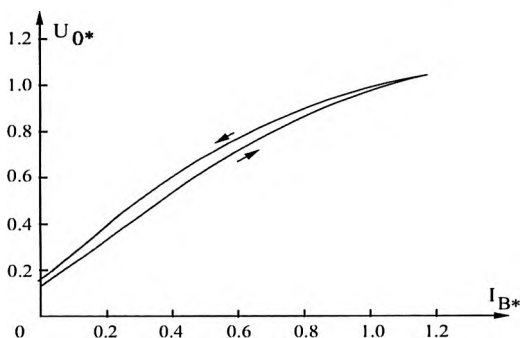


Рис. 5.3. Характеристика холостого хода

Если на этом эксперимент заканчивается, то приводной ДПТ останавливают, повернув регулятор «constant speed or torque» против часовой стрелки до упора. Включают питание приводного ДПТ кнопкой «dynamometer power», при этом красная лампочка на блоке управления моментом нагрузки и скоростью привода 68 - 441 погасает. Отключают питание блоков и трехфазное питание установки.

#### *Внешняя характеристика ГПТ.*

Собирают электрическую цепь в соответствии со схемой рис. 5.1,б. В качестве нагрузки (электроприемника) используют блок резисторов 67 - 142.

Внешняя характеристика показывает взаимную связь между электрическими величинами, относящимися к той части цепи, которая является внешней по отношению к генератору, т.е. между

напряжением и током электроприемника –  $U_{я} = f(I)$  при  $R_{пр} = 0$ ,  $n = const$ .

Приведение якоря генератора во вращение описано выше (см. характеристику холостого хода).

Снятие внешней характеристики начинают с режима холостого хода, когда ток электроприемника  $I = 0$  ( $R_H = \infty$ ). Затем увеличивают ток  $I$ , изменяя сопротивление блоков резисторов. Данные изменений записывают в табл. 5.2.

Т а б л и ц а 5.2

**Внешняя характеристика ГПТ параллельного возбуждения при  $n = const$  и  $R_{пр} = 0$**

№ п/п	Включенные резисторы	$I_B, A$	$I, A$	$U_{я}, B$	$I.$	$U_{я.}$	$\Delta U, \%$
1	все выключены						
2	$R_1$ и $R_2$						
3	$R_1$						
4	$R_2$						
5	$R_1, R_4, R_7$						
6	все включены						

По данным измерений строят внешнюю характеристику – графическую зависимость  $U_{я.} = f(I.)$ , где

$$U_{я.} = \frac{U_{*}}{U_{ном}}; I. = \frac{I}{I_{ном}}; \Delta U = \frac{U_{*}}{U_{ном}} - 100, \%$$

Аналогично снимают внешние характеристики ГПТ при смешанном и независимом возбуждении. Схемы представлены на рис. 5.1,в и 5.1,г, соответственно. Данные измерений записывают в таблицы вида табл. 5.2.

### 5.3. Программа работы

1. Запишите номинальные данные генератора.

2. Соберите электрическую цепь генератора в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5.1, а (последовательная обмотка  $C1 (D1) - C2 (D2)$  не включается).

3. Под руководством преподавателя произведите пуск приводного ДПТ.

4. Проверьте выполнение условий самовозбуждения генератора. Если они не выполнены, то добейтесь их выполнения.

5. Снимите характеристику холостого хода генератора. Результаты измерений запишите в табл. 5.1.

Постройте характеристику холостого хода, как показано на рис. 5.3.

6. Снимите внешние характеристики ГПТ параллельного, смешанного и независимого способов возбуждения, собирая цепи в соответствии со схемами рис. 5.1. Результаты измерений запишите в табл. 5.2.

Постройте внешние характеристики в относительных единицах. Определите изменение напряжения  $\Delta u$  для каждого способа возбуждения.

7. Запишите технические данные измерительных приборов.

8. Выполните анализ полученных результатов, в котором отметьте соответствие полученных и теоретических характеристик; оцените значение остаточной ЭДС  $E_{ост}$  в процентах от  $U_{ном}$ , сравните эксплуатационные характеристики генератора с различными системами возбуждения и дайте им соответствующую оценку, учитывая, что напряжение на зажимах электроприемника не должно отличаться больше, чем на  $\pm 5 \%$  от номинального значения.



#### **5.4. Контрольные вопросы**

1. Как классифицируют ГПТ по способам возбуждения?
2. Какие основные части ГПТ изображены на схеме?
3. От каких физических величин зависит ЭДС генератора?
4. Назовите условия самовозбуждения ГПТ. Как проверить их выполнение?
5. Что собой представляют характеристики холостого хода, внешняя и как их снимают?
6. Как изменяют ток нагрузки и ток возбуждения при снятии характеристик ГПТ?

## Р а б о т а 6

### ИСПЫТАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 6.1. Общие указания

Цель работы – формирование знаний об устройстве, принципе действия, способах пуска и регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока (ДПТ), а также приобретение практических навыков в сборке электрических цепей, опытным определении основных эксплуатационных характеристик ДПТ и обработке экспериментальных данных.

Работ ДПТ в установившемся режиме определяют уравнением напряжения

$$U = E_a + I_a(R_a + R_c), \quad (6.1)$$

и уравнением равновесия моментов

$$M = M_0 + M_2, \quad (6.2)$$

где  $U$  – напряжение на зажимах двигателя;  $E_a$  – ЭДС якоря;  $I_a$  – ток якоря;  $R_a$  – сопротивление якоря;  $R_c$  – сопротивление последовательной обмотки возбуждения ДПТ смешанного возбуждения;  $M$  – вращающий электромагнитный момент;  $M_0$  – момент холостого хода;  $M_2$  – полезный момент на валу двигателя.

Вращающий электромагнитный момент ДПТ определяется равенством

$$M = c_m I_a \Phi, \quad (6.3)$$

где  $c_m$  – постоянная, зависящая от конструкции ДПТ;  $\Phi$  – результирующий магнитный поток двигателя.

В работе проводят испытания двигателя как при параллельном, так и при смешанном возбуждении. Паспортные данные ДПТ смешанного возбуждения приведены в табличках, прикрепленных к приборным стойкам лабораторных стендов.

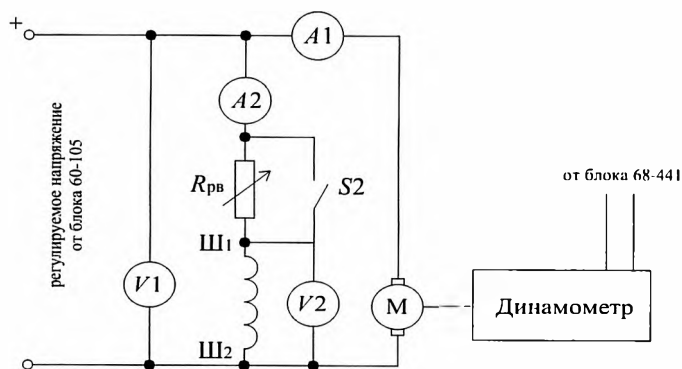


Рис. 6.1. Схема ДПТ параллельного возбуждения

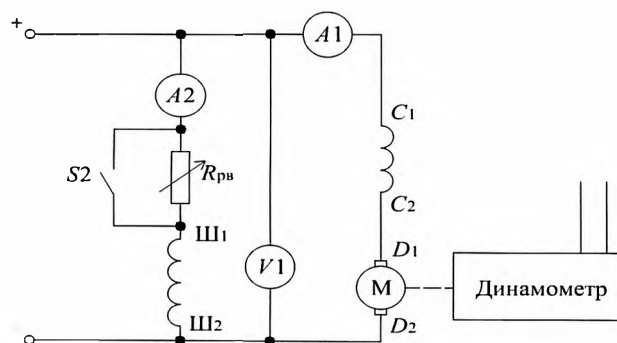


Рис. 6.2. Схема ДПТ смешанного возбуждения

Используются блоки:

1. Коммутируемый блок резисторов при параллельном соединении всех резисторов (блок 67 - 142).
2. Блок вольтметров и амперметров (блок 68 - 110).
3. Блок источника питания (блок 60 - 105).
4. Блок управления тормозным моментом и частотой вращения (блок 68 - 441).
5. Механическая нагрузка (динамометр – блок 67 - 502).

Схема соединения деталей блоков показана на рис. 6.1. и рис. 6.2. Амперметр  $A1$  измеряет ток  $I_{\text{я}}$  обмотки якоря, а амперметр  $A2$  – ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ . Вольтметр  $V1$  измеряет напряжение на обмотке якоря. Блок резисторов  $R_{\text{рв}}$  состоит из 9 резисторов, включенных параллельно (рис. 5.2.). Каждый из 9 резисторов имеет свой выключатель. Если все резисторы включены, то сопротивление блока равно 182 Ом. При включении только  $R1$  ( $R4$ ,  $R7$ ) сопротивление составляет 950 Ом.

## 6.2. Пуск двигателя постоянного тока

Из уравнения (6.1) следует, что ток якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{с}}}. \quad (6.4)$$

В момент пуска двигателя  $n = 0$  и  $E_{\text{я}} = 0$ , следовательно, пусковой ток при прямом включении двигателя в сеть постоянного тока определяется равенством

$$I_{\text{япуск}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{с}}}.$$

Для современных ДПТ при номинальной частоте вращения  $n_{\text{ном}}$  и номинальной нагрузке (полезном номинальном моменте на валу  $M_{2\text{ном}}$ ) ЭДС якоря составляет 95...97 % от номинального напряжения  $U_{\text{ном}}$  двигателя, т. е.  $E_{\text{я}} = (0,95...0,97)U_{\text{ном}}$ . Следовательно,  $I_{\text{яном}}(R_{\text{я}} + R_{\text{с}}) = (0,05...0,03)U_{\text{ном}}$  (см. уравнение (6.1)). Поэтому при прямом включении двигателя пусковой ток  $I_{\text{япуск}}$  может в 20...30 раз превысить номинальное значение тока  $I_{\text{яном}}$ . Одним из способов ограничения пускового тока является включение пускового реостата  $R_{\text{п}}$  последовательно с обмоткой якоря. Тогда пусковой ток якоря

$$I_{\text{япуск}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{с}} + R_{\text{п}}}.$$

При пуске желательно иметь возможно больший вращающий момент. Из уравнения (6.3) следует, что при определенном значении пускового тока наибольший момент можно получить при наибольшем

значении магнитного потока  $\Phi$ , т. е. при максимальном значении тока возбуждения. Для этого при пуске сопротивление реостата  $R_{pi}$  в цепи возбуждения должно быть равно нулю.

Перед пуском двигателя надо проверить и установить в исходное положение следующие блоки:

1. Замкнуть выключатель  $S2$  на блоке резисторов (67 - 142).
2. Поставить в нулевое положение рукоятку регулятора напряжения (блок 60 - 105). Отключить выключатель трехфазного напряжения.
3. На блоке управления моментом и скоростью (блок 68 - 441) необходимо:

- используя зеленую кнопку, отключить главный выключатель блока;

- установить два вращающихся регулятора в крайнее положение, повернув их против часовой стрелки;

- для перевода блока 68 - 441 в режим управления моментом нагрузки необходимо соединить силовой кабель механической нагрузки (динамометр – блок 67 - 502) со штекером «torque» блока 68 - 441 (правый штекер);

- установить выключатель (переключатель) необходимого напряжения в положение +ve;

- нажать кнопку «power», чтобы она светилась зеленым светом;

- нажать кнопку «dynamometer power» так, чтобы соседняя красная лампочка загорелась.

После этого на блоке «Источник питания» (блок 60 - 105) включают выключатель трехфазной сети. Выключатель  $S2$  замыкают, чтобы сопротивление блока было равно нулю, а ток возбуждения и пусковой момент были максимальными.

С помощью вращаемого регулятора напряжения повышают напряжение от 0 до  $U_{ном} = 220$  В, наблюдая по амперметру  $A1$ , чтобы пусковой ток не превышал номинального значения. Частота вращения якоря двигателя при этом должна быть около 3200 об/мин.

### 6.3. Снятие характеристик двигателя

*Характеристика холостого хода* – это зависимость частоты вращения  $n$  двигателя от тока возбуждения  $I_{\text{в}}$  при неизменном напряжении и отсутствии полезной нагрузки, т. е.  $n_0 = f(I_{\text{в}})$  при  $U = \text{const}$  и  $M_2 = 0$ .

В режиме холостого хода ток якоря  $I_{\text{я0}} = (0,08 \dots 0,1) I_{\text{ном}}$ , а вращающий момент  $M = M_0$ , (см. уравнение (6.2)).

Из (6.1) с учетом того, что  $E_{\text{я}} = c_E n \Phi$ , может быть получено выражение для частоты вращения

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{с}})}{c_E \Phi} \quad (6.5)$$

Из равенства (6.5) следует, что частота вращения обратно пропорциональна магнитному потоку  $\Phi$ , зависимость которого от тока возбуждения  $I_{\text{в}}$  определяется характеристикой намагничивания  $\Phi(I_{\text{в}})$ . Поэтому характеристика холостого хода имеет гиперболический характер (рис. 6.3).

При снятии характеристики холостого хода поддерживают напряжение  $U_{\text{я}} = \text{const}$  с помощью вращаемого регулятора напряжения, размыкают выключатель  $S2$  и изменяют ток возбуждения с помощью блока резисторов (67 - 142) от максимального значения, установленного при пуске двигателя, до того значения, при котором частота вращения достигнет значения примерно  $1,5 n_{\text{2ном}}$ . Результаты измерений и вычислений заносят в табл. 6.1.

Мощность  $P_0$  энергии, потребляемой двигателем в режиме холостого хода, и ток  $I_0$  холостого хода рассчитывают по формулам:

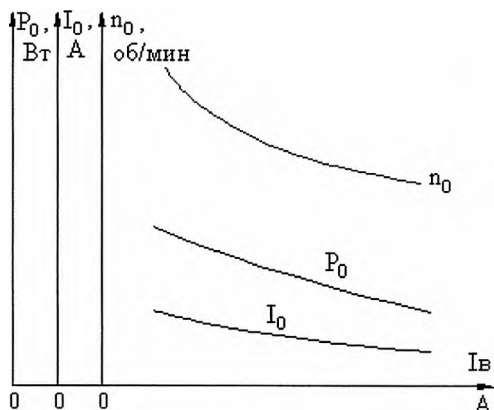
$$P_0 = U_{\text{я}} (I_{\text{я0}} + I_{\text{в}}); \quad I_0 = I_{\text{я0}} + I_{\text{в}}.$$

Т а б л и ц а 6.1

**Характеристики холостого хода ДПТ при  $U_n = 220$  В и  $M_2 = 0$**

№ п/п	Данные измерений			Результаты вычислений	
	$I_B$ , А	$I_{я0}$ , А	$n$ , об/мин	$P_0$ , Вт	$I_0$
1					
2					
3					
4					
5					
6					

По данным измерений и расчетов строят характеристики холостого хода (рис. 6.3), т.е. графические зависимости  $n$ ,  $I_0$ ,  $P_0 = f(I_B)$ .



**Рис. 6.3. Характеристики двигателя в режиме холостого хода**

*Рабочие характеристики ДПТ – зависимости частоты вращения  $n$ , полезного момента  $M_2$  на валу, тока якоря  $I_я$  и коэффициента*

полезного действия  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  при неизменных значениях напряжения на якоре и тока возбуждения двигателя, т. е.  $n$ ,  $M_2$ ,  $I_a$ ,  $\eta = f(P_2)$  при  $U = const$  и  $I_b = const$ .

При снятии рабочих характеристик после пуска ДПТ регулятором постоянного напряжения универсального источника питания (блок 60 - 105) устанавливают и поддерживают неизменным напряжение 220В. С помощью блока резисторов (блок 67 - 142) устанавливают постоянное значение тока возбуждения при частоте вращения около 3200 об/мин.

На панели управления моментом нагрузки (тормозным моментом) (блок 68 - 441) нажатием кнопки «dynamometer power» подают питание на динамометр, с помощью которого создают и изменяют тормозной момент на валу двигателя. При этом загорается красная лампочка.

**Внимание! Без вращения динамометра кнопку не нажимать.**

Регулятором «constant speed or torque» на панели блока 68 - 441 изменяют тормозной момент от минимума до 1,2 Н·м с шагом 0,1 Н·м или 0,2 Н·м.

Измеряют ток якоря  $I_a$ , ток возбуждения  $I_b$ , тормозной момент  $M_2$ , частоту вращения  $n$ . По результатам измерений вычисляют полезную мощность  $P_2$ , КПД двигателя  $\eta$ , мощность  $P_1$  электроэнергии, потребляемой двигателем из сети. Результаты измерений и вычислений заносят в табл. 6.2.

Расчетные формулы:

$$P_1 = U_a (I_a + I_b); P_2 = 0,105 M_2 n; \eta = \frac{P_2}{P_1},$$

$$P_{2*} = \frac{P_2}{P_{2ном}}, M_{2*} = \frac{M_2}{M_{2ном}}, I_{a*} = \frac{I_a}{I_{аном}}; n_* = \frac{n}{n_{ном}}.$$



Рабочие характеристики ДПТ при  $U_n = 220 \text{ В}$  и  $I_n = \dots \text{ А}$ 

№ п/п	Данные измерений					Результаты вычислений						
	$I_a$ , А	$I_b$ , А	$U_a$ , В	$M_2$ , Н·м	$n$ , об/мин	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\eta$ , %	$P_2^*$	$M_2^*$	$I_a^*$	$n^*$
1												
2												
3												
4												
5												
6												

По данным измерений и расчетов строят рабочие характеристики двигателя (рис. 6.4), т.е. графические зависимости  $I_a^*$ ,  $n^*$ ,  $\eta^*$ ,  $P_1^*$ ,  $M_2^* = f(P_2^*)$ .

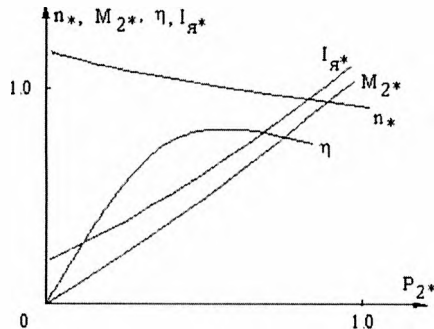


Рис. 6.4. Рабочие характеристики

## 6.4. Регулирование частоты вращения ДПТ

В работе исследуют два способа регулирования частоты

вращения ДПТ: изменением магнитного потока (тока возбуждения) и изменением напряжения. Изменение тока возбуждения осуществляют с помощью изменения сопротивления блока резисторов 67 - 142 в соответствии с табл. 5.1, а изменение напряжения – с помощью вращаемого регулятора напряжения блока источника питания. В обоих случаях устанавливают и поддерживают постоянное значение тормозного момента  $M_2$  (по указанию преподавателя). Данные измерений сводят в табл. 6.3.

Т а б л и ц а 6.3

**Регулирование частоты вращения ДПТ при  $M_2 = \dots \text{Н} \cdot \text{м}$**

а) при изменении тока возбуждения и  $U_{\text{я}} = 220\text{В} = \text{const}$

б) при изменении напряжения  $U_{\text{я}}$  и  $I_{\text{в}} = \dots \text{const}$

№ п/п	Данные измерений				Результаты вычислений					
	$I_{\text{я}}, \text{А}$	$I_{\text{в}}, \text{А}$	$U_{\text{я}}, \text{В}$	$n, \text{об/мин}$	$P_1, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	$\eta, \%$	$P_{1*}$	$P_{2*}$	$n_*$
1										
2										
3										
4										
5										
6										

Расчетные величины в табл. 6.3 определяют по формулам:

$$P_1 = U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}}), \quad P_2 = 0,105 M_2 n; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad P_{1*} = \frac{P_1}{P_{1\text{ном}}}, \quad P_{2*} = \frac{P_2}{P_{2\text{ном}}},$$

$$n_* = \frac{n}{n_{\text{ном}}}.$$

По данным измерений и расчетов строят рабочие характеристики двигателя, т.е. графические зависимости  $n_*$ ,  $\eta_*$ ,  $P_{1*} =$

$f(I_a)$  и  $n$ ,  $\eta$ ,  $P_1 = f(U_a)$ , соответственно.

## 6.5. Программа работы

1. Ознакомьтесь с номинальными данными двигателя постоянного тока.

2. Соберите электрическую цепь ДПТ параллельного возбуждения согласно схеме рис. 6.1.

3. После проверки цепи преподавателем проведите пробный пуск двигателя. Проверьте правильность отклонений стрелок измерительных приборов, проведите опыт изменения направления вращения двигателя, проверьте возможность регулирования частоты вращения и нагрузки ДПТ.

4. Снимите характеристику холостого хода. Результаты измерений и вычислений запишите в табл. 6.1. и постройте характеристики, вид которых показан на рис. 6.3.

5. Снимите рабочие характеристики ДПТ.

Результаты измерений запишите в табл. 6.2. Рассчитайте мощности  $P_1$  и  $P_2$ , КПД  $\eta$ . Постройте рабочие характеристики ДПТ параллельного возбуждения, вид которых показан на рис. 6.4.

6. Соберите электрическую цепь ДПТ смешанного возбуждения согласно схеме на рис. 6.2, и снимите рабочие характеристики (см. п. 5 программы работы).

7. Снимите регулировочные характеристики. Установите заданный преподавателем тормозной момент и поддерживайте его постоянным. Изменяйте ток возбуждения при  $U_a = \text{const}$ . Затем изменяйте напряжение  $U_a$  при  $I_b = \text{const}$ , как показано в пункте 6.4. Результаты измерений и расчета запишите в таблицу, аналогичную табл. 6.2. Постройте характеристики  $n$ ,  $I_a$ ,  $\eta = f(I_b)$  и  $n$ ,  $I_a$ ,  $\eta = f(U_a)$ .

8. Проведите анализ полученных результатов. В отчете отметьте соответствие вида полученных характеристик двигателя теоретическим характеристикам. По рабочим характеристикам дайте оценку изменения

частоты вращения при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной. Укажите и оцените значение номинального КПД со значением, указанным в паспорте. Укажите и оцените значения тока возбуждения и тока холостого хода, в процентах от номинального тока двигателя. Оцените способы регулирования частоты вращения ДПТ с экономической точки зрения (по значениям КПД).

### **6.6. Контрольные вопросы**

1. Какие способы возбуждения применяют в ДПТ?
2. Какие основные части ДПТ изображают на схемах? Покажите их.
3. Как осуществляют пуск ДПТ?
4. Как изменить направление вращения ДПТ?
5. Какую характеристику называют характеристикой холостого хода?
6. Какие характеристики называют рабочими характеристиками двигателя?
7. Как изменить ток якоря двигателя?
8. Как изменить тормозной (полезный) момент  $M_2$ ?
9. Какой реостат служит для изменения тока возбуждения?
10. Как снимают характеристику холостого хода, рабочие характеристики?
11. Как поддерживают напряжение  $U_a$  постоянным?

## Работа 7

### ИСПЫТАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

#### 7.1. Общие указания

Цель работы – формирование знаний об устройстве, назначении и методах испытания трансформатора, приобретение опыта творческой и исследовательской деятельности при определении основных параметров, характеризующих его эксплуатационные качества.

В лабораторной работе проводят испытание однофазного понижающего трансформатора двумя методами: методом непосредственной нагрузки и косвенным методом.

Перед сборкой электрических цепей для исследования трансформатора необходимо ознакомиться с его основными техническими данными, указанными в паспорте, чтобы правильно выбрать измерительные приборы и установить их пределы измерения. Если из паспортных данных известны номинальная мощность  $S_{\text{ном}}$  и номинальные напряжения  $U_{1\text{ном}}$  и  $U_{2\text{ном}}$ , то токи  $I_{1\text{ном}}$  и  $I_{2\text{ном}}$  в первичной и вторичной обмотках трансформатора определяют из соотношений

$$I_{1\text{ном}} \approx S_{\text{ном}} / U_{1\text{ном}}, I_{2\text{ном}} \approx S_{\text{ном}} / U_{2\text{ном}}.$$

Выбранные пределы измерений амперметров должны быть выше  $I_{1\text{ном}}$  и  $I_{2\text{ном}}$ , пределы измерений вольтметров выше  $U_{1\text{ном}}$  и  $U_{2\text{ном}}$  соответственно для первичных и вторичных цепей схемы включения трансформатора, приведенной на рис. 7.1.

#### 7.2. Испытание трансформатора методом непосредственной нагрузки

Метод позволяет опытным путем снять внешнюю характеристику трансформатора.

*Внешняя характеристика* – это зависимость  $U_2 = f(I_2)$  при

$U_1 = \text{const}$ ,  $\cos \varphi_2 = \text{const}$ ,  $f = 50$  Гц, где  $U_2$  – напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора;  $U_1$  – напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора  $I_2$  – ток нагрузки или ток во вторичной обмотке трансформатора.

Внешняя характеристика также может быть выражена зависимостью напряжения  $U_2$  от коэффициента нагрузки  $\beta$  при тех же условиях, где

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}}.$$

В этом же опыте определяют КПД трансформатора и изменение напряжения  $\Delta U_2$ .

Электрическая схема для проведения испытаний трансформатора приведена на рис. 7.1. Питание лабораторной установки производится от сети переменного тока напряжением 220 В, а для изменения напряжения, подводимого к первичной обмотке трансформатора, используют универсальный источник питания ИП (блок 60 - 105).

Блок 60 - 105 автоматически отключается в случае перегрузки по току. На источнике питания имеется кнопка «Аварийное отключение» для экстренного отключения питания в случае непредвиденных обстоятельств.

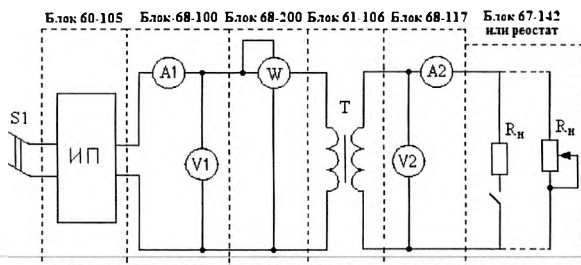


Рис. 7.1. Принципиальная электрическая схема для проведения опытов холостого хода и непосредственной нагрузки трансформатора

Однофазный трансформатор номинальной мощностью  $S_{\text{ном}} = 100 \text{ В} \cdot \text{А}$  размещен в блоке 61 - 106. Предусмотрена возможность использования другого трансформатора мощностью  $S_{\text{ном}} = 1000 \text{ В} \cdot \text{А}$ .

Измерение токов и напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора производят с использованием измерительных блоков 68 - 100 и 68 - 117 с многопредельными амперметром и вольтметром в каждом из них. Из имеющихся пределов измерений приборов: амперметра – 1 А, 5 А, 10 А, вольтметра – 50 В, 250 В, 500 В следует выбрать необходимые значения для первичной и вторичной цепей трансформатора.

Измерение токов и напряжений можно также осуществлять виртуальной измерительной системой 68 - 500 с использованием программного обеспечения 65 – 500 - *USB*. Можно воспользоваться и универсальным измерительным блоком 68 - 100 для измерения токов, напряжений, активной и реактивной мощностей.

Измерение мощности  $P_1$  электрической энергии, потребляемой трансформатором из сети, производят измерительным блоком 68 - 200. Следует иметь в виду, что пределы измерений тока в первичной обмотке трансформатора в режиме холостого хода и в режиме номинальной нагрузки различаются примерно на порядок. Поэтому при проведении измерений необходимо внимательно следить за пределом тока  $I_w$  на переключателе блока 68 - 200 измерения мощности.

Ток  $I_w$  переключателя ваттметра в режиме номинальной нагрузки трансформатора выбирают таким, чтобы он был близок к  $I_{1\text{ном}}$ , а в режиме холостого хода  $I_{\text{хх}} = I_0 \approx I_w \approx 0,1 I_{1\text{ном}}$ .

Учитывая, что ток  $I_w = I_1$ , цены делений  $c_A$ ,  $c_W$  амперметра и ваттметра можно определить по формулам:

$$c_A = \frac{I_A}{N_A}, \frac{\text{А}}{\text{дел}}; \quad c_W = \frac{I_w \cdot U_w}{N_w}, \frac{\text{Вт}}{\text{дел}},$$

где  $I_A$  – ток переключателя амперметра в измерительном блоке 68 - 117;  $I_w$  и  $U_w$  – ток и напряжение переключателей выбора пределов в измерительном блоке 68 - 200;  $N_A$  и  $N_w$  – число делений амперметра и

ваттметра, соответственно.

Цену деления вольтметра блока 68 - 117 вычисляют по формуле:

$$c_v = \frac{U}{N_v}, \frac{B}{\text{дел}}, \text{ где } \bar{U} - \text{предел измерения напряжения вольтметра}$$

блока 68 - 117;  $N_v$  – число делений вольтметра.

Испытание трансформатора проводят при активной нагрузке, т.е. при  $\cos \varphi_2 = 1$ . Для трансформатора с  $S_{\text{ном}} = 100 \text{ В} \cdot \text{А}$  нагрузкой является резистивный блок 67 - 142, а с  $S_{\text{ном}} = 1000 \text{ В} \cdot \text{А}$  – используют нагрузочный реостат с допустимым током  $5 \dots 7 \text{ А}$ .

Опыт непосредственной нагрузки проводят в следующей последовательности.

1. Устанавливают токи  $I_1$  и  $I_w$  переключателей на блоках 68 - 117 и 68 - 200, значения которых должны быть приблизительно равны номинальному току  $I_{1\text{ном}}$  первичной обмотки исследуемого трансформатора.

2. Выключателем S1 включают источник питания – блок 60 - 105. С помощью регулятора напряжения блока 60 - 105 устанавливают напряжение  $U_1 = U_{1\text{ном}}$  и в течение всего опыта поддерживают его неизменным.

3. Изменяют ток нагрузки  $I_2$  от холостого хода ( $I_2 = 0$ ) до номинального так, чтобы  $I_2$  принимал значения, близкие к (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0)  $I_{2\text{ном}}$ .

4. Измеряют напряжение  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки трансформатора, токи  $I_1$  и  $I_2$  в первичной и вторичной обмотках и активную мощность  $P_1$  электрической энергии, потребляемой трансформатором из сети. Результаты измерений заносят в табл. 7.1.

5. Для каждого из измеренных токов  $I_2$  вычисляют значения следующих величин:

$\beta$  – коэффициент нагрузки;  $\cos \varphi_1$  – коэффициент мощности трансформатора;  $P_2$  – мощность нагрузки;  $\eta$  – КПД трансформатора, где

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}}; \quad \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1}; \quad P_2 = I_2 U_2; \quad \eta = P_2 / P_1.$$



**Характеристики трансформатора при  $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ ;  
 $\cos \varphi_2 = 1$ ;  $f = 50 \text{ Гц}$**

Опытные данные				Результаты вычислений				Примечания
$I_1, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$\beta$	$\cos \varphi_1$	$P_2, \text{Вт}$	$\eta$	
								$c_v = \dots \text{В/дел};$ $c_A = \dots \text{А/дел};$ $c_W = \dots \text{Вт/дел}.$

6. По данным измерений и вычислений строят внешнюю характеристику  $U_2 = f(\beta)$  трансформатора и зависимость  $\eta = f(\beta)$ , как показано на рис. 7.2. Подобные характеристики могут быть построены и в абсолютных единицах в зависимости от тока  $I_2$ . По зависимости  $\eta = f(\beta)$  определяют коэффициент нагрузки  $\beta$ , при котором КПД трансформатора имеет максимальное значение.

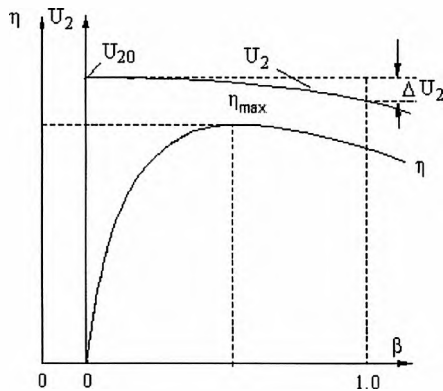


Рис. 7.2. Характеристики трансформатора

7. Определяют коэффициент трансформации  $n$ , который примерно равен:

$$n \approx \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{20}},$$

где  $U_{1\text{ном}}$  – номинальное напряжение первичной обмотки,  $U_{20}$  – вторичное напряжение при холостом ходе трансформатора, т.е. при  $I_2 = 0$ .

8. Вычисляют относительное значение изменения напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора в процентах:

$$\Delta U_2 = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 \%,$$

где  $U_2$  – напряжение на зажимах вторичной обмотки при номинальной нагрузке, т.е. при  $I_2 = I_{2\text{ном}}$ .

### 7.3. Испытание трансформатора косвенным методом

При испытании трансформатора косвенным методом проводят опыт холостого хода и испытательного короткого замыкания, по результатам которых и определяют характеристики трансформатора.

#### *Опыт холостого хода*

Важными эксплуатационными параметрами трансформатора являются коэффициент трансформации  $n$ , ток  $I_0$  и мощность  $P_0$  холостого хода при номинальном напряжении  $U_{1\text{ном}}$ .

Испытание трансформатора в режиме холостого хода проводят по схеме, приведенной на рис. 7.1, при отключенном выключателе  $S2$ . Прежде чем приступить к проведению опыта, необходимо правильно выбрать ток переключателя ваттметра, при котором  $I_w \approx I_0 \approx 0,1 I_{1\text{ном}}$ , а затем рассчитать цены делений амперметра  $A1$ , ваттметра  $W$  и вольтметра  $V1$ .

Если нужно определить параметры трансформатора в режиме холостого хода при напряжении  $U_1 = U_{1\text{ном}}$ , то проводят только один

опыт по методике, описанной в пункте 7.2.

Если необходимо снять характеристики холостого хода  $I_{10} = f(U_1)$ ,  $P_{10} = f(U_1)$ , вид которых показан на рис. 7.3, то опыт проводят следующим образом. С помощью источника питания 60 - 105 изменяют подводимое к первичной обмотке напряжение  $U_1$  от возможного минимума до  $U_1 = (1,0 \dots 1,1)U_{1\text{ном}}$  так, чтобы получить 6 ... 8 измерений. Обычно задают значения первичного напряжения  $U_1 = (50, 150, 180, 200, 210, 220, 230) \text{ В}$ . Измеряют первичное  $U_1$  и вторичное  $U_2$  напряжения, ток  $I_0$  и мощность  $P_0$ . Одно из измерений выполняют при номинальном напряжении  $U_{1\text{ном}}$  трансформатора. Результаты измерений заносят в табл. 7.2.

Коэффициент мощности  $\cos \varphi_0$  вычисляют по формуле:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0}.$$

Коэффициент трансформации  $n$  трансформатора определяют при номинальном первичном напряжении  $U_{1\text{ном}}$  по формуле

$$n = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{20}},$$

так как при холостом ходе в силу малости тока  $I_0$  падением напряжения в первичной обмотке трансформатора можно пренебречь и считать, что  $E_1 \approx U_1$ .

Т а б л и ц а 7.2

**Опыт холостого хода трансформатора**

Опытные данные				Результаты вычислений	Примечания
$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	$P_0, \text{Вт}$	$\cos \varphi_0$	
					$c_v = \dots \text{ В/дел};$
					$c_A = \dots \text{ А/дел};$
					$c_w = \dots \text{ Вт/дел}.$

Кроме того, при номинальном напряжении  $U_{\text{ном}}$  определяют ток холостого хода в процентах от номинального

$$I_{0,\%} = \frac{I_0}{I_{\text{ном}}} 100\%,$$

а также мощность потерь холостого хода в процентах от полной мощности трансформатора

$$P_{0,\%} = \frac{P_0}{S_{\text{ном}}} 100\%.$$

Мощность  $P_0$ , измеряемая в опыте холостого хода, представляет собой мощность потерь  $P_{\text{им}}$  энергии в магнитопроводе и мощность  $P_{\text{гэл}}$  электрических потерь в первичной обмотке трансформатора, т. е.

$$P_0 = P_{\text{им}} + P_{\text{гэл}},$$

$$\text{где } P_{\text{гэл}} = I_0^2 R_1.$$

Ввиду малости тока  $I_0$  при номинальном напряжении  $U_{\text{ном}}$  мощность электрических потерь  $P_{\text{гэл}}$  не превышают 1...2 % от  $P_0$  даже в трансформаторах малой мощности, поэтому ими можно пренебречь и считать, что  $P_0 \approx P_{\text{им}}$ . Численное значение мощности  $P_0$  в мощных трансформаторах 30...100 кВ·А составляет 0,1...0,2 % от  $S_{\text{ном}}$ .

По данным опыта строят характеристики холостого хода, как показано на рис. 7.3.

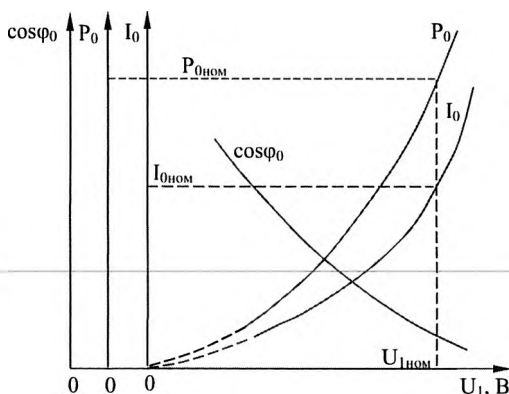


Рис. 7.3. Характеристики холостого хода

### *Опыт испытательного короткого замыкания*

В этом опыте определяют напряжение  $U_k$  и мощность  $P_k$  короткого замыкания трансформатора, а также параметры схемы замещения. При этом под напряжением короткого замыкания  $U_k$  понимают такое напряжение, подведенное к первичной обмотке трансформатора, при котором ток в первичной обмотке равен номинальному значению  $I_{ном}$ , а вторичная обмотка замкнута накоротко.

Электрическая схема для проведения исследования трансформатора при коротком замыкании приведена на рис. 7.4. Вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко перемычкой, имеющей минимальное сопротивление. Номинальный первичный ток  $I_{ном}$  трансформатора Т вычисляют так же, как указано в п. 7.1. Поскольку напряжение  $U_k$  короткого замыкания трансформаторов составляет 5...10 % от  $U_{ном}$ , предел измерения вольтметра  $V1$  и напряжение на переключателе пределов измерения ваттметра  $W$  устанавливают на минимальные значения (50 В и 25 В, соответственно).

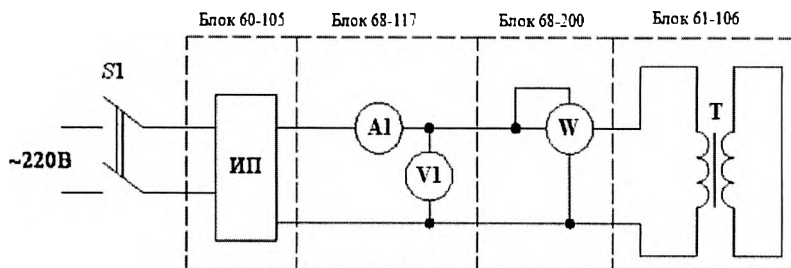


Рис. 7.4. Электрическая схема для проведения опыта испытательного короткого замыкания

Опыт проводят следующим образом. С помощью источника питания (блок 60 - 105) изменяют первичное напряжение  $U_1$  от нуля до  $U_1 = U_k$ , при котором ток в первичной обмотке трансформатора достигает номинального значения  $I_{1ном}$ . При этом измеряют ток  $I_k \approx I_{1ном}$  в первичной обмотке, напряжение  $U_k$  и мощность  $P_k$ .

Желательно для контроля выполнить не менее двух измерений при различных токах в первичной обмотке, близких к номинальному значению, но не превышающих  $1,2I_{1ном}$ . Электрическая энергия потребляется только трансформатором, а ваттметр  $W$  измеряет мощность короткого замыкания.

Результаты измерений заносят в табл. 7.3.

Т а б л и ц а 7.3

Опыт короткого замыкания трансформатора

Опытные данные			Результаты вычислений			Примечания
$U_k$ , В	$I_k$ , А	$P_k$ , Вт	$Z_k$ , Ом	$R_k$ , Ом	$X_k$ , Ом	
						$c_v = \dots \text{В/дел};$
						$c_A = \dots \text{А/дел};$
Средние значения сопротивлений $\rightarrow$						$c_W = \dots \text{Вт/дел}.$

Полное сопротивление короткого замыкания  $Z_k$  трансформатора, его активную  $R_k$  и реактивную  $X_k$  составляющие определяют по формулам

$$Z_k = U_k / I_k; R_k = P_k / I_k^2; X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

По результатам вычислений находят средние значения  $Z_{кр}$ ,  $R_{кр}$  и  $X_{кр}$  и по ним при номинальном токе  $I_{1ном}$  трансформатора определяют напряжение короткого замыкания  $u_{к\%}$  и его активную  $u_{ка\%}$

и реактивную  $u_{кр\%}$  составляющие в процентах от  $U_{1ном}$  и мощность  $P_k$ :

$$u_{к\%} = \frac{I_{1ном} Z_{к ср}}{U_{1ном}} 100 \%; \quad u_{ка\%} = \frac{I_{1ном} R_{к ср}}{U_{1ном}} 100 \%; \quad u_{кр\%} = \frac{I_{1ном} X_{к ср}}{U_{1ном}} 100 \%;$$

$$P_k = I_{1ном}^2 R_{к ср}.$$

Мощность  $P_k$  складывается из мощности электрических потерь энергии в обмотках трансформатора и мощности потерь энергии на нагрев сердечника магнитопровода. Поскольку при напряжении  $U_1 = U_k = (0,05...0,1)U_{1ном}$  магнитный поток и, следовательно, магнитная индукция в сердечнике магнитопровода трансформатора составляют (5...10) % от своего значения при  $U_{1ном}$ , то мощность потерь электрической энергии в нем, пропорциональная квадрату магнитной индукции, составляет (0,25...1) % от мощности потерь в номинальном режиме. Поэтому можно считать, что мощность  $P_k$  равна мощности электрических потерь в обмотках трансформатора, т.е.  $P_k \approx I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$ , где  $R_1$  и  $R_2$  – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Мощность короткого замыкания  $P_k$  при  $I_{1ном}$  так же, как и мощность холостого хода  $P_0$  при  $U_{1ном}$ , имеет важное эксплуатационное значение. Мощность  $P_k$  для трансформаторов небольшой мощности составляет 2...3 % от мощности  $S_{ном}$ .

Соотношение мощностей  $P_0$  и  $P_k$  в силовых трансформаторах обычно равно 0,2...0,4, т.е.  $P_0 / P_k = 0,2...0,4$ .

### ***Определение характеристик трансформатора косвенным методом***

При заданных значениях  $\cos \varphi_2$  внешнюю характеристику трансформатора  $U_2 = f(\beta)$  и изменение напряжения  $\Delta U$  в зависимости от коэффициента нагрузки  $\beta$  рассчитывают по формулам:

$$U_2 = U_{20} \left( 1 - \frac{\Delta U}{100} \right) = U_{20} \left( 1 - \frac{\beta}{100} (U_{ка} \cos \varphi_2 + U_{кр} \sin \varphi_2) \right),$$

$$\Delta U \cong \beta (U_{ка} \cos \varphi_2 + U_{кр} \sin \varphi_2),$$

где  $U_{ка}$  и  $U_{кр}$  – берут из опыта короткого замыкания, а напряжение  $U_{20}$  – из опыта холостого хода при  $U_1 = U_{1ном}$ .

Т а б л и ц а 7.4

**Расчет характеристик трансформатора по данным опытов холостого хода и короткого замыкания при  $U_1 = U_{1ном} = 220$  В и**

**$\cos \varphi_2 = \dots$**

$\beta$	$\Delta U$	$U_2$	$\beta S_{ном} \cos \varphi_2$	$P_0$	$\beta^2 P_K$	$P_0 + \beta^2 P_K$	$\eta$
–	%	В	Вт	Вт	Вт	Вт	–

Для определения КПД трансформатора необходимо знать суммарную мощность потерь  $P_n$  в нем. Из опыта холостого хода известно, что мощность потерь в стали магнитопровода  $P_{пм} \approx P_0$ . При напряжении  $U_1 = U_{1ном} = const$  потери в стали  $P_{пм} \approx P_0 = const$  для любых режимов работы трансформатора. Мощность потерь в обмотках трансформатора, т. е. мощность электрических потерь  $P_{пэ}$ , определяют в опыте короткого замыкания. При токе  $I_1 = I_{1ном}$  мощность этих потерь равна  $P_{пэ} \approx P_K$ . Поскольку электрические потери пропорциональны квадрату тока, то при любой нагрузке трансформатора их определяют как  $P_{пэ} \approx \beta^2 P_K$ .

Мощность  $P_n$  потерь в трансформаторе при  $U_{1ном}$ :

$$P_n = P_{пм} + P_{пэ} = P_0 + \beta^2 P_K.$$

Мощность  $P_2$  электроприемника:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx \beta U_{2ном} I_{2ном} \cos \varphi_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2.$$

КПД трансформатора определяют по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_n} = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K}.$$

Изменение напряжения  $\Delta U_2$ , внешнюю характеристику  $U_2 = f(\beta)$  и КПД трансформатора рассчитывают при тех же значениях



коэффициента нагрузки  $\beta$ , которые были получены в опыте непосредственной нагрузки (см. табл. 7.1). Результаты расчета заносят в табл. 7.4.

По данным таблицы 7.4 строят зависимости  $U_2 = f(\beta)$  и  $\eta = f(\beta)$  (см. рис. 7.2) с целью сравнения методов испытания трансформатора.

## 7.4. Программа работы

1. Ознакомьтесь с паспортными данными трансформатора и запишите их.

2. Соберите электрическую цепь согласно схеме, представленной на рис. 7.1, для проведения опыта непосредственной нагрузки.

3. Проведите испытание трансформатора методом непосредственной нагрузки.

Результаты измерений запишите в табл. 7.1. Вычислите все величины, указанные в табл. 7.1, и постройте внешнюю характеристику трансформатора  $U_2 = f(\beta)$  и зависимость  $\eta = f(\beta)$ , как показано на рис. 7.2.

4. Проведите испытание трансформатора косвенным методом по п. 4.1 ÷ 4.4:

4.1. Проведите опыт холостого хода.

Результаты измерений запишите в табл. 7.2. Вычислите все величины, указанные в табл. 7.2, а также коэффициент трансформации  $n$  трансформатора. Определите ток  $I_0$  и мощность потерь  $P_0$  холостого хода при  $U_{\text{ном}}$ . Постройте характеристики холостого хода трансформатора, как показано на рис. 7.3, если они снимались.

4.2. Соберите электрическую цепь согласно схеме рис. 7.4 для проведения опыта испытательного короткого замыкания.

4.3. Проведите опыт испытательного короткого замыкания.

**Внимание!** Перед включением выключателя  $S1$  убедитесь в том, что движок источника питания (блок 60 - 105) установлен в

положение, при котором  $U_1 = 0$ .

Данные измерений запишите в табл. 7.3. Вычислите параметры трансформатора  $Z_k$ ,  $R_k$ ,  $X_k$  для всех значений тока  $I_k$  и их средние значения. Определите при  $I_1 = I_{1ном}$  напряжение короткого замыкания  $u_{к\%}$ , его активную  $u_{кa\%}$  и реактивную  $u_{кр\%}$  составляющие в процентах от  $U_{1ном}$ , а также мощность короткого замыкания  $P_k$ .

4.4. Рассчитайте косвенным методом внешнюю характеристику  $U_2 = f(\beta)$  трансформатора, изменение напряжения  $\Delta U$  и зависимость  $\eta = f(\beta)$  при коэффициентах нагрузки  $\beta$ , которые имели место при испытании трансформатора методом непосредственной нагрузки. Результаты расчета запишите в табл. 7.4. Постройте характеристики  $U_2 = f(\beta)$  и  $\eta = f(\beta)$  (см. рис. 7.2).

5. Запишите технические данные измерительных приборов измерительных блоков 68 - 117, 68 - 200.

6. Выполните анализ полученных результатов.

Оцените значения тока  $I_0$  и мощности  $P_0$  холостого хода в процентах от  $I_{1ном}$  и  $S_{ном}$  соответственно; оцените значения напряжения  $u_{к\%}$  и мощности  $P_k$  короткого замыкания в процентах от  $U_{1ном}$  и  $S_{ном}$ ; найдите соотношение  $P_0/P_k$  мощностей электрической энергии, потребляемой в режимах холостого хода и испытательного короткого замыкания; сравните значения номинального изменения напряжения  $\Delta U_2$  (при  $\beta = 1$ ), определенные косвенным методом и методом непосредственной нагрузки. Сравните значения КПД  $\eta_{ном}$  трансформатора при номинальной нагрузке ( $\beta = 1$ ) и максимальные значения КПД  $\eta_{max}$ , определенные обоими методами.

## 7.5. Контрольные вопросы

1. Как определить номинальные токи первичной и вторичной обмоток трансформатора по известным  $S_{ном}$ ,  $U_{1ном}$ ,  $U_{2ном}$ ?

2. Как определить цену деления приборов блоков 68 - 117, 68 - 200?

3. С какой целью и как проводят опыты непосредственной нагрузки, холостого хода и испытательного короткого замыкания?

4. Как правильно выбрать пределы измерений по току и напряжению приборов блоков 68 - 117 и 68 - 200 при проведении испытаний трансформатора методом непосредственной нагрузки и косвенным методом?

5. Каковы примерные соотношения между значениями  $I_0$  и  $I_{1ном}$ ,  $U_k$  и  $U_{1ном}$ ,  $P_0$  и  $S_{ном}$ ,  $P_k$  и  $S_{ном}$ ?

6. Как опытным путем определить мощность потерь в стали магнитопровода и в обмотках трансформатора?

## Р а б о т а 8

### ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

#### 8.1. Общие указания

Цель работы – приобретение навыков пуска и освоение методики опытного определения основных эксплуатационных характеристик трехфазных асинхронных двигателей (АД).

Основными уравнениями, характеризующими работу АД в установившемся режиме, являются уравнения для тока в обмотке ротора

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \quad (8.1)$$

и для вращающего момента

$$M = c_m \Phi_m I_2 \cos \psi_2, \quad (8.2)$$

где  $I_2$  – ток в обмотке ротора;  $E_{2s}$ ,  $E_2$  – ЭДС в обмотке вращающегося и неподвижного ротора, соответственно;  $R_2$  – активное сопротивление обмотки ротора;  $X_{2s}$ ,  $X_2$  – индуктивные сопротивления обмотки вращающегося и неподвижного ротора, соответственно;  $s$  – скольжение;  $c_m$  – постоянная, определяемая параметрами АД;  $\Phi_m$  – максимальное значение результирующего магнитного потока;  $I_2 \cos \psi_2$  – активная составляющая тока в обмотке ротора.

Скольжение  $s$  – величина, равная относительной разности частот вращения магнитного поля и ротора:

$$s = (n_1 - n_2) / n_1, \quad (8.3)$$

где  $n_1$  – частота вращения магнитного поля;  $n_2$  – частота вращения ротора.

Частота вращения  $n_1$  магнитного потока зависит от частоты  $f_1$  напряжения сети и числа пар полюсов  $p$  двигателя:

$$n_1 = 60 f_1 / p. \quad (8.4)$$

При промышленной частоте  $f_1 = 50$  Гц частота вращения магнитного потока относительно статора может принимать значения  $n_1 = 3000, 1500, 1000$  об/мин и т. д. Частота вращения  $n_2$  ротора АД всегда меньше  $n_1$ , поэтому в двигательном режиме всегда  $0 < s \leq 1$ .

Принципиальная электрическая схема цепи для проведения испытания асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором представлена на рис. 8.1.

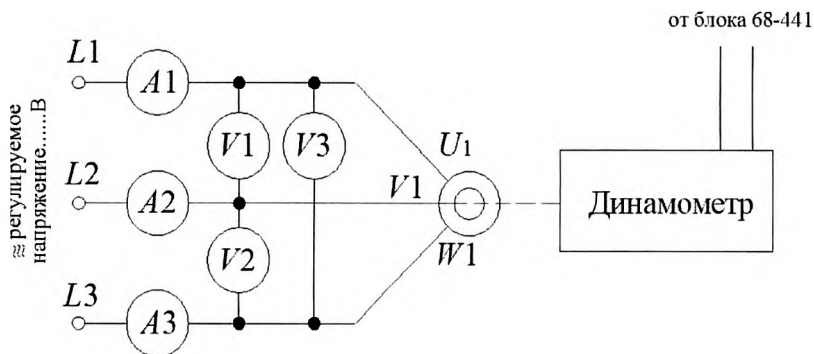


Рис. 8.1. Схема испытания асинхронного двигателя

Используются блоки:

1. 60 - 105 – универсальный источник питания;
2. 68 - 100 – трехфазный измерительный блок;
3. 68 - 441 – блок управления тормозным моментом;
4. 64 - 501 – асинхронный двигатель;
5. 64 - 502 – динамометр (блок нагрузки).

На рис. 8.2. представлены схемы соединения фазных обмоток статора асинхронного двигателя.

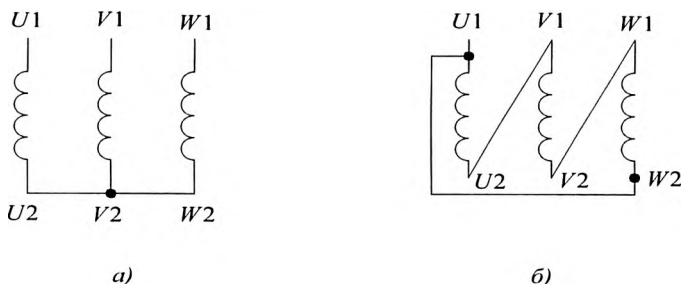


Рис. 8.2. Схемы соединения обмоток статора асинхронного двигателя:  
а) звездой, б) треугольником

## 8.2. Пуск асинхронного двигателя

Предварительно трехфазный выключатель универсального источника питания (блок 60 - 105) приводят в отключенное положение. Собирают электрическую цепь в соответствии с рис. 8.1. и 8.2. (соединение звездой).

После этого устанавливают регулятор регулируемого выходного напряжения (блок 60 - 105) в положение 0%, а трехфазный выключатель – во включенное положение. При этом загорается зеленый индикатор. На блоке 68 - 441 выключают главный источник путем нажатия на зеленую кнопку. Два вращаемые регулятора устанавливают в крайнее положение, вращая их в направлении против часовой стрелки. Присоединяют динамометр к штепсельному гнезду (к правому штекеру «torque») тормозного момента. Устанавливают переключатель «demand voltage» в положение +ve. Нажимают на кнопку «power», которая светится зеленым светом. Нажимают на кнопку «dynamometer power» так, чтобы соседняя красная лампочка загорелась.

**Не оставляйте блок 68 - 441 включенным, если испытываемый двигатель не вращается и к его валу приложен тормозной момент.**

Пуск двигателя осуществляют в режиме холостого хода. Включают трехфазный выключатель блока 60 - 105 (зеленый индикатор должен светиться). С помощью регулятора увеличивают линейное напряжение от 0 до 380 В. При некотором значении напряжения ротор двигателя начинает вращаться. Проверяют все ли вольтметры показывают одно и то же значение напряжения.

### 8.3. Снятие рабочих характеристик асинхронного двигателя

*Рабочими характеристиками* АД называют графические зависимости  $n_2$ ,  $s$ ,  $M_2$ ,  $I_1$ ,  $\cos\varphi$  и  $\eta = f(P_2)$  при  $U_1 = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ .

После пуска двигателя с помощью кнопки «dynamometer power» включают питание динамометра (загорится красная лампочка на панели блока 68 - 441). С помощью динамометра создают тормозной момент (нагрузку) на валу двигателя.

**Внимание! Без вращения динамометра кнопку не нажимать.**

Регулятором «constant speed or torque» блока 68 - 441 изменяют тормозной момент в диапазоне (0...0,8) Н·м с шагом 0,1 Н·м.

Измеряют: линейный ток  $I_1$  (любой один из трех), мощность  $P_1$  потребляемой из сети электроэнергии, коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ), тормозной момент  $M_2$ , частоту вращения  $n_2$ . Вычисляют мощность  $P_2$  на валу двигателя по формуле

$$P_2 = 0,105 M_2 n_2, \text{ Вт},$$

где  $M_2$  – тормозной момент, Н·м;  $n_2$  – частота вращения, об/мин.

Данные измерений заносят в табл. 8.1, данные вычислений – в табл. 8.2.

Закончив снятие рабочих характеристик АД при соединении обмоток статора звездой, уменьшают тормозной момент  $M_2$  до нуля, повернув регулятор «constant speed or torque» против часовой стрелки до упора; выключают питание динамометра кнопкой «dynamometer power» (при этом красная лампочка на блоке 68 - 441 гаснет);

останавливают АД, повернув регулятор напряжения на обмотке статора в положение 0 %; отключают трехфазный выключатель блока питания 60 - 105.

Т а б л и ц а 8.1

**Опытные данные для определения рабочих характеристик асинхронного двигателя при  $U_1 = \dots$  В и  $f = 50$  Гц**

Соединение обмотки статора	$M_2$ , Н·м	$I_1$ , А	$P_1$ , Вт	$Q_1$ , ВАр	$\cos\varphi$	$n_2$ , об/мин
Y						
Δ						

После этого соединяют обмотки статора треугольником (см. рис. 8.2.) и производят пуск асинхронного двигателя, как описано выше для соединения обмотки статора звездой, установив с помощью регулятора линейное напряжение 230 В. Снятие рабочих характеристик проводят в том же порядке, какой описан для соединения звездой. Максимальный тормозной момент одинаков для соединения обмоток статора звездой и треугольником, так как фазное напряжение остается одинаковым (230 В). Данные измерений и вычислений заносят в табл. 8.1. и 8.2.



Т а б л и ц а 8.2

**Рабочие характеристики асинхронного  
двигателя при  $U_1 = \dots$  В и  $f = 50$  Гц**

Соединение обмотки статора	$P_2$ , Вт	$P_{2*}$	$I_1$ *	$M_{2*}$	$n_{2*}$	s	$\eta$	$\cos\varphi$
Y								
$\Delta$								

По окончании снятия рабочих характеристик уменьшают тормозной момент до нуля, регулятор напряжения на обмотке статора АД устанавливают в положение 0 % и отключают трехфазный выключатель блока питания 60 - 105 и питание других блоков.

Относительные значения физических величин вычисляют для всех опытов при соединении обмоток звездой и треугольником по формулам:

$$P_{2*} = \frac{P_2}{P_{2ном}}; \quad M_{2*} = \frac{M_2}{M_{2ном}}; \quad I_{1*} = \frac{I_1}{I_{1ном}}; \quad n_{2*} = \frac{n_2}{n_1};$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Номинальные значения  $P_{2\text{ном}}$ ,  $I_{1\text{ном}}$ ,  $n_{2\text{ном}}$  берут из паспортных данных двигателя, а  $M_{2\text{ном}}$  вычисляют по формуле:

$$M_{2\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{2\text{ном}}}, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где  $P_{2\text{ном}}$  в Вт,  $n_{2\text{ном}}$  в об/мин.

По данным измерений и вычислений строят графические зависимости  $n_2$ ,  $s$ ,  $M_2$ ,  $I_1$ ,  $\cos\varphi$ ,  $\eta = f(P_2)$  для соединения обмоток статора звездой или треугольником (рис. 8.3). На отдельных графиках строят рабочие характеристики  $I_{1*} = f(P_{2*})$ ,  $\cos\varphi = f(P_{2*})$  и  $\eta = f(P_{2*})$ , относящиеся к соединению обмоток статора звездой и треугольником (рис. 8.4).

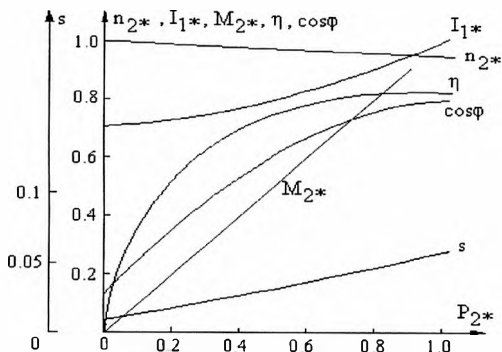


Рис. 8.3. Рабочие характеристики асинхронного двигателя при соединении обмоток статора треугольником

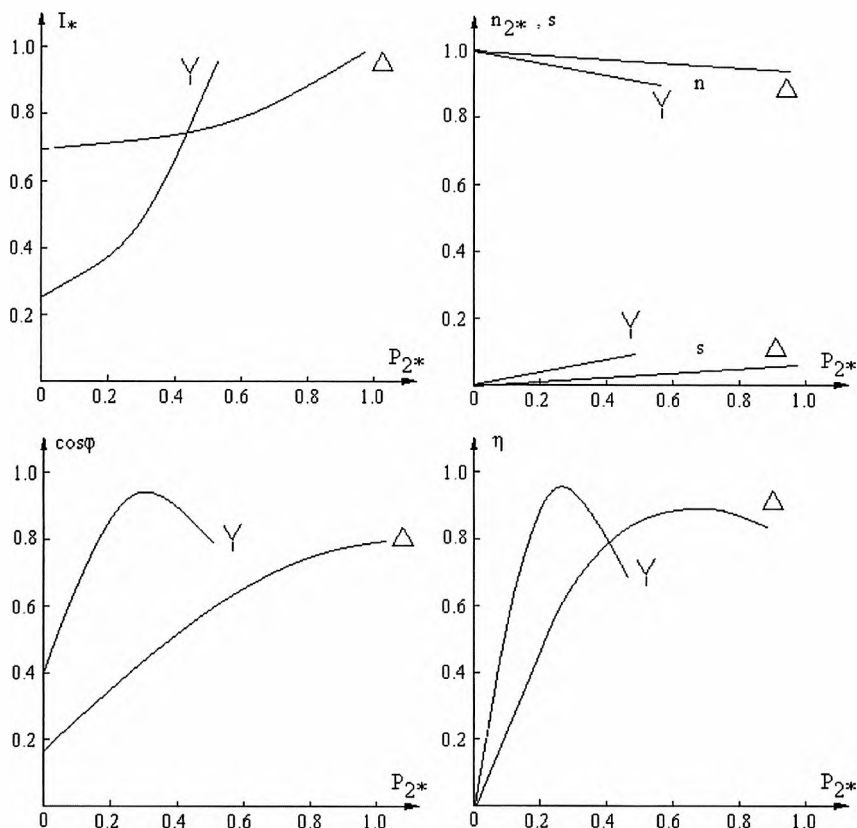


Рис. 8.4. Сравнение рабочих характеристик асинхронного двигателя при соединении обмоток статора треугольником и звездой

## 8.4. Программа работы

1. Ознакомьтесь с паспортными данными асинхронного двигателя и запишите их. Вычислите номинальный вращающий момент  $M_{2\text{ном}}$  двигателя.
2. Соберите электрическую цепь согласно схеме (см. рис. 8.1).
3. Выполните пуск асинхронного двигателя.
4. Снимите рабочие характеристики АД при соединении

обмоток статора звездой, а затем треугольником. Результаты измерений запишите в табл. 8.1.

Вычислите полезную мощность  $P_2$  двигателя, скольжение  $s$ , КПД  $\eta$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi$ , а также относительные значения тока статора  $I_1^*$ , полезной мощности  $P_2^*$ , момента  $M_2^*$  и частоты вращения ротора двигателя  $n_2^*$ . Результаты вычислений запишите в табл. 8.2.

Постройте рабочие характеристики асинхронного двигателя в относительных единицах при соединении обмотки статора треугольником и при различных способах соединения обмотки статора.

5. Запишите технические данные электроизмерительных приборов.

6. Выполните анализ полученных результатов.

Отметьте соответствие вида полученных рабочих характеристик двигателя теоретическим; ток холостого хода  $I_0$  двигателя в процентах от:  $I_{1ном}$  (или в относительных единицах); степень изменения частоты вращения ротора при изменении нагрузки двигателя от холостого хода до номинальной; значения скольжения  $s$  при холостом ходе и номинальной нагрузке; значения коэффициента мощности  $\cos\varphi$  при холостом ходе двигателя; наибольшие значения КПД  $\eta_{max}$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi_{max}$  и полезную мощность  $P_2^*$ , при которой они достигаются. Сравните значения тока  $I_1$  в обмотке статора, частоты вращения  $n_2$  ротора, коэффициента мощности  $\cos\varphi$  и КПД  $\eta$ , полученные в результате испытаний АД при номинальной нагрузке (при  $M_{2ном}$ ), с паспортными значениями этих величин.

## 8.5. Контрольные вопросы

1. Назовите основные конструктивные элементы асинхронного двигателя и укажите их обозначения на электрической схеме.

2. Какие данные АД указывают в его паспорте?

3. Как по паспортным данным АД определить: номинальный момент  $M_{2ном}$ ; частоту вращения  $n_1$  магнитного поля; число пар полюсов  $p$ ?

4. Как осуществляют пуск АД?

5. Как изменить направление вращения АД?

6. Какие характеристики АД называют рабочими, и при каких условиях их снимают?

7. Как создают тормозной момент при снятии рабочих характеристик АД? Каким образом изменяют значение тормозного момента?

## Работа 9

### ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ НА АВТОНОМНУЮ НАГРУЗКУ

#### 9.1. Общие указания

Цель работы – приобретение практических навыков регулирования трехфазного синхронного генератора (СГ) и овладение методикой определения основных эксплуатационных характеристик СГ при работе на автономную нагрузку.

Синхронный генератор применяют в качестве автономного источника питания в тех случаях, когда подключение потребителей электрической энергии к сети невозможно или не оправдано. К таким потребителям можно отнести лесозаготовительные участки, буровые установки, речные и морские суда и т. п.

Качественный анализ работы СГ в установившемся режиме удобно вести, пользуясь упрощенным уравнением напряжения

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - jX_c \underline{I}, \quad (9.1)$$

где  $\underline{U}$ ,  $\underline{I}$  – комплексные фазные напряжение и ток СГ, соответственно;  $\underline{E}_0$  – комплексная ЭДС, индуцированная в фазе обмотки статора СГ основным магнитным потоком  $\Phi_{0m}$ ;  $X_c$  – индуктивное синхронное сопротивление.

При синусоидальном распределении магнитной индукции в воздушном зазоре машины действующее значение ЭДС в установившемся режиме равно:

$$E_0 = 4,44 f w k_{об} \Phi_{0m} = c_E n \Phi_{0m}, \quad (9.2)$$

где

$$f = \frac{pn}{60} \quad (9.3)$$

– частота индуцированной ЭДС, Гц;  $w$  – число витков обмотки статора;  $k_{об}$  – ее обмоточный коэффициент;  $\Phi_{0m}$  – максимальное

значение основного магнитного потока, Вб;  $c_E$  – коэффициент, значение которого зависит от конструкции СГ;  $n$  – частота вращения ротора, об/мин;  $p$  – число пар полюсов.

Нормированная частота ЭДС в России принята равной  $f = 50$  Гц, поэтому на основании (9.3) ротор СГ должен вращаться первичным двигателем с постоянной частотой вращения

$$n = \frac{60 f}{p} = \frac{3000}{p}.$$

Используемое оборудование:

1. Универсальный источник питания (60 - 105).
2. Трехфазная синхронная машина (64 - 510).
3. Панель управления приводным двигателем (68 - 441).
4. Приводной двигатель (динамометр) (67 - 502).
5. Трехфазный электронный измерительный прибор (68 - 100).
6. Блок с вольтметром и амперметром (68 - 110).
7. Ламповый синхроскоп с выключателем (68 - 120).

Принципиальная электрическая схема для проведения испытаний СГ, работающего на автономную нагрузку, показана на рис. 9.1. Перед сборкой электрических цепей необходимо ознакомиться с номинальными данными электрических машин, назначением и расположением на стенде электроизмерительных приборов.

При испытании СГ фазные обмотки статора включают по схеме треугольника. Обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного напряжения на блоке источника питания (60 - 105). Для измерения напряжения и тока в цепи обмотки возбуждения используют измерительный блок 68 - 110. Для производства измерений в цепи обмотки статора используют измерительный блок 68 - 100 (single and three-phase measurements panel). В качестве нагрузки используют блок резисторов при соединении фаз приемника треугольником. Все выключатели блока резисторов должны быть выключены. В качестве приводного двигателя, вращающего ротор СГ, используют динамометр (67 - 502).

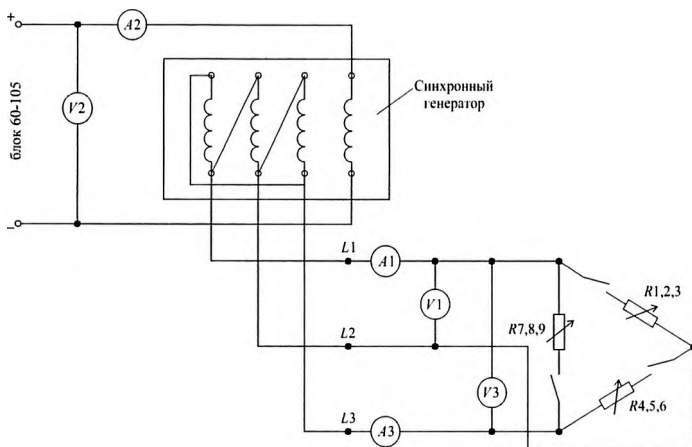


Рис. 9.1. Схема включения обмоток синхронного генератора, измерительных приборов и нагрузочных реостатов

Включение амперметров и вольтметров для измерения синусоидальных токов и напряжений в цепи обмотки статора следует производить по схеме, изображенной на рис. 9.1. В противном случае трехфазный ваттметр не будет давать правильное показание.

## 9.2. Снятие характеристик генератора

Для включения СГ в работу необходимо осуществить следующие операции:

1. На блоке 60 - 105 (источник питания) вращаемый регулятор повернуть в положение 0 % и включить выключатель трехфазной цепи (the 3 phase power).

2. На блоке 68 - 441 (панель контроля частоты вращения): выключить главный выключатель переменного тока, используя зеленую кнопку; установить два вращающихся регулятора в самое



крайнее положение, вращая против часовой стрелки; соединить динамометр с гнездом режима частоты вращения (speed mode); установить выключатель «требуемое напряжение» (demand voltage) в положение +ve; нажать кнопку мощности (power), которая светится зеленым светом; нажать кнопку питания динамометра (dynamometer power) так, чтобы соседняя лампочка светилась красным.

3. С помощью регулятора «constant speed or torque» блока 68 - 441 установить такой режим, при котором частота вращения ротора СГ равна 3000 об/мин. при линейном напряжении 230 В.

**Внимание! Без вращения динамометра кнопку не нажимать.**

4. Вращаемый регулятор постоянного напряжения универсального источника питания (блок 60 - 105) установить в положение, обеспечивающее напряжение цепи обмотки возбуждения равное 10 В.

*Характеристика холостого хода* представляет собой зависимость линейного напряжения СГ от тока возбуждения, т.е.  $U_1 = f(I_a)$  при  $n = \text{const}$  и при отсутствии нагрузки. Поддерживая постоянной частоту вращения и увеличивая напряжение, подводимое к обмотке возбуждения от источника питания, от 10 до 50 В, измеряют ток возбуждения  $I_a$  и линейное напряжение  $U_1$  на обмотке статора. Данные измерений записывают в табл. 9.1.

Значения  $I_{a*}$  и  $U_{1*}$  находят по следующим формулам:

$$I_{a*} = \frac{I_a}{I_{\text{ном}}}; U_{1*} = \frac{U_1}{U_{1\text{ном}}},$$

где  $U_{1\text{ном}} = 230\text{В}$ ;  $I_{\text{в ном}}$  – номинальный ток возбуждения при  $U_{1\text{ном}}$ .

По данным вычислений строят графическую зависимость  $U_{1*} = f(I_{a*})$  (рис. 9.2).

Характеристика холостого хода СГ при  $n_{\text{ном}} = 3000$  об/мин,  $I = 0$ 

№ п/п	$I_B, \text{A}$	$U_1, \text{В}$	$I_{B*}$	$U_{1*}$

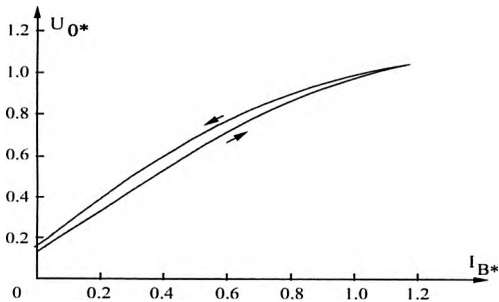


Рис. 9.2. Характеристика холостого хода

Вид характеристики показан на рис. 9.2. и аналогичен виду характеристики намагничивания  $\Phi = f(I_B)$ . Из уравнений (9.1) и (9.2) следует, что в режиме холостого хода напряжение  $U_0$  на зажимах СГ равно ЭДС  $E_0$ , т.е.  $U_0 = E_0 = c_E n \Phi_{0m}$ . Ее нелинейность объясняется насыщением магнитопровода. При отсутствии тока возбуждения ( $I_B = 0$ ) на зажимах СГ имеется напряжение  $U_{\text{ост}} = (0.02 \dots 0.05) U_{\text{ном}}$ , обусловленное остаточным магнитным потоком ротора. Как и в генераторах постоянного тока, характеристика холостого хода не является однозначной вследствие явления гистерезиса в стали.

Внешняя характеристика СГ – это зависимость напряжения  $U$  обмотки статора от тока  $I$  статора при частоте вращения  $n = \text{const}$  и

токе возбуждения  $I_{\text{в}} = \text{const.}$

Включают источник питания 60 - 105 (зеленый индикатор должен светиться), включают панель 68 - 441 регулирования частоты вращения и нажимают на кнопку нагрузки генератора (соседняя красная лампочка должна гореть). Устанавливают частоту вращения генератора 1500 об/мин, которую в дальнейшем поддерживают постоянной.

В режиме холостого хода устанавливают линейное напряжение на обмотке статора 230 В, изменяя ток возбуждения. Затем включают блок резисторов. Для различных сочетаний включенных резисторов, создающих симметричную нагрузку, измеряют напряжение  $U$  на обмотке статора и ток  $I$  статора. Данные измерений заносят в табл. 9.2.

Т а б л и ц а 9.2

### Внешняя характеристика генератора при токе возбуждения

$$I_{\text{в}} = I_{\text{ном}} = \dots \text{ А; } \cos\varphi = 1; f = 50 \text{ Гц}$$

№ п/п	Включенные резисторы	Опытные данные		Расчетные величины	
		$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$U_*$	$I_*$
1	-				
2	$R_2$				
3	$R_2 + R_3$				
4	$R_1$				
5	$R_1 + R_3$				
6	$R_1 + R_2$				
7	$R_1 + R_2 + R_3$				

Расчетные величины:

$$I_* = \frac{I}{I_{\text{ном}}}; U_* = \frac{U}{U_{\text{ном}}}.$$

По данным вычислений строят графическую зависимость  $U = f(I)$ , вид которой показан на рис. 9.3.

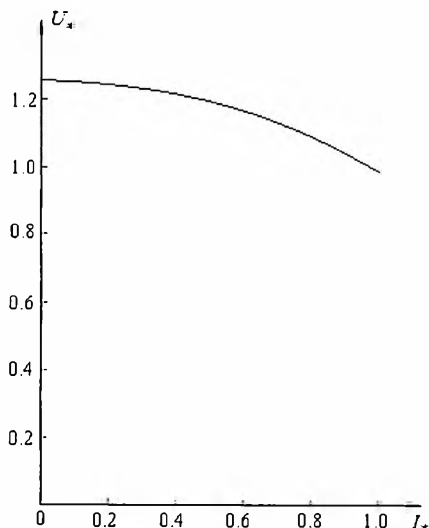


Рис. 9.3. Внешняя характеристика генератора

Регулировочная характеристика СГ показывает как нужно изменять ток возбуждения  $I_b$  при изменении тока статора, чтобы при  $n = const$  напряжение  $U$  на обмотке статора было постоянным. Для снятия характеристики отключают нагрузку и устанавливают напряжение  $U = 230$  В, которое в дальнейшем поддерживают постоянным. Затем, устанавливая различные значения тока статора путем изменения сопротивления фаз приемника, изменяют ток возбуждения так, чтобы напряжение было  $U = const = 230$  В. Данные измерений записывают в табл. 9.3.

Расчетные величины:

$$I_* = \frac{I}{I_{ном}}; I_{в*} = \frac{I_b}{I_{вном}}.$$

По данным вычислений строят графическую зависимость  $I_{в*} = f(I_*)$ , вид которой показан на рис. 9.4.

Т а б л и ц а 9.3

## Регулировочная характеристика генератора при

$$U = U_{\text{ном}} = 230 \text{ В}; \cos\varphi = 1; f = 50 \text{ Гц}$$

№ п/п	Включенные резисторы	Опытные данные		Расчетные величины	
		$I, \text{ А}$	$I_{\text{в}}, \text{ А}$	$I_*$	$I_{\text{в}*}$
1	-				
2	$R_2$				
3	$R_2 + R_3$				
4	$R_1$				
5	$R_1 + R_3$				
6	$R_1 + R_2$				
7	$R_1 + R_2 + R_3$				

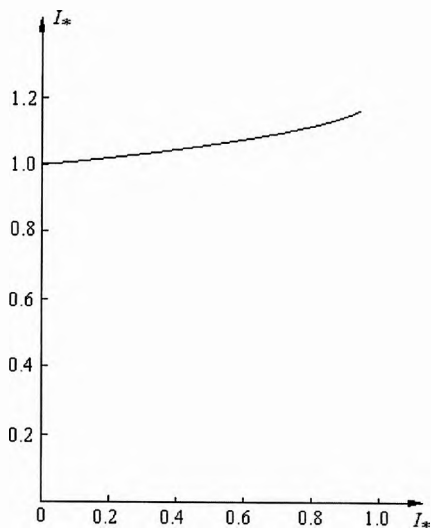


Рис. 9.4. Регулировочная характеристика генератора

### 9.3. Программа работы

1. Запишите номинальные данные электрических машин.
2. Ознакомьтесь с расположением и назначением измерительных приборов.
3. Соберите электрическую цепь согласно схеме (см. рис. 9.1). Осуществите пуск СГ.
4. Снимите характеристики генератора: а) холостого хода; б) внешнюю; в) регулировочную.

Результаты измерений запишите в таблицы 9.1...9.3. По данным измерений постройте эти характеристики, как показано на рис. 9.2...9.4.

5. Запишите технические данные электроизмерительных приборов.
6. Выполните анализ полученных результатов, в котором: отметьте соответствие вида полученных характеристик СГ теоретическим; оцените относительное изменение напряжения  $\Delta u$  генератора; сравните токи возбуждения  $I_{в0}$  и  $I_{вном}$  в режимах холостого хода и номинальной нагрузки СГ при  $U = U_{ном}$  (обычно  $I_{вном}/I_{в0} = 1,5...2,3$ ).

### 9.4. Контрольные вопросы

1. Назовите основные конструктивные элементы синхронного генератора и укажите их графические изображения на электрической схеме (см. рис. 9.1).
2. Каково назначение всех элементов электрической схемы?
3. Как осуществляют пуск, остановку и регулирование частоты вращения приводного ДПТ при снятии характеристик синхронного генератора?
4. Зависит ли напряжение генератора от частоты вращения ротора?
5. Что собой представляют характеристики холостого хода, внешняя и регулировочная? Как и при каких условиях их снимают?

*Веселовский А. П.  
Грачев С. Ю.  
Зверев С. Г.  
Иванов И. И.  
Ларионова В. Л.  
Маркелов В. В.  
Мартьянов М. В.  
Медведева Т. А.  
Савельева И. С.  
Соловьев Г. И.  
Фролов В. Я.  
Юшин Б. А.*

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

### **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебное пособие

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2; 95 3005 – учебная литература

---

Подписано в печать 20.04.2016. Формат 60×84/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 9,25. Тираж 70. Заказ 14229б.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,  
в Типографии Политехнического университета.  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.

