

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
**«Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I»  
(ФГБОУ ВО ПГУПС)**

**Ожерельевский ж.д. колледж - филиал ПГУПС**

СОГЛАСОВАНО

Методист

\_\_\_\_\_ Л.А. Елина  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по УР

\_\_\_\_\_ Н.Н. Иванова  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**

**по дисциплине ОП.03 Электротехника**

специальность 23.02.06 Техническая эксплуатация подвижного состава  
железных дорог

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Пояснительная записка
2. Перечень лабораторных работ
3. Требования к выполнению и оформлению лабораторных работ
4. Лабораторные работы
  - 4.1. Лабораторная работа 3. Проверка закона Ома для участка цепи
  - 4.2. Лабораторная работа 4. Исследование цепи постоянного тока с последовательным соединением резисторов
  - 4.3. Лабораторная работа 5. Исследование цепи постоянного тока с параллельным соединением резисторов
  - 4.4. Лабораторная работа 8. Расчёт магнитной цепи
  - 4.5. Лабораторная работа 9. Проверка законов электромагнитной индукции
  - 4.6. Лабораторная работа 10. Исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления и индуктивности
  - 4.7. Лабораторная работа 11. Исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления и ёмкости
  - 4.8. Лабораторная работа 12. Исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и ёмкости.
  - 4.9. Лабораторная работа 13. Исследование цепи переменного тока с параллельным соединением катушек индуктивности
  - 4.10. Лабораторная работа 14. Исследование цепи переменного тока с параллельным соединением катушек индуктивности и конденсатора
  - 4.11. Лабораторная работа 17. Исследование трёхфазной цепи при соединении потребителей звездой
  - 4.12. Лабораторная работа 18. Исследование трёхфазной цепи при соединении потребителей треугольником
  - 4.13. Лабораторная работа 2. Ознакомление с техническими данными электроизмерительных приборов
  - 4.14. Лабораторная работа 20. Измерение сопротивлений косвенным методом
  - 4.15. Лабораторная работа 21. Включение в цепь и поверка однофазного счётчика электрической энергии
5. Библиографический список

## 1 ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ по дисциплине «**ОП.03 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**» составлены в соответствии с требованиями ФГОС СПО к минимуму содержания и уровню подготовки выпускников СПО по специальности 23.02.06 «Техническая эксплуатация подвижного состава железных дорог» и на основе рабочей программы дисциплины. Данная дисциплина относится к блоку общепрофессиональных дисциплин, устанавливающих базовые знания и иметь практический опыт для освоения ПМ.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен **уметь:**

- собирать простейшие электрические цепи;
- выбирать электроизмерительные приборы;
- определять параметры электрических цепей.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен **знать:**

- сущность физических процессов, протекающих в электрических и магнитных цепях;
- построение электрических цепей, порядок расчета их параметров;
- способы включения электроизмерительных приборов и методы измерений электрических величин.

*Процесс изучения дисциплины направлен на формирование общих компетенций, включающих в себя способность:*

ОК 1. Понимать сущность и социальную значимость своей будущей профессии, проявлять к ней устойчивый интерес.

ОК 2. Организовывать собственную деятельность, выбирать типовые методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество.

ОК 3. Принимать решения в стандартных и нестандартных ситуациях и нести за них ответственность.

ОК 4. Осуществлять поиск и использование информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональных задач, профессионального и личностного развития.

ОК 5. Использовать информационно-коммуникационные технологии в профессиональной деятельности.

ОК 6. Работать в коллективе и команде, эффективно общаться с коллегами, руководством, потребителями.

ОК 7. Брать на себя ответственность за работу членов команды (подчиненных), результат выполнения заданий.

ОК 8. Самостоятельно определять задачи профессионального и личностного развития, заниматься самообразованием, осознанно планировать повышение квалификации.

ОК 9. Ориентироваться в условиях частой смены технологий в профессиональной деятельности.

*Содержание дисциплины ориентировано на подготовку студентов к освоению профессиональных модулей по специальности и овладению*

*профессиональными компетенциями, соответствующими основным видам профессиональной деятельности:*

ПК 1.1. Эксплуатировать подвижной состав железных дорог.

ПК 1.2. Производить техническое обслуживание и ремонт подвижного состава железных дорог в соответствии с требованиями технологических процессов.

ПК 2.2. Планировать и организовывать мероприятия по соблюдению норм безопасных условий труда.

ПК 2.3. Контролировать и оценивать качество выполняемых работ.

ПК 3.2. Разрабатывать технологические процессы на ремонт отдельных деталей и узлов подвижного состава.

Рабочая программа учебной дисциплины предусматривает 32 часа лабораторных работ.

## 2 ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

№ п/п	Название работы (занятия)	Объём часов
1.	Лабораторная работа 3. Проверка закона Ома для участка цепи	2
2.	Лабораторная работа 4. Исследование цепи постоянного тока с последовательным соединением резисторов	2
3.	Лабораторная работа 5. Исследование цепи постоянного тока с параллельным соединением резисторов	2
4.	Лабораторная работа 8. Расчёт магнитной цепи	2
5.	Лабораторная работа 9. Проверка законов электромагнитной индукции	2
6.	Лабораторная работа 10. Исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления и индуктивности	2
7.	Лабораторная работа 11. Исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления и ёмкости	2
8.	Лабораторная работа 12. Исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и ёмкости	2
9.	Лабораторная работа 13. Исследование цепи переменного тока с параллельным соединением катушек индуктивности	2
10.	Лабораторная работа 14. Исследование цепи переменного тока с параллельным соединением катушек индуктивности и конденсатора	2
11.	Лабораторная работа 17. Исследование работы трёхфазной цепи при соединении потребителей звездой	2
12.	Лабораторная работа 18. Исследование работы трёхфазной цепи при соединении потребителей треугольником	2
13.	Лабораторная работа 2. Ознакомление с техническими данными электроизмерительных приборов	2
14.	Лабораторная работа 20. Измерение сопротивлений косвенным методом	2
15.	Лабораторная работа 21. Включение в цепь и поверка однофазного счётчика электрической энергии	2
<b>ИТОГО</b>		<b>30</b>

### **3 ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Лабораторные работы проводятся в кабинете Электротехники (помещение П-2-17). При выполнении работ учащиеся должны иметь конспект лекций, справочные таблицы, чистые листы бумаги формата А4, миллиметровку, авторучки, карандаши, в т. ч. и цветные, транспортиры, оцифрованные линейки и калькуляторы.

Формой контроля качества выполнения лабораторных работ является их оценка как «зачёт/незачёт». Работа учащегося считается невыполненной в том случае, если значение полученного числового результата не совпадает с действительным ответом, неверно указаны параметры вычисленных электромагнитных величин, а также если заданная схема электрической цепи представлена с ошибками.

## 4 ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

### 4.1 Лабораторная работа 3.

**Тема:** проверка закона Ома для участка цепи

**Цель работы:** опытным путём убедиться в справедливости закона Ома для участка цепи, научиться снимать вольт-амперную характеристику

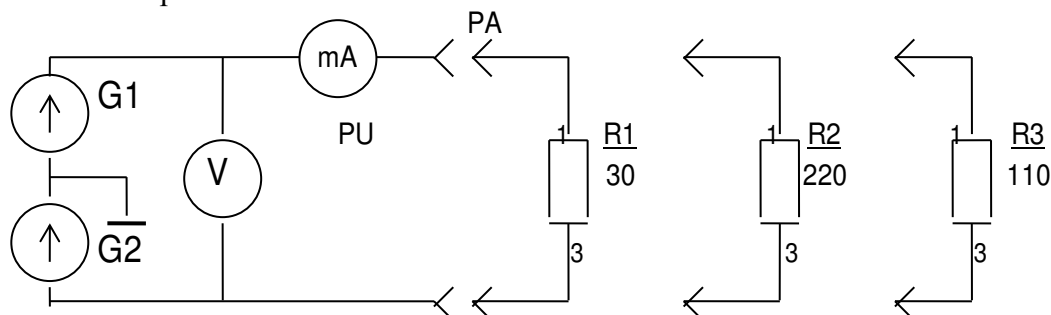
**Оборудование и приборы:** вольтметр и амперметр. Технические характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Обозначение прибора	Наименование прибора	Система прибора	Номинальное значение	Цена деления	Класс точности
PU РА	Вольтметр Амперметр		15В/20В 1000мА 500мА 250мА		

**Исходные данные:**

электрическая схема:



**Краткие теоретические сведения:**

Закон Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

и для участка цепи

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}$$

Сравнивая эти формулы, получим

$$\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varepsilon} = \frac{R}{R + r}$$

Отсюда следует, что, когда по цепи течет ток, разность потенциалов между полюсами источника меньше его ЭДС. При разомкнутой цепи ( $R \rightarrow \infty$ )

$$\varepsilon = \varphi_1 - \varphi_2.$$

### **Порядок выполнения работы:**

1. Согласно «Правилам устройства электроустановок» при проведении лабораторных работ по электротехнике соблюдайте следующие основные требования техники безопасности.
2. Не приступайте к работе, не прослушав инструктаж.
3. Не загромождайте свое рабочее место оборудованием, не относящимся к данной работе.
4. Перед началом сборки цепи убедитесь, что источник напряжения лабораторного стенда отключен.
5. Не используйте приборы с неисправными клеммами, провода с поврежденной изоляцией. Проверьте исправность приборов и целостность изоляции проводников до сборки электрической цепи.
6. Не прикасайтесь к зажимам отключенных конденсаторов. Разрядите конденсатор до сборки цепи и после окончания работы, замкнув его выводы накоротко проводником.
7. Не включайте без разрешения преподавателя собранную электрическую цепь.
8. Не прикасайтесь к находящимся под напряжением элементам цепей, лишенных изоляции.
9. Отключайте цепь от источника напряжения при любых переключениях и пересоединениях.
10. Немедленно отключите цепь от источника напряжения при появлении дыма, специфического запаха горелой изоляции и при исчезновении напряжения в силовой цепи лаборатории.
11. Немедленно отключите источник напряжения стенда или рубильник главного распределительного щита лаборатории при поражении кого-либо электрическим током. Сумейте оказать первую помощь пострадавшему.
12. Ознакомьтесь с техническими характеристиками электроизмерительных приборов и занести сведения о них в соответствующие графы таблицы.
13. Соберите электрическую цепь согласно приведённой в бланке-задании электрической схеме, после чего необходимо предъявить её преподавателю для проверки.
14. Включите лабораторный стенд.
15. Произведите требуемые измерения электрических величин в соответствующей последовательности. Далее, зафиксируйте показания электроизмерительных приборов, преобразуйте их в соответствии с ценами делений и требуемыми единицами измерения, после чего занесите полученные значения в соответствующие графы таблиц, предназначенных для этих целей.
16. Согласно полученным данным выполните соответствующие вычисления.



### Содержание отчёта:

Таблица 2.

U = 10В.		U = 30В		Примечание
I, мА	R', Ом	I, мА	R', Ом	
				R <sub>1</sub> = 30 Ом R <sub>2</sub> = 220 Ом R <sub>3</sub> = 110 Ом

вычислить сопротивление R' и сравнить их с величинами сопротивлений R<sub>1</sub>; R<sub>2</sub>; R<sub>3</sub>

Таблица 3.

R <sub>1</sub> = 30 Ом			R <sub>2</sub> = 220 Ом		
U, В	I, мА	R', Ом	U, В	I, мА	R', Ом
0			0		
10			10		
15			15		
20			20		
25			25		
30			30		

вычислить сопротивление  $R' = \frac{U}{I}$  и сравнить их с величинами сопротивлений R<sub>1</sub>; R<sub>2</sub>;

1 По данным таблицы 2 построить в одних координатных осях графики зависимостей  $I = f(R)$  для двух значений напряжения U.

2 По данным таблицы 3 построить в одних координатных осях графики зависимостей  $I = f(U)$  для двух значений сопротивления R.

### Контрольные вопросы:

1. Как формулируется закон Ома для участка цепи?
2. Как определяют количество уравнений, составляемых по законам Кирхгофа?
3. Что такое ВАХ резистора и что она показывает?
4. Перечислите методы расчета сложных электрических цепей.
5. Как изменится ток в цепи с ростом R?

## 4.2 Лабораторная работа 4

**Тема:** исследование цепи постоянного тока с последовательным соединением резисторов

**Цель работы:** опытным путем проверить основные соотношения между электрическими величинами в цепи постоянного тока с последовательным соединением резисторов.

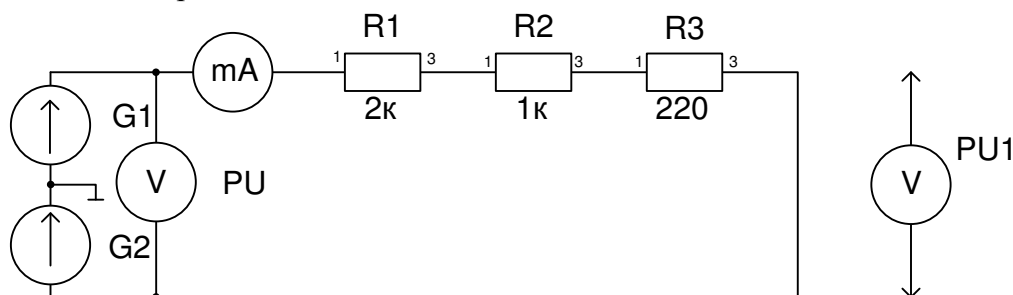
### Оборудование и приборы:

Таблица 1.

Обозначение прибора	Наименование прибора	Система прибора	Номинальное значение	Цена деления	Класс точности
PU	Вольтметр		15В/20В		
PU1	Вольтметр		Цифровой		
РА	Амперметр		50мА		

### Исходные данные:

электрическая схема:



### Краткие теоретические сведения:

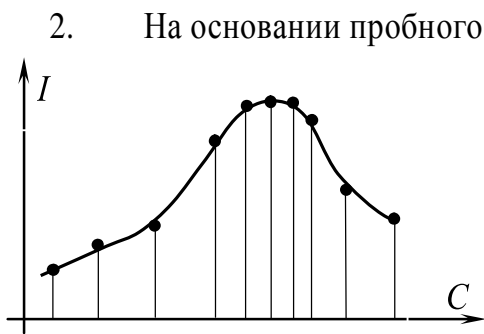
#### Последовательная цепь постоянного тока

Электрической цепью называют совокупность устройств, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в котором могут быть описаны с помощью понятий о напряжении и токе. Задача анализа электрических цепей обычно сводится к определению тем или иным методом токов в ветвях и напряжений на различных участках цепи.

В основе методов анализа цепей лежат законы Кирхгофа и Ома. Для линейных цепей справедливы: принцип наложения (суперпозиции), свойство взаимности, теорема об эквивалентном генераторе и др.

### Порядок выполнения работы:

1. Включите исследуемую цепь. Постепенно увеличивая напряжение от нуля до указанной в методическом описании величины, не производя записи показаний приборов в протокол, убедитесь в том, что пределы измерительных приборов выбраны правильно.



следует производить запись показаний приборов. Целесообразно выбирать неравномерные интервалы. Например, при изучении резонансных явлений следует позаботиться о достаточной густоте экспериментальных точек в области максимума графика, как это показано на рисунке.

рисунке.

3. Для построения кривых производите такое количество измерений, по которым можно построить график исследуемой зависимости со всеми характерными особенностями (максимумы, минимумы, точки перегиба и т.д.). Обычно достаточно предусмотреть 3–9 измерений.

4. Перед началом измерений внимательно определите цену деления приборов.

5. В протокол измерений вносите показания приборов только в размерных единицах. Представление результата эксперимента «в делениях» недопустимо.

6. Одновременно с записью стройте кривую исследуемой зависимости. Если одна или несколько точек лежат в стороне от кривой, то проведите повторное измерение.

7. Если по ходу работы соединение электрической цепи должно быть частично или полностью изменено, то это целесообразно делать после выполнения всех измерений по первой схеме и после того, как полученные результаты будут проверены преподавателем. Вносить изменения в электрическую цепь, разбирать ее можно только с разрешения преподавателя после отключения всех источников электрической энергии.

8. По окончании каждой части работы до разборки электрической цепи оцените правильность полученных результатов, выполните расчеты, постройте графики и весь этот материал представьте преподавателю для проверки.

### Содержание отчёта:

Таблица 2.

Данные измерений					Результаты вычислений										Примечание
U	I	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	R	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	U <sub>1</sub> / U <sub>2</sub>	R <sub>1</sub> / R <sub>2</sub>	U <sub>1</sub> / U <sub>3</sub>	R <sub>1</sub> / R <sub>3</sub>	U'	R'	
В	мА	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	--	--	--	--	В	Ом	
30															
30															R <sub>1</sub> =0
30															R <sub>2</sub> =0
30															R <sub>3</sub> =0

По данным измерений вычислить сопротивления участков и всей цепи

$$R = \frac{U}{I}; \quad R_1 = \frac{U_1}{I}; \quad R_2 = \frac{U_2}{I}; \quad R_3 = \frac{U_3}{I};$$

По полученным результатам проверить соотношения  $U' = U_1 + U_2 + U_3;$

$$R'_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3; \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}; \quad \frac{U_1}{U_3} = \frac{R_1}{R_3}.$$

**Контрольные вопросы:**

1. Какое соединение резисторов называется последовательным?
2. Что характерно для последовательного соединения резисторов?
3. Чему равно напряжение на закороченном резисторе?

### 4.3 Лабораторная работа 5

**Тема:** исследование цепи постоянного тока с параллельным соединением резисторов

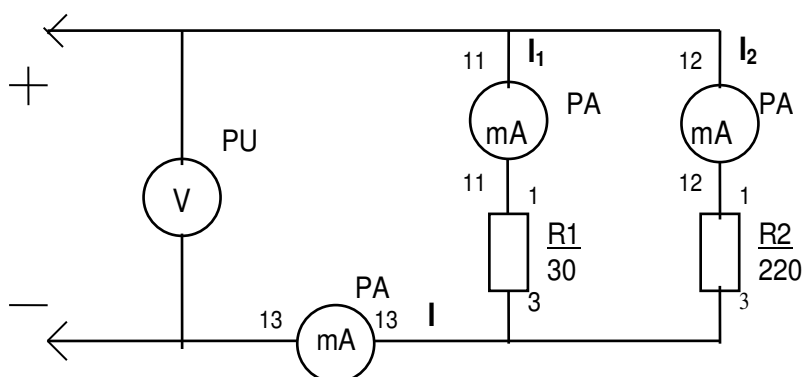
**Цель работы:** опытным путем проверить основные соотношения между электрическими величинами в цепи постоянного тока с параллельным соединением резисторов.

#### Оборудование и приборы:

Таблица 1.

Обозначение прибора	Наименование прибора	Система прибора	Номинальное значение	Цена деления	Класс точности
PU РА	Вольтметр Амперметр		15В/20В 500мА, 1000мА		

#### Исходные данные: электрическая схема



#### Краткие теоретические сведения:

Источник ЭДС - идеализированный активный элемент электрической цепи с двумя зажимами. Его внутреннее сопротивление равно нулю. ЭДС внутри источника направлена от минуса к плюсу. Реальный источник электрической энергии (например, аккумулятор) может быть представлен двумя идеализированными элементами: источником ЭДС  $E$  и внутренним сопротивлением  $R_{в}$ . Разделение зарядов в источнике происходит за счет сторонних сил (химических - аккумуляторы, электромеханических - машинные генераторы, тепловых - термоэлементы и т.д.). Величина работы, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного заряда от отрицательного зажима источника к положительному, называется ЭДС. Численно ЭДС равна напряжению на зажимах источника при отсутствии тока (режим холостого хода).

## Законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда, согласно которому в узлах электрической цепи не может происходить накопление зарядов. Следовательно, сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла, или: алгебраическая сумма токов ветвей в любом узле электрической цепи равна нулю  $\sum I_k = 0$ .

Второй закон Кирхгофа является следствием закона сохранения энергии. Согласно второму закону Кирхгофа, алгебраическая сумма падений напряжений в контуре равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре  $\sum E_k = \sum U_k$ . Знаки слагаемых в каждой сумме зависят от совпадений или несовпадений положительного направления напряжений, токов и ЭДС с направлением обхода контура.

### Порядок выполнения работы:

1. Включите исследуемую цепь. Постепенно увеличивая напряжение от нуля до указанной в методическом описании величины, не производя записи показаний приборов в протокол, убедитесь в том, что пределы измерительных приборов выбраны правильно.
2. Перед началом измерений внимательно определите цену деления приборов.
3. В протокол измерений вносите показания приборов только в размерных единицах. Представление результата эксперимента «в делениях» недопустимо.
4. Если по ходу работы соединение электрической цепи должно быть частично или полностью изменено, то это целесообразно делать после выполнения всех измерений по первой схеме и после того, как полученные результаты будут проверены преподавателем. Вносить изменения в электрическую цепь, разбирать ее можно только с разрешения преподавателя после отключения всех источников электрической энергии.
5. По окончании каждой части работы до разборки электрической цепи оцените правильность полученных результатов, выполните расчеты, постройте графики и весь этот материал представьте преподавателю для проверки.

### Содержание отчёта:

Таблица 2.

Данные измерений				Результаты вычислений										
U	I	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	R	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	g	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	P	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	R'э	I'
В	мА	мА	мА	Ом	Ом	Ом	См	См	См	Вт	Вт	Вт	Ом	А
10														
20														
30														

Формулы для вычислений:  $R = \frac{U}{I}$ ;  $g = \frac{I}{U}$ ;  $P = U \cdot I$ ; убедиться в

справедливости соотношений  $I' = I_1 + I_2$ ;  $P = P_1 + P_2$ ;  $g = g_1 + g_2$ ;

сравнить величину эквивалентного сопротивления  $R' = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$  и  $R$ , а также сопротивления участков.

**Контрольные вопросы:**

1. Перечислите признаки параллельного соединения.
2. Как распределяются токи в параллельно соединенных ветвях?
3. Сравните мощности ветвей с малым и большим сопротивлением

## 4.4 Лабораторная работа 8

**Тема:** расчёт магнитной цепи

**Цель работы:** научиться рассчитывать неразветвлённую магнитную цепь

**Оборудование и приборы:**

Таблица 1.

Обозначение прибора	Наименование прибора	Система прибора	Номинальное значение	Цена деления	Класс точности
PU	Вольтметр		250 В		
РА	Амперметр		250 – 1000мА		

**Исходные данные:** схема неразветвлённой магнитной цепи

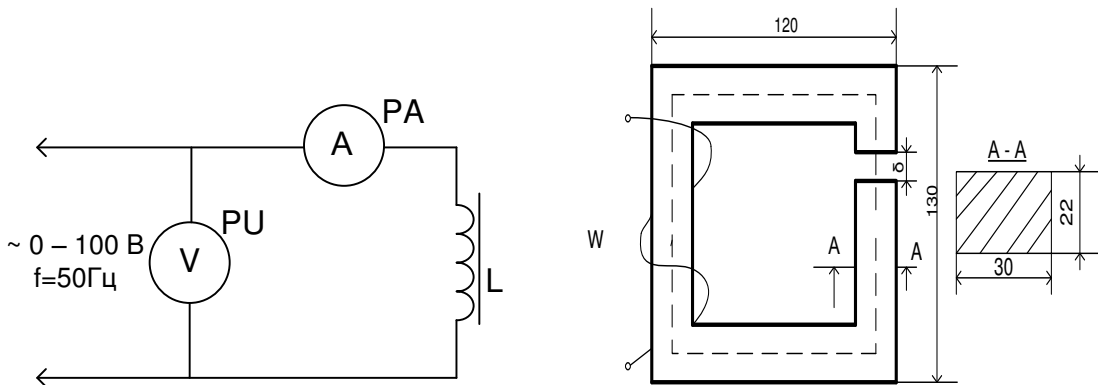


Рис. 1.

Верхняя и нижняя части сердечника выполнены из литой стали, а вертикальные стержни – из электротехнической стали.

Кривая намагничивания стали приведена на рис. 2.

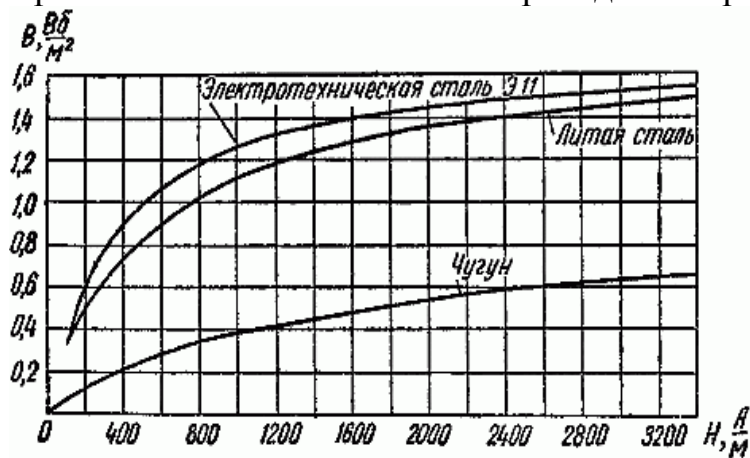


Рис. 2



**Дополнения:** единицы измерения магнитных величин:

$B$  – индукция магнитного поля, Тл (Тесла);

$H$  – напряженность магнитного поля, А/м (Ампер/метр);

$\Phi$  – поток индукции магнитного поля, Вб (Вебер);

$F = I \cdot w$  – магнитодвижущая сила (МДС), А (Ампер);

$U_M = H \cdot l$  – магнитное напряжение, А (Ампер).

Константы:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

### **Краткие теоретические сведения:**

**Намагничивание вещества.** Любое вещество является магнетиком, т. е. способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент - намагничиваться. Намагниченное вещество создает магнитное поле  $B_{\text{магн}}$ , которое накладывается на обусловленное внешними токами  $I_{\text{своб}}$  поле  $B_{\text{своб}}$ . Результирующее поле

$$B = B_{\text{своб}} + B_{\text{магн}}. \quad (1)$$

Величина  $\mu = B/B_{\text{своб}}$  называется магнитной проницаемостью вещества.

Эксперимент показывает, что направление добавочного поля  $B_{\text{магн}}$  относительно первоначального  $B_{\text{своб}}$  может быть различным. По своим магнитным свойствам все вещества делятся на две группы: слабые магнетики, у которых  $\mu$  мало отличается от единицы; сильные магнетики - вещества, у которых  $\mu \gg 1$ . В свою очередь слабые магнетики делятся на две подгруппы: диамагнетики ( $\mu < 1$ ) и парамагнетики ( $\mu > 1$ ). В диамагнетиках  $B_{\text{магн}}$  направлено противоположно  $B_{\text{своб}}$ ; в парамагнетиках эти поля совпадают по направлению. Опишем механизм этих явлений. Атомы многих веществ не имеют постоянных магнитных моментов, или, точнее, все магнитные моменты внутри атома уравновешены. Если включить внешнее магнитное поле, то внутри атома по индукции генерируются слабые дополнительные токи. По правилу Ленца эти токи действуют так, чтобы сопротивляться увеличивающемуся магнитному полю. При этом наведенный магнитный момент атомов направлен противоположно магнитному полю. Это и есть механизм диамагнетизма. Типичные диамагнетики: вода, стекло, инертные газы, большинство органических соединений, графит, Bi, Zn, Cu, Ag, Hg и т.д. Существуют и такие соединения, атомы которых обладают магнитным моментом, т.е. их электронные орбиты имеют ненулевой полный циркулирующий ток. В таких веществах кроме диамагнитного эффекта, который есть всегда, существует возможность выстраивания атомных магнитных моментов в одном направлении. Магнитные моменты выстраиваются по направлению внешнего поля и усиливают его. Парамагнетизм довольно слаб, и тепловое движение легко с ним конкурирует, разрушая магнитное упорядочение. Для обычного парамагнетика эффект тем сильнее, чем ниже температура. Диамагнетизм зависит от температуры значительно слабее. Таким образом, у любого вещества с выстроенными магнитными моментами есть как парамагнитный, так и диамагнитный эффекты, причем парамагнитный эффект обычно доминирует. Типичные парамагнетики: O<sub>2</sub>, Al, Pt, щелочные металлы, редкоземельные элементы и т.д.

К сильным магнетикам относятся ферромагнетики, антиферро-магнетики и ферримагнетики. В ферромагнетиках, свойства которых изучаются в настоящей

работе, возникают большие (до 10 мкм) области спонтанного намагничивания - домены, в которых все так называемые спиновые магнитные моменты электронов выстроены параллельно. Кроме железа типичными ферромагнетиками являются кобальт, никель, гадолиний, их сплавы и соединения, а также некоторые соединения марганца, кобальта и др. В обычных условиях направления магнитных моментов доменов хаотически распределены в пространстве - тело в целом не намагничено. При внесении вещества в магнитное поле домены, ориентированные по полю, растут за счет доменов, ориентированных против поля - тело сильно намагничивается.

Степень намагниченности любого магнетика характеризуется вектором намагниченности - магнитным моментом единицы объема

$$\vec{M}_m = \frac{\sum_{\Delta V} \vec{p}_m}{\Delta V}, \quad (2)$$

где  $\Delta V$  - физически бесконечно малый объем вблизи данной точки,  $p_m$  - магнитный момент отдельной молекулы. В простейшем случае  $p_m$  можно определить как магнитный момент контура с током:  $p_m = I S n$ , где  $I$  - сила тока, текущего по контуру;  $S$  - площадь контура;  $n$  - положительная нормаль к контуру. При определении вектора намагниченности сумма берется по всем молекулам в объеме  $\Delta V$ . С физической точки зрения атомные токи создаются реальными заряженными частицами, движущимися в атомах и молекулах вещества. Эти токи иногда называют амперовскими, т.к. Ампер первый предположил, что магнетизм вещества происходит за счет циркуляции атомных токов.

Определим вектор напряженности магнитного поля  $H(x,y,z)$  в любой точке пространства как

$$H = B / \mu_0 - M_m, \quad (3)$$

здесь  $\mu_0$  - магнитная постоянная.

Опыт показывает, что для не очень больших полей намагниченность пропорциональна магнитному полю. Традиционно намагниченность  $M_m$  связывают не с  $B$ , а с  $H$ :

$$M_m = \chi H. \quad (4)$$

Формула (4) является определением величины  $\chi$  - магнитной восприимчивости вещества. Отметим, что  $\chi < 0$  для диамагнетиков и  $\chi > 0$  для парамагнетиков.

Характеристики  $\chi$  и  $\mu$  связаны друг с другом простым соотношением

$$\mu = 1 + \chi. \quad (5)$$

Учитывая (4) и (5), соотношение (3) можно записать в следующем виде

$$H = \frac{B}{\mu_0(1+\chi)} = \frac{B}{\mu_0\mu}. \quad (6)$$

Заметим, что определенный в (6) вектор  $H$  относится к свободному току в проводниках так же, как вектор  $B$  относится к полному току -

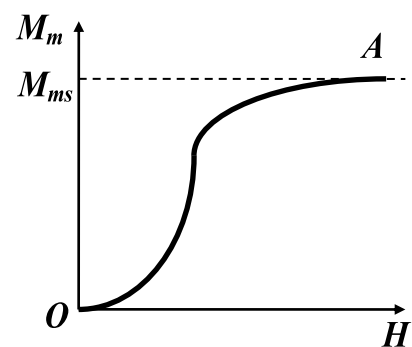


Рис.3

свободному и магнитному (атомному). Несомненно, фундаментальной величиной, характеризующей магнитное поле, является вектор  $\mathbf{B}$ , и именно его следовало бы назвать напряженностью магнитного поля (по аналогии с напряженностью электрического поля). Однако в силу исторических причин  $\mathbf{B}$  называется индукцией магнитного поля, а  $\mathbf{H}$  - напряженностью. Поскольку в магнитных системах легко контролировать именно токи в проводниках - свободные токи, вспомогательный вектор  $\mathbf{H}$  широко используется.

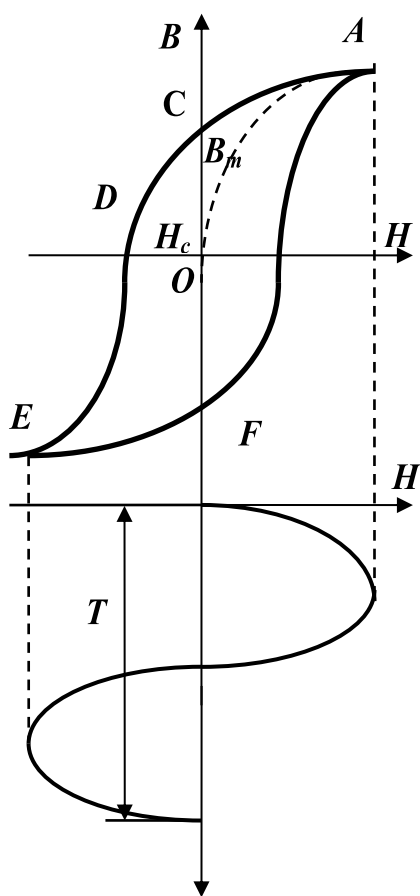


Рис. 4

Основными свойствами ферромагнетиков являются:

- 1) большие величины магнитной проницаемости  $\mu$ , достигающей значения  $10^3 \dots 10^4$ ;
- 2) сложная нелинейная зависимость между  $M_m$  и  $H$  (рис. 3). По мере увеличения напряженности намагничивающего поля намагниченность сначала растет, а затем становится постоянной  $M_m = M_{ms}$  (насыщение). Заметим, что поскольку непосредственно  $M_m$  измерить сложно, на практике измеряют не намагниченность, а связанную с ней величину  $\mathbf{B}$  (см. (3)):  $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{M}_m + \mathbf{H})$ . Зависимость  $\mathbf{B} = f(\mathbf{H})$  изображена на рис. 2. Кривая  $OA$  называется основной кривой намагничивания;

3) для ферромагнетиков зависимость  $\mathbf{B}$  от  $\mathbf{H}$  не только нелинейна, но и неоднозначна:  $\mathbf{B}$  зависит еще и от истории намагничивания образца. Это явление называется магнитным гистерезисом (изменение  $\mathbf{B}$  отстает от изменения  $\mathbf{H}$ ). Из рис. 4 видно, что если после намагничивания ферромагнетика его попытаться размагнитить, то зависимость  $\mathbf{B} = f(\mathbf{H})$  пойдет не по кривой  $AO$ , а по кривой  $ACD$ . Отрезок  $OC$  характеризует остаточную намагниченность образца  $B_m$ . Для того чтобы размагнитить образец, магнитное поле  $\mathbf{H}$  надо направить в противоположную сторону. Кривая пойдет по пути  $CD$ . Точка  $D$  соответствует значению  $H_c$  - коэрцитивной силе образца. Это та напряженность обратного магнитного поля, которая размагничивает образец. Замкнутая кривая  $ACDEFA$  называется петлей гистерезиса. Если точка  $A$  соответствует насыщению образца, ее называют предельной петлей гистерезиса.  $T$  - период изменения поля  $\mathbf{H}$ ;

4) благодаря гистерезису перемагничивание ферромагнетиков сопровождается выделением тепла, количество которого за один цикл перемагничивания определяется интегралом

$$Q = \int_{ACDEFA} \mathbf{B} d\mathbf{H} ,$$

который совпадает с площадью, охватываемой петлей гистерезиса;

5) при повышении температуры до так называемой температуры Кюри ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние и становится слабым магнетиком.

**Порядок выполнения работы:**

1. Намечается средняя линия (см. замкнутую линию  $l_1 - l_2$  на рис.1), которая затем делится на участки с одинаковым сечением магнитопровода и магнитной проницаемостью  $\mu_a$ .

2. Разбивается магнитная цепь на три однородных участка  $l_1, l_2$  и  $l_3$  и высчитываются их длины в м и площади поперечного сечения магнитопровода в м<sup>2</sup>.

3. Исходя из постоянства магнитного потока вдоль всего магнитопровода  $\Phi = B_1 S_1 = B_2 S_2 = B_3 S_3$ ,

определяются значения индукции для каждого  $i$ -го участка ( $i=1,2,3$ ):  $B_i = \Phi/S_i$ . По этой причине  $B_1/B_2 = S_2/S_1, B_1/B_3 = S_3/S_1$ .

4. По кривой намагничивания (рис. 2) для каждого значения  $B_i$  находятся напряженности  $H_i$  на каждом участке магнитной цепи.

Напряженность поля в воздушном зазоре определяется как  $H_3 = B_3/\mu_0$ .

5. По второму закону Кирхгофа для магнитной цепи определяется искомая МДС путем суммирования падений магнитных напряжений вдоль контура:  $NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 = Iw$ .

6. Соответственно находится величина тока  $I = NI/w$ .

**Содержание отчёта:**

Результаты выполнения лабораторной работы должны быть оформлены в виде табл. 2 и табл.3.

**Таблица 2.**

$\delta = 0$		$\delta = 2$ мм
U, В	I, мА	I, мА
0		
25		
50		
75		
100		

Формулы для расчета:  $\Phi_m = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot w}$ ;

$w = 1500$ ; МДС  $F_n = \sqrt{2} I \cdot w$ ;  $R_m = \frac{F_n}{\Phi_m}$ ;

$R_{\text{мс}} = \frac{\delta}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot S}$ ;  $R_{\text{мст}} = R_m - R_{\text{мв}}$

**Таблица 3.**

$\delta$ , мм	$\delta$ , м	l, м	S, м <sup>2</sup>	U, В	$\Phi_m$ , Вб	I, А	$F_n$ , А	$R_m$ , 10 <sup>4</sup> /Гн	$R_{\text{мв}}$ , 10 <sup>4</sup> /Гн	$R_{\text{мст}}$ , 10 <sup>4</sup> /Гн
0	0			50						
	0,001			50						
	0,002			50						
	0,003			50						

**К**

онт  
рол  
ьн  
ые  
воп  
рос  
ы:

1. Как изменяется магнитное сопротивление при увеличении воздушного зазора?

2. Какие параметры характеризуют величины  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\Phi$ ,  $F_H$ , в каких единицах они измеряются?

3. На какие группы можно разделить вещества по характеру намагниченности в данной работе?

## 4.5 Лабораторная работа 9

**Тема:** проверка законов электромагнитной индукции

**Цель работы:** выявить условия возникновения ЭДС электромагнитной индукции в катушках при различных режимах работы

**Оборудование и приборы:** вольтметр - 15 В, миллиамперметр - 0,25 мА

**Исходные данные:** используются три схемы, приведенные на рис. 1-3

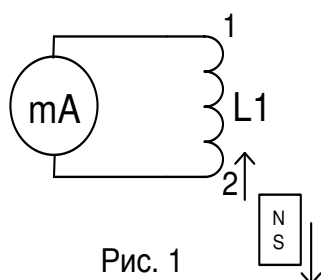


Рис. 1

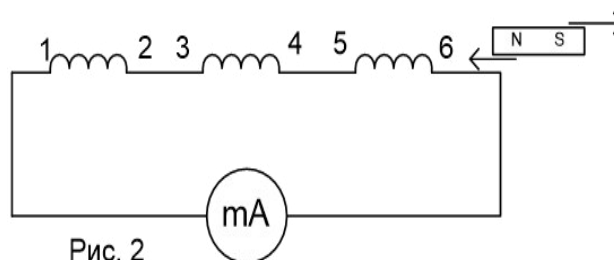


Рис. 2

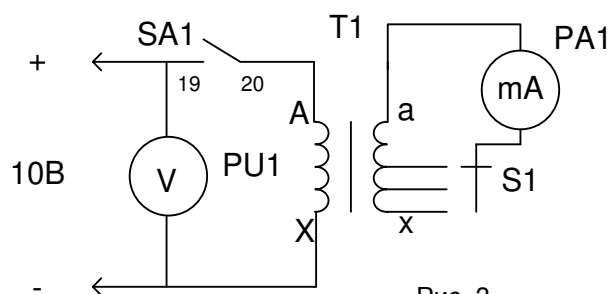


Рис. 3

К

ратк  
ие  
теор

### этические сведения:

**Явление электромагнитной индукции.** В 1831 году английский физик М. Фарадей открыл явление, заключающееся в том, что при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего площадку, ограниченную замкнутым проводящим контуром, в нем возникает электрический ток. Это явление называется явлением электромагнитной индукции, а возникающий ток - индукционным током. Этот факт свидетельствует о том, что при изменении магнитного потока в контуре возникает электродвижущая сила  $\epsilon_i$ . Опыт показал, что  $\epsilon_i$  (ЭДС индукции) зависит от скорости изменения магнитного потока, пронизывающего данный контур, т. е.

$$\epsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} . \quad (1)$$

Магнитный поток, пронизывающий контур, определяется выражением

$$\Phi = B S \cos \alpha , \quad (2)$$

где  $\vec{B}$  - вектор индукции магнитного поля;  $S$  - площадь контура;  $\alpha$  - угол между вектором  $\vec{B}$  и положительной нормалью к площадке.

Индукция и напряженность магнитного поля связаны соотношением

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} ,$$

где  $\mu$  - магнитная проницаемость;  $\mu_0$  - магнитная постоянная.

Если контур содержит  $N$  витков, то  $\mathcal{E}_i$  определяется выражением

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d \Psi}{d t} . \quad (3)$$

Величина  $\Psi$  называется потокосцеплением, или полным магнитным потоком,

$$\Psi = N \Phi . \quad (4)$$

**Соленоид.** Соленоидом называется контур, состоящий из  $N$  витков одинакового радиуса, расположенных вплотную друг к другу. В теории рассматривается бесконечный соленоид, состоящий из бесконечного числа витков.

Известно, что индукция магнитного поля в любой точке внутри бесконечного соленоида

$$B = \mu \mu_0 n I , \quad (5)$$

где  $I$  - ток, текущий по соленоиду;  $n$  - число витков на единицу длины соленоида. Если соленоид конечной длины, то индукция в любой точке любого сечения

$$B' = \frac{\mu \mu_0 n I}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) , \quad (6)$$

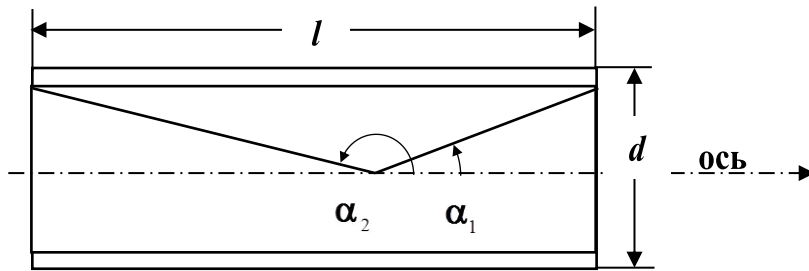


Рис. 1

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - углы между осью соленоида и радиусами - векторами, проведенными из любой точки на оси соленоида к его концам (рис. 1).

### Взаимоиндукция.

Частным случаем явления

электромагнитной индукции является явление взаимной индукции, которое имеет место тогда, когда два контура расположены достаточно близко друг к другу (рис.8.2). При протекании переменного тока  $I_1$  по первому контуру во втором контуре возникает ЭДС индукции, которая определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{i2} = - \frac{d \Phi_{21}}{d t} = - L_{21} \frac{d I_1}{d t} , \quad (7)$$

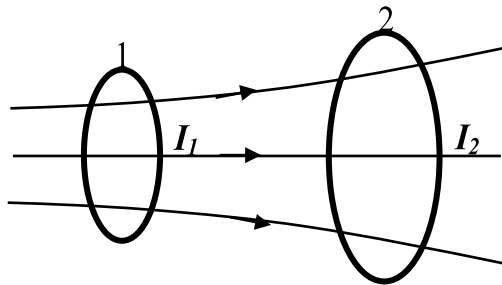


Рис. 2

здесь  $\Phi_{21}$  - магнитный поток, пронизывающий второй контур (создается током  $I_1$ );  $L_{21}$  - коэффициент взаимной индукции второго контура с первым. Если создать переменный ток  $I_2$  во втором контуре, то в первом контуре наведется ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_{i1} = - \frac{d \Phi_{12}}{d t} = - L_{12} \frac{d I_2}{d t} , \quad (8)$$

где  $\Phi_{12}$  - магнитный поток, пронизывающий первый контур ( $\Phi_{12}$  создается током  $I_2$ );

$L_{12}$  - коэффициент взаимной индукции первого контура со вторым.

Теоретически доказано, что  $L_{21} = L_{12}$ . Если это так, то при поочередном протекании одинаковых переменных токов в двух связанных контурах, ЭДС индукции, возникающие в них, должны быть равны, т. е.  $\mathcal{E}_{12} = \mathcal{E}_{21}$ .

### **Порядок выполнения работы:**

1. Ознакомьтесь с техническими характеристиками электроизмерительных приборов и занести сведения о них в соответствующие графы таблицы.
2. Соберите электрическую цепь согласно приведённой в бланке-задании электрической схеме, после чего необходимо предъявить её преподавателю для проверки.
3. Включите лабораторный стенд. Соберите схему.
4. Произведите требуемые измерения электрических величин в соответствующей последовательности. Далее, зафиксировав показания электроизмерительных приборов, преобразуйте их в соответствии с ценами делений и требуемыми единицами измерения, для занесения полученных значений в соответствующие графы таблиц, предназначенные для этих целей.
5. Теоретически определите ЭДС индукции в катушках.
6. По миллиамперметру определите величину тока  $I$ .
7. Поочередно подключая милливольтметр к выводам катушек, определите ЭДС, возникающую в них. Результаты занесите в таблицу.
8. Используя экспериментальные данные, полученные в начале эксперимента, вычислите ЭДС, возникающую в одном витке каждой катушки.
9. Согласно полученным данным выполните соответствующие вычисления.

### **Оформление отчёта:**

Выводы проведённых экспериментов на каждой из 3-х цепей, схемы которых представлены на рис. 1-3 должны быть оформлены в произвольной форме, но с обязательным указанием основных параметров, характеризующих явления электромагнитной индукции.

### **Контрольные вопросы:**

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
2. Что такое магнитный поток и как он вычисляется?
3. Что называется потокоцеплением?
4. Как определяется индукция магнитного поля для конечного и бесконечного соленоидов?
5. Что такое коэффициент взаимной индукции?

## **4.6 Лабораторная работа 10.**



**Тема:** исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления и индуктивности

**Цель работы:** экспериментальная проверка основных теоретических соотношений в цепи переменного тока при последовательном соединении активного и реактивного сопротивлений. Влияние параметров электрической цепи на угол сдвига фаз между напряжением и током.

**Оборудование и приборы:**

лабораторная работа выполняется на стенде ЛСЭ-2 с использованием: блока включения, состоящего из вольтметра автотрансформатора, с помощью которого имеется возможность регулировать напряжение от 0 до 250В.

*Внимание.* Перед включением стенда ручку автотрансформатора повернуть влево до упора.

Блока резисторов.

Блока индуктивностей.

Блока “Коммутатор”.

Блока “Фазометр”.

Ваттметр, с пределом измерений по току до 1А и напряжений до 30В.

Амперметр, с пределом измерений до 1А.

Вольтметр цифровой с автоматическим выбором с пределом измерения до 100 В. Соединительные провода.

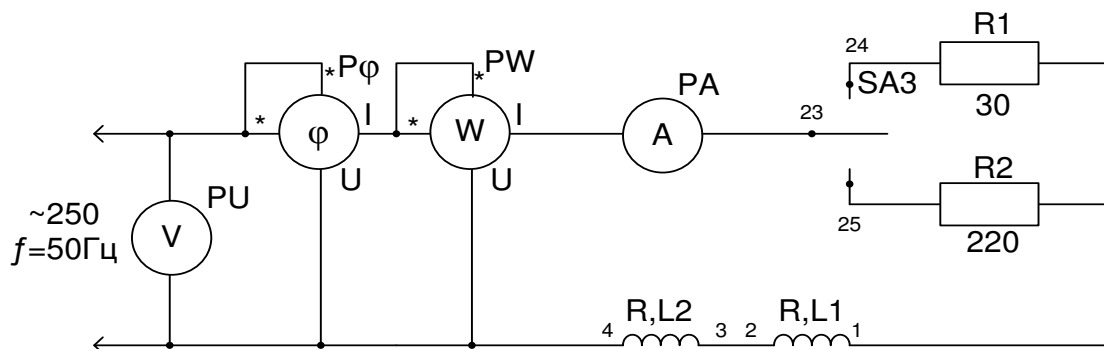
*Внимание:* во всех опытах ток в цепи не должен превышать 0,5А

Таблица 1

Обозначение прибора	Наименование прибора	Номинальное значение	Цена деления	Класс точности
PU	Вольтметр	250 В		
PA	Амперметр	250 мА		
PW	Ваттметр	30 В; 0,5 А		
Pφ	Фазометр			

**Исходные данные:**

Электрическая схема



**Краткие теоретические сведения:**

Рассмотрим электрическую цепь, содержащую последовательно соединенные резистор и индуктивную катушку, схема которой изображена на рис. 1. Пусть цепь подключена к источнику синусоидального напряжения  $u(t)=U_m \sin(\omega t + \psi_i)$ .

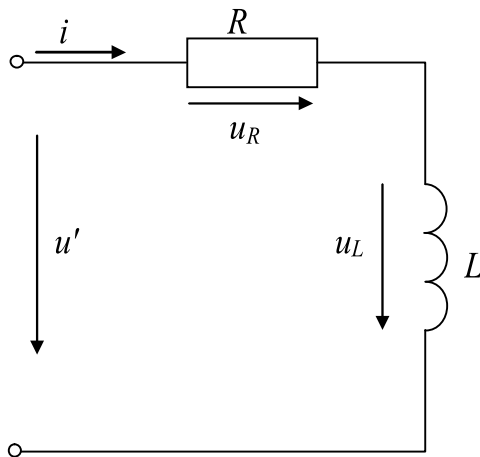


Рис. 1

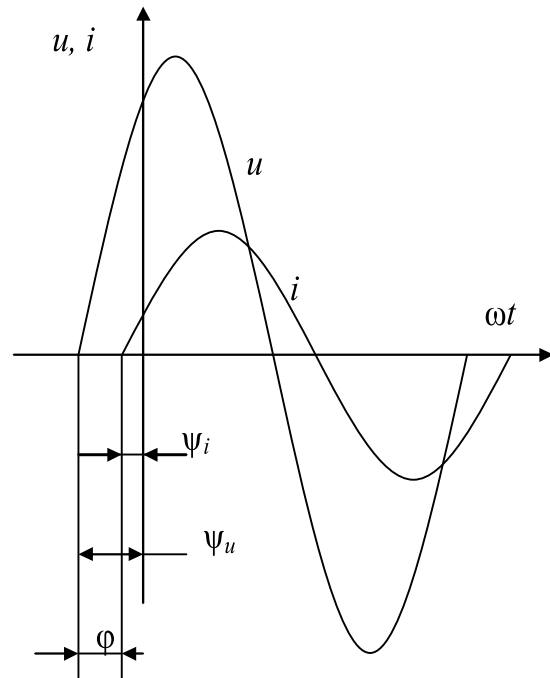


Рис. 2

Если приложенное напряжение изменяется по синусоидальному закону, то падение напряжения на всех элементах и ток в цепи изменяется также по синусоидальному закону (рис. 2)

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

где:  $\omega = 2\pi f$  - угловая частота,  $\psi_u$  - начальная фаза напряжения,  $\psi_i$  - начальная фаза тока.

На основании второго закона Кирхгофа для мгновенных значений напряжений входное напряжение в рассматриваемой цепи

$$u(t) = u_R(t) + u_L(t) = R \cdot i(t) + L di/dt. \quad (2)$$

При подстановке в (2) выражения (1) получим

$$u(t) = RI_m \sin(\omega t + \psi_i) + \omega LI_m \sin(\omega t + \psi_i + \pi/2). \quad (3)$$

Начальная фаза напряжения на активном элементе совпадает с начальной фазой тока. Начальная фаза напряжения на индуктивном сопротивлении отличается от начальной фазы тока на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Синусоидально изменяющаяся во времени функция, изображается вращающимся вектором, длина которого определяется ее амплитудой. Поэтому уравнение (2) представляет собой векторную сумму падений напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L. \quad (4)$$

Совокупность векторов, построенных с соблюдением их взаимной ориентацией на фазе, называется векторной диаграммой. Принято отсчитывать углы начальных фаз от горизонтали, а знак угла считать положительным при вращении вектора против часовой стрелки.

Векторная диаграмма исследуемой цепи рис.1 для действующих значений тока и напряжений показана на рис. 3

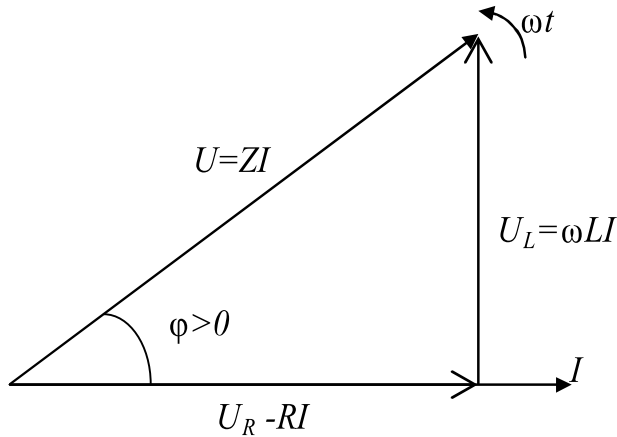


Рис. 3

Для простоты построения диаграммы начальная фаза тока принята равной нулю.

Вектор напряжения на активном сопротивлении совпадает по фазе с вектором тока, а на индуктивном опережает вектор тока на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Знак угла  $\phi$  положительный, если поворот вектора тока к вектору

напряжения на наименьший угол совпадает с положительным направлением вращения векторов. Индуктивный характер цепи соответствует положительному значению угла  $\phi$ .

Результирующий вектор напряжения на входе рассматриваемой цепи опережает вектор тока на угол  $\phi$ , равный разности начальных фаз между приложенным напряжением  $u(t)$  и током  $i(t)$

$$\phi = \psi_u - \psi_i \quad (5)$$

Если в векторной диаграмме рис. 3 все вектора напряжений разделить на общий множитель равный току  $I$ , то получим треугольник сопротивлений (рис. 4.)

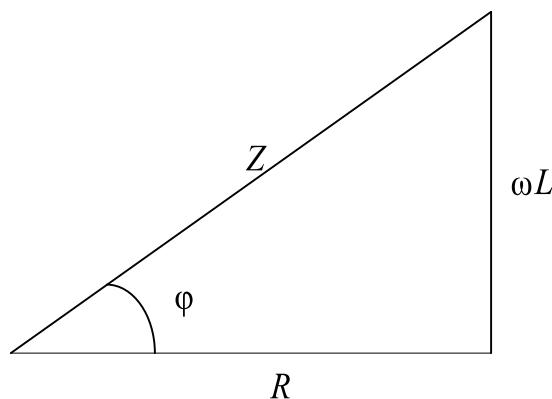


Рис. 4

2.2. Рассмотрим электрическую цепь, содержащую последовательно соединенные резистор и конденсатор, схема которой изображена на рис. 5. Пусть цепь подключена к источнику синусоидального напряжения  $U(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ . Тогда ток в цепи

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

На основании второго закона Кирхгофа для рассматриваемой цепи

$$u(t) = u_R(t) + u_C(t) = Ri + C_0 \int i dt + U_C(0), \quad (9)$$

где  $U_C(0)$  - начальное напряжение на ёмкости

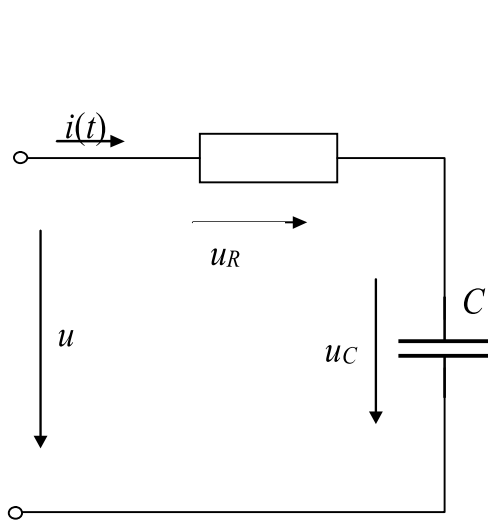


Рис. 5

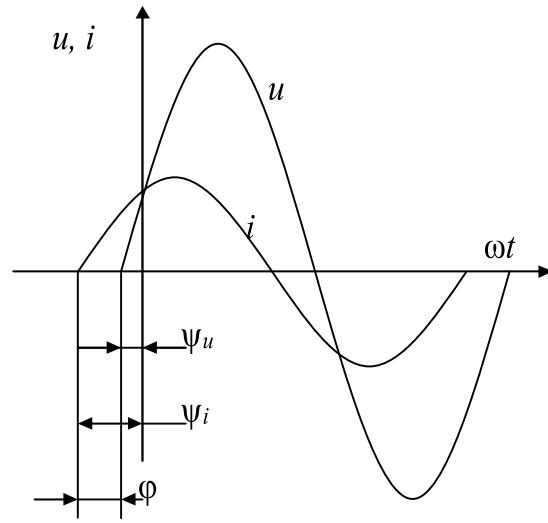


Рис. 6

Если не оговорено особо, считают  $U_C(0) = 0$ .

С учетом выражения (2.1) получим

$$u(t) = RI_m \sin(\omega t + \psi_i) + 1/\omega C I_m \sin(\omega t + \psi_i - \pi/2). \quad (2.10)$$

Временная диаграмма изображена на рис. 6.

Из анализа выражения (10) следует, что напряжение на активном элементе совпадает с током по фазе, а начальная фаза напряжения на емкости отстает от тока на  $\frac{\pi}{2}$ .

Уравнение (9) для векторов напряжений рассматриваемой схемы

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_C. \quad (11)$$

В соответствии с уравнением (11) на рис. 7 построена векторная диаграмма, в которой начальная фаза тока  $\psi_i$  для простоты построения принята равной нулю.

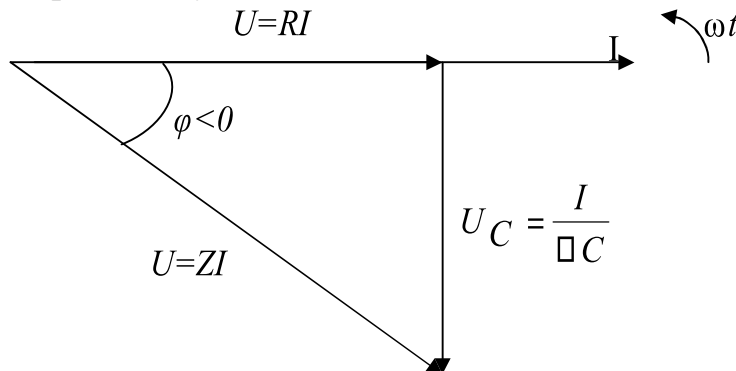


Рис. 7

Вектор напряжения на активном сопротивлении совпадает по фазе с вектором тока, а на емкости отстает от тока на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Результирующий вектор напряжения  $U$  на входе рассматриваемой цепи отстает от вектора тока на угол  $\phi$  равный разности фаз между приложенным напряжением  $U$  и током  $I$   $\phi = \psi_u - \psi_i$ .

Угол сдвига фаз  $\phi$  между током и напряжением отрицательный и соответствует емкостному характеру цепи. Из векторной диаграммы напряжений рис. 7 сокращая значения векторов напряжений на величину  $I$ , получим треугольник сопротивлений рис. 8.

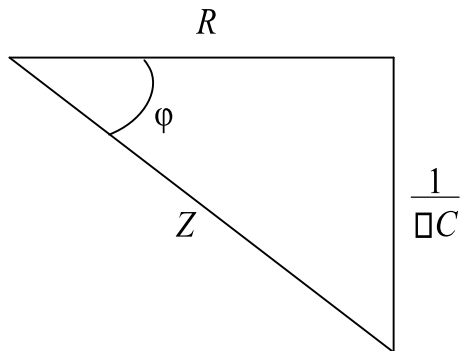


Рис.8

### 2.3. Мгновенная мощность цепи и тока

$$P = ui = U_m \sin(\omega t + \phi) \cdot I_m \sin \omega t. \quad (14)$$

Активная мощность измеряется в ваттах [Вт] и рассеивается в виде тепла на активных сопротивлениях цепи.

Реактивная мощность цепи определяется как

$$Q = I^2 X \quad (16)$$

Единицей измерения реактивной мощности является вольт-ампер реактивный (ВАр).

Полная мощность цепи может быть найдена из выражения

$$S = UI = I^2 Z = \sqrt{Q^2 + P^2} \quad (17) \text{ измеряется в вольт-амперах [ВА].}$$

Если все стороны треугольника напряжений (рис. 3) с учетом масштаба умножить на общий множитель  $I$ , то получится подобный ему треугольник мощностей (9).

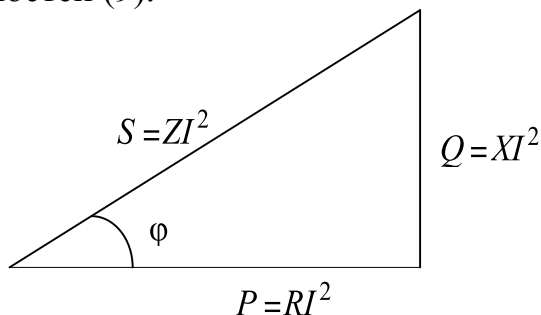


Рис. 9

Из треугольников мощностей (рис.9) следует, что

$$Q = UI \sin \phi \quad (18)$$

Реактивная мощность положительна  $Q > 0$  при  $\phi > 0$ , и отрицательна при  $\phi < 0$ .

### Порядок выполнения работы:

10. Ознакомьтесь с техническими характеристиками электроизмерительных приборов и занести сведения о них в соответствующие графы таблицы.

11. Соберите электрическую цепь согласно приведённой в бланке-задании электрической схеме, после чего необходимо предъявить её преподавателю для проверки.

12. Включите лабораторный стенд. Соберите схему.

13. Произведите требуемые измерения электрических величин в соответствующей последовательности. Далее, зафиксировав показания электроизмерительных приборов, преобразуйте их в соответствии с ценами делений и требуемыми единицами измерения, для занесения полученных значений в соответствующие графы таблиц, предназначенные для этих целей.

### Содержание отчёта:

#### Результаты наблюдений и вычислений

Таблица 2

Параметры цепи		Данные измерений					Результаты вычислений								
		U	I	P	$\phi$	$\cos \phi$	$\sin \phi$	Z	$R_{\Sigma}$	$X_L$	L	$U_a$	$U_L$	Q	S
R, Ом	L, Гн	В	мА	Вт	град			Ом	Ом	Ом	Гн	В	В	вар	ВА
30	0.4	50													
220	0.4	50													
30	2	50													
220	2	50													

Для каждого опыта вычислить:  $Z = \frac{U}{I}$ ,  $R_{\Sigma} = Z \cdot \cos \phi$ ;  $X_L = Z \cdot \sin \phi$ ;

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}; \quad U_a = I \cdot R_{\Sigma};$$

$U_L = I \cdot X_L$ ;  $Q = I \cdot U_L$ ;  $S = U \cdot I$ ; синус и косинус вычислить по таблице через угол  $\phi$ .

Построить векторные диаграммы тока и напряжения для всех опытов, **выбрав масштаб** по напряжению и не изменяя его.

### Контрольные вопросы:

1 Каким соотношением связаны ток и напряжение в цепи переменного тока с активно-индуктивной нагрузкой?

2 Как изменяются показания приборов РА и Р $\phi$  (амперметра и фазометра)

-если при неизменном напряжении изменить R? (указать №№ опытов табл.2)

-если изменить L? (указать №№ опытов табл.2)

## 4.7 Лабораторная работа 11.

**Тема:** исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления и ёмкости

**Цель работы:** экспериментальная проверка основных теоретических соотношений в цепи переменного тока при последовательном соединении активного и реактивного сопротивлений. Влияние параметров электрической цепи на угол сдвига фаз между напряжением и током.

### Оборудование и приборы:

лабораторная работа выполняется на стенде ЛСЭ-2 с использованием: блока включения, состоящего из вольтметра автотрансформатора, с помощью которого имеется возможность регулировать напряжение от 0 до 250В.

*Внимание.* Перед включением стенда ручку автотрансформатора повернуть влево до упора.

Блока резисторов. Блока конденсаторов. Блока “Коммутатор”.

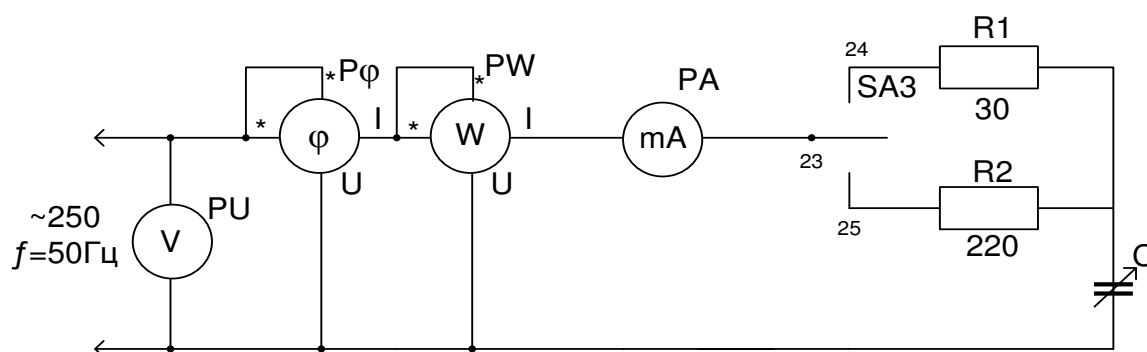
Блока “Фазометр”. Ваттметр, с пределом измерений по току до 1А и напряжений до 30В. Амперметр, с пределом измерений до 1А. Вольтметр цифровой с автоматическим выбором с пределом измерения до 100 В. Соединительные провода.

*Внимание:* во всех опытах ток в цепи не должен превышать 0,5А

Таблица 1

Обозначение прибора	Наименование прибора	Номинальное значение	Цена деления	Класс точности
PU	Вольтметр	250 В		
PA	Амперметр	250 мА		
PW	Ваттметр	30 В; 0,5 А		
Pφ	Фазометр			

### Исходные данные: электрическая схема



### Краткие теоретические сведения:

1 Рассмотрим электрическую цепь, содержащую последовательно соединенные резистор и конденсатор, схема которой изображена на рис. 1. Пусть цепь подключена к источнику синусоидального напряжения  $U(t)=U_m\sin(\omega t+\psi_u)$ . Тогда ток в цепи

$$i(t) = I_m\sin(\omega t + \psi_i).$$

На основании второго закона Кирхгофа для рассматриваемой цепи

$$u(t)=u_R(t)+u_C(t)=Ri+C_0\int idt+U_C(0), \quad (1)$$

где  $U_C(0)$  - начальное напряжение на ёмкости

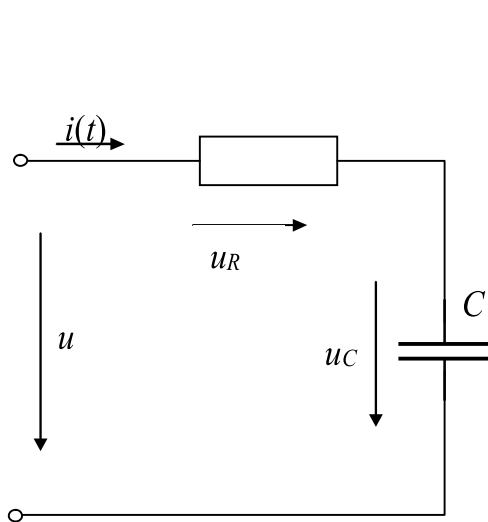


Рис. 1

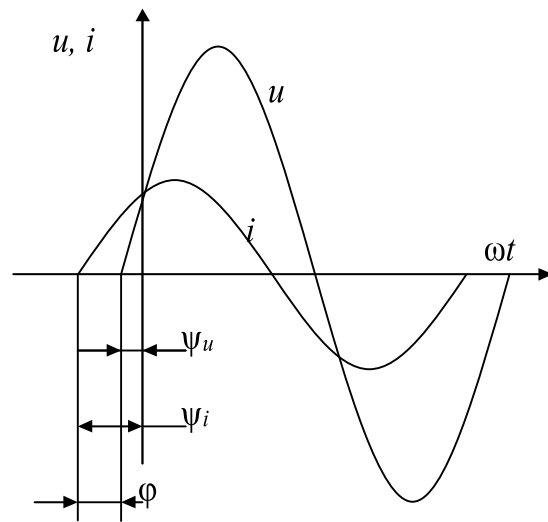


Рис. 2

Если не оговорено особо, считают  $U_C(0)=0$ .

$$\text{Тогда } u(t)=RI_m\sin(\omega t+\psi_i)+1/\omega C I_m\sin(\omega t+\psi_i - \pi/2). \quad (2)$$

Временная диаграмма изображена на рис. 2.

Из анализа выражения (10) следует, что напряжение на активном элементе совпадает с током по фазе, а начальная фаза напряжения на емкости отстает от тока на  $\frac{\pi}{2}$ .

Уравнение (9) для векторов напряжений рассматриваемой схемы

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_C. \quad (3)$$

В соответствии с уравнением (3) на рис. 3 построена векторная диаграмма, в которой начальная фаза тока  $\psi_i$  для простоты построения принята равной нулю.

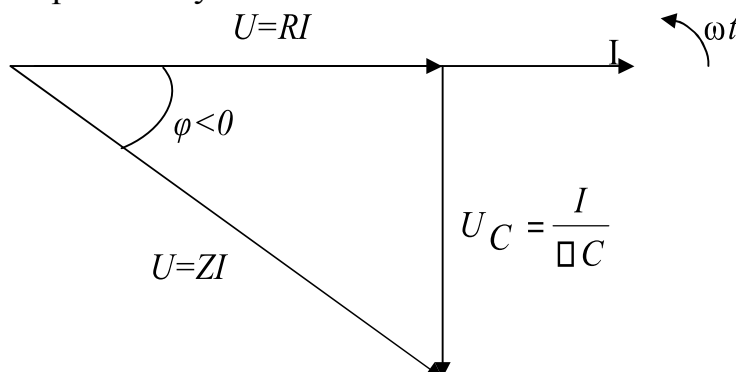




Рис.3

Вектор напряжения на активном сопротивлении совпадает по фазе с вектором тока, а на емкости отстает от тока на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Результирующий вектор напряжения  $U$  на входе рассматриваемой цепи отстает от вектора тока на угол  $\phi$  равный разности фаз между приложенным напряжением  $U$  и током  $I$   $\phi = \psi_u - \psi_i$ .

Угол сдвига фаз  $\phi$  между током и напряжением отрицательный и соответствует емкостному характеру цепи. Из векторной диаграммы напряжений рис. 3 сокращая значения векторов напряжений на величину  $I$ , получим треугольник сопротивлений рис. 4.

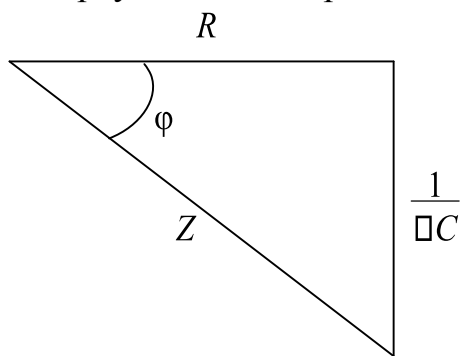


Рис.4

## 2. Мгновенная мощность цепи и тока

$$P = ui = U_m \sin(\omega t + \phi) \cdot I_m \sin \omega t. \quad (4)$$

Активная мощность измеряется в ваттах [Вт] и рассеивается в виде тепла на активных сопротивлениях цепи.

Реактивная мощность цепи определяется как

$$Q = I^2 X \quad (5)$$

Единицей измерения реактивной мощности является вольт-ампер реактивный (ВАр).

Полная мощность цепи может быть найдена из выражения

$$S = UI = I^2 Z = \sqrt{Q^2 + P^2} \quad (6) \text{ измеряется в вольт-амперах [ВА].}$$

Если все стороны треугольника напряжений с учетом масштаба умножить на общий множитель  $I$ , то получится подобный ему треугольник мощностей (5).

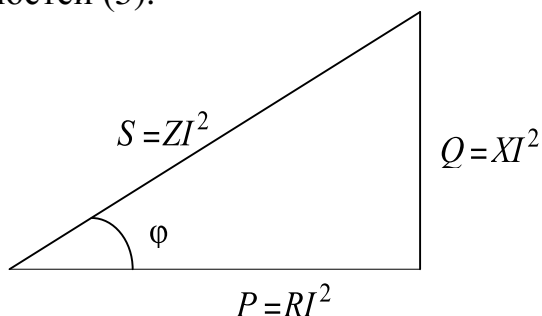


Рис. 5

Из треугольников мощностей (рис.5) следует, что

$$Q = UI \sin \phi \quad (7)$$

Реактивная мощность положительна  $Q > 0$  при  $\phi > 0$ , и отрицательна при  $\phi < 0$ .

### Порядок выполнения работы:

1. Ознакомьтесь с техническими характеристиками электроизмерительных приборов и занести сведения о них в соответствующие графы таблицы.
2. Соберите электрическую цепь согласно приведённой в бланке-задании электрической схеме, после чего необходимо предъявить её преподавателю для проверки.
3. Включите лабораторный стенд. Соберите схему.
4. Произведите требуемые измерения электрических величин в соответствующей последовательности. Далее, зафиксировав показания электроизмерительных приборов, преобразуйте их в соответствии с ценами делений и требуемыми единицами измерения, для занесения полученных значений в соответствующие графы таблиц, предназначенные для этих целей.

### Содержание отчёта: результаты наблюдений и вычислений

Таблица 2

Параметры цепи		Данные измерений						Результаты вычислений								
		U	I	P	$\phi$	cos $\phi$	sin $\phi$	Z	R $_{\Sigma}$	X $_C$	C	U $_a$	U $_C$	Q	S	
R, Ом	C, мкФ	В	мА	Вт	град			Ом	Ом	Ом	мкФ	В	В	вар	ВА	
30	16	50														
220	16	50														
30	30	50														
220	30	50														

1 Для каждого опыта вычислить:  $Z = \frac{U}{I}$ ;  $R_{\Sigma} = Z \cdot \cos \phi$ ;  $X_C = Z \cdot \sin \phi$ ;

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}; U_a = I \cdot R_{\Sigma};$$

$U_C = I \cdot X_C$ ;  $Q = I \cdot U_C$ ;  $S = U \cdot I$ ; синус вычислить по таблице через угол  $\phi$ .

2 Построить векторные диаграммы тока и напряжения для всех опытов, *выбрав масштаб по напряжению и не изменяя его.*

### Контрольные вопросы:

1 Каким соотношением связаны ток и напряжение в цепи переменного тока с активно-ёмкостной нагрузкой?

2 Как изменяются показания приборов РА и Рф:

- если при неизменном напряжении изменить  $R$ ? (указать №№ опытов табл.2)
- если изменить  $C$ ?  $X_C$ ? (указать №№ опытов табл.2)

#### 4.8 Лабораторная работа 12.

**Тема:** исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и ёмкости

**Цель работы:** проверить основные свойства неразветвленной цепи переменного тока с катушкой индуктивности и конденсатором. Исследовать условия возникновения и признаки резонанса напряжений; влияние параметров цепи на угол сдвига фаз тока и напряжения.

#### Оборудование и приборы:

лабораторная работа выполняется на стенде ЛСЭ-2 с использованием: блока включения, состоящего из вольтметра автотрансформатора, с помощью которого имеется возможность регулировать напряжение от 0 до 250В.

*Внимание.* Перед включением стенда ручку автотрансформатора повернуть влево до упора.

Блока резисторов. Блока конденсаторов. Блока “Коммутатор”.

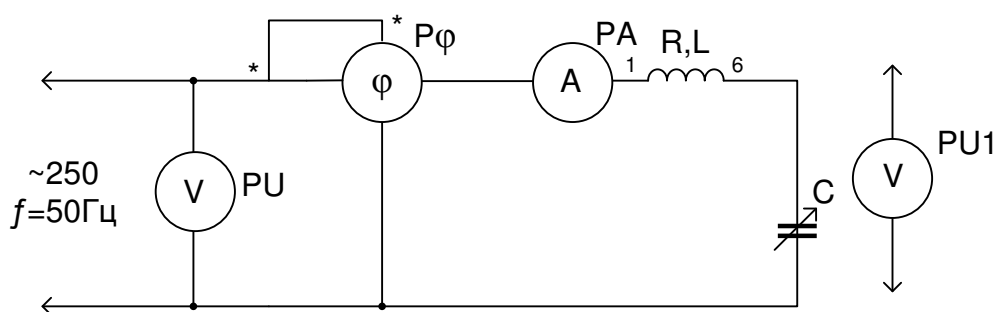
Блока “Фазометр”. Ваттметр, с пределом измерений по току до 1А и напряжений до 30В. Амперметр, с пределом измерений до 1А. Вольтметр цифровой с автоматическим выбором с пределом измерения до 100 В. Соединительные провода.

*Внимание:* во всех опытах ток в цепи не должен превышать 0,5А

Таблица 1

Обозначение прибора	Наименование прибора	Номинальное значение	Цена деления	Класс точности
PU	Вольтметр	250 В		
PU1	Вольтметр	электронный		
PA	Амперметр	250 мА		
Pφ	Фазометр			

#### Исходные данные: электрическая схема



### Краткие теоретические сведения:

Резонансом называют явление резкого увеличения тока или напряжения в электрической цепи, содержащей участки индуктивного и емкостного характера, при котором разность фаз напряжения и тока на входе цепи равна нулю  $\phi = 0$ .

Цепь, состоящую из последовательно соединенных резистора ( $R$ ), конденсатора ( $C$ ) и индуктивности ( $L$ ), называют колебательным контуром (рис. 1.1).

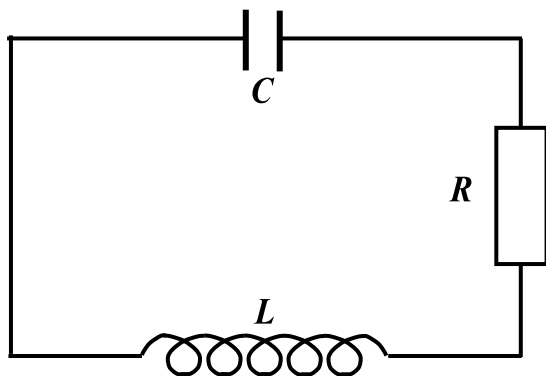


Рис. 1.1

Периодический процесс преобразования энергии электрического поля заряженного конденсатора в энергию магнитного поля катушки индуктивности и обратно называют электромагнитными колебаниями. Свободные электромагнитные колебания в любом реальном контуре всегда затухающие. Первоначальный запас энергии контура в процессе колебаний расходуется на нагревание проводов, по которым течет ток.

Запишем второй закон Кирхгофа для данного контура

$$IR + \frac{q}{C} = -L \frac{dI}{dt}.$$

Разделив это уравнение на  $L$  и заменив  $I = \dot{q}$ , а  $\frac{dI}{dt} = \ddot{q}$ , получим

$$\ddot{q} + \frac{R}{L} \dot{q} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (1)$$

Обозначим  $\frac{R}{L} = 2\beta$ ,  $\frac{1}{LC} = \omega_0^2$ . С учетом этих обозначений уравнение (10.1) примет вид

$$\ddot{q} + 2\beta \dot{q} + \omega_0^2 q = 0. \quad (2)$$

Решением этого дифференциального уравнения является функция (при условии, что  $\beta < \omega_0$ )

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha). \quad (3)$$

Из решения следует, что заряд на пластинах конденсатора меняется по гармоническому закону. Амплитуда колебаний со временем убывает по экспоненте.

Циклическая частота колебаний

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (4)$$

Нетрудно показать, что напряжение на пластинах конденсатора и ток в контуре меняются по гармоническому закону, аналогичному (3).

Период колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (5)$$

Если  $\beta$  (его называют коэффициентом затухания) много меньше  $\omega_0$ , то период колебаний определяется по формуле Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (6)$$

Векторные диаграммы для дорезонансных режимов  $X > 0$ ,  $U_L > U_C$  (индуктивный характер цепи) и  $X < 0$ ,  $U_L < U_C$  (емкостной характер цепи) представлены соответственно на рис. 1.2 и 1.3.

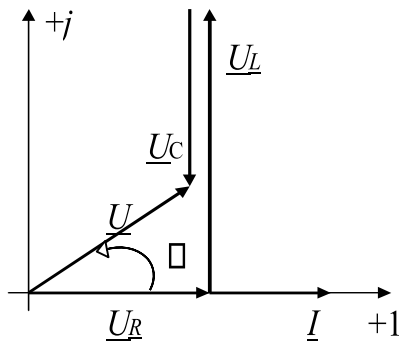


Рис 1.2.

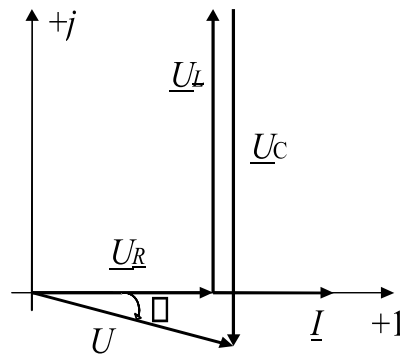


Рис 1.3.

Векторная диаграмма для режима резонанса напряжения представлена на рис. 1.4

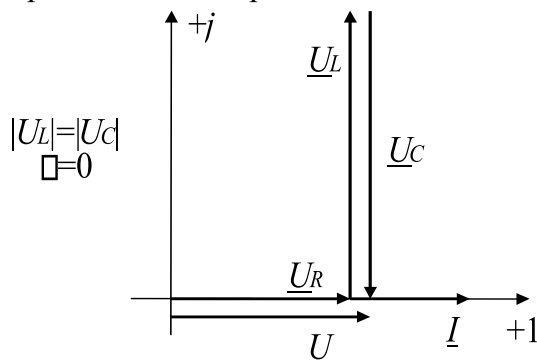


Рис 1.4.

Для реальной электрической цепи, схема которой представлена на рис. 1.5.

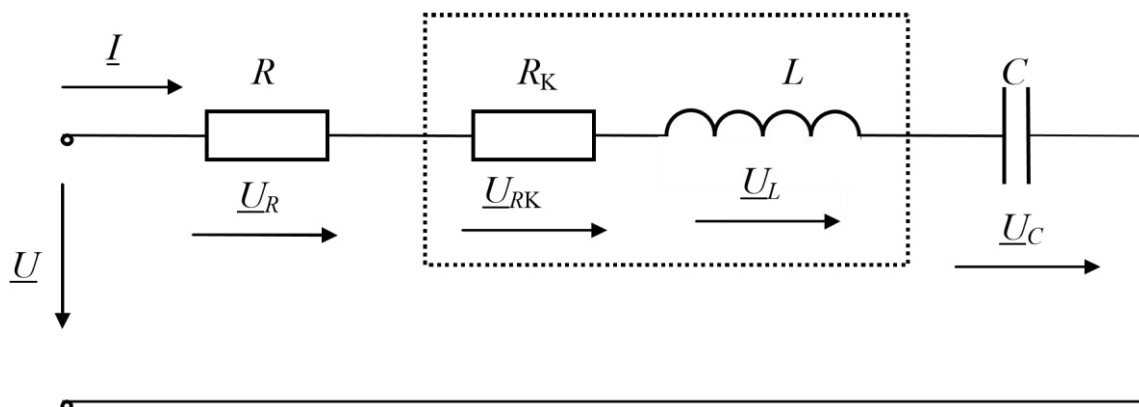


Рис 1.5.

Векторная диаграмма в режиме резонанса напряжений имеет вид, изображенный на рис. 1.6.

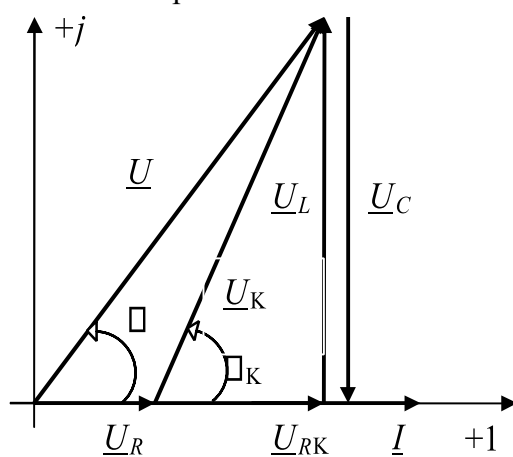


Рис 1.6.

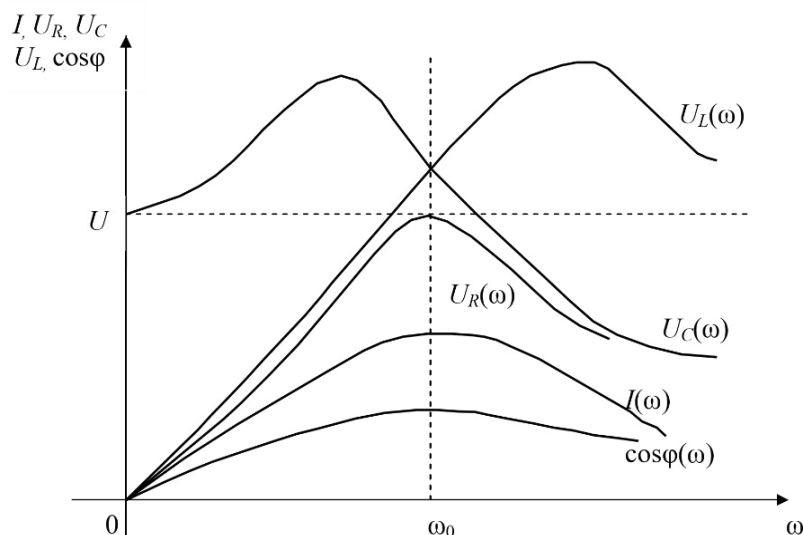


Рис 4.7.

Явление резонанса в цепи, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником и конденсатор, называют феррорезонансом. При последовательном соединении катушки и конденсатора (рис. 1) возникает феррорезонанс напряжений, при параллельном – феррорезонанс токов.

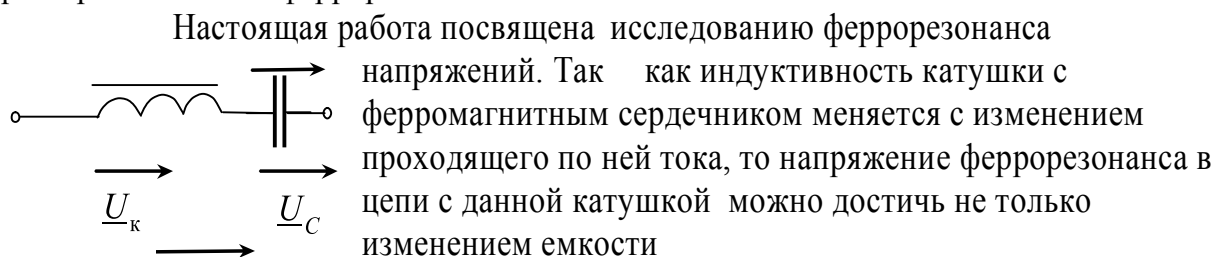
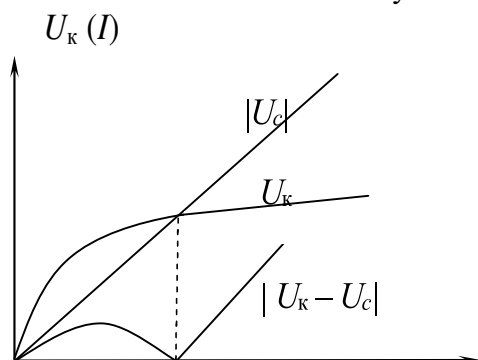


Рис. 1.

конденсатора или частоты, но и путем изменения тока. Плавное изменение напряжения может вызвать скачки амплитуды и фазы тока. При одном и том же напряжении в цепи может существовать три различных значения тока.

Точный анализ явлений феррорезонанса весьма сложен. Для упрощения анализа в первой части работы реальные несинусоидальные кривые токов и напряжений заменим эквивалентными синусоидами, выбрав их амплитуды равными амплитудам первых гармоник реальных кривых, то есть используем метод эквивалентных синусоид.

Если пренебречь потерями в стали и меди катушки, то  $U_k = 4,44Wf\Phi_m$ , где  $W$  – число витков катушки,  $f$  – частота переменного тока,  $\Phi_m$  –  $U$  максимальное значение магнитного потока в катушке.



Напряжение  $U_k$  пропорционально потоку  $\Phi_m$  и магнитной индукции  $B$ . Ток  $I$  пропорционален напряженности магнитного поля.

Следовательно, график представляет кривую намагничивания  $B(H)$ , соответствующем масштабе. Вольтамперная характеристика катушки  $U_k(I)$  показана на рис.2.

Рис. 1.

Вольтамперная характеристика линейного конденсатора  $U_C(I)$  представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат. При принятых выше допущениях напряжения на катушке и конденсаторе находятся в противофазе, поэтому общее напряжение  $U = |U_k - U_C|$  (рис. 2).

При учете потерь в катушке характеристика  $|U_k - U_C|$  имеет вид, показанный на рис.3.

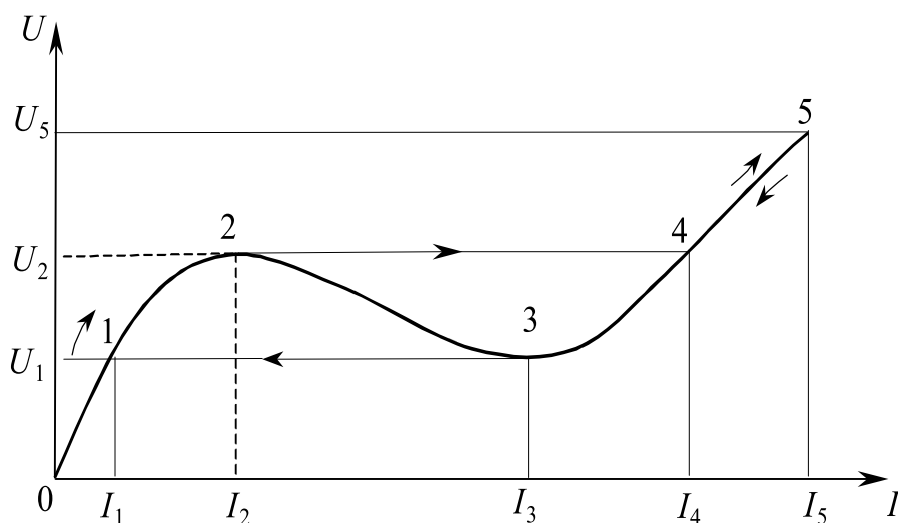


Рис. 3

Особенностью этой характеристики является ее неоднозначность и наличие падающего участка 2-3 с отрицательным динамическим сопротивлением.

Рабочая точка, связывающая координаты напряжения и тока, на возрастающих участках характеристики стабильна, а на падающем участке нестабильна, в связи с чем в рассматриваемой цепи на этом участке возникает неустойчивый режим работы.

Если цепь (рис.1) подключить к источнику напряжения с малым входным сопротивлением, то при увеличении напряжения от нуля рабочая точка будет перемещаться по участку 0 – 1 – 2 характеристики (рис.3), а ток возрастет от 0 до  $I_2$ . При достижении входным напряжением значения  $U_2$  возникает скачок тока от  $I_2$  до  $I_4$  и рабочая точка перемещается на возрастающий участок характеристики 4 – 5 с положительным динамическим сопротивлением. Уменьшение входного напряжения от  $U_5$  до  $U_1$  ведет к плавному убыванию тока до значения  $I_3$  и последующему скачкообразному его уменьшению до значения  $I_1$ .

Эффект скачкообразного изменения одной электрической величины при плавном изменении другой величины называют релейным эффектом. Скачкообразное изменение тока приводит к возникновению скачков напряжения на катушке и конденсаторе.



Участок 2 – 3 вольтамперной характеристики (рис.3) с отрицательным динамическим сопротивлением можно получить экспериментально, если подключить исследуемую цепь (рис.1) к источнику тока (то есть источнику с большим внутренним сопротивлением). В лабораторной работе роль большого внутреннего сопротивления источника выполняет дополнительный конденсатор с емкостью  $C_d$ .

**Порядок выполнения работы:**

1. Ознакомьтесь с техническими характеристиками электроизмерительных приборов и занести сведения о них в соответствующие графы таблицы.
2. Соберите электрическую цепь согласно приведённой в бланке-задании электрической схеме, после чего необходимо предъявить её преподавателю для проверки.
3. Включите лабораторный стенд. Соберите схему.
4. Произведите требуемые измерения электрических величин в соответствующей последовательности. Далее, зафиксировав показания электроизмерительных приборов, преобразуйте их в соответствии с ценами делений и требуемыми единицами измерения, для занесения полученных значений в соответствующие графы таблиц, предназначенные для этих целей.

**Содержание отчёта: результаты наблюдений и вычислений**

Таблица 2.

Параметры цепи		Данные измерений					Результаты вычислений									
		U	I	φ	U <sub>к</sub>	U <sub>с</sub>	Z	Z <sub>к</sub>	R <sub>к</sub>	X <sub>L</sub>	X <sub>с</sub>	X	U <sub>а</sub>	U <sub>L</sub>	U <sub>P</sub>	cos φ
L, Гн	C, мкФ	В	мА	град	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	В	В	В	φ
0,8	6	20														
0,8		20														
0,8	20	20														
0,2	20	20														

1 Для каждого опыта вычислить:  $Z = \frac{U}{I}$ ;  $Z_k = \frac{U_k}{I}$ ;  $R_k = Z \cos \varphi$ , при резонансе

$R_k = Z$ ;

$X_L = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$ ;  $X_c = \frac{U_c}{I}$ ;  $X = X_L - X_c$ ;  $U_a = I \cdot R_k$ ;  $U_L = I \cdot X_L$ ;  $U_P = U_L - U_C = I \cdot X$ ;

$\cos \varphi = \frac{R_k}{Z}$

2 Построить векторные диаграммы тока и напряжения и треугольники сопротивлений для всех опытов, *выбрав масштаб по напряжению*, сопротивлению и не изменяя его.

**Контрольные вопросы:**

1 Как изменение емкости C (сравнить оп. 1и 3) влияет на характер нагрузки и значение угла φ (L=const)?

2 Как изменение индуктивности  $L$  (сравнить оп. 3 и 4) влияет на характер нагрузки и значение угла  $\varphi$  ( $C = \text{const}$ )?

3 Укажите условие и признаки резонанса напряжений.

#### 4.9 Лабораторная работа 13.

**Тема:** исследование цепи переменного тока с параллельным соединением катушек индуктивности

**Цель работы:** проверить основные свойства цепи переменного тока с параллельным соединением катушек индуктивности

**Оборудование и приборы:**

лабораторная работа выполняется на стенде ЛСЭ-2 с использованием: блока включения, состоящего из вольтметра автотрансформатора, с помощью которого имеется возможность регулировать напряжение от 0 до 250В.

*Внимание.* Перед включением стенда ручку автотрансформатора повернуть влево до упора.

Блока резисторов. Блока конденсаторов. Блока “Коммутатор”.

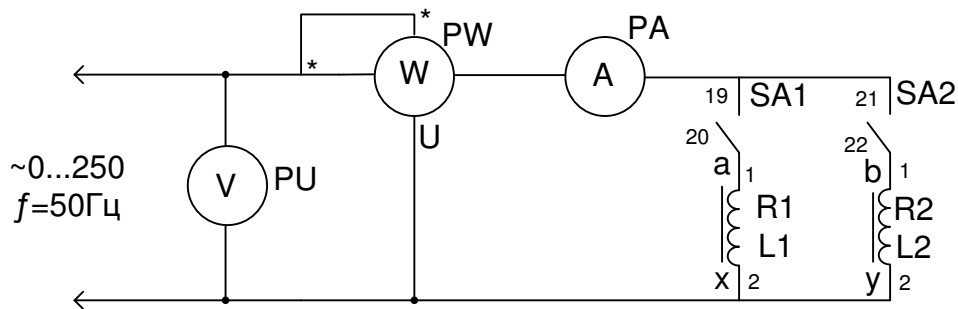
Блока “Фазометр”. Ваттметр, с пределом измерений по току до 1А и напряжений до 30В. Амперметр, с пределом измерений до 1А. Вольтметр цифровой с автоматическим выбором с пределом измерения до 100 В. Соединительные провода.

*Внимание:* во всех опытах ток в цепи не должен превышать 0,5А

Таблица 1.

Обозначение прибора	Наименование прибора	Номинальное значение	Цена деления	Класс точности
PU	Вольтметр	250 В		
PW	Ваттметр	30 В; 0,5 А		
PA	Амперметр	250, 500 мА		

**Исходные данные:** электрическая схема



### Краткие теоретические сведения:

Если приложенное напряжение изменяется по синусоидальному закону, то падение напряжения на всех элементах и ток в цепи изменяется также по синусоидальному закону

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

где:  $\omega = 2\pi f$  - угловая частота,  $\psi_u$  - начальная фаза напряжения,  $\psi_i$  - начальная фаза тока.

На основании второго закона Кирхгофа для мгновенных значений напряжений входное напряжение в рассматриваемой цепи

$$u(t) = u_R(t) + u_L(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di}{dt}. \quad (2)$$

При подстановке в (2) выражения (1) получим

$$u(t) = R I_m \sin(\omega t + \psi_i) + \omega L I_m \sin(\omega t + \psi_i + \pi/2). \quad (3)$$

Начальная фаза напряжения на активном элементе совпадает с начальной фазой тока. Начальная фаза напряжения на индуктивном сопротивлении отличается от начальной фазы тока на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Синусоидально изменяющаяся во времени функция, изображается вращающимся вектором, длина которого определяется ее амплитудой. Поэтому уравнение (2) представляет собой векторную сумму падений напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L. \quad (4)$$

Совокупность векторов, построенных с соблюдением их взаимной ориентацией на фазе, называется векторной диаграммой. Принято отсчитывать углы начальных фаз от горизонтали, а знак угла считать положительным при вращении вектора против часовой стрелки

### Порядок выполнения работы:

1. Ознакомьтесь с техническими характеристиками электроизмерительных приборов и занести сведения о них в соответствующие графы таблицы.

2. Соберите электрическую цепь согласно приведённой в бланке-задании электрической схеме, после чего необходимо предъявить её преподавателю для проверки.
3. Включите лабораторный стенд. Соберите схему.
4. Произведите требуемые измерения электрических величин в соответствующей последовательности. Далее, зафиксировав показания электроизмерительных приборов, преобразуйте их в соответствии с ценами делений и требуемыми единицами измерения, для занесения полученных значений в соответствующие графы таблиц, предназначенные для этих целей.

**Содержание отчёта:** результаты наблюдений и вычислений

Таблица 2.

Параметры цепи		Измерено			Результаты вычислений								
		U	I	P	R	Z	X <sub>L</sub>	L	I <sub>a</sub>	I <sub>p</sub>	cos φ	Q	S
		В	мА	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	мА	мА	φ	вар	ВА
1	L1, R1, W3												
	L2, R2, W3												
	L, R												
2	L1, R1, W2												
	L2, R2, W3												
	L, R												

Для каждого опыта вычислить:  $R = \frac{P}{I^2}$ ;  $z = \frac{U}{I}$ ;  $x_L = \sqrt{z^2 - R^2}$ ;  $L = \frac{X_L}{2\pi f}$ ;

$I_a = I \cdot \cos\varphi$ ;  $I_p = I \cdot \sin\varphi$ ;  $Q = U \cdot I_p$ ;  $S = U \cdot I$ ;  $\cos\varphi = \frac{P}{UI}$ , угол φ и sinφ определить

по таблицам Брадиса.

По данным наблюдений и вычислений таблицы 2 построить для всех опытов в одном масштабе векторные диаграммы токов и треугольники мощностей.

**Контрольные вопросы:**

- 1 Как изменяется величина X<sub>L</sub>, I<sub>p</sub> и Q при изменении числа витков катушки?
- 2 Убедиться по векторной диаграмме для обоих опытов, что I<sub>a1</sub> + I<sub>a2</sub> = I<sub>a</sub>; I<sub>p1</sub> + I<sub>p2</sub> = I<sub>p</sub>.
- 3 Сравнить значение индуктивности отдельных катушек с индуктивностью параллельного соединения.

#### 4.10 Лабораторная работа 14.

**Тема:** исследование цепи переменного тока с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора

**Цель работы:** проверить основные свойства разветвленной цепи переменного тока с катушкой индуктивности и конденсатором. Исследовать признаки резонанса токов, влияние параметров цепи на угол сдвига фаз тока и напряжения.

**Оборудование и приборы:** технические данные используемых приборов приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Обозначение прибора	Наименование прибора	Номинальное значение	Цена деления
PU	Вольтметр	250 В	
Rφ	Фазометр		
PA1	Амперметр	250, 500 мА	

Лабораторная работа выполняется на стенде ЛСЭ-2 с использованием: блока включения, состоящего из вольтметра автотрансформатора, с помощью которого имеется возможность регулировать напряжение от 0 до 250В.

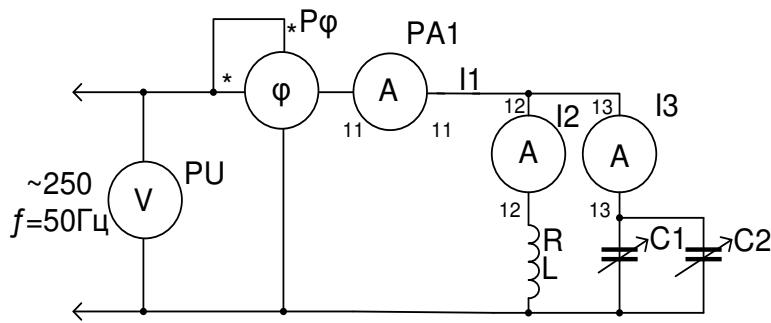
*Внимание.* Перед включением стенда ручку автотрансформатора повернуть влево до упора.

Блока резисторов. Блока конденсаторов. Блока “Коммутатор”.

Блока “Фазометр”. Ваттметр, с пределом измерений по току до 1А и напряжений до 30В. Амперметр, с пределом измерений до 1А. Вольтметр цифровой с автоматическим выбором с пределом измерения до 100 В. Соединительные провода.

*Внимание:* во всех опытах ток в цепи не должен превышать 0,5А

**Исходные данные:** электрическая схема приводится ниже



**Краткие теоретические сведения:**

Резонансом токов называется такой режим работы электрической цепи, содержащей параллельно соединенные индуктивную катушку и конденсатор (рис. 1), при котором ее входная реактивная проводимость равна нулю ( $B = 0$ ). Для режима резонанса токов характерна возможность установления токов в катушке и конденсаторе, существенно превышающих ток в неразветвленной части цепи.

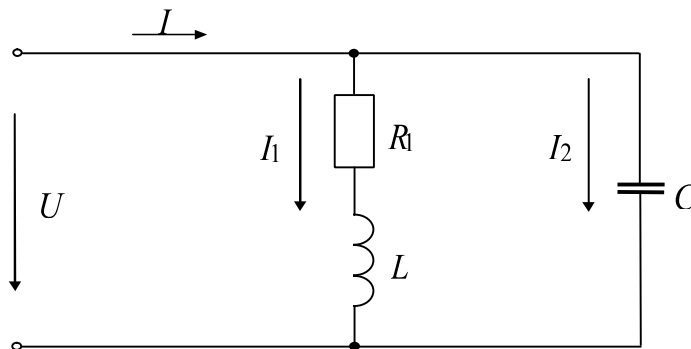


Рис. 1.

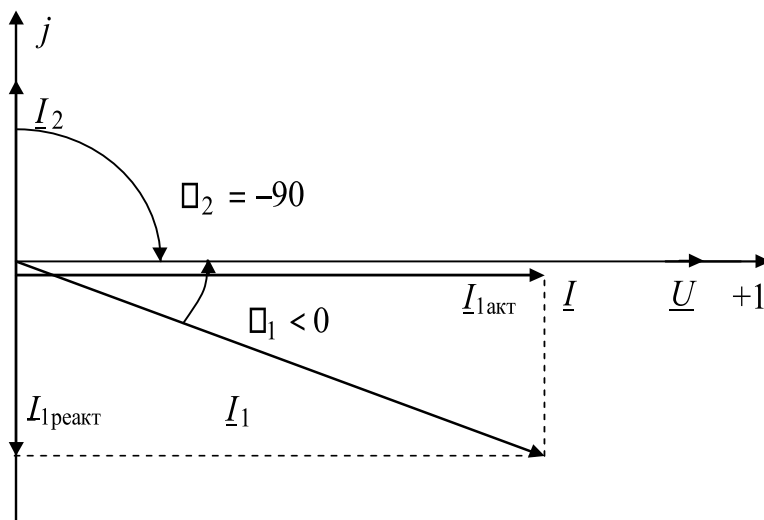


Рис. 2.

При резонансе ток в неразветвленной части цепи, если он отличен от нуля, совпадает по фазе с приложенным напряжением (рис. 2)

$$\phi = 0, \quad (1)$$

где  $\phi = \psi_u - \psi_i$ ;

Кроме общего условия для резонанса токов справедливо

$$\operatorname{Im}\{Y_{\text{вх}}\}=0. \quad (2)$$

Как видим, резонанс в цепи может быть получен изменением любого из трёх параметров цепи  $\omega, L, C$ .

Как следует из анализа, резонанс возможен, если  $R_1 < \rho$ .

### **Порядок выполнения работы:**

1. Согласно «Правилам устройства электроустановок» при проведении лабораторных работ по электротехнике соблюдайте следующие основные требования техники безопасности.
2. Не приступайте к работе, не прослушав инструктаж.
3. Не загромождайте свое рабочее место оборудованием, не относящимся к данной работе.
4. Перед началом сборки цепи убедитесь, что источник напряжения лабораторного стенда отключен.
5. Не используйте приборы с неисправными клеммами, провода с поврежденной изоляцией. Проверьте исправность приборов и целостность изоляции проводников до сборки электрической цепи.
6. Не прикасайтесь к зажимам отключенных конденсаторов. Разрядите конденсатор до сборки цепи и после окончания работы, замкнув его выводы накоротко проводником.
7. Не включайте без разрешения преподавателя собранную электрическую цепь.
8. Не прикасайтесь к находящимся под напряжением элементам цепей, лишенных изоляции.
9. Отключайте цепь от источника напряжения при любых переключениях и пересоединениях.
10. Немедленно отключите цепь от источника напряжения при появлении дыма, специфического запаха горелой изоляции и при исчезновении напряжения в силовой цепи лаборатории.
11. Немедленно отключите источник напряжения стенда или рубильник главного распределительного щита лаборатории при поражении кого-либо электрическим током. Сумейте оказать первую помощь пострадавшему.
12. Ознакомьтесь с техническими характеристиками электроизмерительных приборов и занести сведения о них в соответствующие графы таблицы.

13. Соберите электрическую цепь согласно приведённой в бланке-задании электрической схеме, после чего необходимо предъявить её преподавателю для проверки.

14. Включите лабораторный стенд.

15. Произведите требуемые измерения электрических величин в соответствующей последовательности. Далее, зафиксируйте показания электроизмерительных приборов, преобразуйте их в соответствии с ценами делений и требуемыми единицами измерения, после чего занесите полученные значения в соответствующие графы таблиц, предназначенных для этих целей.

16. Согласно полученным данным выполните соответствующие вычисления.

**Содержание отчёта:** результаты наблюдений и вычислений должны быть представлены в табл. 2

Таблица 2.

Параметры цепи		Данные измерений					Результаты вычислений						
		U	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	φ	I <sub>a</sub>	I <sub>p</sub>	cos φ	sin φ	P	Q	S
L, Гн	C, мкФ	В	мА	мА	мА	град	мА	мА	--	--	Вт	вар	ВА
0,8	6	20											
0,8		20											
0,8	40	20											

1 Для каждого опыта вычислить:  $I_a = I_1 \cdot \cos \varphi$ ;  $I_p = I_1 \cdot \sin \varphi$ ;  $P = U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$ ;  $Q = U \cdot I_1 \cdot \sin \varphi$ ;  $S = U \cdot I_1$

2 По данным наблюдений и вычислений таблицы 2 построить для всех опытов в одном масштабе векторные диаграммы токов и треугольники мощностей.

### Контрольные вопросы:

1 Как изменение емкости влияет на величину и знак угла φ, на Q?

2 Указать условие резонанса токов, признаки резонанса и пояснить изменение величины P и Q при резонансе.



#### 4.11 Лабораторная работа 17.

**Тема:** исследование трёхфазной цепи при соединении потребителей звездой

**Цель работы:** изучить работу трехфазной системы при включении приёмником энергии звездой в различных режимах нагрузки фаз, исследовать влияние нулевого провода на характер работы системы.

**Оборудование и приборы:** технические данные используемых приборов приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Обозначение прибора	Наименование прибора	Номинальное значение	Цена деления	Класс точности
РА1	Амперметр	250-1000мА		
РА2	Амперметр	250-1000мА		
РУ	Вольтметр	Цифровой		

Лабораторная работа выполняется на стенде ЛСЭ-2 с использованием:

1. блока включения, состоящего из вольтметра автотрансформатора, с помощью которого имеется возможность регулировать напряжение от 0 до 250В.

2. *Внимание.* Перед включением стенда ручку автотрансформатора повернуть влево до упора.

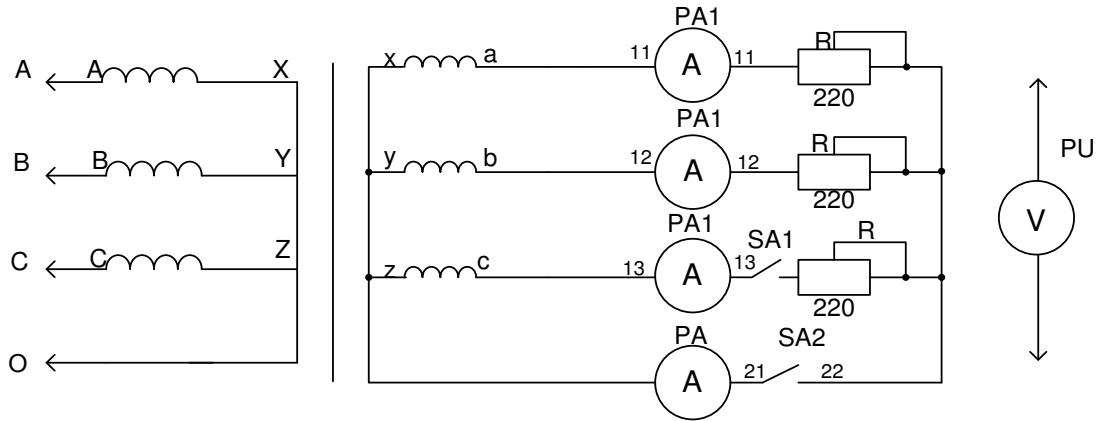
3. Блока резисторов. Блока конденсаторов. Блока “Коммутатор”.

4. Блока “Фазометр”. Ваттметр с пределом измерений по току до 1А и напряжений до 30В. Амперметр с пределом измерений до 1А.

Соединительные провода.

5. *Внимание:* во всех опытах ток в цепи не должен превышать 1А.

**Исходные данные:** электрическая схема приводится ниже





**Краткие теоретические сведения:**

Под трехфазной системой понимается совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол  $2\pi/3$  ( $120^\circ$ ), создаваемые общим источником электрической энергии (например, синхронным генератором).

При соединении обмоток генератора или приемников звездой концы трех фаз соединены в общую точку, называемую нейтральной или нулевой.

На практике применяются две схемы соединения фаз генератора и приемника, соединенных звездой:

- а) звезда –  – звезда с нулевым проводом;
- б) звезда –  – звезда без нулевого провода.

На рис. 1 изображена схема трехфазной цепи соединения звезда – звезда с нулевым проводом. а на рис. 7.2 – звезда – звезда без нулевого провода.

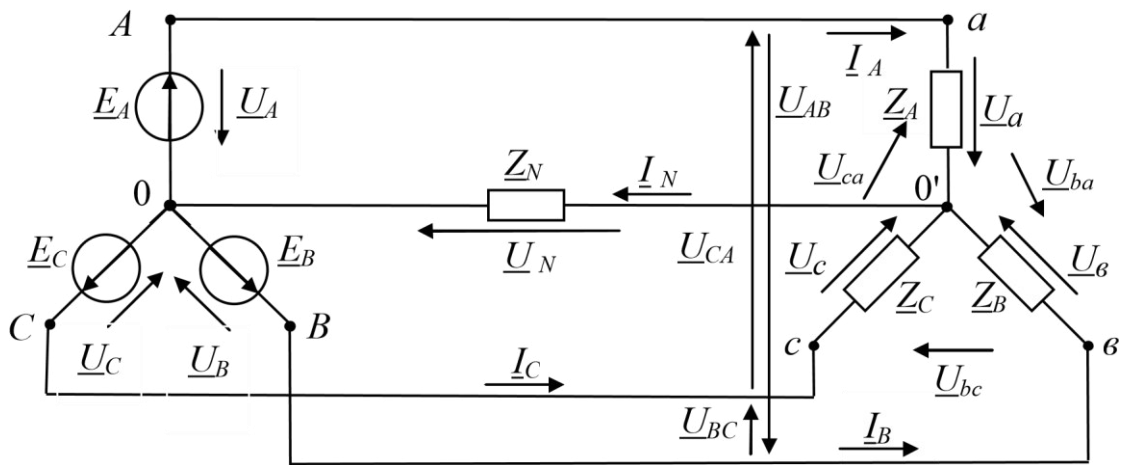


Рис. 1

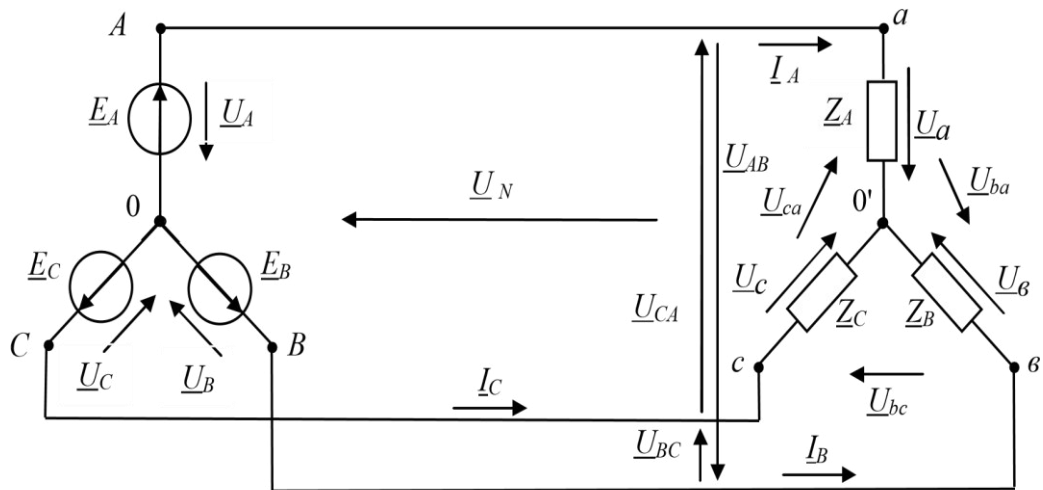


Рис. 7.2

ЭДС, наводимые в фазных обмотках генератора, напряжения на их зажимах, напряжения на фазах нагрузки и токи в них называются соответственно фазными ЭДС, напряжениями и токами и обозначаются:

$E_{\Phi}$  или  $E_A, E_B, E_C$ ;

$U_{\Phi}$  или  $U_A, U_B, U_C$ ;  $I_{\Phi}$  или  $I_A, I_B, I_C$ ;

при этом имеются ввиду действующие значения.

Напряжения между линейными проводами и токи в них называются линейными напряжениями и токами и обозначаются соответственно


$U_{\text{л}}$  или  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ ;

$I_{\text{л}}$  или  $I_A, I_B, I_C$ .

Очевидно, что для схем соединения фаз приемника звездой в линейных проводниках и в нагрузке протекает один и тот же ток

$$I_{\text{л}} = I_{\Phi}. \quad (1.1)$$

В работе проводится исследование режимов работы трехфазной цепи при условии симметричной системы ЭДС генератора. Фазы генератора и приемника соединены звездой. В расчетах считаем, что фазные ЭДС генератора равны их фазным напряжениям. Сопротивления соединительных проводов пренебрегаем.

Для схемы соединения  (рис.1) имеют место следующие соотношения:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \underline{I}_N, \quad (1.2)$$

где ток  $\underline{I}_N$  - ток нулевого провода.

При заданной системе фазных ЭДС генератора

$$\underline{I}_A = (\underline{E}_A - \underline{U}_N) \underline{Y}_A,$$

$$\underline{I}_B = (\underline{E}_B - \underline{U}_N) \underline{Y}_B,$$

$$\underline{I}_C = (\underline{E}_C - \underline{U}_N) \underline{Y}_C,$$

$$\underline{I}_N = \underline{U}_N \underline{Y}_N,$$

где  $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$  - комплексные проводимости фаз нагрузки (величины обратные комплексным сопротивлениям  $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$ ),  $\underline{Y}_N$  - комплексная проводимость нулевого провода (величина обратная  $\underline{Z}_N$ );  $\underline{U}_N$  - напряжение между нейтральными точками 0' и 0 (смещение нейтрали)

$$\underline{U}_N = \underline{U}_{0'0} = \underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C + \underline{U}_N \underline{Y}_N. \quad (1.4)$$

Топографическая диаграмма напряжений, совмещенная с векторной диаграммой токов, изображена на рис. 3.

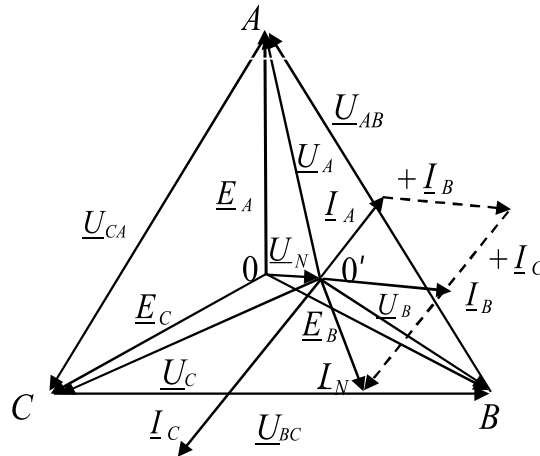


Рис. 3

При симметричной нагрузке фаз  $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C$  расчет упрощается:

$$\begin{aligned} E_\phi = U_\phi, \quad U_N = 0, \quad (1.5) \\ \sqrt{U_L} = 3U_\phi, \quad I_N = 0. \end{aligned}$$

Необходимость в нулевом проводе отпадает.

Для схемы соединения  $\_ / \_$  (рис. 7.2.) при заданной системе фазных ЭДС генератора справедливы все соотношения схемы  $\_ / \_$  при условии  $\underline{Y}_N = 0$ .

При соединении приемника звездой без нейтрального провода, фазные напряжения можно определить, зная линейные напряжения и комплексные проводимости фаз нагрузки по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{AB} \underline{Y}_B - \underline{U}_{CA} \underline{Y}_C, \quad \underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_{BC} \underline{Y}_C - \underline{U}_{AB} \underline{Y}_A, \\ \underline{U}_C &= \underline{U}_{CA} \underline{Y}_A - \underline{U}_{BC} \underline{Y}_B. \\ \underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C & \end{aligned} \quad (1.6)$$

Фазные токи определяются по закону Ома:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{U}_A \underline{Y}_A, \\ \underline{I}_B &= \underline{U}_B \underline{Y}_B, \\ \underline{I}_C &= \underline{U}_C \underline{Y}_C. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Кроме того, очевидно, что

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (1.8)$$

В случае короткого замыкания фазы  $B$  крайним положением нулевой точки будет вершина угла треугольника напряжений. Если же произойдет обрыв фазы  $B$ , то нулевая точка сместится на сторону, противоположную вершине этого угла. Фазы же  $A$  и  $C$  окажутся включенными последовательно под линейное напряжение  $U_{CA}$ , которое распределится между ними поровну. Это вызовет плохой накал ламп той и другой фаз.

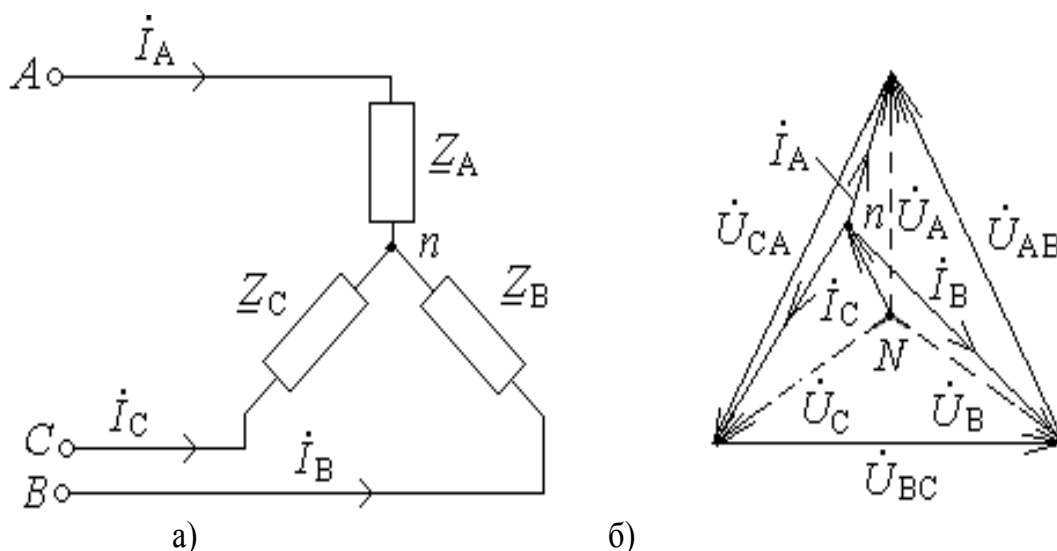


Рис.4. Векторные диаграммы несимметричной трехпроводной системы

Относительным преимуществом соединения генераторных обмоток звездой является возможность иметь у потребителя некоторую систему напряжений. Так, при соединении фазных обмоток генераторов звездой с заземленной нейтралью при фазном напряжении генератора 220 В у потребителя получим систему напряжений 220/380 В.

#### Порядок выполнения работы:

1. Согласно «Правилам устройства электроустановок» при проведении лабораторных работ по электротехнике соблюдайте следующие основные требования техники безопасности.
2. Не приступайте к работе, не прослушав инструктаж.
3. Не загромождайте свое рабочее место оборудованием, не относящимся к данной работе.
4. Перед началом сборки цепи убедитесь, что источник напряжения лабораторного стенда отключен.
5. Не используйте приборы с неисправными клеммами, провода с поврежденной изоляцией. Проверьте исправность приборов и целостность изоляции проводников до сборки электрической цепи.
6. Не прикасайтесь к зажимам отключенных конденсаторов. Разрядите конденсатор до сборки цепи и после окончания работы, замкнув его выводы накоротко проводником.
7. Не включайте без разрешения преподавателя собранную электрическую цепь.
8. Не прикасайтесь к находящимся под напряжением элементам цепей, лишенных изоляции.
9. Отключайте цепь от источника напряжения при любых переключениях и пересоединениях.
10. Немедленно отключите цепь от источника напряжения при появлении дыма, специфического запаха горелой изоляции и при исчезновении напряжения в силовой цепи лаборатории.

11. Немедленно отключите источник напряжения стенда или рубильник главного распределительного щита лаборатории при поражении кого-либо электрическим током. Сумейте оказать первую помощь пострадавшему.

12. Ознакомьтесь с техническими характеристиками электроизмерительных приборов и занести сведения о них в соответствующие графы таблицы.

13. Соберите электрическую цепь согласно приведённой в бланке-задании электрической схеме, после чего необходимо предъявить её преподавателю для проверки.

14. Включите лабораторный стенд.

15. Произведите требуемые измерения электрических величин в соответствующей последовательности. Далее, зафиксируйте показания электроизмерительных приборов, преобразуйте их в соответствии с ценами делений и требуемыми единицами измерения, после чего занесите полученные значения в соответствующие графы таблиц, предназначенных для этих целей.

16. Согласно полученным данным выполните соответствующие вычисления.

**Содержание отчёта:** результаты наблюдений и вычислений должны быть представлены в табл. 2

Таблица 2.

Параметры цепи	SA <sub>2</sub> нулев провод	Данные измерений									Вычисления			
		I <sub>A</sub> мА	I <sub>B</sub> мА	I <sub>C</sub> мА	I <sub>O</sub> мА	U <sub>A</sub> В	U <sub>B</sub> В	U <sub>C</sub> В	U <sub>AB</sub> В	U <sub>BC</sub> В	U <sub>CA</sub> В	R <sub>A</sub> Ом	R <sub>B</sub> Ом	R <sub>C</sub> Ом
R <sub>A</sub> =R <sub>B</sub> =R <sub>C</sub>	вкл*													
	выкл.													
R <sub>A</sub> >R <sub>B</sub> >R <sub>C</sub>	вкл*													
	выкл.													
R <sub>A</sub> =R <sub>B</sub> R <sub>C</sub> = ∞	вкл.													
	выкл*													
R <sub>C</sub> =0	выкл*													

По данным наблюдений вычислить сопротивление фаз приёмников  $R_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}}$  и

построить в одном масштабе векторные диаграммы напряжений и токов для опытов, отмеченных \*.

### Контрольные вопросы:

1. Как зависят токи в фазах от их сопротивлений?
2. Какими соотношениями связаны фазные и линейные напряжения при соединении в звезду?

3. Какова роль нулевого провода?
4. Что произойдет при обрывке нулевого провода в случае симметричной и несимметричной нагрузки фаз?

#### 4.12 Лабораторная работа 18.

**Тема:** исследование трёхфазной цепи при соединении потребителей треугольником.

**Цель работы:** изучить работу трехфазной системы при включении приёмником энергии треугольником в различных режимах нагрузки фаз.

**Оборудование и приборы:** технические данные используемых приборов приведены в табл. 1.

Таблица 1.

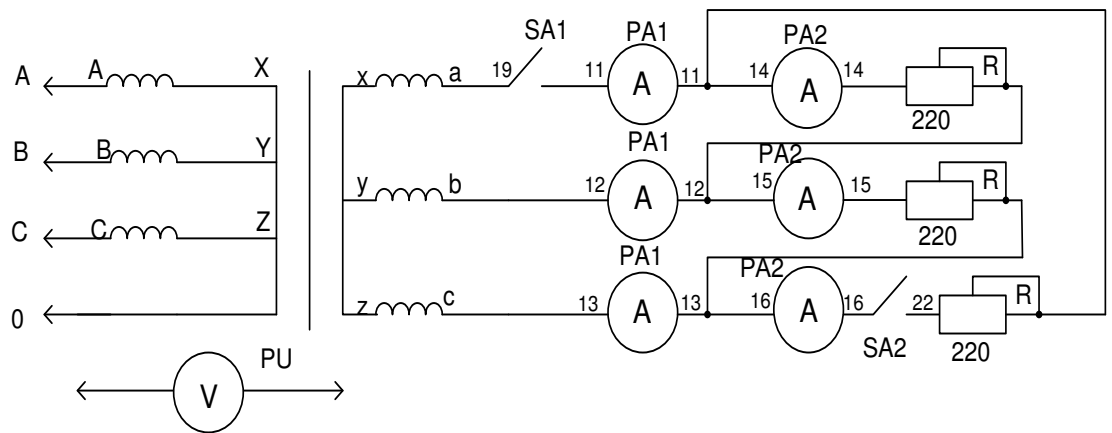
Обозначение прибора	Наименование прибора	Система прибора	Номинальное значение	Цена деления	Класс точности
PA1	Амперметр				
PA2	Амперметр				
PU	Вольтметр		Цифровой		

Лабораторная работа выполняется на стенде ЛСЭ-2 с использованием:

1. Блока включения, состоящего из вольтметра автотрансформатора, с помощью которого имеется возможность регулировать напряжение от 0 до 250В.

2. *Внимание.* Перед включением стэнда ручку автотрансформатора повернуть влево до упора.
3. Блока резисторов.
4. Блока “Коммутатор”.
5. Амперметр с пределом измерений до 1 А.
6. Амперметр с пределом измерений до 5 А.
7. Цифровой вольтметр.
8. Соединительные провода.
9. *Внимание:* во всех опытах ток в цепи не должен превышать 5 А.

**Исходные данные:** электрическая схема приводится ниже



**Краткие теоретические сведения:**

При соединении приемника энергии треугольником (рис. 1) конец одной фазы соединяется с началом следующей фазы, и каждая фаза оказывается включенной непосредственно под линейное напряжение.

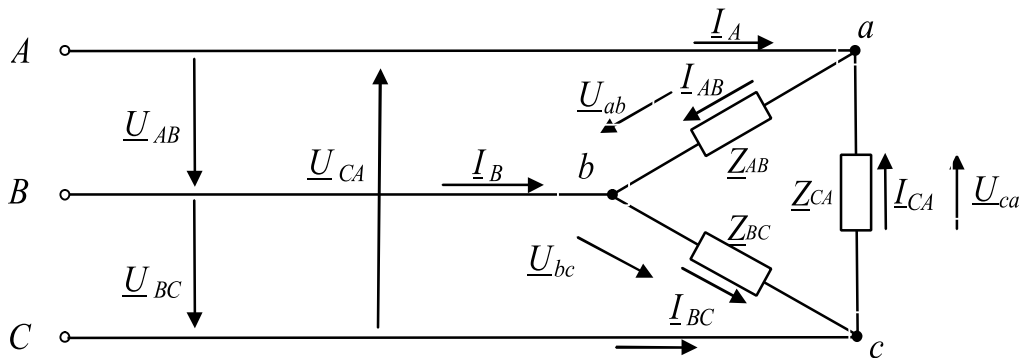


Рис. 1

Токи, протекающие в фазах приемника, называются фазными ( $I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$ ). Токи, протекающие в линейных проводах, которые соединяют генератор с приемником, называются линейными ( $I_A, I_B, I_C$ ). При выбранном положительном направлении фазных токов линейные токи определяются как геометрическая разность соответствующих фазных токов:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \end{aligned} \quad (1.1)$$



$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

При соединении в треугольник геометрическая сумма линейных токов равна нулю

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (1.2)$$

Для симметричного приемника, соединенного треугольником справедливо:

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z} = Z e^{j\phi}. \quad (1.3)$$

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_\phi = U_\Delta / Z, \quad (1.4)$$

имеют сдвиг по фазе относительно друг друга  $120^\circ$ , и образуют симметричную «звезду» - векторную диаграмму фазных токов (см. рис. 2).

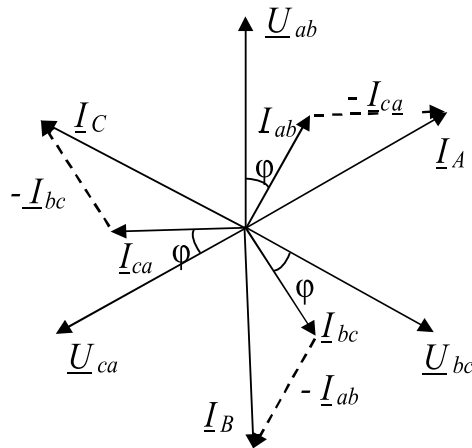


Рис 2.

При этом между модулями фазных и линейных токов справедливо следующее условие:

$$I_\Delta = \sqrt{3} I_\phi. \quad (1.5)$$

При несимметричной нагрузке уравнение (1.5) не выполняется, но справедливы: уравнение (1.2) и равенство

$$U_\Delta = U_\phi, \quad (1.6)$$

а векторные диаграммы фазных и линейных токов искажаются и уже не образуют симметричную систему векторов.

На рис. 3. приведена векторная диаграмма для несимметричной нагрузки. Для этого же несимметрично приемника (при соединении фаз генератора по схеме звезда) на рис. 4. изображена, топографическая диаграмма напряжений, совмещенная с векторной диаграммой токов.

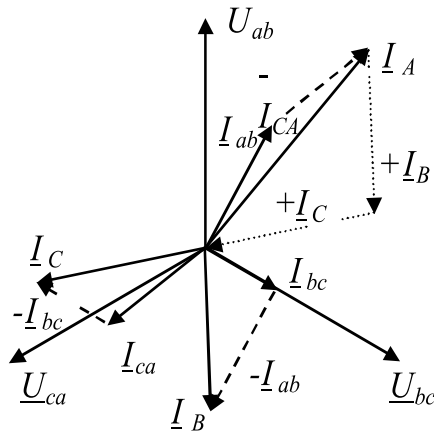


Рис. 3

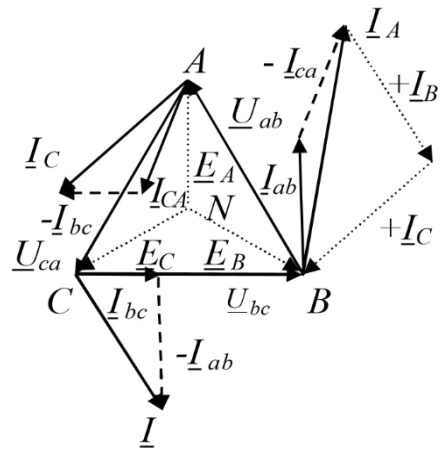


Рис. 4

В трехпроводной цепи, например, при соединении приемника энергии треугольником определение активной мощности может быть произведено с помощью двух ваттметров, как это показано на схеме, изображенной на рис. 5.

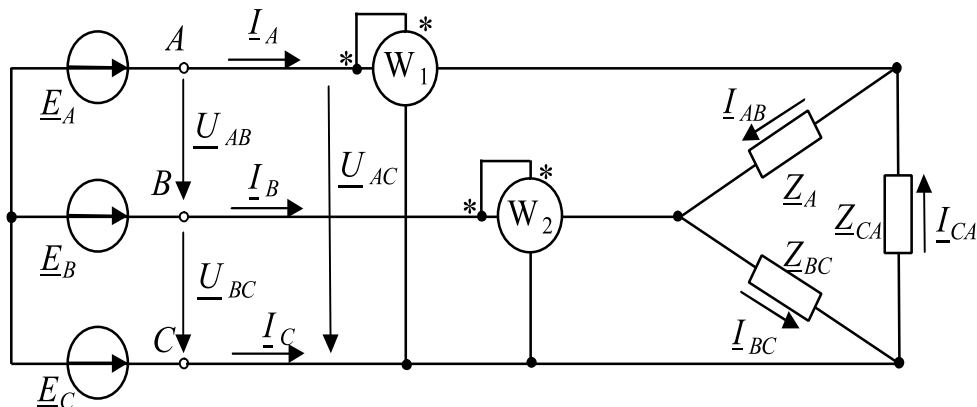


Рис. 5

### Порядок выполнения работы:

1. Согласно «Правилам устройства электроустановок» при проведении лабораторных работ по электротехнике соблюдайте следующие основные требования техники безопасности.
2. Не приступайте к работе, не прослушав инструктаж.
3. Не загромождайте свое рабочее место оборудованием, не относящимся к данной работе.
4. Перед началом сборки цепи убедитесь, что источник напряжения лабораторного стенда отключен.
5. Не используйте приборы с неисправными клеммами, провода с поврежденной изоляцией. Проверьте исправность приборов и целостность изоляции проводников до сборки электрической цепи.

6. Не прикасайтесь к зажимам отключенных конденсаторов. Разрядите конденсатор до сборки цепи и после окончания работы, замкнув его выводы накоротко проводником.
7. Не включайте без разрешения преподавателя собранную электрическую цепь.
8. Не прикасайтесь к находящимся под напряжением элементам цепей, лишенных изоляции.
9. Отключайте цепь от источника напряжения при любых переключениях и пересоединениях.
10. Немедленно отключите цепь от источника напряжения при появлении дыма, специфического запаха горелой изоляции и при исчезновении напряжения в силовой цепи лаборатории.
11. Немедленно отключите источник напряжения стенда или рубильник главного распределительного щита лаборатории при поражении кого-либо электрическим током. Сумейте оказать первую помощь пострадавшему.
12. Ознакомьтесь с техническими характеристиками электроизмерительных приборов и занести сведения о них в соответствующие графы таблицы.
13. Соберите электрическую цепь согласно приведённой в бланке-задании электрической схеме, после чего необходимо предъявить её преподавателю для проверки.
14. Включите лабораторный стенд.
15. Установите симметричную нагрузку во всех фазах. Симметричность нагрузки контролируется равенством фазных токов.
16. Фазные (линейные) напряжения измеряются вольтметром.
17. По показаниям приборов найдите отношение линейного тока к фазному.
18. Разорвите (по указанию преподавателя) один из проводов линии, в которую включен ваттметр. Измерьте фазные и линейные токи и напряжения между вершинами треугольника. Показания всех приборов занесите в таблицу.
19. Устраните разрыв линии, восстановив исходную электрическую цепь, и отключить нагрузку в одной из фаз (по указанию преподавателя). Запишите показания приборов.
20. Восстановив отключенную нагрузку, установите несимметричную нагрузку в фазах (по указанию преподавателя). Нагрузка должна быть такой, чтобы фазные токи значительно отличались друг от друга, но не превышали 0,3 А. Результаты измерений занести в таблицу.
21. Для всех пунктов в масштабе постройте векторные диаграммы токов и напряжений. На диаграммах выделить напряжения, токи и углы, определяющие показания каждого из ваттметров.
22. Сделайте выводы по проделанной работе.

**Содержание отчёта:** результаты наблюдений и вычислений должны быть представлены в табл. 2

Таблица 2.

Параметры цепи	Данные измерений									Вычисления		
	I <sub>A</sub> мА	I <sub>B</sub> мА	I <sub>C</sub> мА	I <sub>AB</sub> мА	I <sub>BC</sub> мА	I <sub>CA</sub> мА	U <sub>AB</sub> В	U <sub>BC</sub> В	U <sub>CA</sub> В	R <sub>AB</sub> Ом	R <sub>BC</sub> Ом	R <sub>CA</sub> Ом
R <sub>AB</sub> = R <sub>BC</sub> = R <sub>CA</sub>												
R <sub>AB</sub> > R <sub>BC</sub> > R <sub>CA</sub>												
R <sub>AB</sub> = R <sub>BC</sub> = R <sub>CA</sub> SA1 ВЫКЛ.												
R <sub>AB</sub> = R <sub>BC</sub> = R <sub>CA</sub> SA2 ВЫКЛ.												

По данным наблюдений для каждого опыта вычислите сопротивление фаз  $R_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}}$  и постройте в одном масштабе векторные диаграммы напряжений и токов для всех опытов.

#### Контрольные вопросы:

1. Каким соотношением связаны линейные и фазные токи при равномерной и неравномерной нагрузке?
2. Как зависят токи в фазах от их сопротивлений?
3. Каким образом изменится режим работы цепи при обрыве линейного провода?
4. Каким образом изменится режим работы цепи при обрыве фазы?

#### 4.13 Лабораторная работа 2.










**Тема:** ознакомление с техническими данными электроизмерительных приборов

**Цель работы:** научиться определять технические характеристики приборов по условным обозначениям на шкалах






**Оборудование и приборы:** учащимся даются два электроизмерительных прибора, технические характеристики которых они должны определить по условным обозначениям по их шкалам

**Исходные данные:** пользуясь справочной литературой, необходимо расшифровать условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов, в т.ч. обозначения класса точности, положения прибора, прочности изоляции, и других технических величин, влияющих на точность измерения электрических параметров.






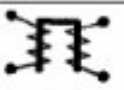












### Пример условных обозначений на шкалах приборов

Класс точности при нормировании погрешности в процентах от диапазона измерения, например 1,5	1,5
То же, при нормировании погрешности в процентах от длины шкалы, например 1,5	
Горизонтальное положение шкалы	
Вертикальное положение шкалы	
Наклонное положение шкалы под определенным углом к горизонту	
Направление ориентировки прибора в земном магнитном поле	
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана на напряжение, например 2 кВ	
Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит	
Осторожно! Прочность изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу не соответствует нормам (знак красного цвета)	
Внимание! Смотри дополнительные указания в паспорте и инструкции по эксплуатации	

### Обозначения рода тока

Постоянный ток	
Переменный однофазный ток	
Постоянный и переменный ток	
Трехфазный ток (общее обозначение)	
Трехфазный ток при неравномерной нагрузке фаз	

## Обозначение принципа действия прибора

Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрический логометр с подвижными рамками	
Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом	
Магнитоэлектрический логометр с подвижным магнитом	
Электромагнитный прибор	
Электромагнитный логометр	
Электромагнитный поляризованный прибор	
Электродинамический прибор	
Электродинамический логометр	
Ферродинамический прибор	
Ферродинамический логометр	
Индукционный прибор	
Индукционный логометр	
Магнитоиндукционный прибор	
Электростатический прибор	
Вибрационный прибор (язычковый)	
Тепловой прибор с нагреваемой проволокой	
Биметаллический прибор	

### Краткие теоретические сведения:

#### Принцип функционирования приборов магнитоэлектрической системы

Движущиеся заряды (токи) изменяют свойства окружающего их пространства - создают в нем магнитное поле. Наличие магнитного поля проявляется в действии силы на движущиеся в нем заряды (токи).

Если в магнитное поле поместить небольшую свободно ориентирующуюся (поворачивающуюся до тех пор, пока действует вращающий момент) рамку с током, то она установится определенным образом. Следовательно, магнитное поле имеет направленный характер и должно характеризоваться векторной величиной. Эту величину называют индукцией магнитного поля (магнитной индукцией) и обозначают  $\vec{B}$ .

За направление вектора  $\vec{B}$  принимают направление положительной нормали (положительная нормаль к плоскости рамки образует правый винт с направлением тока в рамке), установившейся и свободно ориентирующейся небольшой рамки с током. Согласно гипотезе Ампера в постоянных магнитах в частности, в магнитной стрелке, круговые «молекулярные токи» расположены в параллельных плоскостях и направлены в одну сторону. Благодаря этому действие магнитного поля на магнитную стрелку аналогично действию на рамку с током. Поэтому за направление вектора  $\vec{B}$  берут также направление, в котором устанавливается северный конец магнитной стрелки, помещенный в данную точку поля.

Сила  $d\vec{F}$ , действующая на элемент проводника длиной  $d\vec{l}$  с током  $I$ , находящийся в магнитном поле, определяется по закону Ампера

$$d\vec{F} = I [ d\vec{l} \times \vec{B} ], \quad (1)$$

или в скалярной форме

$$dF = B I dl \sin ( d\vec{l}, \wedge \vec{B} ), \quad (2)$$

здесь  $d\vec{l}$  - вектор с модулем  $dl$ , направленный по току, а  $\vec{B}$  и есть индукция магнитного поля в месте, где расположен элемент проводника.

Из формулы (2) при  $\sin ( d\vec{l}, \wedge \vec{B} ) = 1$

$$B = \frac{1}{I} \cdot \frac{dF}{dl}. \quad (3)$$

Следовательно, вектор магнитной индукции численно равен отношению силы, действующей со стороны магнитного поля на элемент проводника с током, к произведению силы тока на длину элемента, если он расположен перпендикулярно вектору магнитной индукции.

Если индукция  $\vec{B}$  в каждой точке поля одинакова, то такое поле называется однородным. В случае однородного магнитного поля и прямого проводника с током, расположенного перпендикулярно линиям индукции, из формулы (2) получим

$$F = B I l. \quad (4)$$

Из формулы (5.4) имеем

$$B = \frac{F}{Il},$$

что позволяет простейшим образом установить единицу измерения магнитной индукции  $B$ . В СИ магнитная индукция измеряется в теслах (Тл). Тесла есть индукция такого однородного магнитного поля, в котором на проводник с током в 1 ампер длиной 1 метр, расположенный перпендикулярно линиям индукции, действует сила в 1 ньютон.

Примером практического применения действия магнитного поля на проводник с током служат электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы.

Устройство прибора магнитоэлектрической системы, который может служить для измерения тока, напряжения и т.п. показано на рис. 1.

Полюсные наконечники постоянного магнита имеют цилиндрическую расточку, в которой по оси установлен стальной сердечник. Между полюсами и сердечником образуется зазор с радиальным магнитным полем, индукция которого одинакова по величине во всех точках зазора (рис.2). Рамка (см. рис.1), укрепленная на оси, может вращаться в межполюсном зазоре. При вращении две ее стороны (на рис. 2 они перпендикулярны) постоянно пересекают радиальное магнитное поле в зазоре.

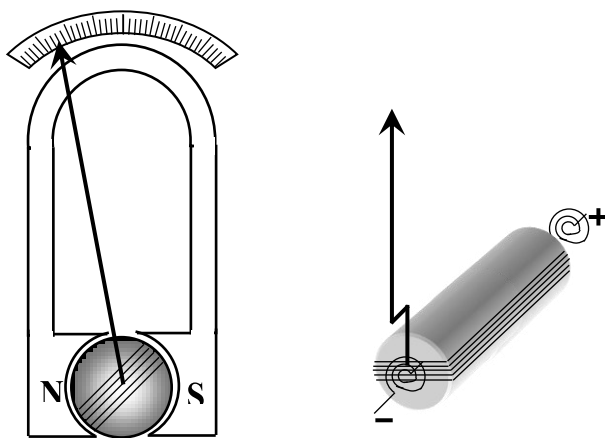


Рис. 1

Для уменьшения трения ось рамки оканчивается стальными кернами, опирающимися на подпятники, изготовленные из агата, рубина или корунда. С осью жестко связана стрелка прибора. При включении прибора в электрическую цепь ток проходит по виткам рамки. При этом на каждую сторону рамки, расположенную в магнитном поле зазора, действует сила  $\vec{F}$ . С учетом числа витков рамки  $k$  согласно закону Ампера (4) имеем

$$F = k B I l_1 \quad (5)$$

здесь  $B$  - величина магнитной индукции в зазоре;  $I$  - сила тока в рамке;  $l_1$  - длина той стороны рамки, которая расположена в зазоре; направление силы  $F$  определяется правилом "левой руки" (линии магнитной индукции входят в ладонь, четыре пальца направлены по току, отогнутый большой палец показывает направление силы).

Каждая из сил  $\vec{F}$  создает вращающий момент рамки, модуль которого равен  $M_1 = k B I l_1 l_2 / 2$ , где  $l_2$  - длина стороны рамки, не помещенной в зазор.

Направление вектора  $\vec{M}_1$  можно определить по правилу "правого винта": если вращать винт так, как вращает рамку приложенная сила, то поступательное движение винта указывает направление вектора  $\vec{M}_1$ . На рис. 2 вектор  $\vec{M}_1$  направлен по оси вращения рамки к нам и обозначен точкой.

Момент пары сил, приложенных к рамке

$$M = 2 M_1 = k B I l_1 l_2 = k B I S, \quad (6)$$

где  $S$  - площадь рамки.

Величину  $k I S$  обозначают  $p_m$  и называют **магнитным моментом рамки**. Эту величину вводят как вектор и направляют по положительной нормали к рамке с током.

Следовательно,

$$\vec{P}_m = k I S \vec{n},$$

где  $\vec{n}$  - единичный вектор вдоль положительной нормали к рамке.

С введением вектора  $P_m$  выражение (5) можно записать в векторной форме:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}], \quad (7)$$

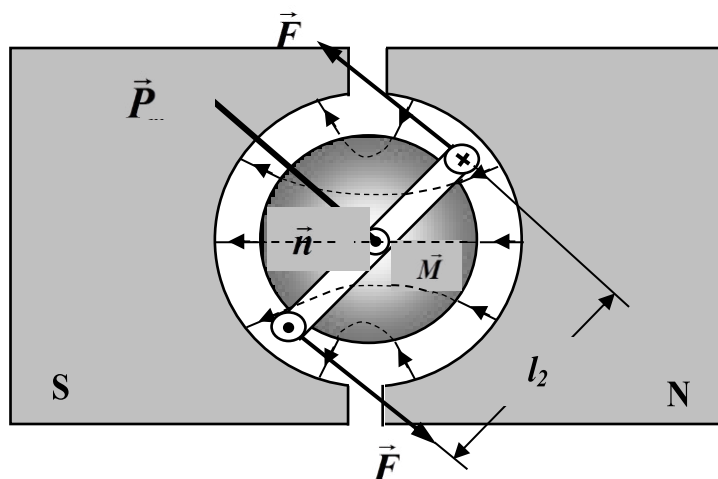


Рис. 2



здесь  $\vec{B}$  - магнитная индукция в тех местах зазора, где расположена рамка. Используя закон Ампера, нетрудно показать, что формула (7) справедлива также в случае, когда рамка с током расположена в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ .

При изменении направления тока в рамке направление каждой из сил  $\vec{F}$  изменится на противоположное и, следовательно, стрелка будет отклоняться в другую сторону от положения равновесия. Поэтому магнитоэлектрический измерительный механизм пригоден только в цепях постоянного тока.

Для компенсации момента  $\vec{M}$  служат пружины, скрепленные одним концом с осью рамки. При повороте рамки пружины создают момент сил упругости, пропорциональный углу поворота рамки  $\varphi$

$$N = C \varphi, \quad (8)$$

здесь  $C$  - жесткость пружины. Момент  $\vec{N}$  всегда направлен противоположно вращающему моменту  $\vec{M}$ .

Пока угол поворота  $\varphi$  мал ( $|\vec{M}| > |\vec{N}|$ ), рамка продолжает вращаться под действием результирующего момента  $M - N$ . При этом угол  $\varphi$  увеличивается и вместе с ним увеличивается и  $N$ . Это происходит до тех пор, пока момент сил упругости пружин  $N$  не станет равным вращающему моменту  $M$ . Следовательно, угол, соответствующий установившемуся положению равновесия рамки, будет удовлетворять, согласно (6) и (8), равенству

$$C \varphi = k B I S. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что угол поворота рамки пропорционален току в ней. Поэтому шкала прибора магнитоэлектрической системы равномерная.

По формуле (9) индукция магнитного поля в зазоре

$$B = \frac{C \varphi}{k I S}, \quad (10)$$

что позволяет определить ее опытным путем, если измерить каким-либо образом величины  $C$ ,  $\varphi$ ,  $k$ ,  $S$ .

**Термопара** представляет собой два разнородных проводника (I и II), соединенные своими концами (рис. 3). Места соединений называют спаями ( $A$  и  $B$ ). Если температуры спаев не одинаковы (например,  $T_A > T_B$ ), то в цепи термопары потечет ток (термоток) - явление Зеебека.

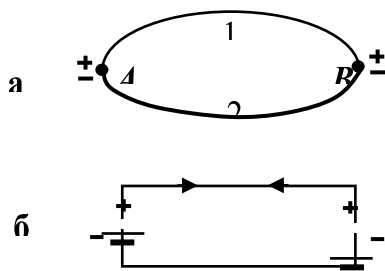


Рис. 3

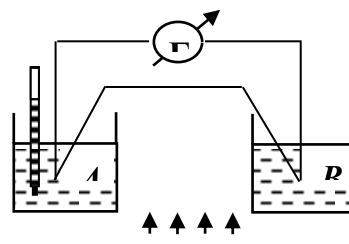


Рис. 4

Опыт показывает, что связанная с термотоком ЭДС  $\varepsilon$  пропорциональна разности температур "горячего" ( $A$ ) и "холодного" ( $B$ ) спаев  $\varepsilon = \alpha (T_A - T_B)$ , (11)

где  $\alpha$  - удельная термо-ЭДС, определяется свойствами металлов, из которых изготовлена термопара. Например, для пары железо - константан  $\alpha = 5,3 \times 10^{-5}$  В/К.

Возникновение термотока при  $T_A \neq T_B$  связано с наличием разных по величине контактных разностей потенциалов (КРП) в спаях  $A$  и  $B$ . КРП в любом из спаев определяется выражением

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{A_1 + A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}, \quad (12)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  - работа выхода электрона соответственно из металлов I и II;  $e$  - заряд электрона;  $k$  - постоянная Больцмана;  $n_1, n_2$  - концентрации электронов в металлах I и II.

При одинаковых температурах спаев их КРП одинаковы, но противоположны по направлению. ЭДС, равная алгебраической сумме скачков потенциалов в цепи, в этом случае нулевая, так как имеется два одинаковых источника тока, соединенных одинаковыми полюсами (рис. 4).

Если  $T_A \neq T_B$ , то

$|\Delta\varphi_A| \neq |\Delta\varphi_B|$ ,

$$\varepsilon = \Delta\varphi_A - \Delta\varphi_B = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_A - T_B),$$

что совпадает с формулой (11), если

$$\frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} = \alpha.$$

Используются термопары чаще всего для измерения высоких (или низких) температур. Для этого “горячий” спай помещают в среду, температуру  $T$  которой хотят узнать ( $T_A = T$ ), а “холодный” спай - в среду с известной температурой  $T_B = T_0$  (например, в тающий лед). Измерив термо-ЭДС (термоток) и зная  $\alpha$ , по формуле (4.1) легко вычислить  $T$ . При измерениях удобно иметь предварительно градуированную термопару. В этом случае нет необходимости в знании  $\alpha$ . По измеренным ЭДС и  $T$  непосредственно по графику  $\varepsilon = f(\Delta T = T - T_0)$  определяют  $\Delta T$ , а значит, и  $T$ . Задача данной лабораторной работы состоит в том, чтобы получить градуировочную кривую. Градуировку термопары производят по той же схеме (рис. 4), что и при измерениях температуры, с той лишь разницей, что “горячий” спай здесь помещают в среду, температуру которой можно изменить и измерить независимым от термопары способом (обычным термометром).

### Принцип работы потенциометра

Потенциометры - приборы для измерения ЭДС источников тока, термо-ЭДС и для некоторых других целей. Принцип их работы основан на компенсационном методе.

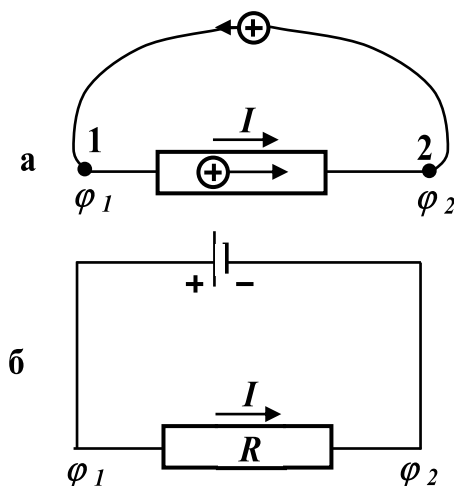


Рис. 5

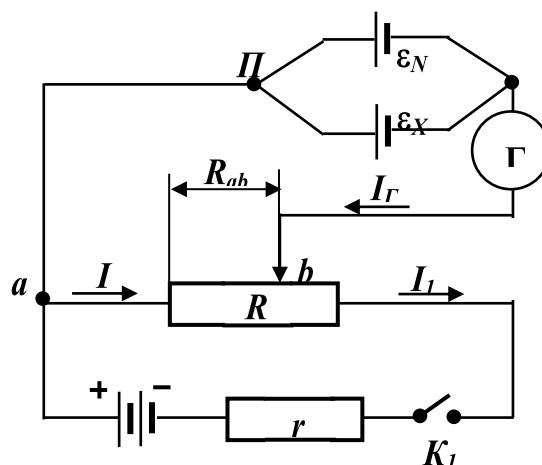


Рис. 6

Если на концах проводника сопротивлением  $R$  (рис. 5) имеется разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$ , то по проводнику течет ток.

Чтобы ток некоторое время был неизменным, разность потенциалов в течение этого времени надо поддерживать постоянной. Это значит, что положительные заряды, приходящие в точку 2, необходимо каким-то образом перемещать обратно в точку 1, где

потенциал  $\phi_1 > \phi_2$ . Силы электрического поля сделать этого не могут, так как они направлены в сторону меньшего потенциала. Следовательно, работу по перемещению положительных зарядов из точки 2 в точку 1 могут совершать только силы неэлектрического происхождения (например, механические силы, силы химической природы и т. д.). Эти силы называются **сторонними**.

### Порядок выполнения работы:

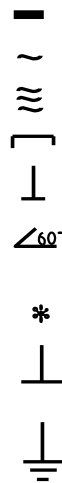
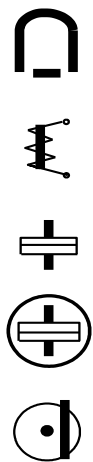
Пользуясь справочной литературой, расшифровать условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов, определить систему, тип измеряемых величин, класс точности, пределы измерения, цены деления, положения прибора, тип шкалы.

### Содержание отчёта:

Результаты выполненной работы занести в представленную ниже таблицу

Наименование прибора и обозначение	Система прибора	Род и характер измеряемой величины	Способ отсчета измеряемой величины	Класс точности	Пределы измерения	Цена деления на всех пределах	Тип шкалы	Положение прибора при измерении

и указать систему представленных ниже электроизмерительных приборов:



Указать обозначение зажимов

### Контрольные вопросы:

1. Чем создается и как обнаруживается магнитное поле?

2. Как направлен вектор индукции магнитного поля?
3. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле (закон Ампера).
4. Величина индукции магнитного поля (физический смысл индукции магнитного поля), единицы ее измерения в СИ.
5. Принцип действия прибора магнитоэлектрической системы.

#### 4.14 Лабораторная работа 20.

**Тема:** измерение сопротивлений косвенным методом

**Цель работы:** научиться измерять сопротивление резисторов мостом постоянного тока, и цифровым прибором. Определять абсолютную и относительную погрешность измерения сопротивлений

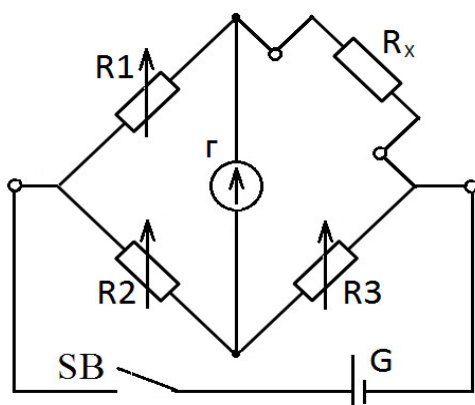
**Оборудование и приборы:**

Лабораторная работа выполняется на стенде ЛСЭ-2.

с использованием:

6. Блок резисторов.
7. Блок “Коммутатор”.
8. Мост постоянного тока.
9. Цифровой измерительный прибор.
10. Гальванометр.
11. Соединительные провода.

**Исходные данные:** электрическая схема приводится ниже



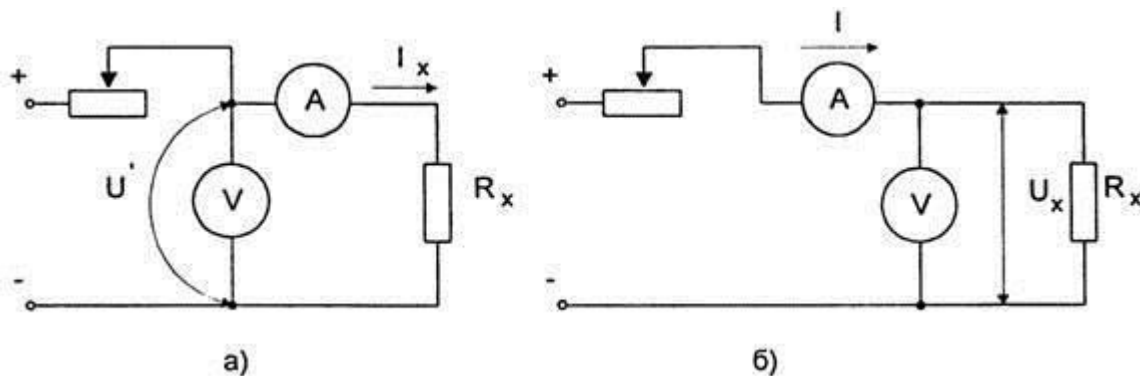
**Краткие теоретические сведения:**

Диапазон измеряемых на практике сопротивлений широк (от  $10^{-8}$  до  $10^{15}$  Ом), и его условно делят по значениям сопротивлений на три части — малые (менее 10 Ом; — средние (от 10 до  $10^6$  Ом) — большие (свыше  $10^6$  Ом), в каждой из которых измерение сопротивлений имеет свои особенности.

Сопротивление — параметр пассивный и в процессе измерения обязательно преобразуется в активную электрическую величину, значение которой затем измеряется. При этом важно позаботиться о том, чтобы полученная активная электрическая величина правильно отражала только измеряемое сопротивление и не содержала излишней информации, которая воспринимается как погрешность измерения.

**Измерение методом амперметра и вольтметра.**

Сопротивление какой-либо электрической установки или участка электрической цепи можно определить с помощью амперметра и вольтметра, пользуясь законом Ома. При измерении малых R рекомендуют применять схему а):



Потому что в данном случае  $I_A \approx I_R$  из-за большого внутреннего сопротивления вольтметра относительно  $R$  и будет выполнено равенство  $I_V \ll I_R$ . При среднем значении  $R$  рекомендована схема б):

Так как в этом случае  $U_V \approx U_R$  из-за очень малого внутреннего сопротивления амперметра. Соответственно применив закон Ома получим:

$$R = \frac{U_V}{I_A}$$

Из-за наличия внутренних сопротивлений в приборах возникает погрешность, что есть основным недостатком этого метода. Но при измерении малых  $R$  сопротивление вольтметра будет равно  $R_V > 100R$ , а для измерения средних  $R$  амперметра  $R_A < 100R$ , то в таком случае суммарная погрешность не будет более 1%.

### Измерение сопротивлений электрическим мостом

Мостовая схема (рис.2) состоит из источника питания, чувствительного прибора (гальванометра  $\Gamma$ ) и четырех резисторов, включаемых в плечи моста: с неизвестным сопротивлением  $R_x$  ( $R_4$ ) и известными сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , которые могут при измерениях изменяться. Прибор включают в одну из диагоналей моста (измерительную), а источник питания — в другую (питающую).

Сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  можно подобрать такими, что при замыкании контакта  $SB$  показания прибора будут равны нулю (в таком случае принято говорить, что мост уравновешен). При этом неизвестное сопротивление определяют:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3$$

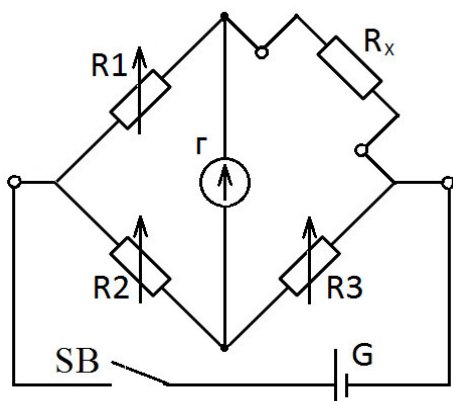


Рис. 2 Мостовая схема измерения  $R_x$

**В некоторых мостах отношение плеч  $R_1/R_2$  установлено постоянным, а равновесие моста достигается только подбором сопротивления  $R_3$ . В других, наоборот, сопротивление  $R_3$  постоянно, а равновесие достигается подбором сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ .**

Существуют различные конструкции мостов постоянного тока, при использовании которых не требуется выполнять вычисления, так как неизвестное сопротивление  $R_x$  отсчитывают по шкале прибора. Смонтированные в них магазины сопротивлений позволяют измерять сопротивления от 10 до 100 000 Ом.

### Измерительные шунты

Измерительный шунт характеризуется номинальным значением входного тока  $I_{ном}$  и номинальным значением выходного напряжения  $U_{ном}$ . Их отношение определяет номинальное сопротивление шунта:

$$R_{ш} = U_{ном} / I_{ном}$$

Шунты применяются для расширения пределов измерения измерительных механизмов ИМ по току, при этом большую часть измеряемого тока пропускают через шунт, а меньшую — через измерительный механизм. Шунты имеют небольшое сопротивление и применяются, главным образом, в цепях постоянного тока с магнитоэлектрическими измерительными механизмами.

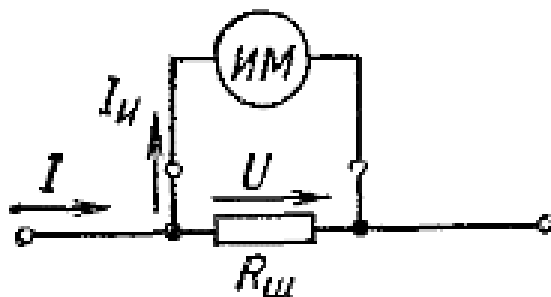


Рис 3. Схема соединения измерительного механизма с шунтом.

На рис. 3 приведена схема включения магнитоэлектрического механизма измерительного прибора с шунтом  $R_{ш}$ . Ток  $I_{ш}$  протекающий через измерительный механизм, связан с измеряемым током  $I$  зависимостью

$$I_{ш} = I \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_{и}},$$

где  $R_{и}$  — сопротивление измерительного механизма.

Если необходимо, чтобы ток  $I_{ш}$  был в  $n$  раз меньше тока  $I$ , то

сопротивление шунта должно быть:

$$R_{ш} = \frac{R_{и}}{n - 1},$$

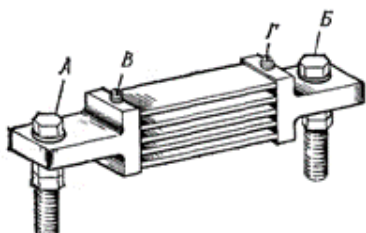
где  $n = I / I_{ш}$  — коэффициент шунтирования.

Шунты изготавливают из манганина. Если шунт рассчитан на небольшой ток (до 30 А), то его обычно встраивают в корпус прибора (внутренние шунты). Для измерения больших токов используют приборы с наружными

шунтами В этом случае мощность, рассеиваемая в шунте, не нагревает прибор.

На рис. 4 показан **наружный шунт** на 2000 А Он имеет массивные наконечники из меди, которые служат для отвода тепла от манганиновых пластин, впаянных между ними.

Зажимы шунта А и Б — токовые. Измерительный механизм присоединяют к потенциальным зажимам В и Г, между которыми и заключено сопротивление шунта.



Р  
ис 4.  
Наруж  
ный  
шунт

При таком включении измерительного механизма устраняются погрешности от контактных сопротивлений. Наружные шунты обычно выполняются калиброванными, т. е. рассчитываются на определенные токи и падения напряжения. Калиброванные шунты должны иметь номинальное падение напряжения 10, 15, 30, 50, 60, 75, 100, 150 и 300 мВ.

Для переносных магнитоэлектрических приборов на токи до 30 А внутренние шунты изготавливают на несколько пределов измерения.

На рис. 5, а, б показаны схемы многопредельных шунтов. Многопредельный шунт состоит из нескольких резисторов, которые можно переключать в зависимости от предела измерения рычажным переключателем (рис. 5, а) или путем переноса провода с одного зажима на другой (рис. 5, б).

При работе шунтов с измерительными приборами на переменном токе возникает дополнительная погрешность от изменения частоты, так как сопротивления шунта и измерительного механизма поразному зависят от частоты.

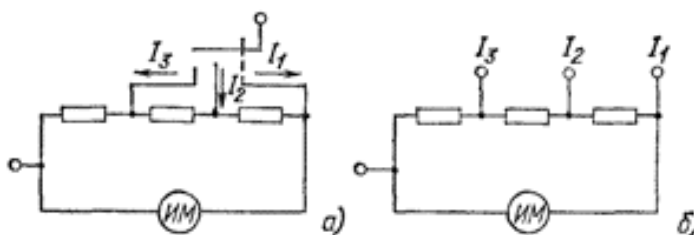


Рис.5. Схемы многопредельных измерительных шунтов: а — шунта с рычажным переключателем, б — шунта с отдельными выводами

Шунты разделяются на классы точности 0,02; 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5. Число, определяющее класс точности, обозначает допустимое отклонение сопротивления шунта в процентах его номинального значения.





### Добавочные резисторы

Добавочные резисторы являются измерительными преобразователями напряжения в ток, а на значение тока непосредственно реагируют измерительные механизмы вольтметров.

Добавочные резисторы служат для расширения пределов измерения по напряжению вольтметров различных систем и других приборов, имеющих параллельные цепи, подключаемые к источнику напряжения. Сюда относятся, например, ваттметры, счетчики энергии, фазометры и т. д.

Добавочный резистор включают последовательно с измерительным механизмом (рис. 6). Ток  $I_{и}$  в цепи, состоящий из измерительного механизма с сопротивлением  $R_{и}$  и добавочного резистора с сопротивлением  $R_{д}$ , составит:

$I_{и} = U / (R_{и} + R_{д})$ , где  $U$  — измеряемое напряжение.

Если вольтметр имеет предел измерения  $U_{ном}$  и сопротивление измерительного механизма  $R_{и}$  и при помощи добавочного резистора  $R_{д}$  надо расширить предел измерения в  $n$  раз, то, учитывая постоянство тока  $I_{и}$ , протекающего через измерительный механизм вольтметра, можно записать:  $U_{ном} / R_{и} = n U_{ном} / (R_{и} + R_{д})$  Откуда  $R_{д} = R_{и} (n - 1)$

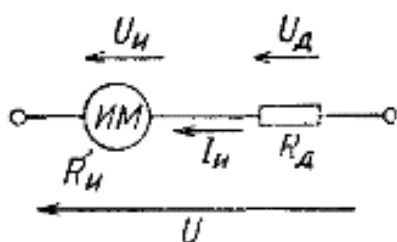


Рис 6. Схема соединения измерительного механизма с добавочным резистором

Добавочные резисторы изготавливаются обычно из изолированной манганиновой проволоки, намотанной на пластины или каркасы из изоляционного материала. Они применяются в цепях постоянного и переменного тока.

Добавочные резисторы, предназначенные для работы на переменном токе, имеют бифилярную обмотку для получения безреактивного сопротивления.

При применении добавочных резисторов не только расширяются пределы измерения вольтметров, но и уменьшается их температурная погрешность.

В переносных приборах добавочные резисторы изготавливаются секционными на несколько пределов измерения (рис. 7).

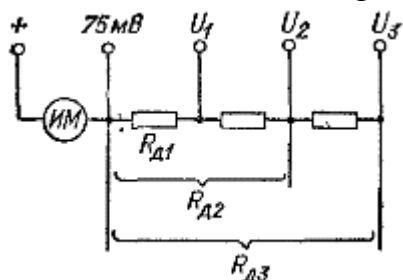


Рис. 7. Схема многопредельного вольтметра

Добавочные резисторы бывают внутренние и наружные. Последние выполняются в виде отдельных блоков и подразделяются на индивидуальные и калиброванные. Индивидуальный резистор применяется только с тем прибором, который с ним градуировался. Калиброванный резистор может применяться с любым прибором, номинальный ток которого равен



номинальному току добавочного резистора.

Рис. 8. Калибровочный резистор

Калиброванные добавочные резисторы делятся на классы точности 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0. Они выполняются на номинальные токи от 0,5 до 30 мА.

Добавочные резисторы применяются для преобразования напряжений до 30 кВ.

### **Измерение больших сопротивлений мегаомметрами**

Для измерения сопротивления изоляции чаще всего применяют мегаомметры магнитоэлектрической системы. Последовательно с одной катушкой включают добавочный резистор  $R_{д}$ , в цепь другой катушки — резистор сопротивлением  $R_{х}$ .

В качестве источника тока обычно используют небольшой генератор постоянного тока, называемый индуктором; якорь генератора приводят во вращение рукояткой, соединенной с ним через редуктор. Индукторы имеют значительные напряжения от 250 до 2500 В, благодаря чему мегаомметром можно измерять большие сопротивления.

При взаимодействии протекающих по катушкам токов с магнитным полем постоянного магнита создаются два противоположно направленных момента  $M_1$  и  $M_2$ , под влиянием которых подвижная часть прибора и стрелка будут занимать определенное положение. Положение подвижной части логометра зависит от отношения  $I_1/I_2$ . Следовательно, при изменении  $R_x$  будет изменяться угол  $\alpha$  отклонения стрелки. Шкала мегаомметра



градуируется непосредственно в килоомах или мегаомах. Чтобы измерить сопротивление изоляции между проводами, необходимо отключить их от источника тока (от сети) и присоединить один провод к зажиму Л (линия), а другой – к зажиму З (земля). Затем, вращая рукоятку индуктора 1 мегаомметра, определяют по шкале логометра 2 сопротивление изоляции. Имеющийся в приборе переключатель 3 позволяет изменять пределы измерения. Напряжение индуктора, а, следовательно, частота вращения его рукоятки теоретически не оказывают влияние на результаты измерений, но практически рекомендуется вращать ее более или менее равномерно.

При измерении сопротивления изоляции между обмотками электрической машины отсоединяют их друг от друга и соединяют одну из них с зажимом Л, а другую с зажимом З, после чего, вращая рукоятку индуктора, определяют сопротивление изоляции. При измерении сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса его соединяют с зажимом З, а обмотку — с зажимом Л.

**Погрешности прямых измерений** – это отклонение результата измерений от истинного значения измеряемой величины. По способу выражения различают абсолютную, относительную и приведенную погрешности измерения.

**Абсолютная погрешность**  $\Delta$  равна разности между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины, выраженная в единицах измеряемой величины

$$\Delta = X - X_{И} \quad (1.1)$$

**Относительная погрешность**  $\delta$  представляет собой отношение абсолютной погрешности измерения к измеренному значению измеряемой величины, выраженное в процентах

$$\delta = \frac{\Delta}{X} \cdot 100 \% \quad (1.2)$$

**Приведенная погрешность** – это отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению прибора

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} 100 \% \quad (1.3)$$

Согласно ГОСТ 8.401-80 средствам измерений присваивают определённые классы точности. Классы точности выражаются одним числом, выражаемым из ряда  $1 \cdot 10^n$ ;  $1,5 \cdot 10^n$ ;  $2 \cdot 10^n$ ;  $2,5 \cdot 10^n$ ;  $4 \cdot 10^n$ ;  $5 \cdot 10^n$ ;  $6 \cdot 10^n$ , где  $n = 1; 0; -1; -2$  и т. д.

**Классом точности средств измерения** называется обобщенная его характеристика, определяемая пределами допускаемых основной погрешности и погрешностей, названных изменением значений влияющих величин.

Большинству аналоговых электроизмерительных приборов присваивается класс точности, определяемый основной наибольшей допустимой приведенной погрешностью

$$\gamma_{\Delta} = \frac{\Delta_M}{X_N} 100 \% \quad (1.4)$$

где  $\Delta_M$  – предел допустимой максимальной абсолютной погрешности измерения.

У приборов, класс точности которых выражается одним числом, основная приведенная погрешность прибора в рабочем диапазоне рабочей шкалы, выраженная в процентах, не должна превышать значения, соответствующего класса точности.

**Косвенные измерения** – это измерения, при которых искомое значение величины  $A$  находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , определяемыми прямыми измерениями, т. е.  $A = F(X_1, X_2, \dots, X_N)$ .

Очевидно, что абсолютная погрешность измеряемой величины  $\Delta_A$  является функцией абсолютных погрешностей прямых измерений

$$\Delta A = F(\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_k).$$

В простейшем случае для одной переменной  $A = f(X)$  в результате измерения получим

$$A + \Delta A = F(X + \Delta X).$$

Разложим правую часть в ряд Тейлора и сохраним члены разложения, содержащие  $\Delta X$  в первой степени:

$$A + \Delta A = F(X) + \frac{\partial F(X)}{\partial X} \cdot \Delta X,$$

отсюда абсолютная погрешность  $\Delta A$  имеет вид:

$$\Delta A = \frac{\partial F(X)}{\partial X} \cdot \Delta X$$

Относительная погрешность  $\delta_A$  определяется выражением

$$\delta_A = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\partial F(X)}{\partial X} \cdot \frac{\Delta X}{A}$$

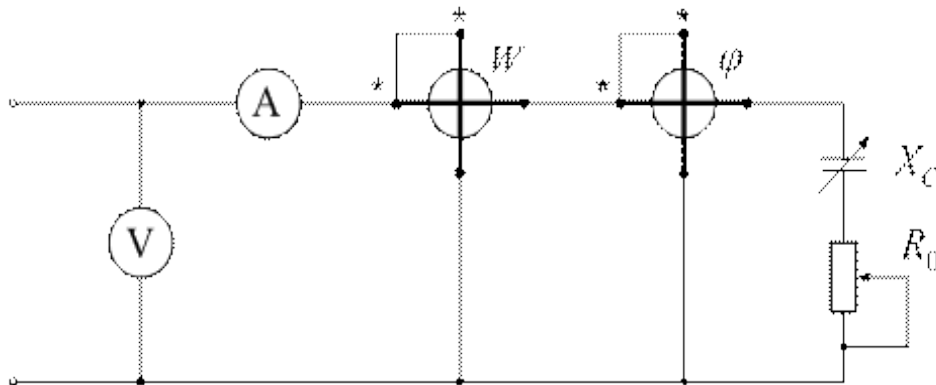


Рис. 7. Схема косвенного измерения параметров электрической цепи

#### Порядок выполнения работы:

1. Измерение сопротивления мостом постоянного тока осуществляется следующим образом:
2. К зажимам 1 и 2 присоединяют неизвестное сопротивление  $R_x$  (например, обмотку электрической машины или аппарата), к зажимам 3 и 4 — гальванометр, а к зажимам 5 и 6 — источник питания (сухой гальванический элемент или аккумулятор).
3. Изменяя сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  (в качестве которых используют магазины сопротивлений, переключаемые соответствующими контактами), добиваются равновесия моста, которое определяется по нулевому показанию гальванометра (при замкнутом контакте В).

**Содержание отчёта:** результаты наблюдений и вычислений должны быть представлены в табл. 1

Таблица 1.

Мост постоянно го тока	Цифровой прибор	Вычисления		Примечание
		$R' - R''$	$\gamma$	
Ом	Ом	Ом	%	
				$R_1 = 30 \text{ Ом}$
				$R_2 = 1 \text{ кОм}$
				$R_3 = 10 \text{ кОм}$

Формулы для вычислений

$$\gamma = \frac{R' - R''}{R''} \cdot 100\%$$

**Контрольные вопросы:**

1. Как работает измерительный мост постоянного тока?
2. Какой из исследуемых методов измерения наиболее точный?

**4.15** Лабораторная работа 21.

**Тема:** включение в цепь и поверка однофазного счётчика электрической энергии

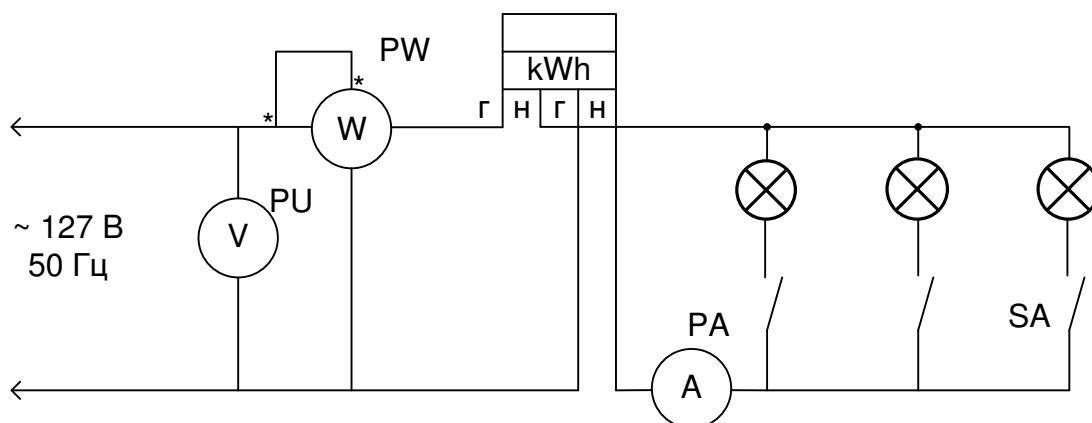
**Цель работы:** научиться включать индукционный счетчик электрической энергии в цепь нагрузки, проверять правильность его показаний при различных нагрузках методом, предусматривающим применение ваттметра и секундомера, проверять однофазный счетчик на отсутствие самохода.

**Оборудование и приборы:** технические данные используемых приборов приведены в табл. 1

Таблица 1

обозначение прибора	наименование прибора	система прибора	номинальное значение	цена деления	класс точности
pv	вольтметр		250в		
pa	амперметр		1а		
pw	ваттметр		150 в, 1 а		
kwh	счетчик эл. энергии		127 в, 10 а		

**Исходные данные:** электрическая схема приводится ниже



**Краткие теоретические сведения:**

Электросчётчики по принципу работы делятся на 2 вида:

индукционные

электронные

Рассмотрим более подробно принцип работы каждого типа счетчиков.

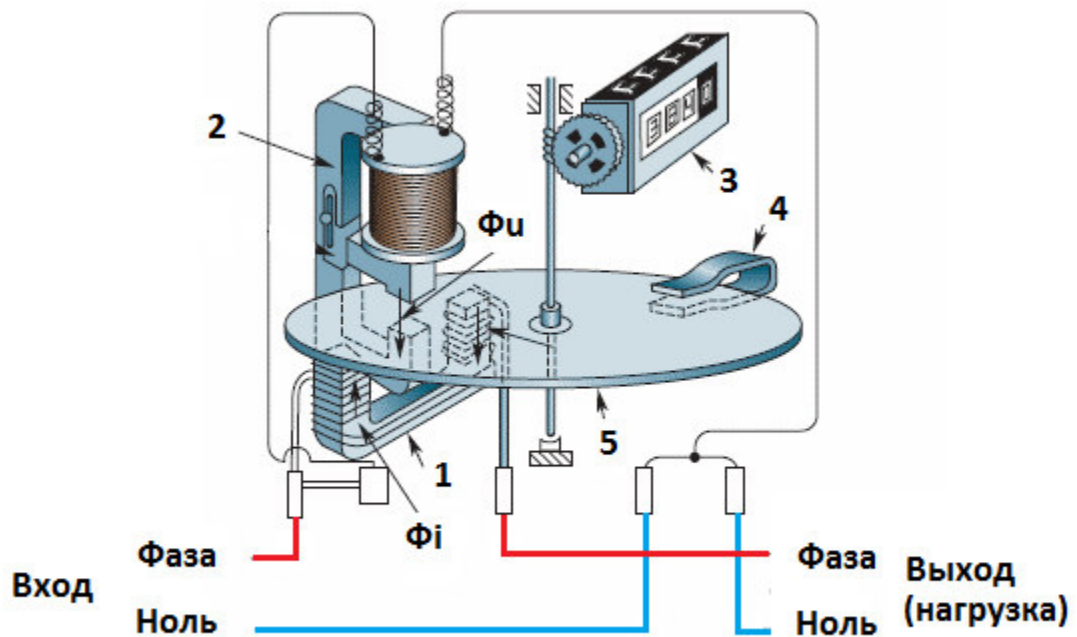


Рис. 1. Принцип работы индукционного электросчетчика:

- 1 — токовая или последовательная обмотка (катушка)
- 2 — параллельная катушка (обмотка) или катушка напряжения
- 3 — счетный механизм в виде червячной передачи
- 4 — постоянный магнит для создания торможения и плавности хода диска
- 5 — алюминиевый диск

$\Phi_i$  — магнитный поток, который создается током нагрузки

$\Phi_u$  — магнитный поток, который создается током в катушке напряжения

Электросчетчик состоит из 2 катушек (обмоток): катушка напряжения и токовая катушка, электромагниты которых расположены под углом  $90^\circ$  относительно друг друга в пространстве. В зазоре между этими электромагнитами находится алюминиевый диск, который с нижней и верхней стороны крепится на подшипниках и подпятниках. На оси диска установлен червяк, который через зубчатые колеса передает вращение счетному механизму (барabanу).

Токовая катушка включается в цепь последовательно и состоит из небольшого количества витков. Наматывается такая катушка толстым проводом, соответственно, прямому номинальному току электросчетчика.

Катушка напряжения включается в цепь параллельно и состоит из большого количества витков. Наматывается тонким проводом с диаметром примерно от 0,06 - до 0,12 (мм).

При подачи переменного напряжения на катушку напряжения и при протекании через токовую катушку тока нагрузки, в зазоре наводятся переменные магнитные потоки  $\Phi_i$  и  $\Phi_u$ , которые наводят в алюминиевом диске вихревые токи. При взаимодействии этих потоков и вихревых токов в диске, возникает вращающий момент — диск начинает вращаться.



Если у вас возникли подозрения в правильности работы электрического счетчика, вы можете самостоятельно проверить его работу. Перед проверкой рекомендуется проверить правильность схемы подключения электросчетчика.

Проверку электросчетчика следует начать с определения отсутствия самохода. Необходимо отключить однополюсные автоматы либо вывернуть пробки, электрический счетчик при этом должен остаться под напряжением. П

После этого обращаем внимание на диск индукционного счетчика либо световой индикатор электронного счетчика. При отсутствии самохода диск электрического счетчика не должен совершить более одного полного оборота, а световой индикатор более одного импульса в течение 15 минут.

Для дальнейшей проверки электросчетчика вам нужен секундомер и любой электрический прибор, мощность которого вы будете точно знать.

Вам необходимо отключить в квартире (доме) все электроприборы из электророзеток, в том числе электроприборы находящиеся в режиме ожидания (телевизор, телефон и т. д.). Автоматы и пробки должны быть включены.

Далее включаете только электроприбор, по которому вы решили производить проверку работы электросчетчика (лучше всего использовать обыкновенную лампу накаливания, мощностью 100-150 ватт).

По секундомеру засекаем время трех-пяти полных оборотов диска электросчетчика, либо время десяти интервалов между импульсами светового индикатора (время от 1-го до 11-го импульса).

Вычисляем время одного полного оборота диска либо время одного интервала между импульсами светового индикатора.

Далее производим расчет погрешности работы электрического счетчика по формуле:

$E = (P \times t \times n / 3600 - 1) \times 100\%$ , где **E** - погрешность работы счетчика в процентах, %;

**P** - мощность электрического прибора в киловаттах, кВт;

**t** - время одного полного оборота диска либо время одного интервала между импульсами светового индикатора электросчетчика в секундах, с;

**n** - передаточное число, показывает, сколько оборотов сделает диск индукционного счетчика за один час при включенной нагрузке мощностью равной 1кВт, либо количество импульсов светового индикатора электронного счетчика за один час, также при включенной нагрузке, мощностью 1кВт. Единицы измерения передаточного числа индукционного счетчика обозначаются в разных вариациях: [оборотов/1кВтч]; [об/кWh]; [r/кWh], электронного также - [imp/1кWh]; [имп/кВтч]. Передаточное число вы можете увидеть на табло вашего счетчика.

### **Пример расчета**

Проверим индукционный счетчик, с передаточным числом  $n = 400 \text{ r/kwh}$ . Для проверки включим электрическую лампочку мощностью  $P = 150\text{Вт} = 0,15 \text{ кВт}$ . Засекаем секундомером время пяти полных оборотов счетчика, получаем  $t' = 307$  секунд. Вычисляем время одного оборота  $t = t'/5 = 307/5 = 61,4$  секунды.

Производим расчет погрешности:  $E = (0,15 \times 61,4 \times 400/3600 - 1) \times 100\% = 2,33\%$ . Получается счетчик работает с торможением на 2,33%.

Проверим электронный счетчик,  $n = 6400 \text{ imp/kWh}$ .ключаем лампочку мощностью  $P = 100\text{Вт} = 0,1 \text{ кВт}$ . Засаекаем время от 1-го до 11-го импульса, получаем  $t' = 54,6$  секунд. Время одного интервала между импульсами  $t = t'/10 = 54,6/10 = 5,46$  секунды.

Производим расчет погрешности работы электросчетчика:  
 $E = (0,1 \times 5,46 \times 6400/3600 - 1) \times 100\% = - 2,93\%$ .

Так как погрешность получилась отрицательная, значит счетчик работает с опережением на 2,93%.

Недостаточно проверить счетчик одним электроприбором. Так как вы не можете на 100% утверждать, что мощность, например, электролампочки именно 100 Ватт, а не 95 или 105. Также нельзя утверждать, что ваш секундомер считает идеально. Поэтому если выявленная погрешность не превышает 10%, считайте, что ваш счетчик работает исправно.

Но если все-таки у вас появились сомнения в работе электрического счетчика, вызывайте представителя энергоснабжающей организации. Вам выпишут предписание на поверку электросчетчика в государственной лаборатории либо его замену. Но имейте ввиду, поверка вам будет стоить денег и времени и не факт, что после этого счетчик будет работать идеально. Поэтому часто бывает проще заменить электрический счетчик на новый.



Различают однофазные и трехфазные счетчики. Однофазные счетчики применяются для учета электроэнергии у потребителей, питание которых осуществляется однофазным током (в основном, бытовых). Для учета электроэнергии трехфазного тока применяются трехфазные счетчики.

**Трехфазные счетчики можно классифицировать следующим образом.**  
**По роду измеряемой энергии** — на счетчики активной и реактивной энергии.  
**В зависимости от схемы электроснабжения, для которой они предназначены,** — на трехпроводные счетчики, работающие в сети без нулевого провода, и четырехпроводные, работающие в сети с нулевым проводом.

По способу включения счетчики можно разделить на 3 группы  
- **Счетчики непосредственного включения (прямого включения)**, включаются в сеть без измерительных трансформаторов. Такие счетчики выпускаются для сетей 0,4/0,23 кВ на токи до 100 А.

- **Счетчики полукосвенного включения**, своими токовыми обмотками включаются через трансформаторы тока. Обмотки напряжения включаются непосредственно в сеть. Область применения - сети до 1 кВ.

- **Счетчики косвенного включения**, включаются в сеть через трансформаторы тока и трансформаторы напряжения. Область применения - сети выше 1 кВ.

Счетчики косвенного включения изготавливаются двух типов. **Трансформаторные счетчики** — предназначены для включения через измерительные трансформаторы, имеющие определенные наперед заданные коэффициенты трансформации. Эти счетчики имеют десятичный пересчетный коэффициент (10п). Трансформаторные универсальные счетчики — предназначены

для включения через измерительные трансформаторы, имеющие любые коэффициенты трансформации. Для универсальных счетчиков пересчетный коэффициент определяется по коэффициентам трансформации установленных измерительных трансформаторов.

### **Обозначения электросчетчиков**

В зависимости от назначения счетчику присваивается условное обозначение. В обозначениях счетчиков буквы и цифры означают: С - счетчик; О - однофазный; Л - активной энергии; Р - реактивной энергии; У - универсальный; 3 или 4 для трех- или четырехпроводной сети.

Пример обозначения: СА4У - Трехфазный трансформаторный универсальный четырехпроводный счетчик активной энергии.

Если на табличке счетчика поставлена буква М, это значит, что счетчик предназначен для работы и при отрицательных температурах (-15° - +25°С).

### **Электросчетчики специального назначения**

Счетчики активной и реактивной энергии, снабженные дополнительными устройствами, относятся к счетчикам специального назначения. Перечислим некоторые из них.

**Двухтарифные и многотарифные счетчики** — применяются для учета электроэнергии, тариф на которую изменяется в зависимости от времени суток.

**Счетчики с предварительной оплатой** — применяются для учета электроэнергии бытовых потребителей, живущих в отдаленных и труднодоступных населенных пунктах.

**Счетчики с указателем максимальной нагрузки** — применяются для расчетов с потребителями по двухставочному тарифу (за израсходованную электроэнергию и максимальную нагрузку).

**Телеизмерительные счетчики** — служат для учета электроэнергии и дистанционной передачи показаний.

К счетчикам специального назначения относятся и **образцовые счетчики**, предназначенные для поверки счетчиков общего назначения.

### **Технические характеристики электросчетчиков**

Техническая характеристика счетчика определяется следующими основными параметрами.

**Номинальное напряжение и номинальный ток счетчиков** — у трехфазных счетчиков указываются в виде произведения числа фаз на номинальные значения тока и напряжения, у четырехпроводных счетчиков указываются линейные и фазные напряжения. Например- 3/5 А; 3Х380/220 В.

У трансформаторных счетчиков вместо номинальных тока и напряжения указываются номинальные коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов, для работы с которыми счетчик предназначен, например: 3Х150/5 А. 3Х6000/100 В.

На счетчиках, называемых перегрузочными, указывается значение максимального тока непосредственно после номинального, например, 5 - 20 А.

Номинальное напряжение счетчиков прямого и полукосвенного включения должно соответствовать номинальному напряжению сети, а счетчиков косвенного включения — вторичному номинальному напряжению трансформаторов напряжения. Точно так же номинальный ток счетчика косвенного или полукосвенного включения должен соответствовать вторичному номинальному току трансформатора тока (5 или 1 А).

Счетчики допускают длительную перегрузку по току без нарушения правильности учета: трансформаторные и трансформаторные универсальные - 120%; счетчики прямого включения — 200% и более (в зависимости от типа).

**Класс точности счетчика** — это его наибольшая допустимая относительная погрешность, выраженная в процентах. Счетчики активной энергии должны изготавливаться классов точности 0,5; 1,0; 2,0; 2,5; счетчики реактивной энергии - классов точности 1,5; 2,0; 3,0. Трансформаторные и трансформаторные универсальные счетчики учета активной и реактивной энергии должны быть класса точности 2,0 и более точные.

Класс точности устанавливается для условий работы, называемых нормальными. К ним относятся: прямое чередование фаз; равномерность и симметричность нагрузок по фазам; синусоидальность тока и напряжения (коэффициент линейных искажений не более 5%); номинальная частота ( $50 \text{ Гц} \pm 0,5\%$ ); номинальное напряжение ( $\pm 1\%$ ); номинальная нагрузка;  $\cos \phi = 1$  (для счетчиков активной энергии) и  $\sin \phi = 1$  (для счетчиков реактивной энергии); температура окружающего воздуха  $20^\circ + 3^\circ \text{C}$  (для счетчиков внутренней установки); отсутствие внешних магнитных полей (индукция не более 0,5 мТл); вертикальное положение счетчика.

**Передаточное число индукционного счетчика** - это число оборотов его диска, соответствующее единице измеряемой энергии.

Например, 1 кВт-ч равен 450 оборотам диска. Передаточное число указывается на табличке счетчика.

**Постоянная индукционного счетчика** — это значение энергии, которое он измеряет за 1 оборот диска.

**Чувствительность индукционного счетчика** — определяется наименьшим значением тока (в процентах к номинальному) при номинальном напряжении и  $\cos \phi = 1$  ( $\sin \phi = 1$ ), который вызывает вращение диска без остановки. При этом допускается одновременное перемещение не более двух роликов счетного механизма.

Порог чувствительности не должен превышать: 0,4% - для счетчиков класса точности 0,5; 0,5% — для счетчиков классов точности 1,0; 1,5; 2 и 1,0% - для счетчиков класса точности 2,5 и 3,0

**Емкость счетного механизма** — определяется числом часов работы счетчика при номинальных напряжении и токе, по истечении которых счетчик дает первоначальные показания.

**Собственное потребление мощности (активной и полной) обмотками счетчиков** — ограничено стандартом. Так, для трансформаторных и трансформаторных универсальных счетчиков потребляемая мощность в каждой токовой цепи при номинальном токе не должна превышать 2,5 В-А для всех классов

точности, кроме 0,5. Мощность, потребляемая одной обмоткой напряжения счетчиков до 250 В: для классов точности 0,5; 1; 1,5 — активная 3 Вт, полная 12 В-А, для классов точности 2,0; 2,5; 3,0 — соответственно 2 Вт и 8 В-А.

На табличках некоторых индукционных счетчиков имеется надпись «Со стопором» или «Обратный ход застопорен». Стопор препятствует вращению диска против направления, указанного стрелкой. Импортные счетчики могут иметь графическое условное обозначение стопора.

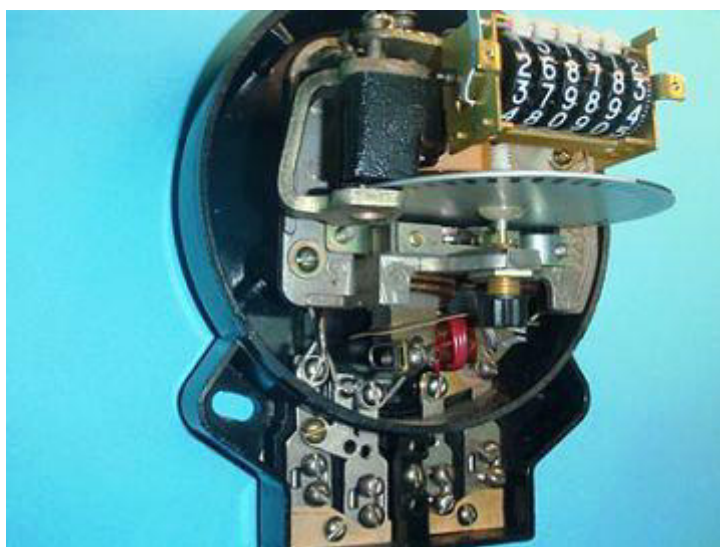


Рис. 2. Устройство индукционного электросчетчика

Для учета потребленной электроэнергии в сетях переменного трехфазного тока применяются **трехфазные индукционные электросчетчики**, принцип действия которых аналогичен однофазным.

В настоящее время все более широкое применение получили **электронные (цифровые) электросчетчики**. Электронные счетчики обладают рядом преимуществ по сравнению с индукционными счетчиками:

- малые габаритные размеры,
- отсутствие вращающихся частей,

- возможность учета электроэнергии по нескольким тарифам,
- измерение суточных максимумов нагрузки,
- учет как активной, так и реактивной мощности,
- более высокий класс точности,
- возможность дистанционного учета электроэнергии.

### **Порядок выполнения работы:**

1. Согласно «Правилам устройства электроустановок» при проведении лабораторных работ по электротехнике соблюдайте следующие основные требования техники безопасности.
2. Не приступайте к работе, не прослушав инструктаж.
3. Не загромождайте свое рабочее место оборудованием, не относящимся к данной работе.
4. Перед началом сборки цепи убедитесь, что источник напряжения лабораторного стенда отключен.
5. Не используйте приборы с неисправными клеммами, провода с поврежденной изоляцией. Проверьте исправность приборов и целостность изоляции проводников до сборки электрической цепи.
6. Не прикасайтесь к зажимам отключенных конденсаторов. Разрядите конденсатор до сборки цепи и после окончания работы, замкнув его выводы накоротко проводником.
7. Не включайте без разрешения преподавателя собранную электрическую цепь.
8. Не прикасайтесь к находящимся под напряжением элементам цепей, лишенных изоляции.
9. Отключайте цепь от источника напряжения при любых переключениях и пересоединениях.
10. Немедленно отключите цепь от источника напряжения при появлении дыма, специфического запаха горелой изоляции и при исчезновении напряжения в силовой цепи лаборатории.
11. Немедленно отключите источник напряжения стенда или рубильник главного распределительного щита лаборатории при поражении кого-либо электрическим током. Сумейте оказать первую помощь пострадавшему.
12. Ознакомьтесь с техническими характеристиками электроизмерительных приборов и занести сведения о них в соответствующие графы таблицы.
13. Соберите электрическую цепь согласно приведённой в бланке-задании электрической схеме, после чего необходимо предъявить её преподавателю для проверки.
14. Произведите требуемые измерения электрических величин в соответствующей последовательности. Далее, зафиксируйте показания электроизмерительных приборов, преобразуйте их в соответствии с ценами делений и требуемыми единицами измерения, после чего занесите

полученные значения в соответствующие графы таблиц, предназначенных для этих целей.

15. Согласно полученным данным выполните соответствующие вычисления.

**Содержание отчёта:** результаты наблюдений и вычислений должны быть представлены в табл. 2

Таблица 2

Нагрузка	Данные измерений				Результаты вычислений		
	U,	I,	P,	t,	C <sub>н</sub> ,	C <sub>д</sub> ,	γ,
	В	А	Вт	с	Вт·с/об	Вт·с/об	%
1 лампа							
2 лампы							
3 лампы							

Для каждого опыта вычислить:  $C_d = \frac{P \cdot t}{N'}$ , где  $N' = 1$  оборот;

$$\gamma_c = \frac{C_n - C_d}{C_d} \cdot 100\%$$

$C_n = \frac{W}{N}$  определить по данным, указанным на щитке счетчика.

**Контрольные вопросы:**

Сделать вывод о пригодности поверяемого счетчика для дальнейшего использования.

## **5 Библиографический список**

### Основные источники:

1. Кривоногов Н.А. и др. Общая электротехника: учебное пособие: - Ростов на Дону, Феникс, 2016. – 222 с
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учебное пособие. Ростов-на-Дону, «Феникс», 2010

### Электронные ресурсы:

3. <http://e.lanbook.com/books>.