

В. Г. Гуляев, О. Б. Кондрашкин, И. А. Гулин

# Электрические цепи

*Учебное пособие*

Нижний Новгород  
2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

В. Г. Гуляев, О. Б. Кондрашкин, И. А. Гулин

# Электрические цепи

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия

Нижний Новгород  
ННГАСУ  
2021

ББК 31.2  
Э50  
УДК 621.3(075.8)

Рецензенты:

*С. Н. Стребуляев* – канд. техн. наук, доцент кафедры дифференциальных уравнений, математического и численного анализа института информационных технологий, математики и механики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный ун-т им. Н. И. Лобачевского»  
*Ю. Я. Бродский* – канд. физ. - мат. наук, ст. науч. сотр., ведущий конструктор Института прикладной физики РАН

Гуляев В. Г. Электрические цепи [Текст]: учеб. пособие / В. Г. Гуляев О. Б. Кондрашкин, И. А. Гулин; Нижегород. гос. архитектур. - строит. ун - т – Н. Новгород: ННГАСУ, 2021. – 134 с. ISBN 978-5-528-00440-2

Пособие содержит основные сведения по электрическим цепям общей электротехники. Изложены законы электротехники, рассмотрены элементы электрических цепей. Приведены описание и порядок выполнения лабораторных работ на специализированном стенде.

Предназначено для студентов направления «Строительство» при подготовке к лабораторным занятиям (включая рекомендации по организации самостоятельной работы) по дисциплине «Электротехника и электроснабжение зданий и сооружений»

ББК 31.2

ISBN 978-5-528-00440-2

© Гуляев В. Г., Кондрашкин О. Б.,  
Гулин И. А., 2021  
© ННГАСУ, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....	6
1.1. Основные определения .....	6
1.2. Электрический ток и напряжение .....	7
1.3. Параметры приёмников электрической энергии .....	7
1.3.1. Резистор.....	8
1.3.2. Индуктивность.....	8
1.3.3. Конденсатор.....	9
1.4. Режимы работы источника ЭДС.....	10
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	11
2.1. Общие положения .....	11
2.2. Методы расчета простейшей электрической цепи .....	11
2.3. Метод расчёта цепей по законам Кирхгофа .....	14
2.3. Метод суперпозиции.....	15
2.4. Метод узловых потенциалов (узлового напряжения) .....	17
2.5. Метод контурных токов.....	18
3. ОДНОФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	19
3.1. Получение синусоидальной ЭДС .....	19
3.2. Способы изображения синусоидальных величин.....	20
3.3. Резистор в цепи однофазного переменного тока .....	23
3.4. Индуктивность в цепи переменного тока (индуктивный элемент) .....	25
3.5. Конденсатор в цепи переменного тока .....	27
3.6. Последовательное соединение резистора, индуктивности и ёмкости в цепи переменного тока.....	29
3.7. Параллельное соединение резистора, индуктивности и емкости в цепи переменного тока.....	32
3.8. Резонансные явления в цепи переменного тока.....	34
3.8.1. Резонанс напряжений.....	34
3.8.2. Резонанс токов .....	36
3.9. Способ повышения коэффициента мощности $\cos\varphi$ электроприёмника .....	38
4. ТРЁХФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА .....	40
4.1. Трёхфазная система ЭДС. Схема соединения источника.....	40
4.2. Четырёхпроводная схема электроприёмников – «звезда» .....	43

4.3 Трёхпроводная схема соединения электроприемников – «треугольник».....	48
4.4. Мощность трёхфазной цепи.....	50
2. Методические указания к лабораторным работам по электрическим цепям однофазного тока.....	52
Лабораторная работа № 2.1.....	52
Лабораторная работа № 2.2.....	55
Лабораторная работа № 2.3.....	57
Лабораторная работа № 2.3.1.....	58
Лабораторная работа № 2.3.2.....	61
Лабораторная работа № 2.3.3.....	63
Лабораторная работа № 2.3.4.....	67
Лабораторная работа № 2.3.5.....	71
Лабораторная работа № 2.4.....	73
Лабораторная работа № 2.4.1.....	74
Лабораторная работа № 2.4.2.....	77
Лабораторная работа № 2.4.3.....	79
Лабораторная работа № 2.4.4.....	83
Лабораторная работа № 2.4.5.....	87
Лабораторная работа № 2.5.....	89
Лабораторная работа № 2.5.1.....	89
Лабораторная работа № 2.5.2.....	95
Лабораторная работа № 2.5.3.....	100
Лабораторная работа № 2.5.4.....	105
Лабораторная работа № 2.5.5.....	110
Лабораторная работа № 2.5.6.....	112
Лабораторная работа № 2.5.7.....	114
Лабораторная работа № 2.5.8.....	116
Лабораторная работа № 2.5.9.....	118
Лабораторная работа № 2.7.....	120
2. Методические указания к лабораторным работам по трехфазным электрическим цепям .....	124
Лабораторная работа № 3.1. и 3.2.....	124
Лабораторная работа № 3.2.....	126
Лабораторная работа № 3.3.....	128

Лабораторная работа № 3.4.....	130
Лабораторная работа № 3.5.....	132
Литература .....	134

## ВВЕДЕНИЕ

Электротехника – это область науки и техники, использующая электрические и магнитные явления для практических целей.

Правильное и технически грамотное решение вопросов использования электроэнергии – одна из основных задач курса электротехники.

## 1. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

### 1.1. Основные определения

*Электрическая цепь* – это совокупность устройств, которые генерируют, передают, преобразуют и потребляют электрическую энергию.

Простейшая электрическая цепь (рис. 1.1) состоит из источника электрической энергии «И» и приёмника «П», соединённых между собой проводами «ЭП».

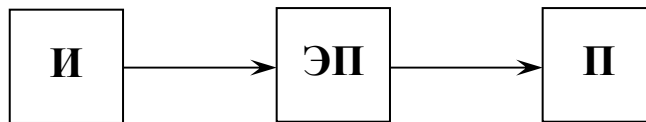


Рис. 1.1

Устройства, предназначенные для генерирования электрической энергии, называются *источниками электрической энергии*, или *источниками питания*, или *источниками электродвижущей силы (ЭДС)*, или *источниками тока*.

Источники питания бывают:

- машинные (генераторы постоянного и переменного тока);
- электростатические (химические, солнечные, атомные и другие).

Устройства, потребляющие электрическую энергию, называются *приёмниками электрической энергии*, или *нагрузкой*.

Приёмниками электрической энергии могут быть:

- приводные электродвигатели различных типов;
- лампы накаливания, нагревательные и осветительные приборы;
- электрохимические и радиотехнические приборы и др.

*Преобразователи* электрической энергии могут быть для электрической цепи как источниками, так и потребителями энергии (например, трансформаторы).

Каждое устройство электрической цепи называется *элементом электрической цепи*.

Для изучения процессов в электрических цепях составляют электромагнитную модель, которая содержит отдельные идеальные элементы. Графическое изображение реальной цепи с помощью идеальных элементов, параметрами которых являются параметры реальных замещённых элементов, носит название *схемы замещения*.

## 1.2. Электрический ток и напряжение

К основным величинам электрической цепи относятся:

- электрический ток;
- напряжение на элементах;
- электродвижущая сила.

*Электрический ток* – направленное движение носителей электрических зарядов.

Принятые обозначения:

$I$  – сила постоянного тока, измеряется в амперах (А);

$i$  – мгновенное значение переменного тока.

*Напряжение* – это энергия, которую расходует каждый электрический заряд в приёмнике электрической энергии, измеряется в вольтах (В).

Принятые обозначения:

$U$  – постоянное напряжение;

$u$  – мгновенное значение переменного напряжения.

*Электродвижущая сила (ЭДС)* – это энергия, которую получает каждый электрический заряд в источнике электрической энергии, измеряется также в вольтах (В).

Принятые обозначения:

$E$  – постоянная ЭДС;

$e$  – мгновенное значение переменной ЭДС.

Условно-положительные направления тока, напряжения и ЭДС определяются так:

- *условно-положительное направление тока* – это направление движения положительных зарядов (далее – направление тока);
- *условно-положительное направление напряжения* – это направление уменьшения потенциала (далее – направление напряжения);
- *условно-положительное направление ЭДС* – это направление действия сторонних сил в источнике питания (далее – направление ЭДС).

Условно-положительные направления тока и ЭДС источника совпадают. Условно-положительные направления тока и напряжения на элементах потребителя совпадают. Условно-положительные направления токов, напряжений и ЭДС на схемах обозначаются стрелками.

## 1.3. Параметры приёмников электрической энергии

К параметрам приёмников электрической энергии относятся:

- сопротивление  $R$ ;
- ёмкость  $C$ ;
- индуктивность  $L$ .



### 1.3.1. Резистор

Резистор сопротивлением  $R$  – это элемент, в котором электрическая энергия преобразуется в тепловую или световую. Примером резистивного элемента служат нагревательные элементы, лампы накаливания и т.д. Схема замещения резистивного элемента показана на рис. 1.2.

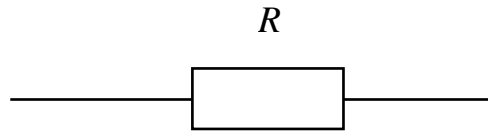


Рис. 1.2

Резистор обладает сопротивлением  $R$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (\text{Ом}) \quad (1.1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала, из которого сделан резистор

$$\left( \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right);$$

$l$  – длина (м);

$S$  – площадь поперечного сечения ( $\text{мм}^2$ ).

Из (1.1) следует, что сопротивление резистора  $R$  зависит только от материалов и размеров и не зависит от тока  $I$  и приложенного напряжения  $U$ .

Также для характеристики резистивного элемента вводится понятие проводимости  $g$  – величина, обратная сопротивлению, измеряемая в Сименсах.

$$g = \frac{1}{R} \quad (\text{См}) \quad (1.2)$$

На резисторе выделяется активная мощность  $P$ , равная

$$P = I^2 R \quad (\text{Вт}) \quad (1.3)$$

### 1.3.2. Индуктивность

*Индуктивность*  $L$  – это элемент, в котором электрическая энергия источника преобразуется в энергию магнитного поля, причём индуктивность и источник обмениваются между собой энергией, поэтому она не теряется (в идеальном случае). Схема замещения индуктивного элемента показана на рис.1.3.



Рис. 1.3

Взаимосвязь между электрическим и магнитным полями в индуктивном элементе задается следующим соотношением:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1.4)$$

где  $\Psi$  – потокосцепление (Вб);

$i$  – мгновенное значение тока (А);

$L$  – коэффициент пропорциональности.

$L$  называют *индуктивностью*, и она измеряется в Генри (Гн), при расчетах используют  $1\text{мГн} = 10^{-3}\text{Гн}$

Знак «минус» в выражении (1.4) говорит о том, что, когда  $\Psi = \text{max}$ , то ток через индуктивность (катушку)  $i$  – минимален и наоборот, то есть потокосцепление  $\Psi$  и ток  $i$  через катушку колеблются в противофазе.

### 1.3.3. Конденсатор

*Конденсатор* – это элемент, в котором электрическая энергия источника преобразуется в энергию электрического поля, находящегося между обкладками конденсатора, причем конденсатор и источник обмениваются между собой энергией, поэтому она не теряется (в идеальном случае).

Схема замещения конденсатора показана на рис.1.4.

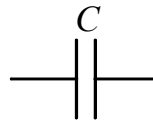


Рис. 1.4

Устройство простейшего конденсатора приведено на рис 1.5, где

- 1- две металлические обкладки, расстояние между обкладками  $d$  (м), площадь обкладок  $S$  (м<sup>2</sup>);
- 2- диэлектрик с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , находящийся между обкладками.

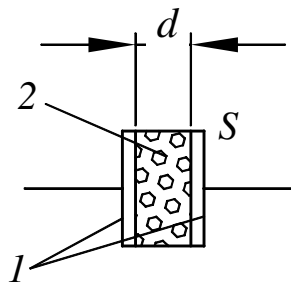


Рис. 1.5

Конденсатор характеризуется емкостью  $C$ :

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (\Phi) \quad (1.5)$$

Емкость измеряется в Фарадах (Ф), при расчете используется

$$1\text{мкФ} = 10^{-6}\text{Ф}.$$

В электротехнике для классификации «пассивных» элементов применяется следующая терминология: резистор  $R$  – «активный» элемент, индуктивность  $L$  и емкость  $C$  – «реактивный» элемент.

### 1.4. Режимы работы источника ЭДС

Для исследования режимов работы источника ЭДС используется схема замещения, показанная на рис. 1.6.

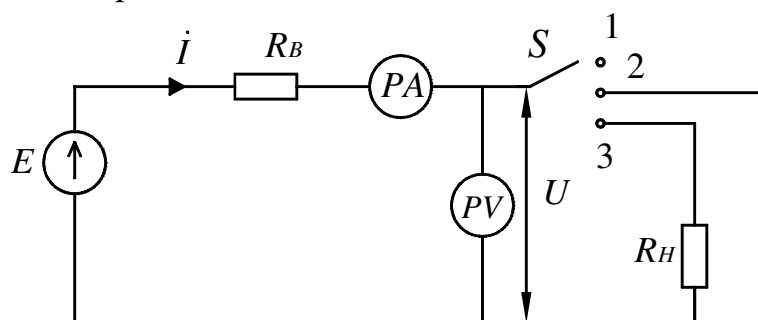


Рис. 1.6

Схема состоит из источника ЭДС  $E$ , с внутренним сопротивлением  $R_B$ , двух приборов:  $PA$  (амперметра), предназначенного для измерения тока  $I$  (А) и  $PV$  (вольтметра), предназначенного для измерения напряжения  $U$  (В), переключателя  $S$  на три положения и сопротивления нагрузки  $R_H$ .

Режимы работы источника исследуются при трех положениях переключателя  $S$ .

При первом положении (1) цепь разомкнута, поэтому ток равен нулю ( $I=0$ ), а напряжение на выходе  $U$ , равняется ЭДС ( $E$ ).

Такой режим работы источника ЭДС называется *режимом холостого хода*

$$U_{xx} = E, I = 0.$$

При втором положении (2) переключателя цепь замкнута на перемычку  $R_H = 0$ , при этом по цепи пойдет ток  $I = \frac{E}{R_B}$ , а так как внутреннее сопротивление  $R_B$  очень мало, то ток будет достигать максимального значения  $I = I_{KЗ} \rightarrow \infty$ .

Такой режим работы источника называется *режимом короткого замыкания*, и он характеризуется  $I_{KЗ} \rightarrow \infty$ ,  $U_{KЗ} = R_H \cdot I_{KЗ} = 0$ . Это аварийный режим работы источника ЭДС.

При третьем (3) положении переключателя к источнику ЭДС подключено сопротивление нагрузки  $R_H$ . По цепи идет ток  $I_H$ .

$$I_H = \frac{E}{R_H + R_B} \quad (\text{А}), \quad (1.6)$$

Показания вольтметра ( $U_H$ ) согласно закону Ома будет

$$U_H = I_H \cdot R_H \quad (\text{В}), \quad (1.7)$$

Подставляя (1.6) в (1.7) получаем

$$U_H = E \cdot \frac{R_H}{R_H + R_B} \quad (1.8)$$

Под внешней характеристикой источника ЭДС понимается зависимость напряжения  $U$  от тока нагрузки  $I$ :  $U = f(I)$ . Внешняя характеристика показана на рис.1.7.

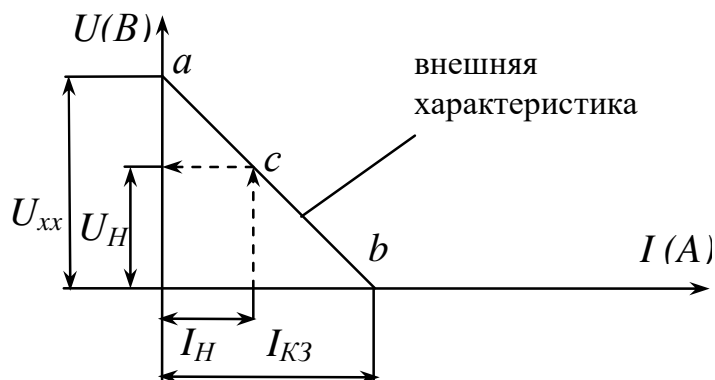


Рис. 1.7

На рис 1.7 точка «а» соответствует режиму холостого хода, точка «b» – режиму короткого замыкания, точка «с» – нагрузочному режиму, когда задан ток нагрузки  $I_H$ .

## 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.1. Общие положения

При расчете цепей постоянного тока необходимо учитывать следующие положения:

1. Электрические цепи являются линейными, зависимость между напряжением и током линейная.
2. Сопротивления в цепи постоянного тока – резисторы  $R$ .
3. Источники ЭДС характеризуются полярностью и могут работать как в режиме отдачи электрической энергии (нагрузочном), так и в режиме подзарядки (аккумуляторном).

### 2.2. Методы расчета простейшей электрической цепи

Различают следующие способы соединения элементов (резисторов): последовательное, параллельное и смешанное.

*Последовательным* называется такое соединение элементов, при котором вывод одного элемента соединен только с выводом другого элемента (рис 2.1).

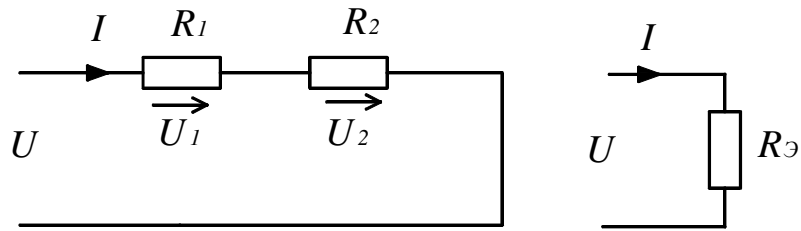


Рис. 2.1

Основное свойство такого соединения состоит в том, что ток  $I$ , проходящий через элементы, имеет одинаковое значение, а приложенное напряжение  $U$  равно сумме падений напряжений на каждом из элементов.

$$U = U_1 + U_2 \quad (\text{В}) \quad (2.1)$$

Последовательно соединённые сопротивления могут быть заменены одним эквивалентным сопротивлением, величина которого равна сумме сопротивлений

$$R_{\text{Э}} = R_1 + R_2 \quad (\text{Ом}) \quad (2.2)$$

Зная приложенное напряжение  $U$  и ток  $I$ , эквивалентное сопротивление можно определить по формуле

$$R_{\text{Э}} = U/I \quad (\text{Ом}) \quad (2.3)$$

Мощность, потребляемая последовательно соединёнными элементами

$$P = U \cdot I = I^2 R_{\text{Э}} \quad (\text{Вт}) \quad (2.4)$$

*Параллельным соединением* называют такое соединение элементов, при котором одни и те же выводы элементов соединены с выводами других элементов (рис. 2.2).

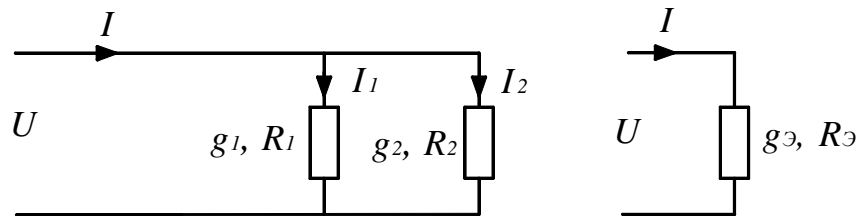


Рис. 2.2

Основное свойство такого соединения состоит в том, что напряжение на всех элементах одинаково и равно приложенному. Токи, согласно первому закону Кирхгофа, связаны соотношением

$$I = I_1 + I_2, \quad (\text{А}) \quad (2.5)$$

$$\text{где } I_1 = \frac{U}{R_1} \quad (\text{А}), \quad I_2 = \frac{U}{R_2} \quad (\text{А}).$$

Параллельно соединённые сопротивления могут быть заменены одним эквивалентным, имеющим проводимость, равную сумме проводимостей

$$g_{\text{Э}} = g_1 + g_2, \quad (\text{См}) \quad (2.6)$$

$$\text{где } g_1 = \frac{1}{R_1}, \quad g_2 = \frac{1}{R_2}, \quad g_{\text{Э}} = \frac{1}{R_{\text{Э}}}.$$

Зная приложенное напряжение  $U$  и ток  $I$ , эквивалентную проводимость и эквивалентное сопротивление можно определить по следующим формулам

$$g_{\text{Э}} = \frac{I}{U}, \quad (\text{См}) \quad (2.7)$$

$$R_{\text{Э}} = \frac{1}{g_{\text{Э}}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad (\text{Ом})$$

Мощность, потребляемая параллельно соединёнными элементами

$$P = U \cdot I = U^2 g_{\text{Э}} \quad (\text{Вт}) \quad (2.8)$$

*Смешанным соединением* называют соединение элементов, при котором часть элементов соединена последовательно, а часть параллельно (рис.2.3).

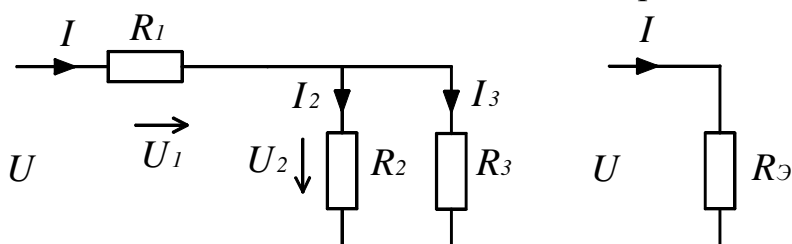


Рис. 2.3

Для смешанного соединения справедливы соотношения

$$U = U_1 + U_2 \quad (\text{В}) \quad (2.9)$$

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (\text{А})$$

Смешанное соединение элементов может быть заменено одним эквивалентным сопротивлением

$$R_{\text{Э}} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \quad (\text{Ом}) \quad (2.10)$$

Зная приложенное напряжение  $U$  и ток  $I$ , эквивалентное сопротивление можно определить следующим образом

$$R_{\text{Э}} = U/I \quad (\text{Ом}) \quad (2.11)$$

Определив токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  и напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  можно рассчитать каждое из сопротивлений

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1}; \quad R_2 = \frac{U_2}{I_2}; \quad R_3 = \frac{U_2}{I_3} \quad (2.12)$$

Мощность, потребляемую смешанным соединением элементов, можно определить по формуле

$$P = U \cdot I_1 = I_1^2 \cdot R_{\text{Э}} \quad (\text{Вт}) \quad (2.13)$$

## 2.3. Метод расчёта цепей по законам Кирхгофа

Сложная электрическая цепь характеризуется следующими параметрами: ветвь, узел, контур.

*Ветвь* – участок электрической цепи, по которой протекает один и тот же ток.

*Узел* – место соединения ветвей электрической цепи.

*Контур* – замкнутый путь, проходящий по ветвям электрической цепи.

Первый закон Кирхгофа говорит о том, что алгебраическая сумма всех токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (2.14)$$

Второй закон Кирхгофа говорит о том, что алгебраическая сумма падений напряжений по замкнутому контуру равна алгебраической сумме ЭДС в нем:

$$\sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n R_i I_i \quad (2.15)$$

Для расчёта электрической цепи с помощью законов Кирхгофа необходимо:

- в цепи произвольно выбрать направление токов;
- составить уравнения по первому закону Кирхгофа на одно меньше, чем число узлов в цепи;
- уравнения, которых недостаёт до полной системы, составить по второму закону Кирхгофа. Контур нужно выбирать таким образом, чтобы в каждом была хотя бы одна ветвь, которая не рассматривалась ранее;
- после определения токов нужно уточнить действительное направление этих токов.

**ПРИМЕР.** Рассчитать электрическую цепь с одним источником питания, представленную на рис. 2.4.

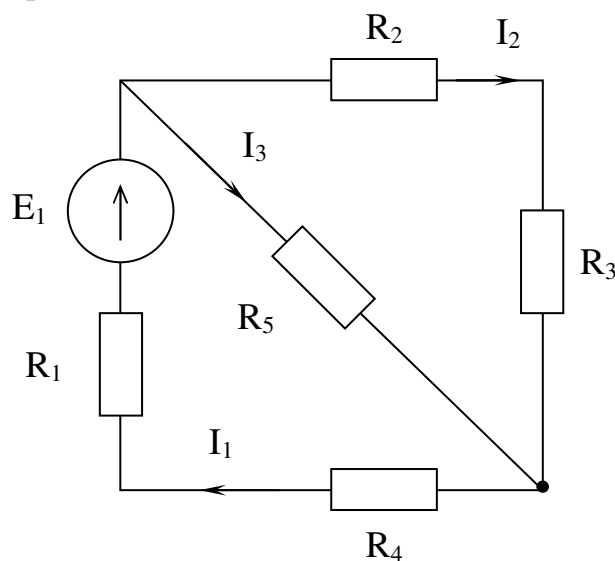


Рис. 2.4

Составим уравнения:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0;$$

$$E_1 = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_2 \cdot R_3 + I_1 \cdot R_4;$$

$$0 = I_2 \cdot R_2 + I_2 \cdot R_3 - I_3 \cdot R_5.$$

Решая систему уравнений, находим все токи.

Из закона сохранения энергии вытекает понятие *баланса мощностей*.

Мощность всех источников питания электрической цепи равна сумме мощностей всех приёмников этой цепи:

$$\sum_{K=1}^n E_K I_K = \sum_{K=1}^m I_K^2 R_K.$$

Если направления ЭДС и тока совпадают, то источник отдаёт мощность нагрузке. В этом случае произведение  $E_K I_K$  нужно брать со знаком «+». Если направления ЭДС и тока противоположны, то источник работает в режиме приёмника (например, режим зарядки аккумулятора). В таком случае произведение нужно брать со знаком «-».

### 2.3. Метод суперпозиции

Если цепь имеет несколько источников питания, то для расчёта этих цепей можно применить *метод суперпозиции (метод наложения)*. Этот метод использует принцип независимости действия ЭДС. Токи, которые создаются несколькими ЭДС, являются алгебраической суммой токов, создаваемых каждым источником в отдельности. Метод суперпозиции даёт возможность заменить вычисление сложных цепей расчётами элементарных цепей с одним источником питания в каждой.

Вычисление сложных цепей с несколькими источниками питания по этому методу можно осуществить следующим образом:

1) сложную цепь заменяют несколькими цепями, каждая из которых имеет один источник питания в элементарной цепи, другие заменяют сопротивлениями, которые равны внутренним сопротивлениям источников;

2) рассчитывают элементарные цепи, определяя величины и направления токов в каждой ветви;

3) в каждой ветви находят действительные токи, как алгебраическую сумму соответствующих токов, то есть слагаемыми действительного тока являются токи этой ветви в элементарных цепях.

Для примера вычислим цепь, приведённую на рис. 2.5.



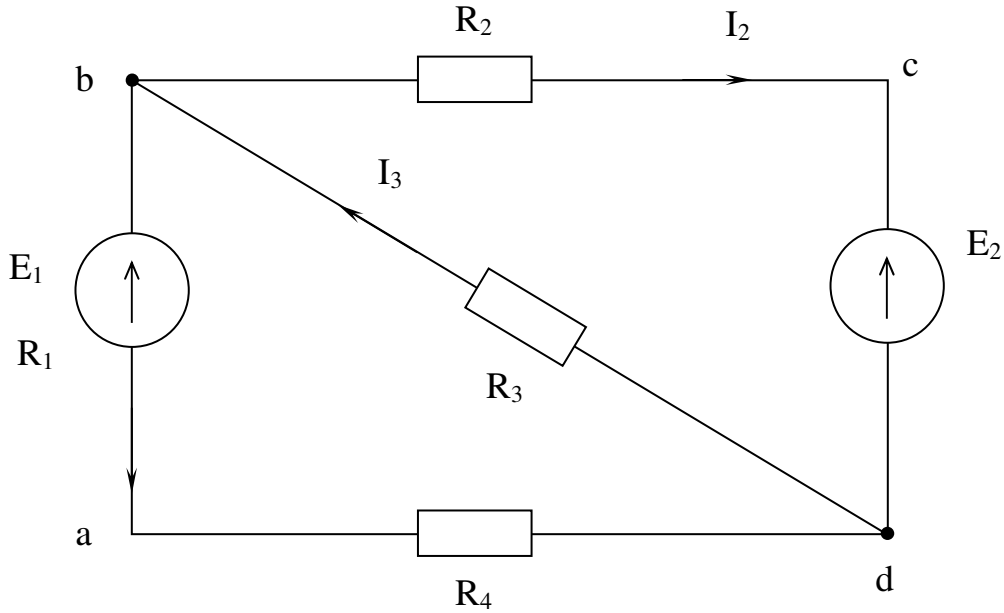


Рис. 2.5

В первом случае рассмотрим цепь без ЭДС  $E_2$ . Внутреннее сопротивление этой ЭДС равно нулю. Все токи будем помечать штрихом, то есть:

$$I_1' = \frac{-E_1}{R_1 + R_4 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}};$$

$$I_3' = -\frac{E_1 + I_1'(R_1 + R_4)}{R_3};$$

$$I_2' = I_3' - I_1'.$$

Дальше можно рассмотреть цепь без источника  $E_1$ , но учесть его внутреннее сопротивление  $R_1$ . Токи будем помечать двумя штрихами:

$$I_2'' = \frac{-E_2}{R_2 + \frac{(R_1 + R_4)R_3}{R_1 + R_3 + R_4}};$$

$$I_3'' = -(E_2 + I_2''R_2) \cdot \frac{1}{R_3};$$

$$I_1'' = I_3'' - I_2''.$$

Действительные токи являются суммой соответствующих токов элементарных цепей, то есть:

$$I_1 = I_1' + I_1'',$$

$$I_2 = I_2' + I_2'',$$

$$I_3 = I_3' + I_3''.$$

## 2.4. Метод узловых потенциалов (узлового напряжения)

Если электрическая цепь состоит *только из двух узлов*, то проще всего рассчитать её методом *узлового напряжения*.

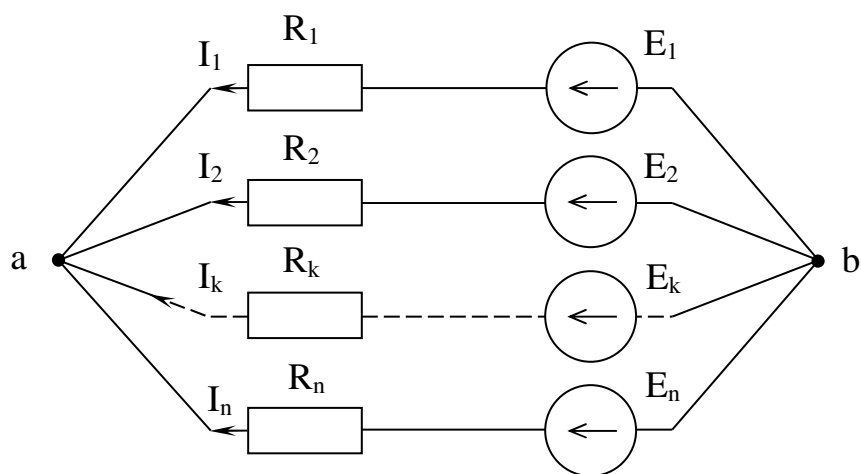


Рис. 2.6

На рис. 2.6 напряжение  $U_{ab}$  направлено от  $a$  к  $b$ . Для каждого  $k$ -го контура уравнение по второму закону Кирхгофа имеет вид:

$$E_K = I_K R_K + U_{ab}.$$

Ток в каждой ветви цепи в таком случае равен:

$$I_K = (E_K - U_{ab}) \cdot g_k,$$

где  $g_k$  – проводимость ветви.

Если составить уравнение по первому закону Кирхгофа

$$\sum I_K = 0,$$

т.е.

$$\sum I_K = \sum (E_K - U_{ab}) \cdot g_k = 0,$$

то можно определить узловое напряжение:

$$U_{ab} = \frac{\sum E_K \cdot g_k}{\sum g_k}.$$

Чтобы рассчитать цепь методом узлового напряжения, нужно:

- в цепи *произвольно принять* направление токов;
- определить узловое напряжение

$$U_{ab} = \frac{\sum E_K \cdot g_k}{\sum g_k};$$

произведение в числителе берётся со знаком «+», если направление ЭДС не совпадает с направлением узлового напряжения;

- определив узловое напряжение, можно найти токи во всех ветвях электрической цепи:

$$I_K = (E_K - U_{ab}) \cdot g_k.$$

Если ток имеет отрицательное значение, то действительное его направление противоположно обозначенному на схеме.

## 2.5. Метод контурных токов

С помощью законов Кирхгофа принципиально возможно рассчитать любую электрическую цепь. Но в случае сложных разветвлённых цепей необходимо решать очень громоздкую систему уравнений. Упростить расчёты помогает метод контурных токов.

Метод состоит в следующем:

- вводится понятие о *контурных токах*, которые являются фиктивными, условными (расчётными) и замыкаются лишь по своим сложным контурам;
- контурные токи связывают с действительными токами в ветвях (аналитически);
- составляется система уравнений по второму закону Кирхгофа для контурных токов; количество контурных токов значительно меньше, чем действительных, уменьшается и количество уравнений в цепи;
- решается система уравнений, и определяются контурные токи;
- с помощью аналитических зависимостей определяются действительные токи.

Приведём пример расчёта этим методом для схемы рис. 2.7.

- разобьём схему по смежным контурам и определим направления контурных токов ( $I_I$ ,  $I_{II}$ ,  $I_{III}$ );
- найдём связь контурных и действительных токов

$$I_I = I_1; I_{II} = I_4; I_{III} = I_5;$$

$$I_3 = I_{II} - I_I; I_2 = I_I - I_{III}; I_6 = I_{II} - I_{III};$$

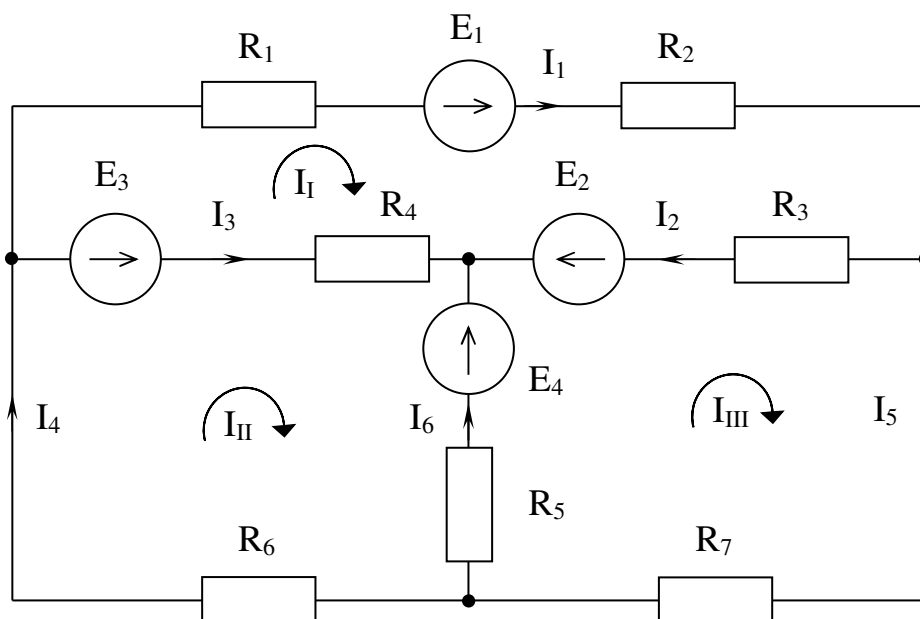


Рис. 2.7

- составим систему уравнений по второму закону Кирхгофа для каждого контура:  
 (1-й контур)  $E_1 + E_2 - E_3 = I_1 \cdot (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) - I_{II} \cdot R_4 - I_{III} \cdot R_3$ ;  
 (2-й контур)  $E_3 - E_4 = I_{II} \cdot (R_4 + R_5 + R_6) - I_I \cdot R_4 - I_{III} \cdot R_5$ ;  
 (3-й контур)  $E_4 - E_2 = I_{III} \cdot (R_3 + R_5 + R_7) - I_I \cdot R_3 - I_{II} \cdot R_5$ ;
- решим систему, найдём контурные токи и определим действительные токи в ветвях.

### 3. ОДНОФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### 3.1. Получение синусоидальной ЭДС

Модель источника синусоидальной ЭДС представлена на рис. 3.1.

Рассмотрим механизм возникновения синусоидальной ЭДС. Для этого удобно использовать простейшую модель – рамку, вращающуюся с постоянной угловой скоростью в равномерном магнитном поле (N-S).

Проводники рамки, перемещаясь в магнитном поле, пересекают его и в них, на основании закона электромагнитной индукции, возникает электродвижущая сила ( $e$ ). Величина ЭДС ( $e$ ) пропорциональна амплитуде магнитной индукции  $B_m$ , длине проводника  $l$ , и скорости перемещения относительно поля  $v_t$ .

$$e = B_m l v_t \quad (\text{В})$$

Выразив скорость  $v_t$  через окружную скорость  $v$  и угол  $\alpha$ , получим

$$e = B_m l v \sin \alpha \quad (\text{В})$$

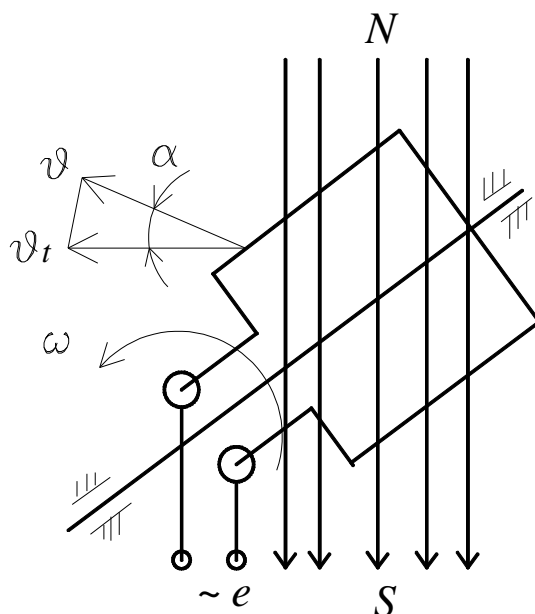


Рис. 3.1

Выражение  $B_m \cdot l v$  представляет собой наибольшее значение ЭДС  $E_m$ , которая возникает в рамке при  $\alpha = 90^\circ$ .

Угол  $\alpha$  равен произведению угловой скорости вращения рамки  $\omega$  на время  $t$ .

$$\alpha = \omega \cdot t$$

Таким образом, ЭДС, возникающая в рамке, будет равна

$$e = E_m \sin \alpha = E_m \sin \omega t \text{ (В)} \quad (3.1)$$

### 3.2. Способы изображения синусоидальных величин

Под переменной ЭДС понимается ЭДС, изменяющаяся по синусоидальному закону (рис. 3.2).

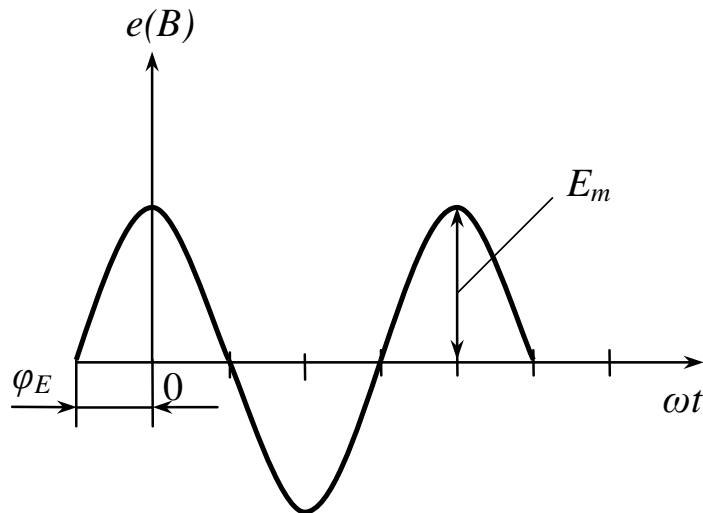


Рис. 3.2

Закон изменения синусоидальной ЭДС записывается в следующем виде:

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_E) \text{ (В)}, \quad (3.2)$$

где  $e$  – мгновенное значение ЭДС (В), это значение ЭДС в каждой точке синусоиды;

$\omega t + \varphi_E$  – фаза синусоидальных колебаний;

$\varphi_E$  – это начальная фаза для  $t = 0$ ;

$\omega$  – угловая частота синусоидальных колебаний (1/с).

Частотой  $f$  называется число периодов в секунду:

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Гц}),$$

где  $T$  – период, это время одного цикла колебаний (с).

Угловая частота  $\omega$  и частота  $f$  связаны соотношением:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f.$$

Для источника переменного напряжения закон изменения записывается в следующем виде:

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_U) \quad (\text{В}) \quad (3.3)$$

Для синусоидального тока закон изменения записывается аналогичным образом:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_I) \quad (\text{А}) \quad (3.4)$$

При сравнении выражений (3.2), (3.3), (3.4) видно, что форма записи одинакова, разница лишь в угле начальной фазы  $\varphi$ .

Частота переменного тока  $f = 50$  Гц в Европе и 60 Гц в США и Японии.

Для того, чтобы сравнить характеристики цепей постоянного и переменного токов, вводится понятие действующего значения синусоидальной величины:

$$\text{тока } I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t \cdot dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$\text{напряжения } U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \sin^2 \omega t \cdot dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}};$$

$$\text{ЭДС } E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E_m^2 \sin^2 \omega t \cdot dt} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Электроприборы в цепях переменного тока измеряют действующее значение тока, напряжения, ЭДС и мощности.

Тригонометрическая форма записи синусоидальных величин неудобна при расчёте электрических цепей переменного тока, поэтому в электротехнике синусоидальные функции изображают в виде комплексных чисел, согласно следующему положению.

Любая синусоидальная функция может быть изображена в виде вектора на комплексной плоскости, величина которого равняется синусоидальной функции, а угол, образованный с осью действительных чисел, равняется углу начальной фазы синусоидального колебания.

*Комплексная плоскость* – это плоскость, образованная с осью действительных чисел ( $+1$ ) и осью мнимых чисел ( $+j$ ), где  $j^2 = -1$ .

На рис. 3.3 показано изображение амплитуды тока  $\dot{I}_m$  на комплексной плоскости

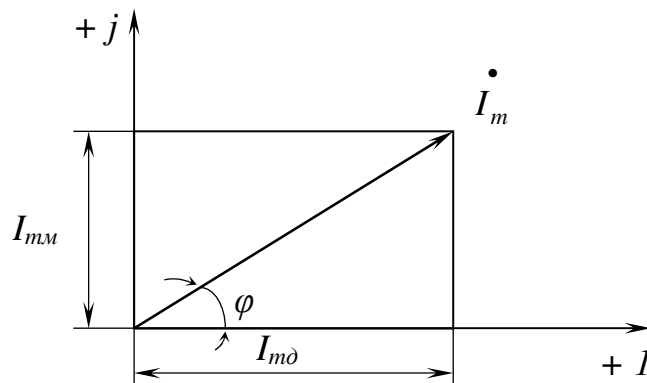


Рис. 3.3

Из рис. 3.3 следует, что  $\dot{I}_m$  – комплекс  $I_m$  (точка показывает комплексную величину);  $I_{m\partial}$  – проекция комплекса на ось действительных чисел;  $I_{m\text{м}}$  – проекция комплекса на ось мнимых чисел;  $\varphi$  – угол начальной фазы.

Существуют следующие способы изображения комплексных чисел:

алгебраическое

$$\dot{I}_m = I_{m\partial} + jI_{m\text{м}}; \quad (3.5)$$

тригонометрическое

$$\dot{I}_m = |I_m|(\cos \varphi + j \sin \varphi); \quad (3.6)$$

где  $|I_m| = \sqrt{I_{m\partial}^2 + I_{m\text{м}}^2}$ ,  $\varphi = \text{arctg} \frac{I_{m\text{м}}}{I_{m\partial}}$ .

показательное

$$\dot{I}_m = |I_m| \cdot e^{+j\varphi}; \quad (3.7)$$

где  $e$  – основание натуральных логарифмов.

Аналогично изображаются и комплексы напряжений  $\dot{U}$  и ЭДС  $\dot{E}$ .

Рассмотрим пример, когда требуется определить сумму двух токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ , изображённых на комплексной плоскости (рис. 3.4).

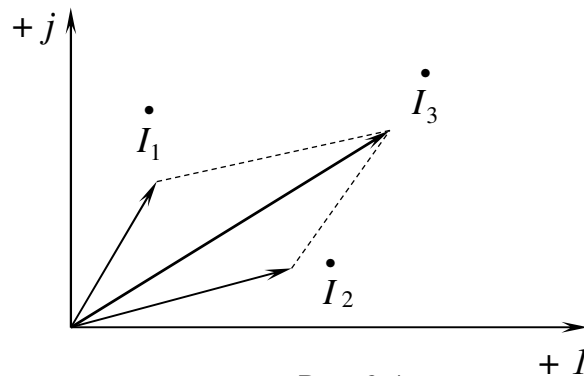


Рис. 3.4

Взаимное расположение векторов на комплексной плоскости называется *векторной диаграммой*. Для определения суммы двух токов  $\dot{I}_3 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$  достаточно сложить их по правилу параллелограмма.

Применение комплексных чисел при расчёте электрических цепей переменного тока позволяет перейти от дифференциальных и интегральных уравнений к алгебраическим.

### 3.3. Резистор в цепи однофазного переменного тока

Пусть в цепь переменного тока  $i = I_m \sin \omega t$  включен резистор  $R$  (рис. 3.5).

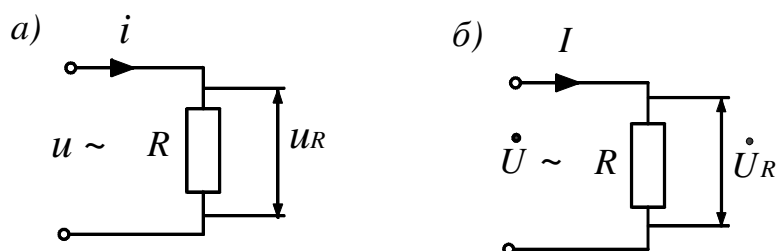


Рис. 3.5

Падение напряжения на резисторе определим согласно закону Ома:

$$u_R = R \cdot i = R \cdot I_m \sin \omega t \quad (3.8)$$

где  $U_m = R \cdot I_m$ .

Графики изменения тока  $i$  и падения напряжения  $u_R$  показаны на рис. 3.6.

Построим векторную диаграмму для цепи, содержащей резистивный элемент. Построение начнём с комплексной плоскости (рис. 3.7). Параллельно оси действительных чисел (+1) строим вектор действующего значения тока  $\dot{I}$ .

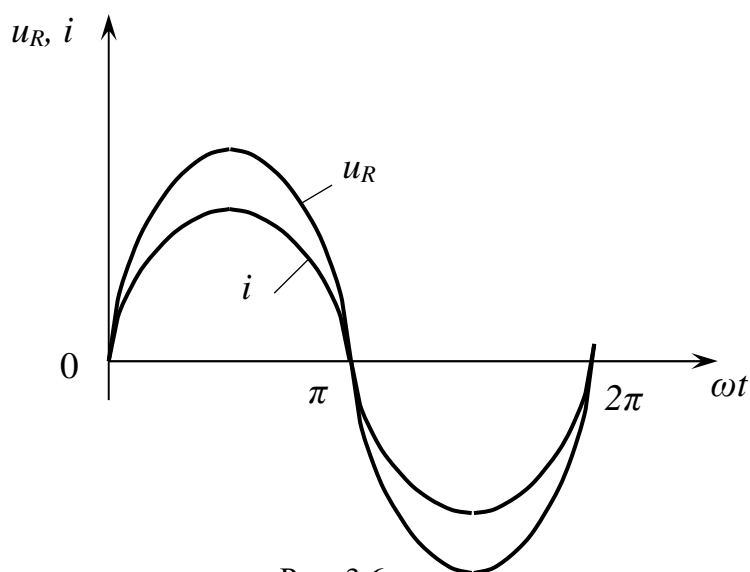


Рис. 3.6

Далее, сравнивая законы изменения тока  $i$  и падения напряжения  $u_R$  (рис. 3.6), делаем вывод: так как законы изменения тока  $i$  и падения напряжения на резисторе  $u_R$  одинаковы, то вектор  $\dot{U}_R$  совпадает по направлению с вектором тока через резистор  $\dot{I}$  (рис. 3.7).



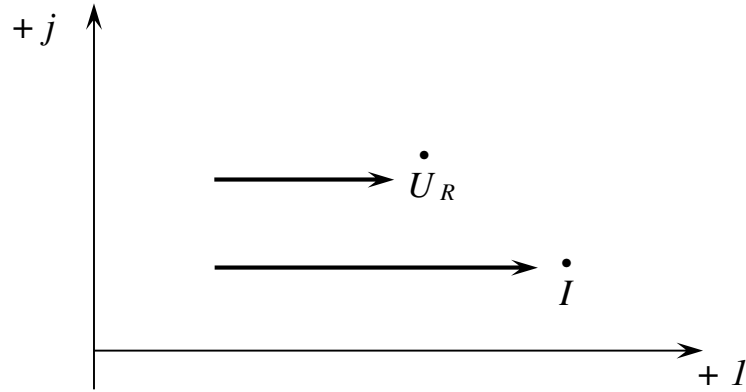


Рис. 3.7

Поэтому закон Ома в комплексном виде запишется так:

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I} \quad (3.9)$$

Этой форме записи закона Ома соответствует схема замещения, показанная на рис. 3.5б.

Мгновенная мощность на резисторе равна:

$$p = u \cdot i = I_m U_m \sin^2 \omega t = \frac{I_m U_m}{2} [1 - \cos 2\omega t] \quad (3.10)$$

Из выражения (3.10) видно, что мгновенная мощность содержит постоянную составляющую  $\frac{I_m U_m}{2}$  и переменную  $\frac{I_m U_m}{2} \cos 2\omega t$ .

Среднее значение мощности, выделяемой на резистивном элементе, равно:

$$P = \frac{U_m I_m}{2} = U \cdot I = I^2 \cdot R \quad (\text{Вт}), \quad (3.11)$$

$$\text{где } I = \frac{U}{R}$$

Мощность  $P$  называется активной и измеряется в ваттах (Вт).

### 3.4. Индуктивность в цепи переменного тока (индуктивный элемент)

Пусть в цепь переменного тока  $i = I_m \sin \omega t$  включена индуктивность (рис. 3.8, а).

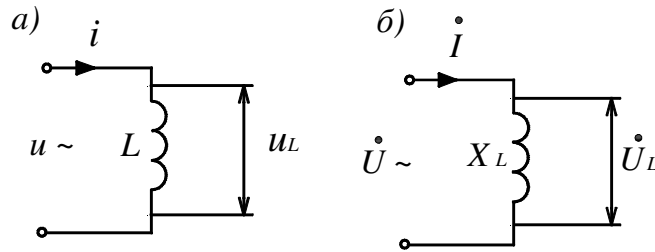


Рис. 3.8

Известно [1], что при прохождении тока через индуктивный элемент в нём возникает магнитный поток  $\Phi$ , который наводит в нём ЭДС самоиндукции

$$e_L = -W \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}, \quad (3.12)$$

где  $W$  – число витков катушки индуктивности.

Эта ЭДС самоиндукции уравновешивается падением напряжения на индуктивности  $u_L$

$$e_L = - u_L \quad (3.13)$$

Падение напряжения на индуктивности  $u_L$  с учётом (3.12) и (3.13) будет равно

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L \cdot I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (3.14)$$

$$u_L = U_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Введём понятие индуктивного сопротивления  $X_L$

$$X_L = \omega L = 2\pi fL = 314L, \text{ (Ом)} \quad (3.15)$$

где  $f = 50$  Гц.

Графики изменения тока ( $i$ ) и падения напряжения на катушке ( $u_L$ ) показаны на рис 3.9.

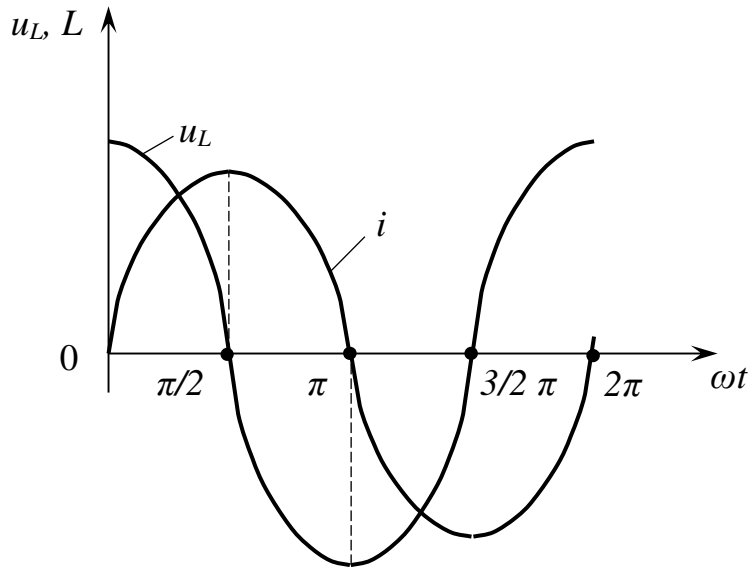


Рис. 3.9

Из рис. 3.9 следует, что ток  $i$  и падение напряжения  $u_L$  колеблются в противофазе.

Построим векторную диаграмму для цепи, содержащей индуктивность  $L$ . Построение начинаем с комплексной плоскости (рис. 3.10). Параллельно оси действительных чисел  $\begin{pmatrix} \bullet \\ +1 \end{pmatrix}$  строим вектор действующего значения тока  $\dot{I}$ .

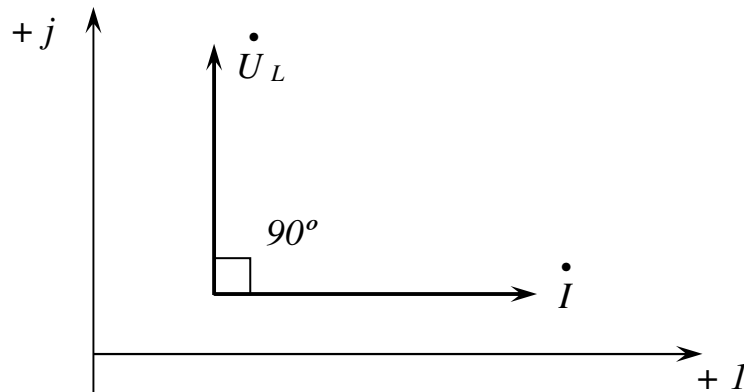


Рис. 3.10

Теперь, сравнивая (рис. 3.9) законы изменения тока  $\sin \omega t$  и падения напряжения на индуктивности  $U_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$ , делаем вывод, что вектор падения напряжения на индуктивности  $\dot{U}_L$  опережает вектор тока  $\dot{I}$  на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Закон Ома в комплексном виде для индуктивного элемента запишется

$$\dot{U}_L = +jX_L \dot{I}, \quad (3.16)$$

где  $+jX_L$  – комплекс индуктивного сопротивления;

+  $j$  показывает, что вектор  $\dot{U}_L$  опережает вектор  $\dot{I}$  на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Мгновенная мощность индуктивности равна:

$$q_L = u_L \cdot i = I_m \sin \omega t \cdot U_{Lm} \cos \omega t = U_L I \sin 2\omega t \quad (3.17)$$

Мощность в цепи, содержащей индуктивный элемент, называют *реактивной индуктивной мощностью* (+  $Q_L$ ) и измеряют в вольт-амперах реактивных (вар).

$$+ Q_L = I^2 X_L \quad (\text{вар}) \quad (3.18)$$

### 3.5. Конденсатор в цепи переменного тока

Пусть в цепь переменного напряжения  $u = U_m \sin \omega t$  включен конденсатор (рис. 3.11).

Тогда ток, проходящий через конденсатор будет равен [1]:

$$i_A = C \frac{du_C}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = I_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (3.19)$$

где  $I_m = \omega C U_m$ .

Введём понятие ёмкостного сопротивления  $X_C$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{314C}, \quad (\text{Ом}) \quad (3.20)$$

где  $f = 50$  Гц, емкость  $C$  измеряется в фарадах (Ф).

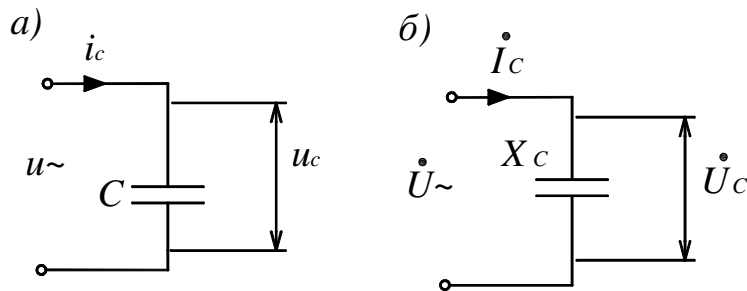


Рис. 3.11

Графики изменения напряжения на конденсаторе  $u_C$  и тока  $i$  показаны на рис. 3.12.

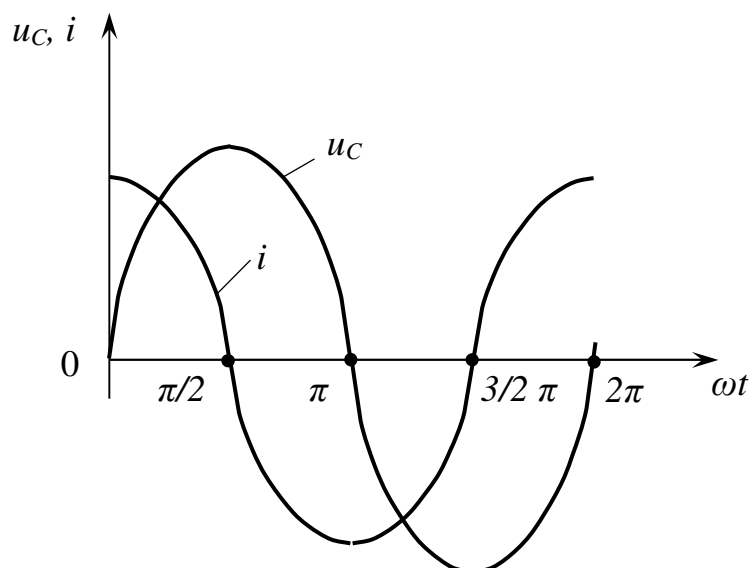


Рис. 3.12

Построим векторную диаграмму для цепи, содержащей конденсатор. Построение начинаем с комплексной плоскости (рис. 3.13). Параллельно оси действительных чисел (+1) строим вектор действующего напряжения на конденсаторе  $\dot{U}_C$ . Теперь, сравнивая (рис. 3.12) законы изменения напряжения на конденсаторе  $u_C = U_m \cdot \sin \omega t$  и тока  $i$  через конденсатор  $I_m \cdot \sin(\omega t + 90)^\circ$  делаем вывод, что вектор тока  $I$  опережает вектор падения напряжения  $\dot{U}_C$  на конденсаторе на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Закон Ома в комплексном виде для конденсатора запишется так:

$$\dot{U}_C = -jX_C \dot{I}_C, \quad (3.21)$$

где  $-jX_C$  – комплекс емкостного сопротивления;

$-j$  показывает, что падение напряжения на конденсаторе  $\dot{U}_C$  отстает от тока  $\dot{I}_C$  на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

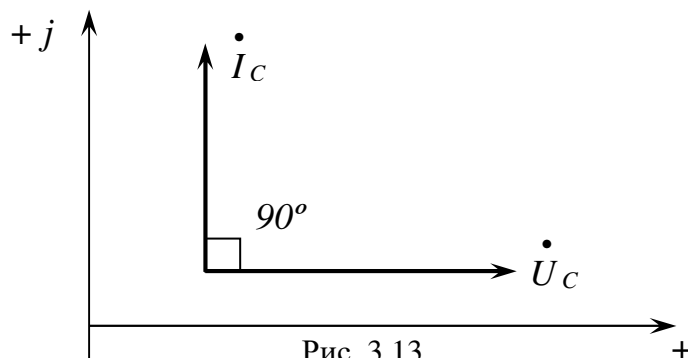


Рис. 3.13

Этой форме записи закона Ома в комплексном виде соответствует схема замещения, показанная на рис. 3.11, б.

Мгновенная мощность на конденсаторе равна

$$q_C = u_C \cdot i_C = U_m \sin \omega t \cdot I_m \cos \omega t = U_m I_m \sin 2\omega t \quad (3.22)$$

Мощность в цепи, содержащей емкостный элемент, называют *реактивной емкостной мощностью*  $Q_C$  и измеряют в вольт-амперах реактивных (вар).

$$-Q_C = I^2 X_C \quad (\text{вар}) \quad (3.23)$$

Знак «минус» у мощности  $Q_C$  говорит о том, что в первую и третью четверть колебаний конденсатор отдаёт мощность источнику в отличие от индуктивности, которая в первую и третью четверть потребляет от источника реактивную мощность  $+Q_L$ .

### 3.6. Последовательное соединение резистора, индуктивности и ёмкости в цепи переменного тока

*Последовательным соединением* элементов называется такое соединение, когда по всем элементам идёт один и тот же ток, а приложенное напряжение равняется геометрической сумме падений напряжений на этих элементах согласно второму закону Кирхгофа.

Схема последовательного соединения  $R$ ,  $x_L$ , и  $x_C$  приведена на рис. 3.14, а.

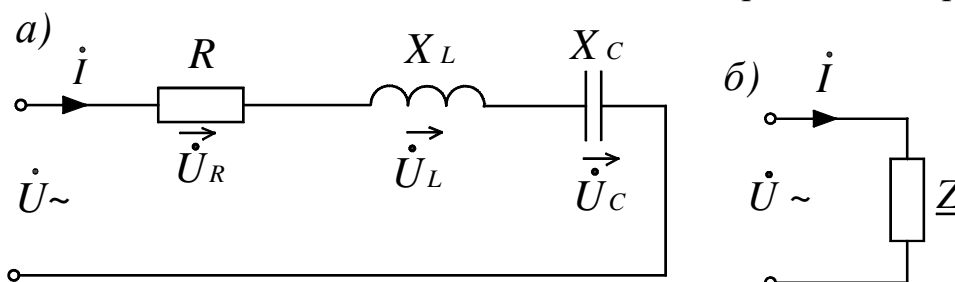


Рис. 3.14

Второй закон Кирхгофа в комплексном виде запишется следующим образом:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C \quad (3.24)$$

С учетом вышеприведённых выражений

$$\dot{U} = \dot{I}R + \dot{I}(+jx_L) + \dot{I}(-jx_L) = \dot{I}[R + j(x_L - x_C)] \quad (3.25)$$

Выражение в квадратных скобках обозначим через  $\underline{Z}$  и назовем его *полным комплексным сопротивлением цепи*.

$$\underline{Z} = R + j(x_L - x_C) \quad (\text{Ом}) \quad (3.26)$$

По величине  $|\underline{Z}|$  равняется

$$Z = |\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} \quad (\text{Ом})$$

Тогда закон Ома для последовательно соединённых элементов в комплексной форме запишется в виде

$$\dot{U} = \dot{I} \cdot \underline{Z} \quad (3.27)$$

Этой форме записи закона Ома будет соответствовать схема замещения, показанная на рисунке 3.14, б. Схемы «а» и «б» называются *эквивалентными*.

Величина тока  $\left| \dot{I} \right|$  при последовательном соединении элементов будет

$$I = \left| \dot{I} \right| = \frac{U}{|\underline{Z}|} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}} \quad (\text{А})$$

Построим векторную диаграмму для последовательного соединения резистора, индуктивности и емкости.

Построение начинаем с комплексной плоскости (рис. 3.15, а), параллельно оси действительных чисел строим вектор действующего значения тока  $\dot{I}$ , так как ток является общим для всех элементов. Далее по вектору тока  $\dot{I}$  строим вектор падения напряжения на резисторе  $\dot{U}_R$  (совпадающий с током по направлению). Из конца вектора  $\dot{U}_R$  строим вектор падения напряжения на индуктивности  $\dot{U}_L$  под углом  $90^\circ$  к вектору тока  $\dot{I}$  в сторону опережения. Из конца вектора  $\dot{U}_L$  строим вектор падения напряжения на конденсаторе  $\dot{U}_C$  ( $\dot{U}_C$  отстает от вектора тока на угол  $90^\circ$ ) и получаем точку «а». Соединив точку «а» с началом вектора  $\dot{U}_R$ , получаем вектор полного приложенного напряжения  $\dot{U}$ , при этом образуется *треугольник напряжений*. Угол  $\varphi$  между векторами тока  $\dot{I}$  и вектором полного напряжения  $\dot{U}$  называется *углом сдвига фаз*, и он характеризует режим работы электрической цепи. Векторная диаграмма позволяет качественно контролировать аналитические расчёты электрических цепей.

Если все стороны треугольника напряжений разделить на ток  $\left| \dot{I} \right|$ , то получим подобный треугольнику напряжений треугольник сопротивлений (рис. 3.15, б).

Если все стороны треугольника сопротивлений умножить на  $I^2$ , то получим треугольник мощности (рис. 3.15, в).

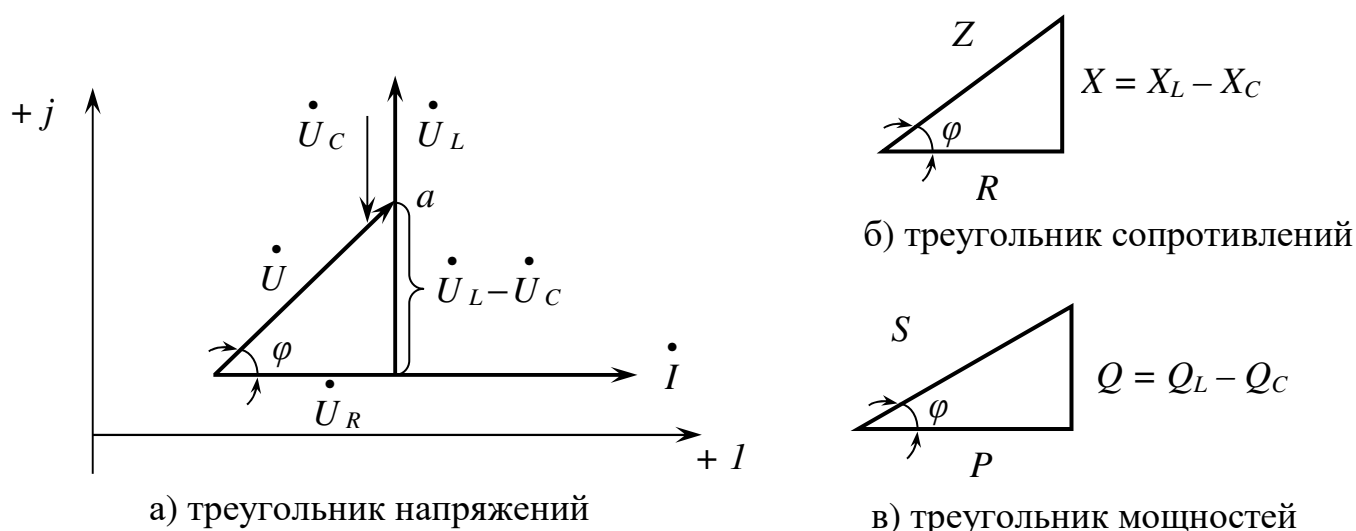


Рис. 3.15

Из треугольника мощности следует, что  $S$  – полная мощность электрической цепи, равна:

$$S = U \cdot I = I^2 \cdot Z = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{В} \cdot \text{А}) \quad (3.28)$$

Реактивная мощность цепи

$$Q = U \cdot I \sin \phi = I^2 x \quad (\text{вар}) \quad (3.29)$$

Активная мощность цепи

$$P = U \cdot I \cos \phi = I^2 R \quad (\text{Вт}) \quad (3.30)$$

Для характеристики режима работы электрической цепи в электротехнике вводится понятие  $\cos \phi$ , который показывает степень использования полной мощности источника  $S$ :

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z} \quad (3.31)$$

Проанализируем режимы работы электрической цепи:

1.  $\cos \phi = 1$ . В этом случае  $S = P$ ,  $Q = 0$  и полное сопротивление  $Z = R$ . Цепь потребляет только активную мощность  $P$ .
2.  $\cos \phi = 0$ . В этом случае  $S = Q$ ,  $P = 0$  и полное сопротивление цепи  $Z = X$ , цепь обладает только реактивными свойствами.
3.  $\cos \phi > 0$ . В этом случае  $S = P + jQ_L$  и полное сопротивление  $\underline{Z} = R + jX_L$ , цепь обладает активно-индуктивными свойствами, и она потребляет активную  $P$  и реактивную  $Q_L$  мощности.
4.  $\cos \phi < 0$ . В этом случае  $S = P - jQ_C$ , и полное сопротивление  $\underline{Z} = R - jX_C$ , цепь обладает активно-ёмкостными свойствами, она потребляет из сети активную мощность  $P$ , но отдает в сеть реактивную  $-Q_C$ .



### 3.7. Параллельное соединение резистора, индуктивности и емкости в цепи переменного тока

Параллельное соединение электроприемников – основной вид соединений, так как в этом случае электроприёмники делаются на одно и то же напряжение.

*Параллельное* соединение – это такой вид соединения, когда на всех элементах одно и то же напряжение, а ток в неразветвлённой части равен геометрической сумме токов этих элементов согласно первому закону Кирхгофа.

Схема параллельного соединения  $R$ ,  $X_L$  и  $X_C$  приведена на рис. 3.16, а.

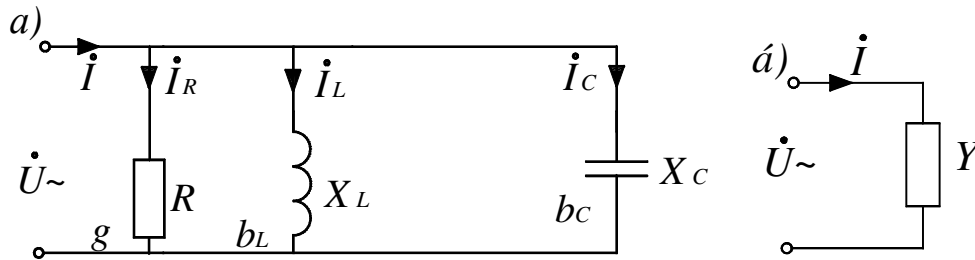


Рис. 3.16

Первый закон Кирхгофа в комплексном виде запишется следующим образом:

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C \quad (3.32)$$

Выразим токи из закона Ома:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R} + \frac{\dot{U}}{+jX_L} + \frac{\dot{U}}{-jX_C} = \dot{U} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{+jX_L} + \frac{1}{-jX_C} \right) \quad (3.33)$$

Для параллельного соединения элементов вводится понятие *проводимости*, величины, обратной сопротивлению, измеряемой в сименсах:

- активная проводимость  $g = \frac{1}{R}$  (См);
- индуктивная проводимость  $-jb_L = \frac{1}{+jX_L}$  (См);
- емкостная проводимость  $+jb_C = \frac{1}{-jX_C}$  (См).

С учётом (3.32) выражение (3.33) примет следующий вид:

$$\dot{I} = \dot{U} [g + j(b_C - b_L)] \quad (3.35)$$

Выражение в квадратных скобках обозначим через  $Y$  и назовем *полной* или *комплексной*, проводимостью:

$$Y = g + j(b_C - b_L) \quad (\text{См})$$

$$|Y| = \sqrt{g^2 + (b_C - b_L)^2} \quad (\text{См}) \quad (3.36)$$

Тогда закон Ома для параллельного соединения элементов в комплексном виде будет

$$\dot{I} = \dot{U} \cdot Y$$

$$\dot{I} = \dot{U} \cdot g - jb\dot{U} = \dot{I}_R + \dot{I}_P \quad (3.37)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_P$$

где  $I_R$  – активная составляющая тока;

$I_P$  – реактивная составляющая тока.

Этой форме записи закона Ома соответствует схема замещения, показанная на рис. 3.16.

Схемы а и б на рис. 3.16 являются эквивалентными.

Построим векторную диаграмму для параллельного соединения резистора, индуктивности и емкости.

Построение начинаем с комплексной плоскости (рис. 3.17, а). Параллельно оси действительных чисел (+ 1) строим вектор приложенного напряжения  $\dot{U}$ , так как напряжение является общим для всех элементов. Далее по вектору напряжения  $\dot{U}$  строим вектор тока в резисторе  $\dot{I}_R$  (который совпадает по направлению с напряжением). Из конца вектора  $\dot{I}_R$  строим вектор тока в конденсаторе  $\dot{I}_C$  (он опережает напряжение на угол  $90^\circ$ ). Из конца вектора  $\dot{I}_C$  строим вектор тока индуктивности  $\dot{I}_L$  (он отстает от напряжения на угол  $90^\circ$ ), получаем точку «а». Соединив точку «а» с началом вектора тока в резисторе  $\dot{I}_R$ , получаем вектор тока  $\dot{I}$  в неразветвлённой части, при этом образуется *треугольник токов*. Угол  $\varphi$  между вектором напряжения  $\dot{U}$  и вектором тока  $\dot{I}$  соответствует углу сдвига фаз.

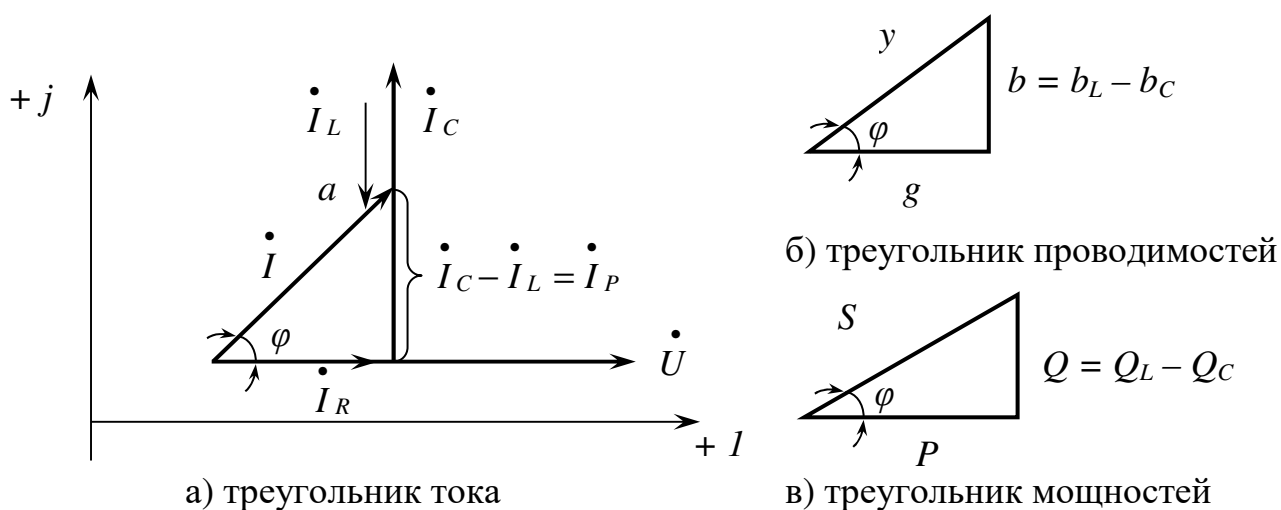


Рис. 3.17

Если все стороны треугольника токов разделить на напряжение  $|U|$ , то получим подобный треугольнику токов *треугольник проводимостей*. Умножив стороны треугольника проводимостей на  $U^2$ , получаем *треугольник мощностей*.

Проанализировав закон Ома для последовательного соединения ( $\dot{U} = \dot{I} Z$ ) и для параллельного соединения ( $\dot{U} = \frac{\dot{I}}{Y}$ ), можно сделать вывод, что:

$$Y = \frac{1}{Z}. \quad (3.38)$$

Соотношение (3.38) показывает, что для каждого последовательного соединения элементов существует эквивалентное параллельное соединение этих же элементов. И наоборот: для каждого параллельного соединения элементов существует эквивалентное последовательное соединение этих же элементов. Соотношение (3.38) широко используется для преобразования сложных электрических цепей.

### 3.8. Резонансные явления в цепи переменного тока

Под резонансным режимом электрической цепи, содержащей резистор  $R$ , индуктивность  $x_L$  и емкость  $x_C$  понимается такой режим, когда полное сопротивление цепи равняется активному, ток совпадает по фазе с напряжением ( $\varphi = 0$ ) и коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) равен единице.

Условия резонанса:

- при последовательном соединении  $Z = R$ ,  $\cos \varphi = 1$ ,  $\varphi = 0$ ;
- при параллельном –  $y = g$ ,  $\cos \varphi = 1$ ,  $\varphi = 0$ .

При последовательном соединении наблюдается резонанс напряжений, при параллельном соединении – резонанс тока.

#### 3.8.1. Резонанс напряжений

Рассмотрим последовательное соединение резистора, индуктивности и ёмкости (рис. 3.18, а).

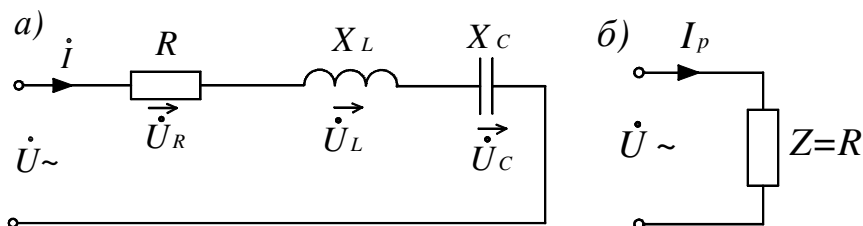


Рис. 3.18

Известно, что для последовательного соединения:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I} \cdot [R + j(x_L - x_C)] = \dot{I} \cdot Z \quad (3.39)$$

Так как  $Z = R + j(x_L - x_C)$ , то по условию резонанса  $Z = R$ , а это будет, если  $x_L - x_C = 0$ .

Тогда условием резонанса напряжений будет равенство индуктивного ( $x_L$ ) и ёмкостного ( $x_C$ ) сопротивлений.

$$x_L = x_C - \text{условие резонанса напряжений.}$$

Закон Ома для резонанса напряжений запишется в следующем виде:

$$\dot{U} = \dot{I}_p R \quad (3.40)$$

где  $\dot{I}_p$  – ток при резонансе.

Этой форме записи закона Ома будет соответствовать схема замещения, показанная на рис. 3.18, б. Так как полное сопротивление  $Z = R$  и достигает минимального значения, то резонансный ток ( $\dot{I}_p$ ) достигает максимального значения ( $\dot{I}_{pz} = \max$ ). При этом наблюдается равенство падений напряжений на индуктивности ( $U_{Lp}$ ) и ёмкости ( $U_{Cp}$ ) имеющих наибольшее значение.

$$|U_{Lp}| = |U_{Cp}| = \max \quad (3.41)$$

Равенство падений напряжений на индуктивности и ёмкости обусловило название этого явления – резонанс напряжений.

Резонансная частота, при которой наблюдается это явление, равна

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.42)$$

Из выражения (3.42) следуют следующие способы достижения резонанса напряжений:

- 1) изменением емкости ( $C = var$ );
- 2) изменением индуктивности ( $L = var$ );
- 3) изменением частоты питающей сети ( $f = var$ ) ( $\omega = 2\pi f = var$ )

Остальные параметры должны оставаться неизменными. Зависимости некоторых параметров электрической цепи от емкости показаны на рис. 3.19.

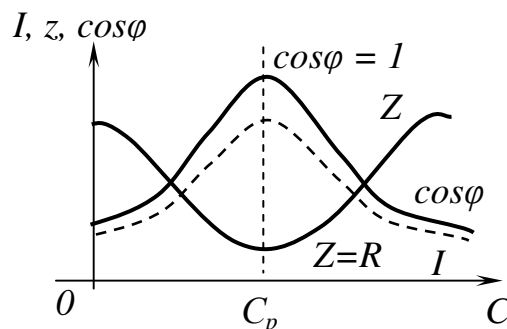


Рис. 3.19

Векторная диаграмма для резонансного режима показана на рис. 3.20. Построение производится аналогично разделу 3.6.

Из векторной диаграммы следует, что угол сдвига фаз  $\varphi=0$ , тогда  $\cos\varphi=1$ . При этом полная мощность  $S$  равняется активной мощности  $P$  и достигает наибольшего значения:

$$\begin{aligned} S &= P = I_p^2 R = \max, \\ Q &= Q_L - Q_C = 0, \\ \cos\varphi &= \frac{P}{S} = 1. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Из вышеизложенного можно сделать следующий вывод:

*При резонансе напряжений электрическая цепь потребляет из сети наибольшую мощность, и падения напряжения на индуктивном и ёмкостном элементах достигают наибольшего значения, что увеличивает вероятность пробоя этих элементов, поэтому резонанс напряжений является нежелательным режимом работы электрической цепи.*

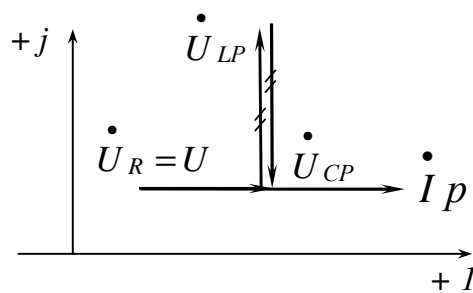


Рис. 3.20

### 3.8.2. Резонанс токов

Рассмотрим параллельное соединение реальной катушки индуктивности и ёмкости (рис. 3.21, а).

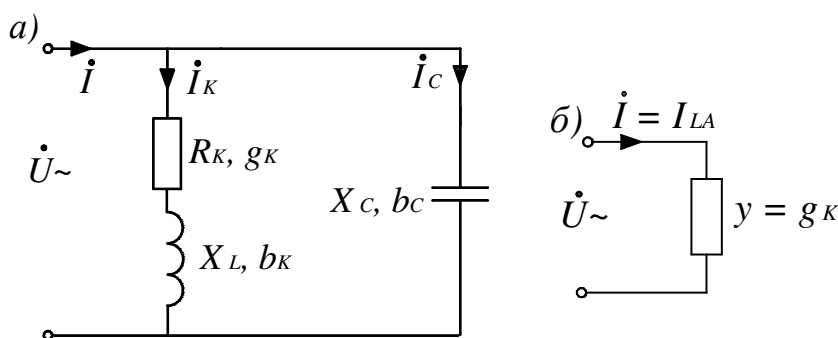


Рис. 3.21

Известно, что для параллельного соединения:

$$\dot{I} = \dot{I}_K + \dot{I}_C = \dot{U} [g_K + j(b_C - b_L)] = \dot{U} \cdot Y,$$

где  $y = g_K + j(b_C - b_L)$ ;  $g_K = \frac{R_K}{R_K^2 + X_L^2}$ ;  $b_L = \frac{X_L}{R_K^2 + X_L^2}$ ;  $b_C = \omega C$ .

Так как по условию резонанса  $y = g_K$ , то резонанс будет наблюдаться, когда  $b_C - b_L = 0$ , поэтому условием резонанса тока будет равенство индуктивной ( $b_L$ ) и емкостной ( $b_C$ ) проводимостей.

$$b_L = b_C - \text{условие резонанса} \quad (3.44)$$

Из (3.44) следует равенство реактивной составляющей тока в индуктивности ( $I_{Lp}$ ) и емкости ( $I_C$ ), что и дало название этому явлению – *резонанс токов*.

$$|I_{Lp}| = |I_C| \quad (3.45)$$

Поэтому ток в неразветвленной части ( $I$ ) будет равен активной составляющей тока индуктивности ( $I_{LA}$ ) и достигает наименьшего значения.

$$\dot{I}_p = \dot{I}_{LA} = \min \quad (3.46)$$

Закон Ома для резонанса токов запишется в следующем виде:

$$\dot{U} = \frac{\dot{I}_p}{g_K}. \quad (3.47)$$

Этой форме записи закона Ома будет соответствовать схема замещения, показанная на рис. 3.21, б.

Резонансная частота равна

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{CR_K^2}{L}},$$

при условии  $R_K \ll \omega L$ ,  $\omega_p \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

Способы достижения резонанса токов при условии  $R_K \ll \omega L$  такие же, что и при резонансе напряжений.

Зависимости некоторых параметров электрической цепи от емкости показаны на рис. 3.22.

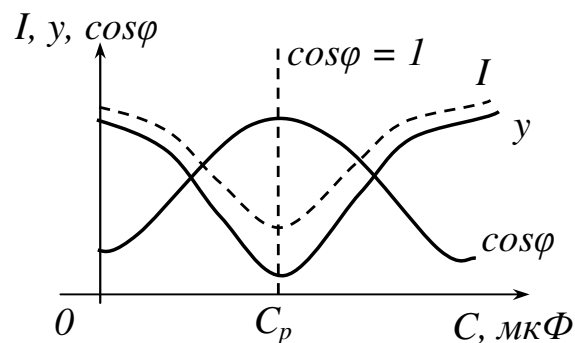
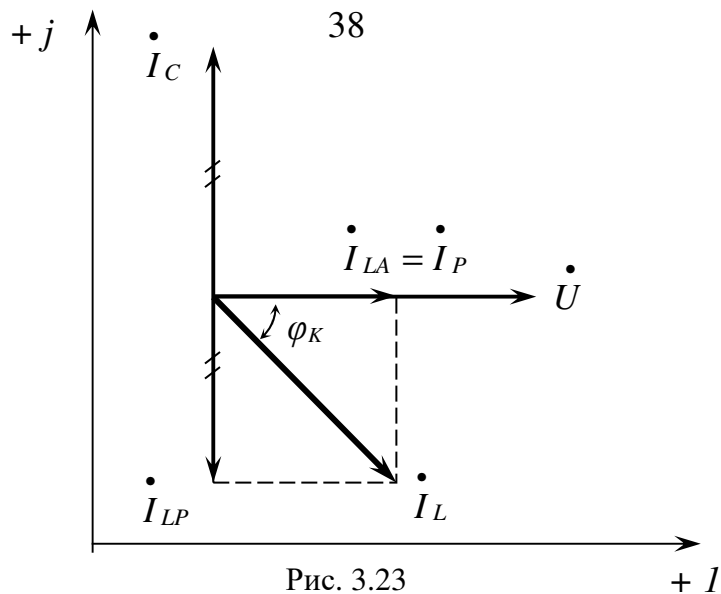


Рис. 3.22

Векторная диаграмма для резонанса токов показана на рис. 3.23, построение ее производится аналогично приведенному в разделе 3.7.



Из векторной диаграммы следует, что угол сдвига фаз  $\varphi = 0$ , поэтому коэффициент мощности  $\cos \varphi = 1$ .

Реактивная мощность цепи равна нулю

$$Q = b_L U^2 - b_C U^2 = Q_L - Q_C = 0.$$

При этом индуктивная ( $Q_L$ ) и емкостная ( $Q_C$ ) реактивные мощности могут приобретать весьма большие значения, оставаясь равными друг другу.

Полная мощность цепи при резонансе тока равна активной мощности и достигает наименьшего значения.

$$S = YU^2 = g_K U^2 = P = \min \quad (3.48)$$

Коэффициент мощности всей цепи при резонансе токов

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{g_K U^2}{YU^2} = 1.$$

*При резонансе токов электрическая цепь потребляет минимальную мощность от источника, поэтому такой режим работы электрической цепи является желательным.*

### 3.9. Способ повышения коэффициента мощности $\cos \varphi$ электроприёмника

Электроприёмники (рис. 3.24) в своём большинстве обладают активно-индуктивными свойствами (электродвигатели, трансформаторы) и поэтому обладают низким коэффициентом мощности.

$$\cos \varphi = \frac{P_n}{U \cdot I_n}, \quad (3.49)$$

где  $P_n$  – мощность электроприёмника, кВт;

$U$  – напряжение питающей сети, В;

$I_n$  – ток электроприёмника, А.

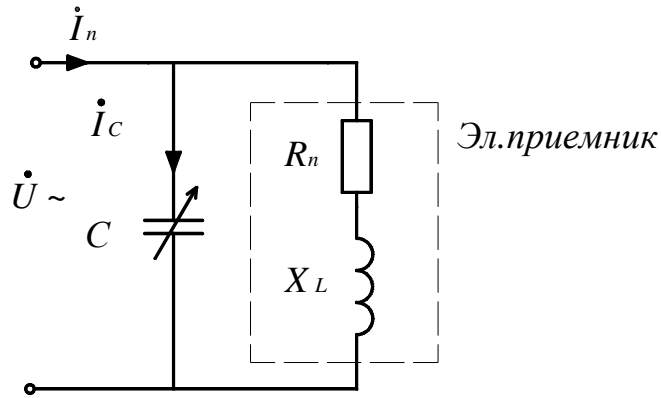


Рис. 3.24

Из (3.49) следует, что ток приёмника  $I_n$  равен

$$I_n = \frac{P_n}{U \cdot \cos \varphi}. \quad (3.50)$$

При постоянной мощности ( $P = const$ ) и напряжении ( $U = const$ ), потребляемый ток  $I_n$  будет зависеть от величины коэффициента мощности  $\cos \varphi$ .

$$I_n = f\left(\frac{1}{\cos \varphi}\right). \quad (3.51)$$

Чем ниже коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , тем больший ток  $I_n$  потребляет электроприёмник.

Повышение  $\cos \varphi$  называется компенсацией угла сдвига фаз  $\varphi$ , это произойдёт при подключении параллельно электроприёмнику конденсатора  $C$ , при этом используется режим, близкий к режиму резонанса токов.

Построение векторной диаграммы электроприёмника до и после подключения конденсатора показано на рис.3.25.

а) до подключения конденсатора

б) после подключения конденсатора

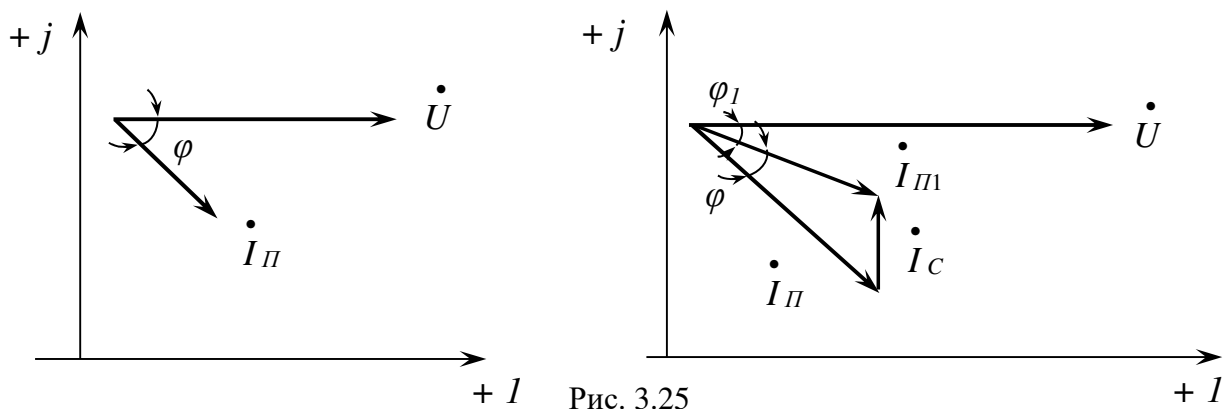


Рис. 3.25

Зависимости тока приёмника  $I_n$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от величины емкости конденсатора приведены на рис. 3.26.



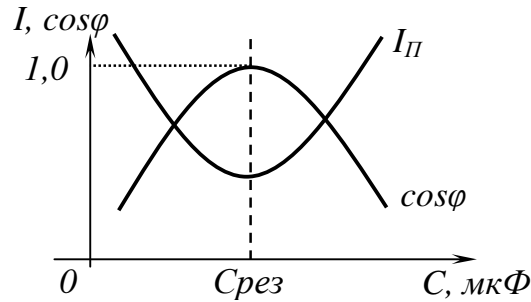


Рис. 3.26

Из рисунков 3.25 и 3.26 следует, что подключение конденсатора снижает потребляемый ток и повышает  $\cos \varphi$  электроприёмника, особенно когда емкость конденсатора равна емкости, соответствующей резонансу токов.

Нормируемое значение коэффициента мощности в энергосистемах составляет  $\cos \varphi_H = 0,95$ . Величину емкости конденсатора, необходимого для подключения к электроприемнику и повышения  $\cos \varphi$  до нормируемого значения, можно определить из следующего выражения:

$$C = \frac{P_n}{\omega \cdot U^2} (\operatorname{tg} \varphi_n - \operatorname{tg} \varphi_H) \cdot 10^6 \text{ (мкФ)} \quad (3.52)$$

где  $P_n$  – мощность потребителя, кВт;

$\omega$  – угловая частота тока, 1/с;  $\omega = 2\pi \cdot f$ ;

$\operatorname{tg} \varphi_n$  – тангенс угла сдвига фаз  $\varphi_n$ , соответствующий  $\cos \varphi_n$ ;

$\operatorname{tg} \varphi_H$  – тангенс угла сдвига фаз  $\varphi_H$ , соответствующий  $\cos \varphi_H$  ( $\operatorname{tg} \varphi_H = 0,33$ ).

#### 4. ТРЁХФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При генерировании, передаче и преобразовании электрической энергии трёхфазные цепи имеют ряд преимуществ по сравнению с однофазными:

- 1) меньший расход меди в проводах;
- 2) меньший расход стали в трансформаторах;
- 3) простота получения вращающегося поля в электродвигателях;
- 4) меньшие пульсации момента на валу роторов генераторов и двигателей.

##### 4.1. Трёхфазная система ЭДС. Схема соединения источника

Под *трёхфазной системой ЭДС* понимается система трёх однофазных ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых относительно друг друга на угол  $120^\circ$ . Совокупность устройств, по которым может протекать один из токов трёхфазной системы ЭДС, называется *фазой*. Фазы принято обозначать А (L1), В (L2), С (L3).

Законы изменения фазных ЭДС имеют следующий вид:

Фаза А  $e_A = E_m \sin \omega t$  (В),

Фаза В  $e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$  (В),

Фаза С  $e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ)$  (В),

где  $e$  – мгновенное значение ЭДС (В),

$E_m$  – амплитуда (В).

Под действием источника трёхфазной ЭДС создается симметричная система трёхфазных напряжений:

$u_A = U_m \sin \omega t$  (В),

$u_B = U_m \sin(\omega t - 120^\circ)$  (В),

$u_C = U_m \sin(\omega t - 240^\circ) = U_m \sin(\omega t + 120^\circ)$  (В).

Схема соединения источника трёхфазной ЭДС представлена на рис. 4.1.

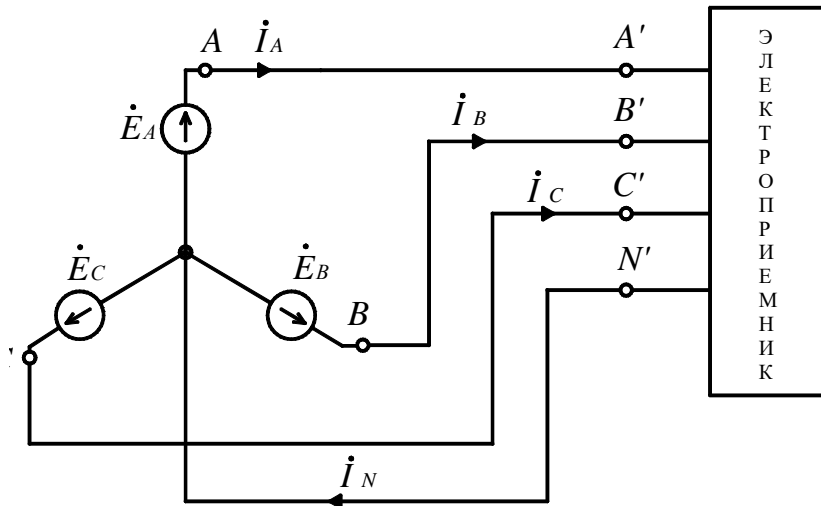


Рис. 4.1

Если концы всех трёх фаз соединяются в одной точке, то эта точка называется – *нулевой точкой* и обозначается  $N$ , а схема соединения источника трёхфазной ЭДС называется «*звезда*» (обозначается  $Y$ ).

Провода  $AN$ ,  $BN$ ,  $CN$  называются *фазными*, и токи, проходящие по этим проводам – *фазными* (обозначаются  $I_\phi$ ).

Провода  $AA'$ ,  $BB'$ ,  $CC'$  называются *линейными*, и токи, проходящие по этим проводам, называются *линейными* (обозначаются  $I_L$ ).

Из рисунка 4.1 следует, что при соединении «звезда»

$$I_L = I_\phi \quad (4.1)$$

Провод  $NN'$ , соединяющий нулевые точки источника ( $N$ ) и приёмника ( $N'$ ) называется *нулевым* или *нейтральным*, а ток, протекающий по этому проводу, *нулевым* или *нейтральным* (обозначается  $I_N$ ).

Нетрудно заметить, что в приёмник входят три тока  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ , а выходит один ток  $-\dot{I}_N$ . Тогда на основании первого закона Кирхгофа мы имеем:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \quad (4.2)$$

Напряжения  $\dot{U}_{AN}, \dot{U}_{BN}, \dot{U}_{CN}$  называются *фазными* (обозначаются  $U_\phi$ ).

Источник выдает симметричную (равных по величине) систему фазных напряжений:

$$|U_{AN}| = |U_{BN}| = |U_{CN}| = U_\phi, \quad (4.3)$$

Напряжения  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$  называются *линейными* (обозначаются  $U_L$ ). Источник выдает симметричную систему линейных напряжений

$$|U_{AB}| = |U_{BC}| = |U_{CA}| = U_L. \quad (4.4)$$

Построим векторную диаграмму для фазных и линейных напряжений источника ЭДС (рис. 4.2).

Построение начинается со «звезды» фазных напряжений, для этого строим под углом  $120^\circ$  векторы фазных напряжений  $\dot{U}_{AN}, \dot{U}_{BN}, \dot{U}_{CN}$ .

Конец вектора  $\dot{U}_{AN}$  обозначим точкой А, соответственно,  $\dot{U}_{BN}$  – В,  $\dot{U}_{CN}$  – С. Соединив точки А, В, С между собой, получим «треугольник» линейных напряжений ( $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ ).

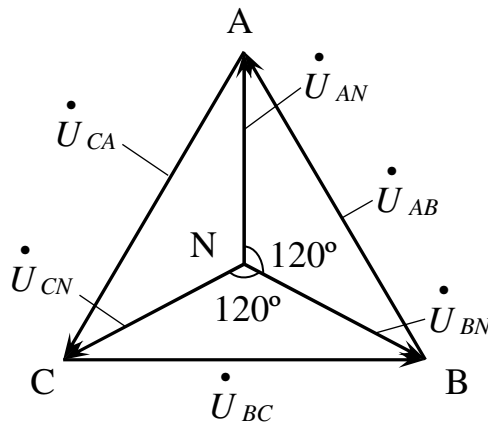


Рис. 4.2

Из векторной диаграммы, согласно второму закону Кирхгофа, следует:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{BN},$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{CN},$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{AN}.$$

Для симметричных систем фазных и линейных напряжений

$$U_{\text{Л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\Phi} \quad (4.5)$$

С учетом вышеизложенного основные электрические соотношения при схеме соединения источника – «звезда»:

$$\begin{aligned} U_{\text{Л}} &= \sqrt{3} \cdot U_{\Phi} \\ I_{\text{Л}} &= I_{\Phi} \\ \dot{I}_N &= \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \end{aligned} \quad (4.6)$$

Источники электрической энергии трёхфазного переменного тока преимущественно соединяются в «звезду» с целью получения симметричных систем фазных и линейных напряжений, так как в этом случае однофазные электроприёмники включаются в фазное напряжение  $U_{\Phi}$ . Наиболее широкое распространение получила система линейных и фазных напряжений  $U_{\text{Л}}/U_{\Phi}$  – 380/220 В.

## 4.2. Четырёхпроводная схема электроприёмников – «звезда»

Схема соединения «звезда» с нулевым (нейтральным) проводом (четырёхпроводная) показана на рис. 4.3.

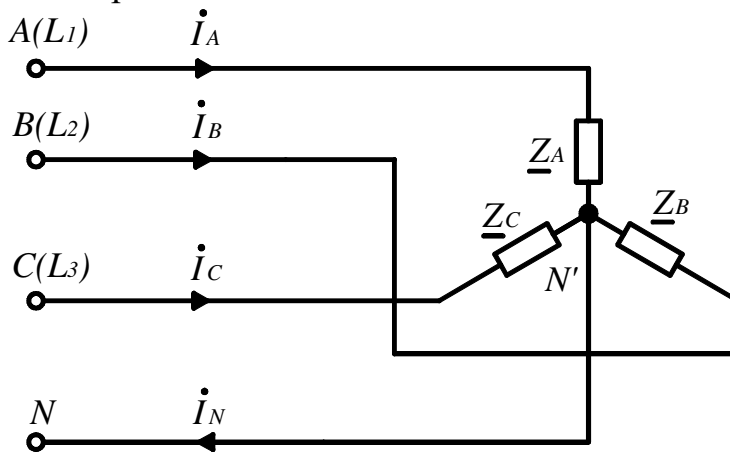


Рис. 4.3

Определим фазные токи из закона Ома:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_{AN}}{Z_A}; \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_{BN}}{Z_B}; \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_{CN}}{Z_C}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

Необходимо отметить, что в трёхфазных цепях режим работы каждой фазы не зависит от режима работы других фаз за исключением аварийных режимов.

Рассмотрим симметричный режим работы цепи, когда сопротивления в фазах одинаковы, равны по величине и имеют одинаковый угол сдвига фаз

$$|\underline{Z}_A| = |\underline{Z}_B| = |\underline{Z}_C|, \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C.$$

Так как источник выдаёт симметричные системы фазных и линейных напряжений, то

$$\begin{aligned} |\dot{U}_{AN}| &= |\dot{U}_{BN}| = |\dot{U}_{CN}| = U_\phi \\ |\dot{U}_{AB}| &= |\dot{U}_{BC}| = |\dot{U}_{CA}| = U_L \end{aligned}$$

С учетом (4.7) будут равны между собой фазные и линейные токи

$$|\dot{I}_A| = |\dot{I}_B| = |\dot{I}_C| = I_\phi = I_L$$

Электрические соотношения в «звезде» с учетом (4.6) при симметричной нагрузке

$$\begin{aligned} U_L &= \sqrt{3} \cdot U_\phi \\ I_L &= I_\phi \\ \dot{I}_N &= \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Построим векторную диаграмму для симметричной резистивной нагрузки (рис. 4.4).

$$|\underline{Z}_A| = |\underline{Z}_B| = |\underline{Z}_C| = R, \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = 0.$$

Построение векторной диаграммы производится аналогично рис. 4.2. Так как нагрузка резистивная, то векторы фазных токов совпадают с соответствующими векторами фазных напряжений

$$\dot{I}_A \rightarrow \dot{U}_{AN}, \dot{I}_B \rightarrow \dot{U}_{BN}, \dot{I}_C \rightarrow \dot{U}_{CN}.$$

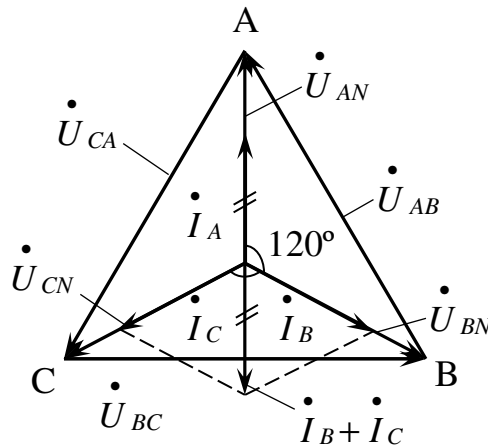


Рис. 4.4

Сложив векторы  $\dot{I}_C$  и  $\dot{I}_B$ , получим вектор суммарного тока, который равен по величине вектору  $\dot{I}_A$  и направлен против него, поэтому ток в нейтральном проводе равен нулю  $\dot{I}_N = 0$ .

При несимметричной нагрузке  $\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$  соответствующие фазные и линейные токи не будут равны между собой

$$\dot{I}_A \neq \dot{I}_B \neq \dot{I}_C$$

Электрические соотношения в «звезде» с учётом (4.6) при несимметричной нагрузке:

$$\begin{aligned} U_{Л} &= \sqrt{3} \cdot U_{\phi} \\ I_{Л} &= I_{\phi} \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C > 0$$

Векторная диаграмма для несимметричной нагрузки показана на рис. 4.5

$$\underline{Z}_A = R + jX_L, \quad \underline{Z}_B = R, \quad \underline{Z}_C = R + jX_L.$$

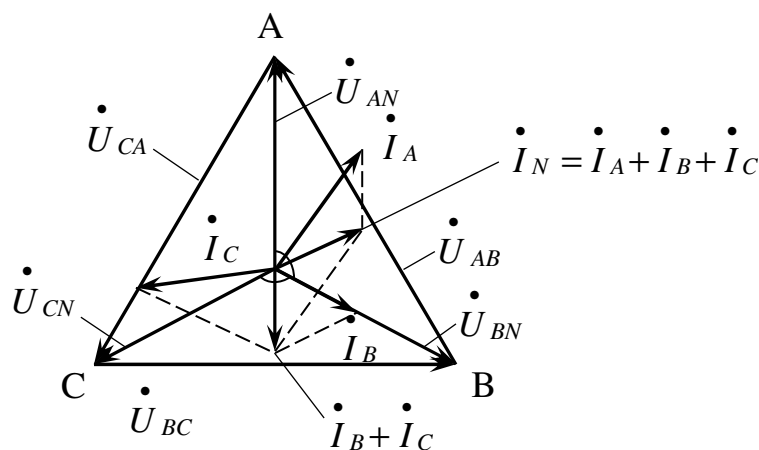


Рис. 4.5

Рассмотрим режимы работы трёхфазной цепи при обрыве нейтрального провода – трёхпроводная «звезда» (рис. 4.6).

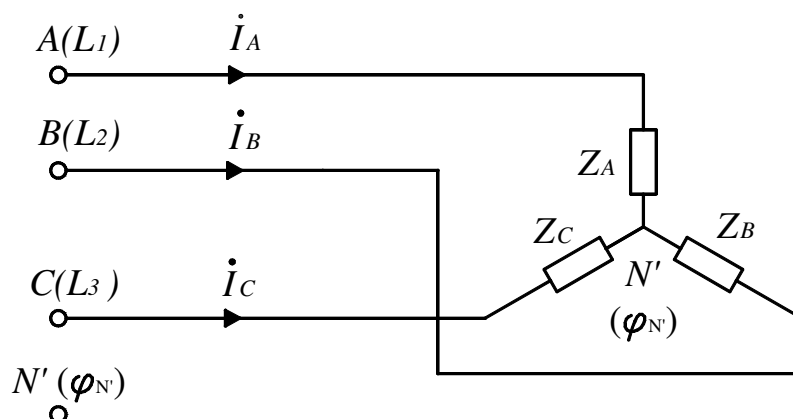


Рис. 4.6

При симметричном режиме  $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$  известно, что при четырёхпроводной системе ток в нейтральном проводе равен нулю  $I_N = 0$ , поэтому отсутствие нейтрального провода  $NN'$  не влияет на режим работы и электрические соотношения запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{Л} &= \sqrt{3} \cdot U_{\phi} \\ I_{Л} &= I_{\phi} \end{aligned} \quad (4.10)$$

При несимметричной нагрузке  $\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$  в четырёхпроводной системе по нейтральному проводу  $NN'$  идет ток  $\dot{I}_N > 0$ , который обусловлен разностью потенциалов между нейтральной точкой источника  $N$  и приёмника  $N'$

$$\dot{U}_{NN'} = \varphi_N - \varphi_{N'} = \frac{\dot{U}_{AN}/\underline{Z}_A + \dot{U}_{BN}/\underline{Z}_B + \dot{U}_{CN}/\underline{Z}_C}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}} \quad (4.11)$$

При наличии нейтрального провода и при несимметричной нагрузке  $\dot{U}_{NN'} = 0$ .

При несимметричной нагрузке и трёхпроводной системе  $\dot{U}_{NN'} > 0$ , тогда напряжение на каждой фазе электроприёмника:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AN'} &= \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{NN'} \\ \dot{U}_{BN'} &= \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{NN'} \\ \dot{U}_{CN'} &= \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{NN'} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Поэтому происходит сдвиг нейтральной точки приемника  $N'$  относительно нейтральной точки источника  $N$  и фазные напряжения не равны между собой

$$|U_{AN'}| = |U_{BN'}| = |U_{CN'}| \quad (4.14)$$

Симметрия линейных напряжений сохраняется

$$|U_{AB}| = |U_{BC}| = |U_{CA}| \quad (4.15)$$

Векторная диаграмма для несимметричной резистивной нагрузки  $Z_A = R_1$ ,  $Z_B = R_2$ ,  $Z_C = R_3$  показана на рис. 4.7.

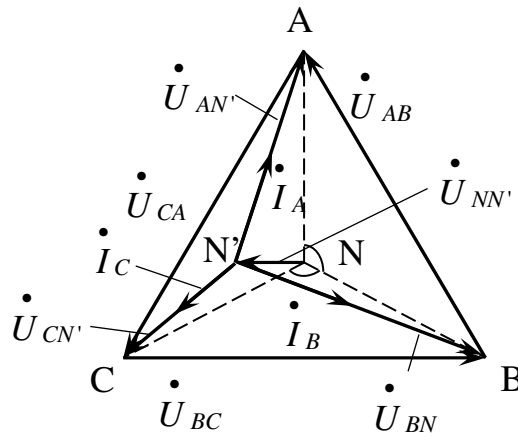


Рис. 4.7

Построение начинаем со штрихпунктирной «звезды» симметричных фазных напряжений источника. Затем строим вектор нулевого напряжения  $\dot{U}_{NN'}$  и, соединив точку  $N'$  с точками  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , получаем векторы фазных напряжений приемника  $\dot{U}_{AN'}$ ,  $\dot{U}_{BN'}$ ,  $\dot{U}_{CN'}$ .

В случае резистивной нагрузки, векторы соответствующих фазных токов будут направлены по векторам фазных напряжений  $\dot{I}_A \rightarrow \dot{U}_{AN'}$ ,  $\dot{I}_B \rightarrow \dot{U}_{BN'}$ ,  $\dot{I}_C \rightarrow \dot{U}_{CN'}$ . Соединив точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$  между собой, получим «треугольник» линейных напряжений  $\dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{BC}$ ,  $\dot{U}_{CA}$ .

Основные электрические соотношения в трехпроводной «звезде» и несимметричной нагрузке:

$$\begin{aligned} U_{\text{л}} &\neq \sqrt{3} \cdot U_{\phi} \\ I_{\text{л}} &= I_{\phi} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Для симметрии линейных и фазных напряжений ( $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi}$ ) присутствие нейтрального провода ( $NN'$ ) при несимметричной нагрузке является обязательным.



### 4.3 Трехпроводная схема соединения электроприемников – «треугольник»

«Треугольник» – это трехпроводная система, у которой начало последующей фазы соединено с концом предыдущей фазы и обозначается «Δ» (рис 4.8).

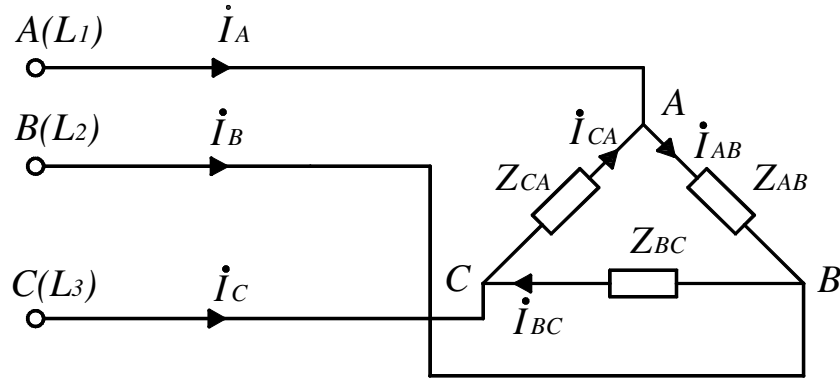


Рис. 4.8

Токи  $\dot{I}_{AB}$ ,  $\dot{I}_{BC}$ ,  $\dot{I}_{CA}$  называются *фазными*, а токи  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$ ,  $\dot{I}_C$  – *линейными*.

Нетрудно заметить, что в «треугольнике» линейные и фазные напряжения равны.

$$\left| \dot{U}_L \right| = \left| \dot{U}_\Phi \right|. \quad (4.17)$$

Найдём фазные токи из закона Ома:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_L}{\underline{Z}_{AB}}; \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_L}{\underline{Z}_{BC}}; \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_L}{\underline{Z}_{CA}}$$

Линейные токи  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$ ,  $\dot{I}_C$  определяются из I закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Рассмотрим режим симметричной нагрузки, когда

$$\left| \underline{Z}_{AB} \right| = \left| \underline{Z}_{BC} \right| = \left| \underline{Z}_{CA} \right|, \quad \varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA}.$$

Так как сопротивления равны, то равны по величине и фазные токи

$$\left| \dot{I}_{AB} \right| = \left| \dot{I}_{BC} \right| = \left| \dot{I}_{CA} \right| = I_\Phi.$$

Соответственно, между собой будут равны и линейные токи

$$\left| \dot{I}_A \right| = \left| \dot{I}_B \right| = \left| \dot{I}_C \right| = I_L.$$

Векторная диаграмма для симметричной резистивной нагрузки ( $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = 0$ ) показана на рис. 4.9.

Построение векторной диаграммы начинается с «треугольника» линейных (фазных) напряжений ( $A, B, C$ ). Далее строим векторы фазных токов; так как нагрузка резистивная, то векторы фазных токов будут совпадать с векторами соответствующих фазных напряжений  $\dot{I}_{AB} \rightarrow \dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{I}_{BC} \rightarrow \dot{U}_{BC}$ ,  $\dot{I}_{CA} \rightarrow \dot{U}_{CA}$ .

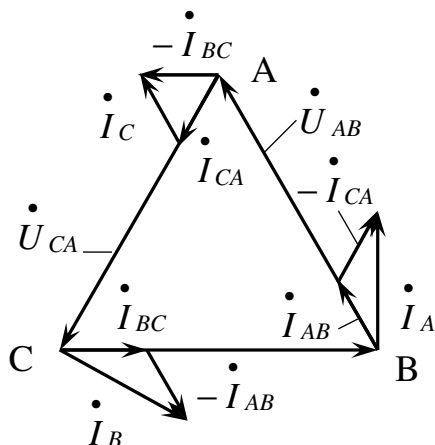


Рис. 4.9

Векторы линейных токов  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  строим с учетом (4.18). Ток  $\dot{I}_A$  строится следующим образом. Из конца вектора  $\dot{I}_{AB}$  параллельно вектору  $\dot{I}_{CA}$  строим вектор  $\dot{I}_{CA}$ , а затем соединяем конец вектора  $\dot{I}_{CA}$  с началом вектора  $\dot{I}_{AB}$  – получаем вектор линейного тока  $\dot{I}_A$ .

Аналогичным образом строятся векторы линейных токов  $\dot{I}_B, \dot{I}_C$ .

С учетом векторной диаграммы основные электрические соотношения при симметричной нагрузке:

$$\begin{aligned} U_L &= U_\phi \\ I_L &= \sqrt{3} \cdot I_\phi \end{aligned} \quad (4.19)$$

При несимметричной нагрузке  $|\underline{Z}_{AB}| \neq |\underline{Z}_{BC}| \neq |\underline{Z}_{CA}|$ ,  $\varphi_{AB} \neq \varphi_{BC} \neq \varphi_{CA}$ , не будут равны и фазные токи  $|\dot{I}_{AB}| \neq |\dot{I}_{BC}| \neq |\dot{I}_{CA}|$  и линейные токи  $|\dot{I}_A| \neq |\dot{I}_B| \neq |\dot{I}_C|$ .

Векторная диаграмма при несимметричной нагрузке  $\underline{Z}_{AB} = R + jX_L$ ,  $\underline{Z}_{BC} = R$ ,  $\underline{Z}_{CA} = R + jX_L$  показана на рис. 4.10.

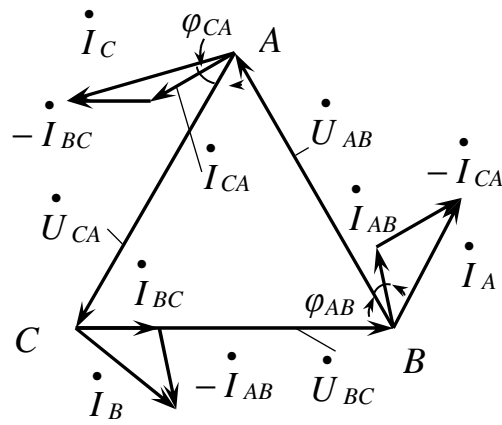


Рис. 4.10

Основные электрические соотношения при несимметричной нагрузке:

$$U_L = U_\Phi$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$$

(4.20)

#### 4.4. Мощность трёхфазной цепи

В общем случае мощность трёхфазной цепи равна сумме мощностей всех трёх фаз.

Активная мощность:

«звезда» –

$$P_\lambda = P_A + P_B + P_C = U_{AN} I_A \cos \varphi_A + U_{BN} I_B \cos \varphi_B + U_{CN} I_C \cos \varphi_C,$$

где  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$  – углы сдвига фаз.

«треугольник» –

$$P_\Delta = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA} = U_{AB} I_{AB} \cos \varphi_{AB} + U_{BC} I_{BC} \cos \varphi_{BC} + U_{CA} I_{CA} \cos \varphi_{CA}$$

где  $\varphi_{AB}$ ,  $\varphi_{BC}$ ,  $\varphi_{CA}$  – углы сдвига фаз.

Реактивная мощность:

«звезда» –

$$Q_\lambda = Q_A + Q_B + Q_C = U_{AN} I_A \sin \varphi_A + U_{BN} I_B \sin \varphi_B + U_{CN} I_C \sin \varphi_C;$$

«треугольник» –

$$Q_\Delta = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA} = U_{AB} I_{AB} \sin \varphi_{AB} + U_{BC} I_{BC} \sin \varphi_{BC} + U_{CA} I_{CA} \sin \varphi_{CA}.$$

При расчёте необходимо учитывать знак реактивной мощности  $+Q_L$  – при индуктивной нагрузке,  $-Q_C$  – при ёмкостной.

Полная мощность:

$$\text{«звезда»} - S_{\lambda} = \sqrt{P_{\lambda}^2 + Q_{\lambda}^2}; \text{ «треугольник»} - S_{\Delta} = \sqrt{P_{\Delta}^2 + Q_{\Delta}^2}.$$

При симметричной нагрузке мощности рассчитываются:

$$P_{\lambda, \Delta} = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л} \cos \varphi = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi = 3 \cdot I_{\phi}^2 \cdot R \quad (\text{Вт})$$

$$Q_{\lambda, \Delta} = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л} \sin \varphi = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \varphi = 3 \cdot I_{\phi}^2 \cdot X \quad (\text{вар}) \quad (4.21)$$

$$S_{\lambda, \Delta} = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{ВА})$$

Если  $|U_{Л\Delta}| = |U_{Л\lambda}|$ , то соотношение мощностей электроприёмников при соединении «треугольником» и «звездой» будет:

$$\frac{P_{\Delta}}{P_{\lambda}} = \frac{Q_{\Delta}}{Q_{\lambda}} = \frac{S_{\Delta}}{S_{\lambda}} = 3 \quad (4.22)$$

Из (4.22) следует, что при необходимости получения наибольшей мощности электроприёмник соединяется в «треугольник», наименьшей – в «звезду».

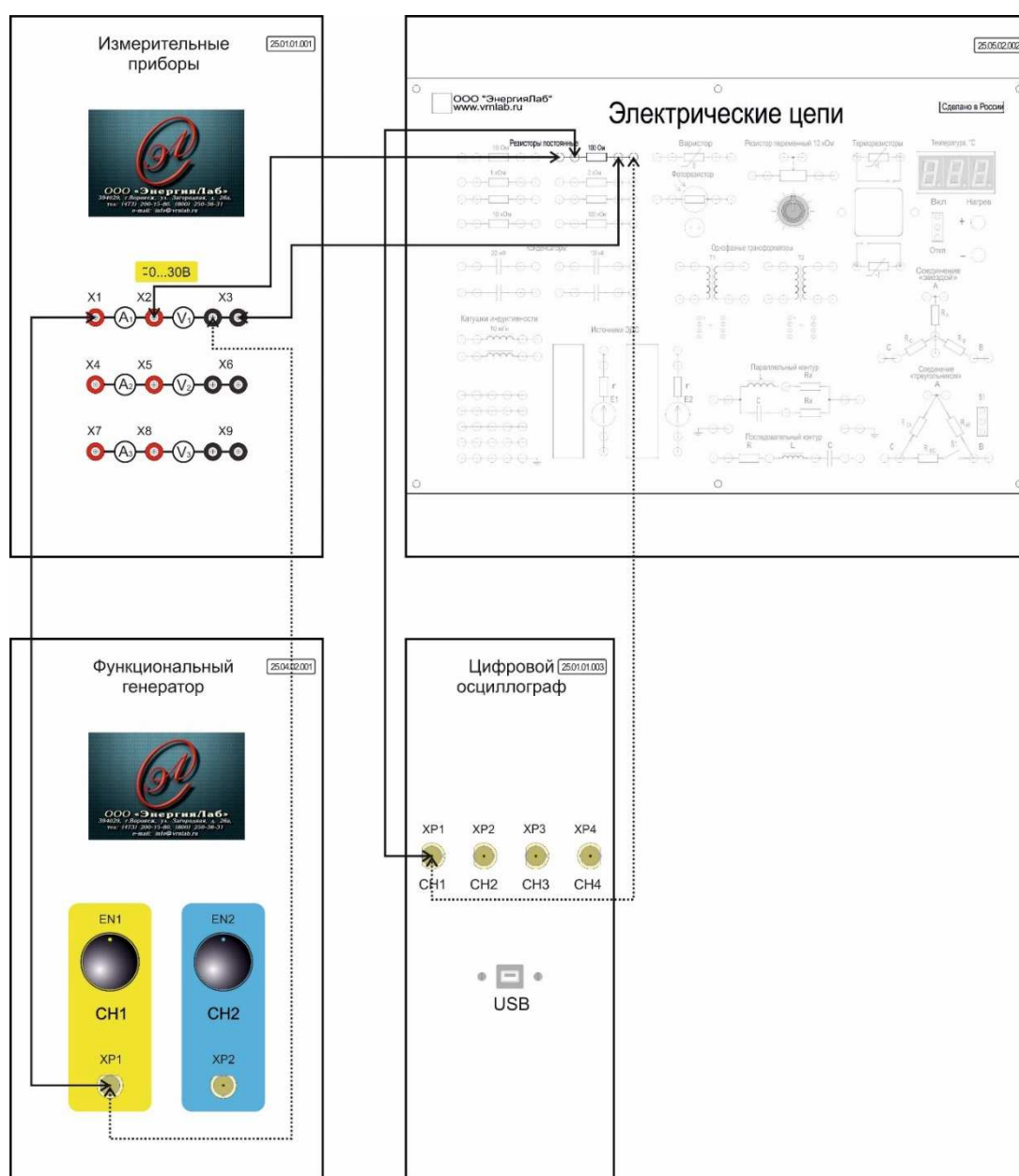
## 2. Методические указания к лабораторным работам по электрическим цепям однофазного тока

Лабораторная работа № 2.1.

### Параметры синусоидальных напряжения и тока.

**Цель работы:** исследовать параметры цепей синусоидальных напряжения и тока.

Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

## Рисунок 1 – Схема электрических соединений

## Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.
8. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:
  - Форма сигнала – синус;
  - Частота – 50 Гц;
  - Амплитуда – 4 В.
9. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.
10. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение, В				
Ток, мА				

11. Изучите полученную осциллограмму, определите период и амплитуду. Зарисуйте осциллограмму.
12. Повторите пункты 8 – 10 для следующих значений амплитуды и частоты выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:
  - 1 Вариант:  
Амплитуда – 3 В;  
Частота – 100 Гц.
  - 2 Вариант:  
Амплитуда – 2,5 В;  
Частота – 200 Гц.
13. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в от-

ключенное состояние.

14. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

13. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

14. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.

15. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

16. Проанализируйте полученные результаты измерений и осциллограммы и сделайте выводы.

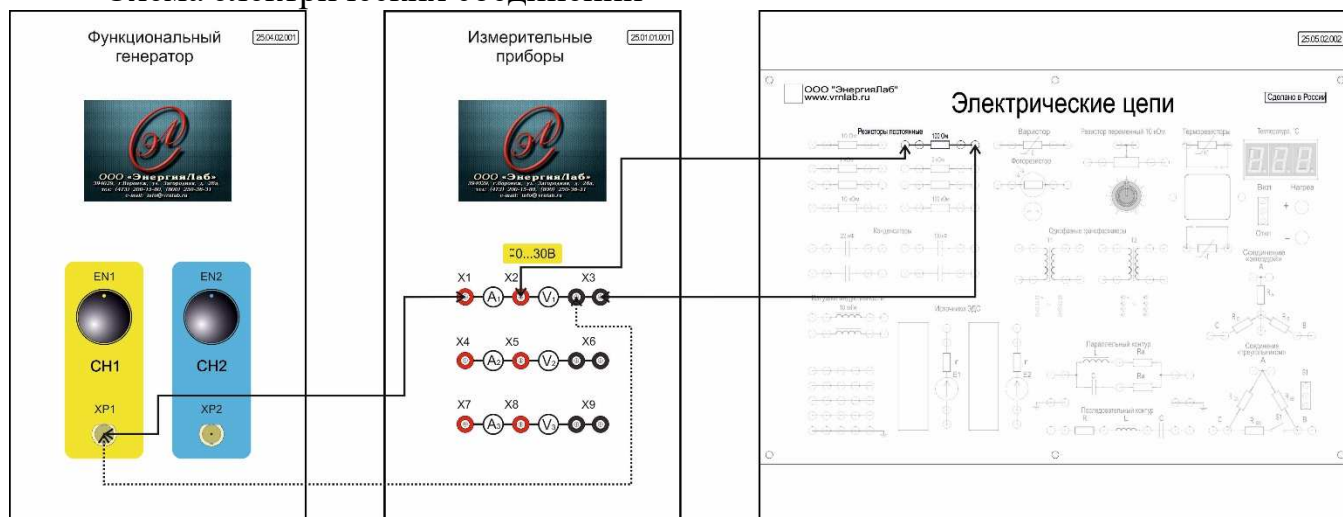
17. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты и выводы.

## Лабораторная работа № 2.2.

**Активная мощность цепи синусоидального тока.**

**Цель работы:** изучить понятие «активная мощность» цепи синусоидального тока.

## Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 1 – Схема электрических соединений

## Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.



6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

Форма сигнала – синус;

Частота – 50 Гц;

Амплитуда – 10 В.

8. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.

9. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение, В			
Ток, мА			

10. Повторите пункт 7 - 9 для следующих значений амплитуды выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

1 Вариант:

Амплитуда – 8 В;

2 Вариант:

Амплитуда – 7 В;

11. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

12. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

13. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

14. По полученным, ранее данным произведите расчет активной мощности исследуемой цепи.

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

где  $\cos \varphi \approx 1$ , так как цепь содержит только активное сопротивление.

15. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
16. Проанализируйте полученные результаты измерений и расчетов.
17. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты.

### Лабораторная работа № 2.3.

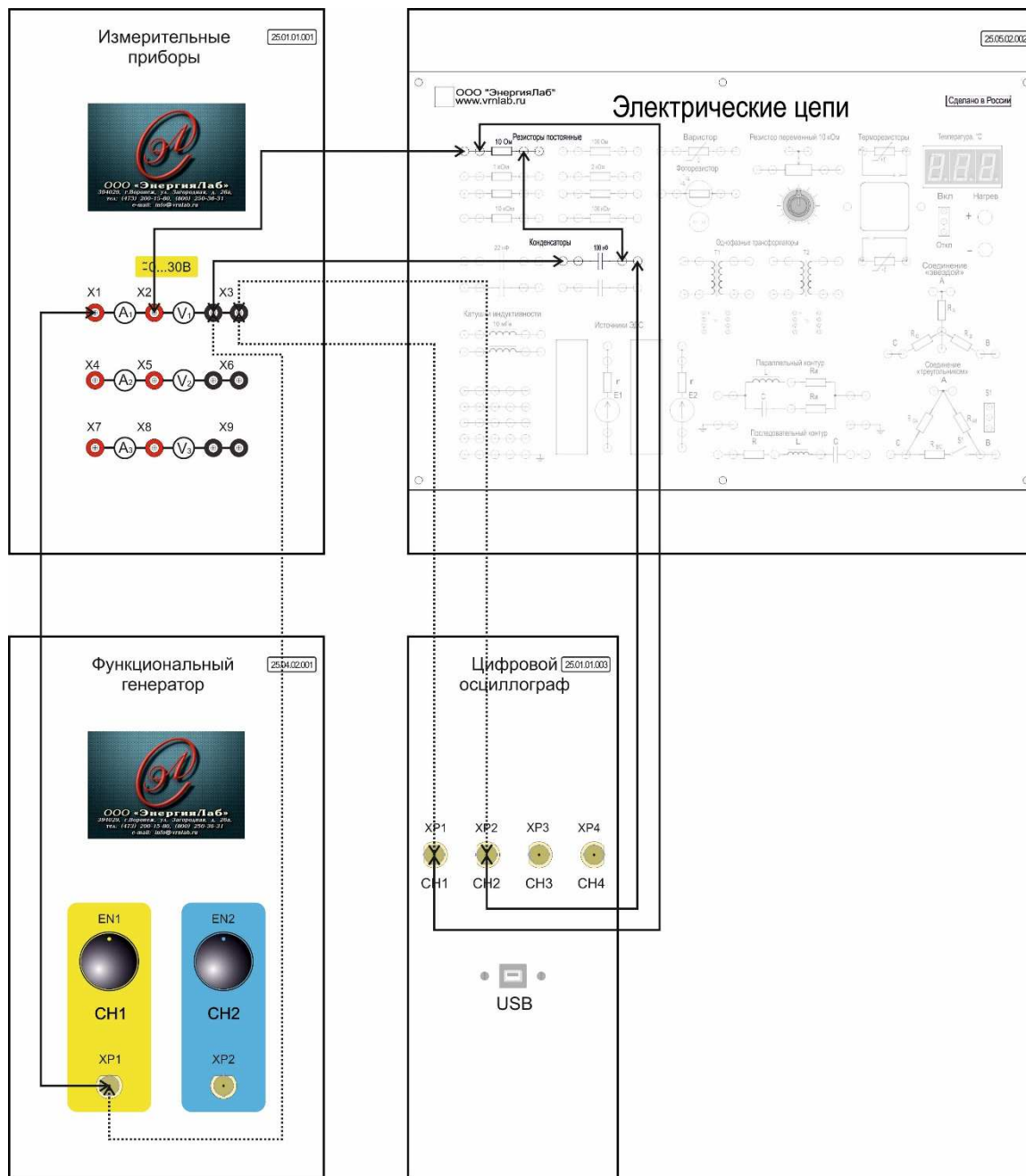
#### **Цепи синусоидального тока с конденсаторами.**

**Цель работы:** ознакомиться с методикой исследования цепей синусоидального тока с конденсаторами: напряжение и ток конденсатора, реактивное сопротивление конденсатора, последовательное соединение конденсаторов, параллельное соединение конденсаторов, реактивная мощность конденсатора.

## Лабораторная работа № 2.3.1. Напряжение и ток конденсатора.

**Цель работы:** исследование напряжения и тока конденсатора.

Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 1 – Схема электрических соединений

Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.
8. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:  
Форма сигнала – синус;  
Частота – 10 кГц;  
Амплитуда – 10 В.
9. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.
10. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение, В			
Ток, мА			

11. Изучите полученную осциллограмму и зарисуйте её.
12. Повторите пункт 8-10 для различных значений частоты и амплитуды.

ды выходного сигнала модуля «Функциональный генератор».

13. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

14. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

15. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

16. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.

17. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

18. Проанализируйте полученные результаты измерений и осциллограммы.

19. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты, осциллограммы и выводы.

## Лабораторная работа № 2.3.2.

**Реактивное сопротивление конденсатора.**

**Цель работы:** исследовать реактивное сопротивление конденсатора.

Схема электрических соединений

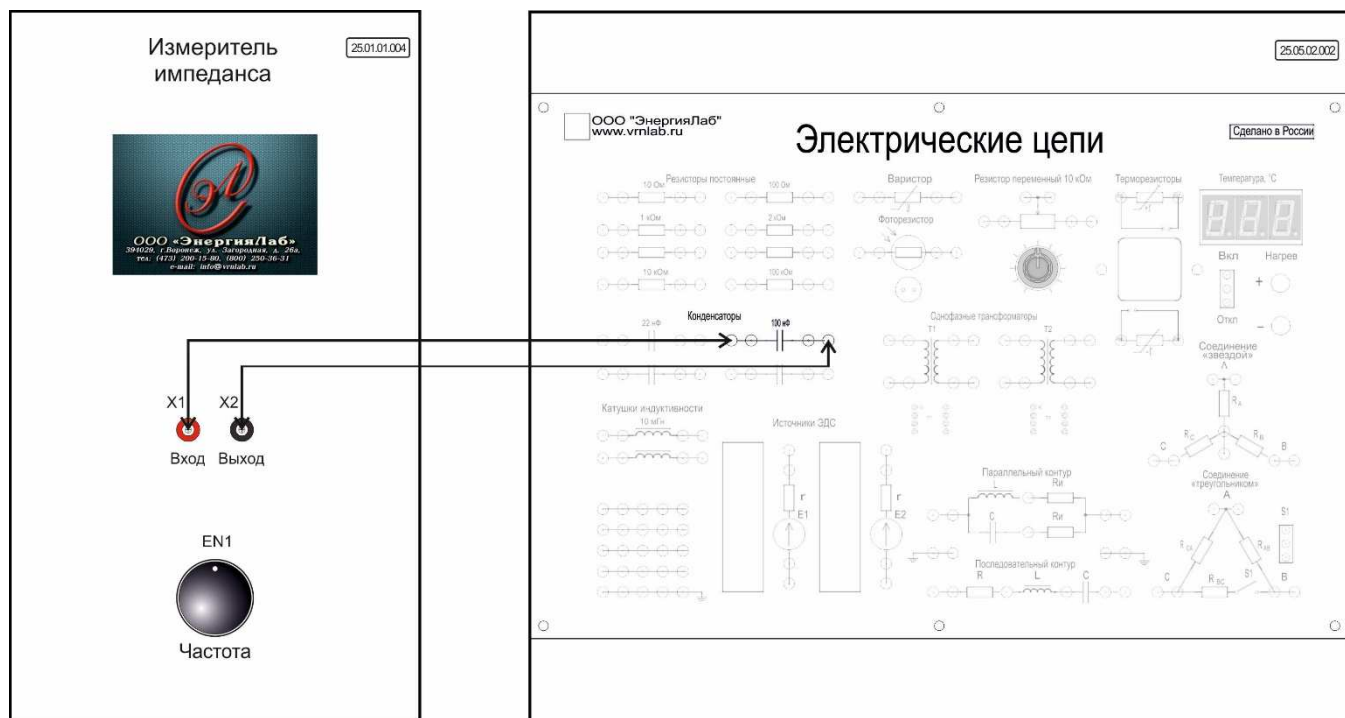


Рисунок 1 – Схема электрических соединений

## Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1

модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измеритель импеданса» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Модуль, Ом			
Фаза, градус			
Частота, Гц			

8. Повторите измерения при различных значениях частоты. Для изменения частоты используйте энкодер EN1 модуля «Измеритель импеданса». Показания прибора занесите в таблицу 1.

9. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

10. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

11. По полученным данным произведите расчет реактивного сопротивления конденсатора.

Примечание: При использовании ПО и ПК, расчет реактивного сопротивления производится автоматически.

12. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

13. Проанализируйте полученные результаты измерений и расчетов.

14. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты.

## Лабораторная работа № 2.3.3.

## Последовательное соединение конденсаторов.

**Цель работы:** исследование последовательного соединения конденсаторов.

## Схема электрических соединений

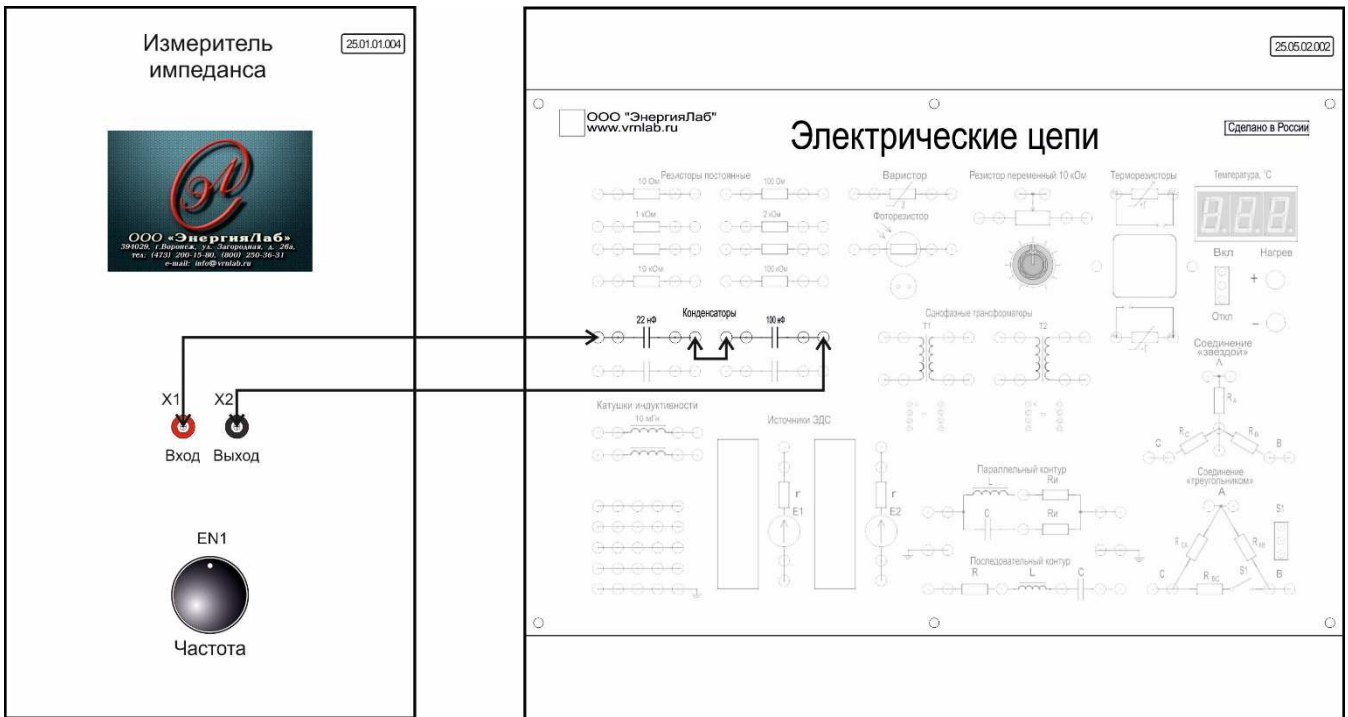
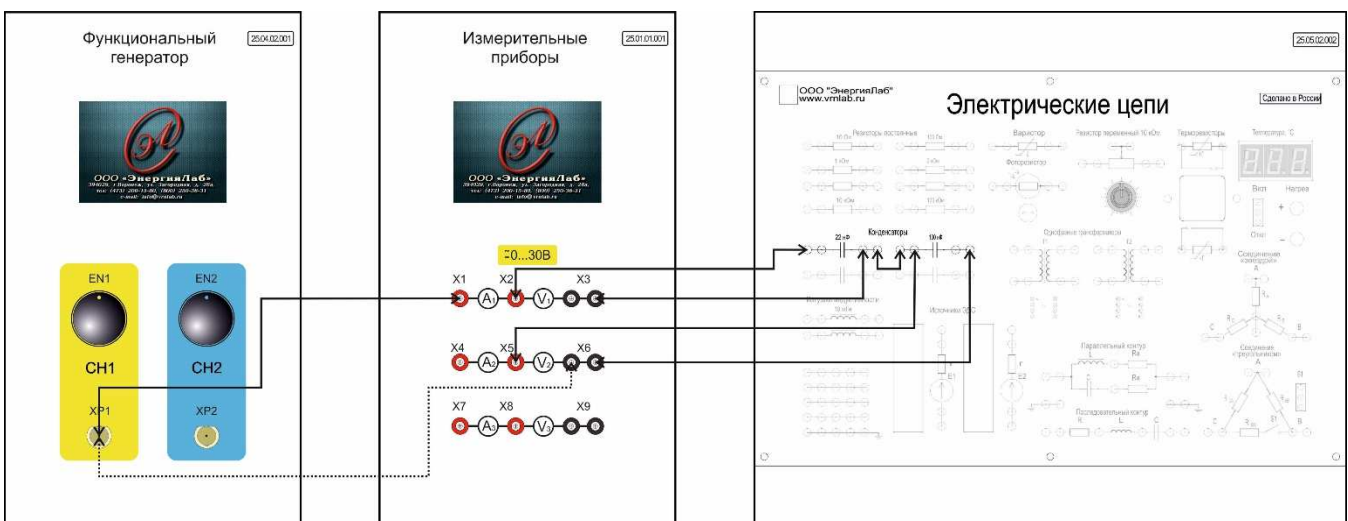


Рисунок 1 – Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 2 – Схема электрических соединений

## Порядок выполнения работы



1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Произведите расчет суммарного сопротивления последовательно соединенных конденсаторов. При условии, что  $f = 10$  кГц.
6. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
7. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
8. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измеритель импеданса» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Модуль, Ом	
Фаза, градус	
Частота, Гц	

9. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.
10. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

Примечание: При использовании ПО и ПК, расчет реактивного сопротивления производится автоматически.

11. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
12. Сравните результаты измерений и расчетов.
13. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
14. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 2.
15. Используя известные формулы, рассчитать ток в цепи последовательного соединения конденсаторов, а также напряжение на каждом конденсаторе. При условии, что напряжение питания 10 В, с частотой 10 кГц.
16. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
17. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
18. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:
  - Форма сигнала – синус;
  - Частота – 10 кГц;
  - Амплитуда – 10 В.
19. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.
20. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение на первом конденсаторе, В	
Напряжение на втором конденсаторе, В	
Ток, мА	

21. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

22. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

23. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

24. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

25. Сравните результаты расчетов и измерений.

26. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты.

## Лабораторная работа № 2.3.4.

**Параллельное соединение конденсаторов.****Цель работы:** исследование параллельного соединения конденсаторов.

Схема электрических соединений

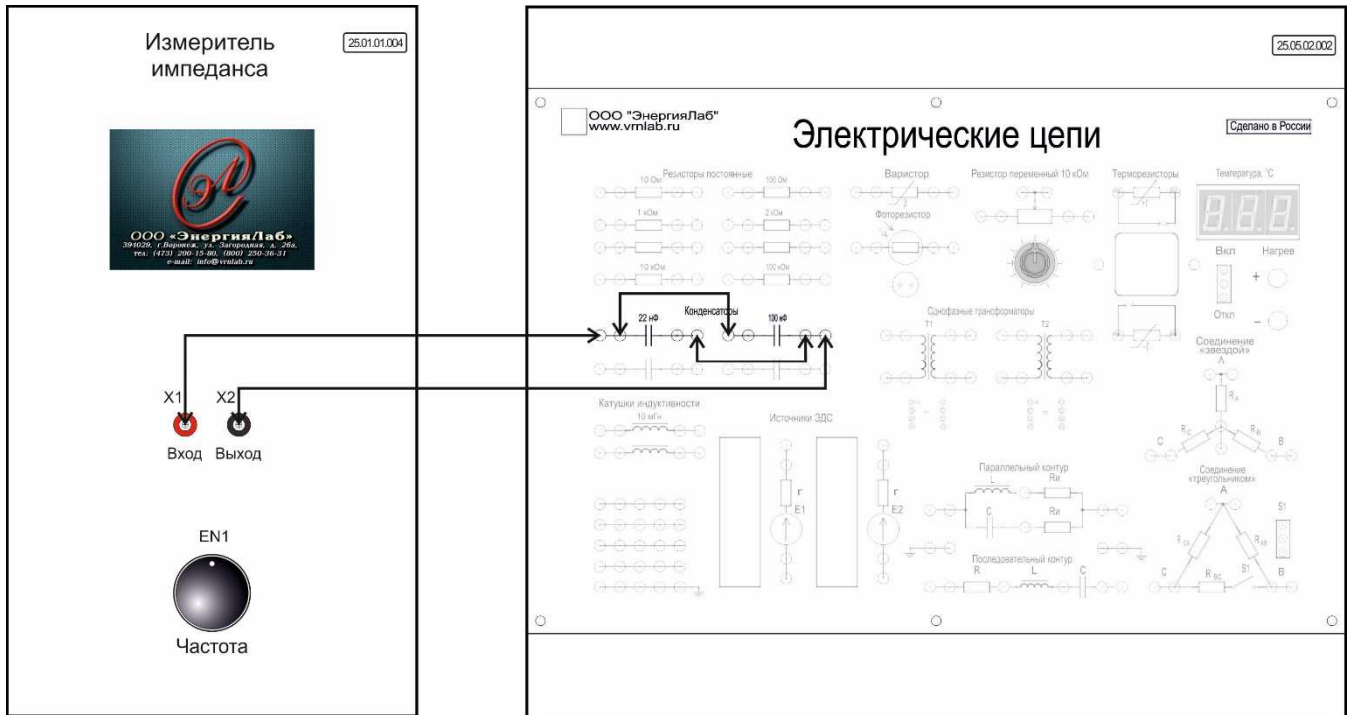
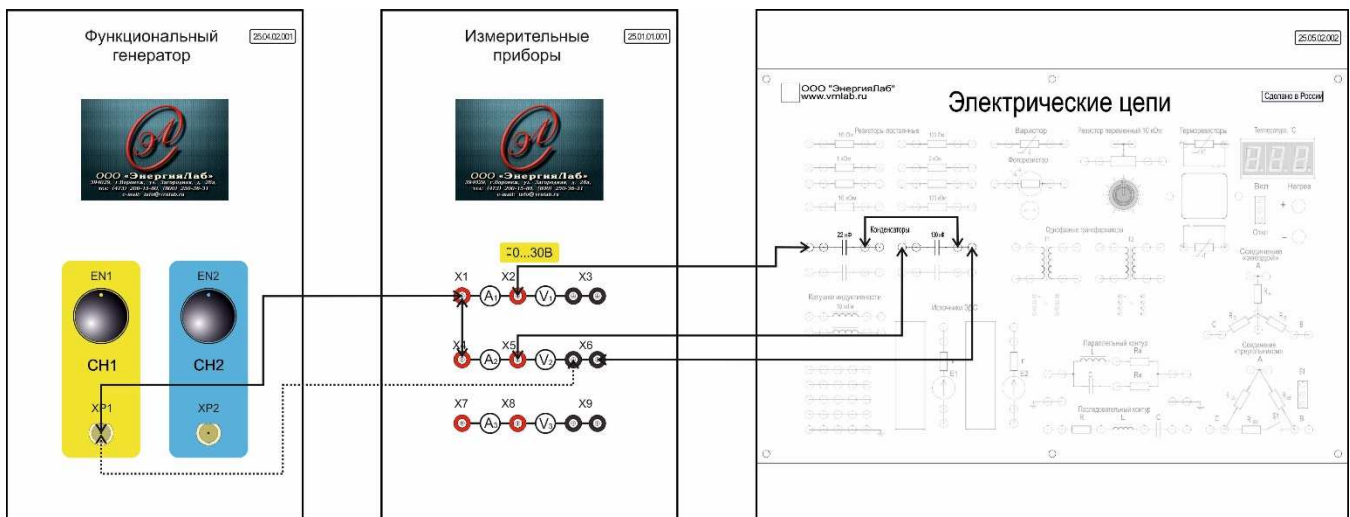


Рисунок 1 – Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 2 – Схема электрических соединений

Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Произведите расчет суммарного сопротивления параллельно соединенных конденсаторов. При условии, что  $f = 10$  кГц.
6. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
7. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
8. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измеритель импеданса» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Модуль, Ом	
Фаза, градус	
Частота, Гц	

9. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.
10. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

Примечание: При использовании ПО и ПК, расчет реактивного сопротивления производится автоматически.

11. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
12. Сравните результаты измерений и расчетов.
13. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
14. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 2.
15. Используя известные формулы, рассчитать токи, протекающие по каждому из параллельно соединенных конденсаторов, а также напряжение, приложенное к ним. При условии, что напряжение питания 10 В, с частотой 10 кГц.
16. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
17. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
18. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:
  - Форма сигнала – синус;
  - Частота – 10 кГц;
  - Амплитуда – 10 В.
19. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.
20. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

$I_{C1}$ , мА	
$I_{C2}$ , мА	
U, В	

21. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в

отключенное состояние.

22. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

23. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

24. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

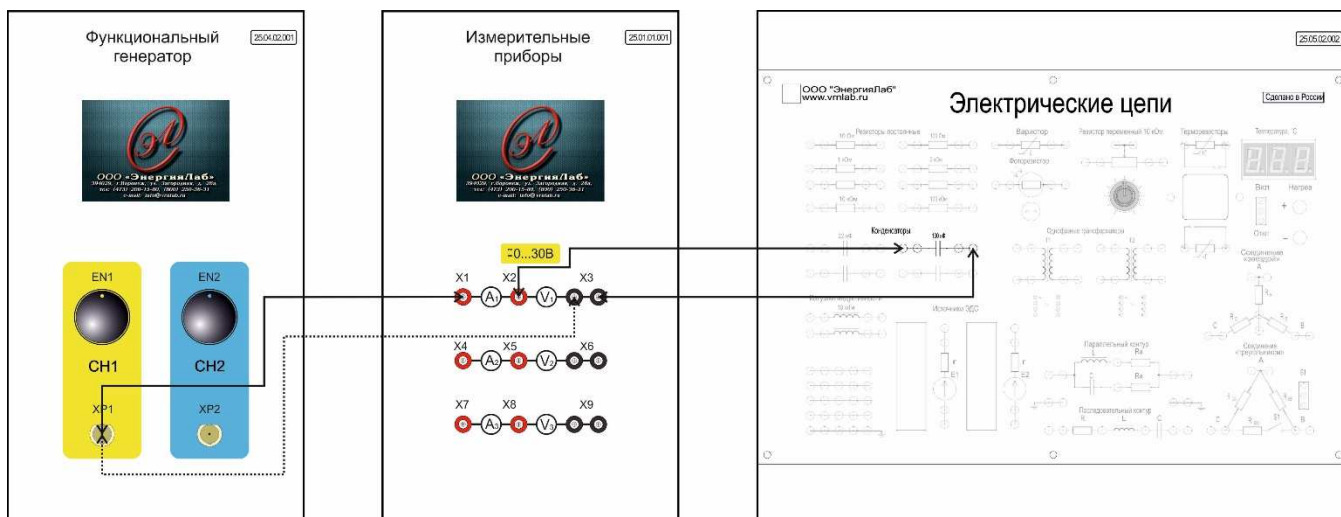
25. Сравните результаты расчетов и измерений.

26. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты.

## Лабораторная работа № 2.3.5. Реактивная мощность конденсатора.

**Цель работы:** исследование реактивной мощности конденсатора.

Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 1 – Схема электрических соединений

Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.



6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

Форма сигнала – синус;

Частота – 10 кГц;

Амплитуда – 10 В.

8. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.

9. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение, В			
Ток, мА			
Частота, Гц			

10. Повторите измерения для различных значений амплитуды и частоты выходного сигнала модуля «Функциональный генератор».

11. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

12. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

13. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

14. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

15. Рассчитайте реактивную мощность цепи.

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

где  $\sin\varphi \approx 1$ , так как цепь содержит только реактивное сопротивление.

16. Проанализируйте полученные результаты измерений и расчетов.

17. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты.

## Лабораторная работа № 2.4.

**Цепи синусоидального тока с катушками индуктивности.**

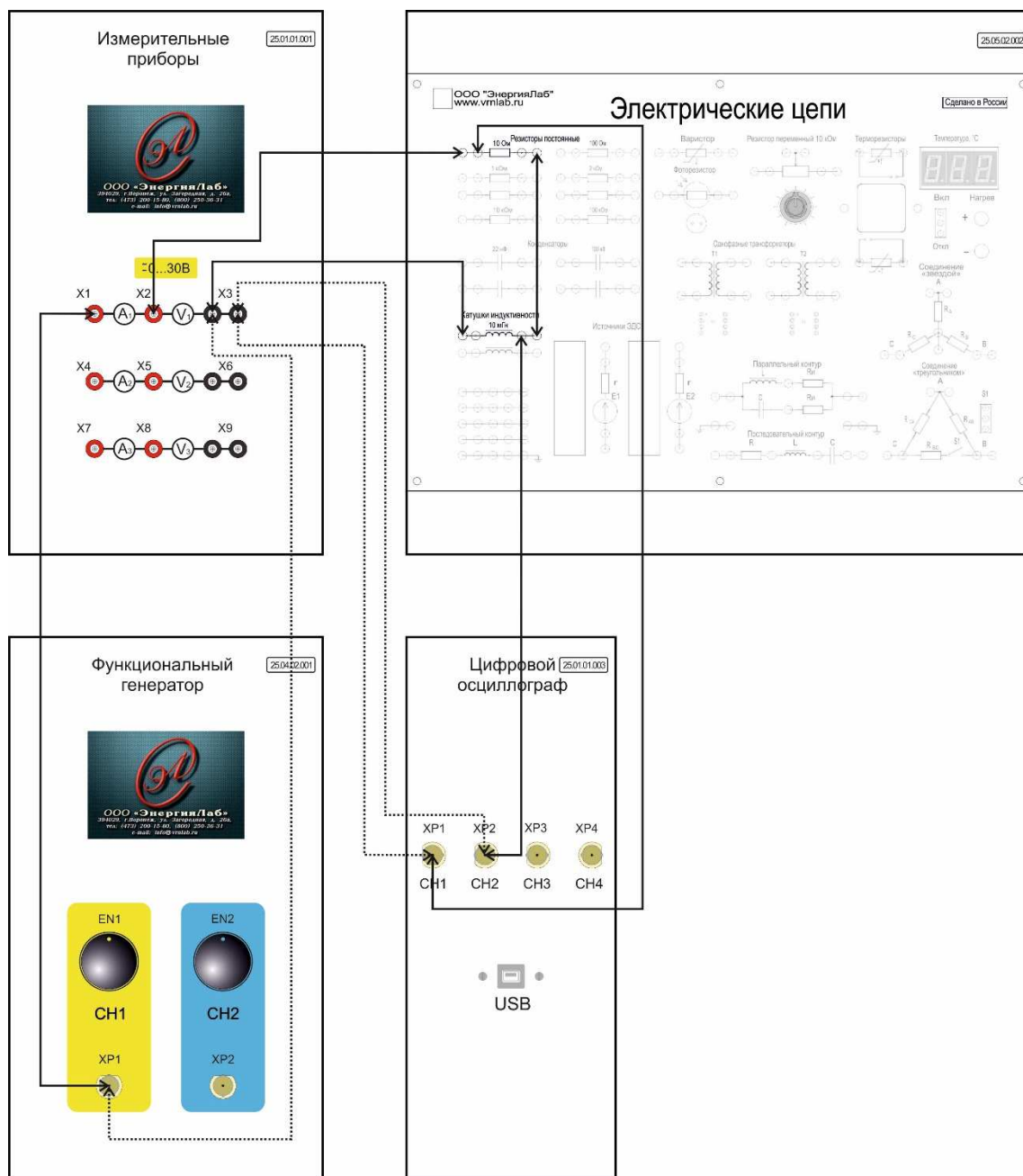
**Цель работы:** ознакомиться с методикой исследования цепей синусоидального тока с катушками индуктивности: напряжение и ток катушки индуктивности, реактивное сопротивление катушки индуктивности, последовательное соединение катушек индуктивности, параллельное соединение катушек индуктивности, реактивная мощность катушки индуктивности.

## Лабораторная работа № 2.4.1.

**Напряжение и ток катушки индуктивности.**

**Цель работы:** исследование напряжения и тока катушки индуктивности.

Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 1 – Схема электрических соединений

Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.
8. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:
  - Форма сигнала – синус;
  - Частота – 200 Гц;
  - Амплитуда – 10 В.
9. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.
10. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение, В			
Ток, мА			

11. Изучите полученную осциллограмму и зарисуйте её.
12. Повторите пункт 10 - 11 для различных значений частоты и амплитуды выходного сигнала модуля «Функциональный генератор».

Примечание: превышение тока 500 мА не желательно.

13. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.
14. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.
15. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.
16. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.
17. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
18. Проанализируйте полученные результаты измерений и осциллограммы.
19. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты, осциллограммы и выводы.

## Лабораторная работа № 2.4.2.

**Реактивное сопротивление катушки индуктивности.**

**Цель работы:** исследование реактивного сопротивления катушки индуктивности.

## Схема электрических соединений

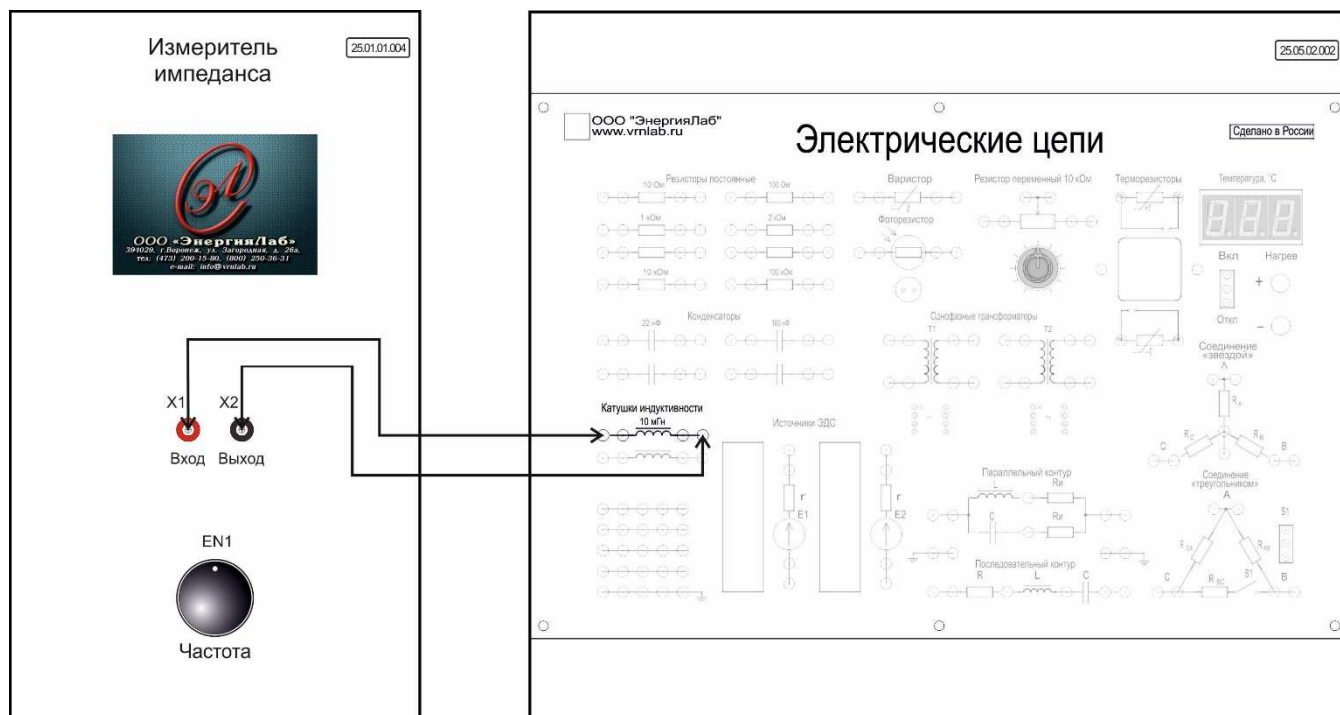


Рисунок 1 – Схема электрических соединений

## Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.

5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
7. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измеритель импеданса» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Модуль, Ом			
Фаза, градус			
Частота, Гц			

8. Повторите измерения при различных значениях частоты. Для изменения частоты используйте энкодер EN1 модуля «Измеритель импеданса». Показания прибора занесите в таблицу 1.
  9. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.
  10. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.
  11. По полученным данным произведите расчет реактивного сопротивления катушки индуктивности.
- Примечание: При использовании ПО и ПК, расчет реактивного сопротивления производится автоматически.
12. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
  13. Проанализируйте полученные результаты измерений и расчетов.
  14. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты.

## Лабораторная работа № 2.4.3.

**Последовательное соединение катушек индуктивности.**

**Цель работы:** исследование последовательного соединения катушек индуктивности.

## Схема электрических соединений

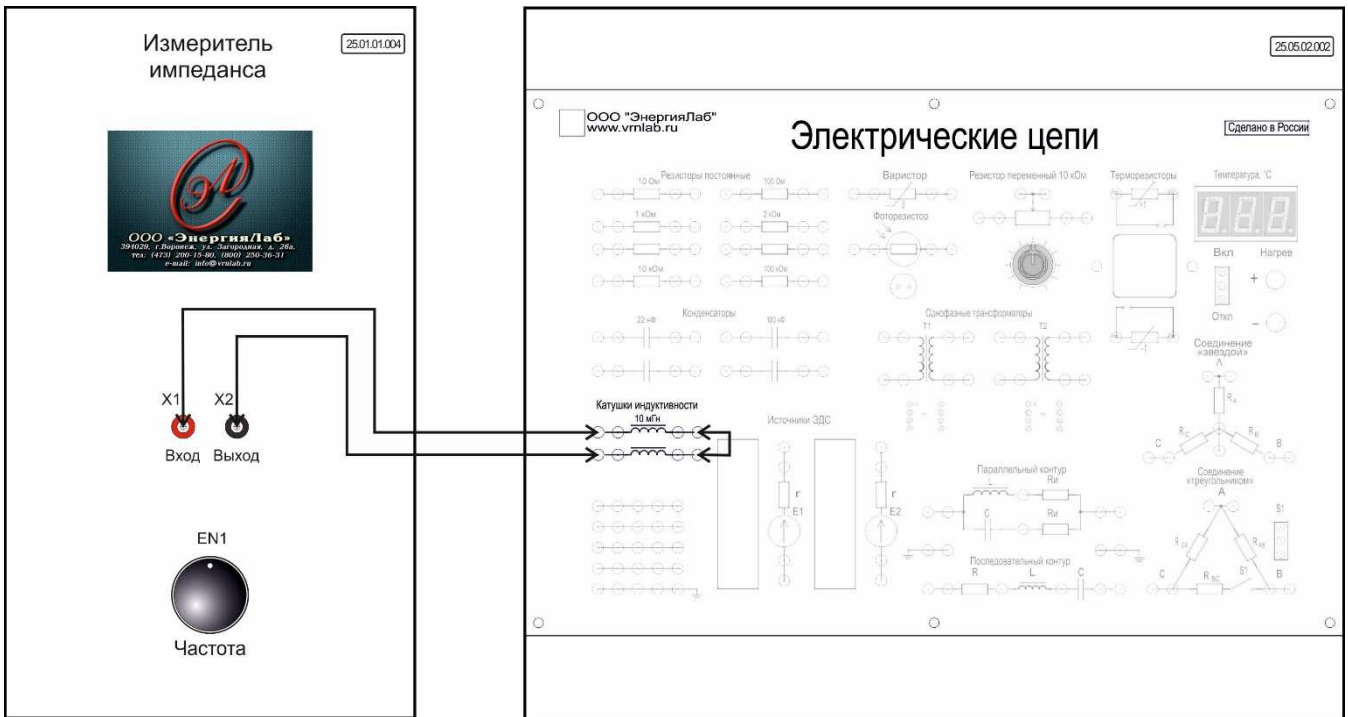
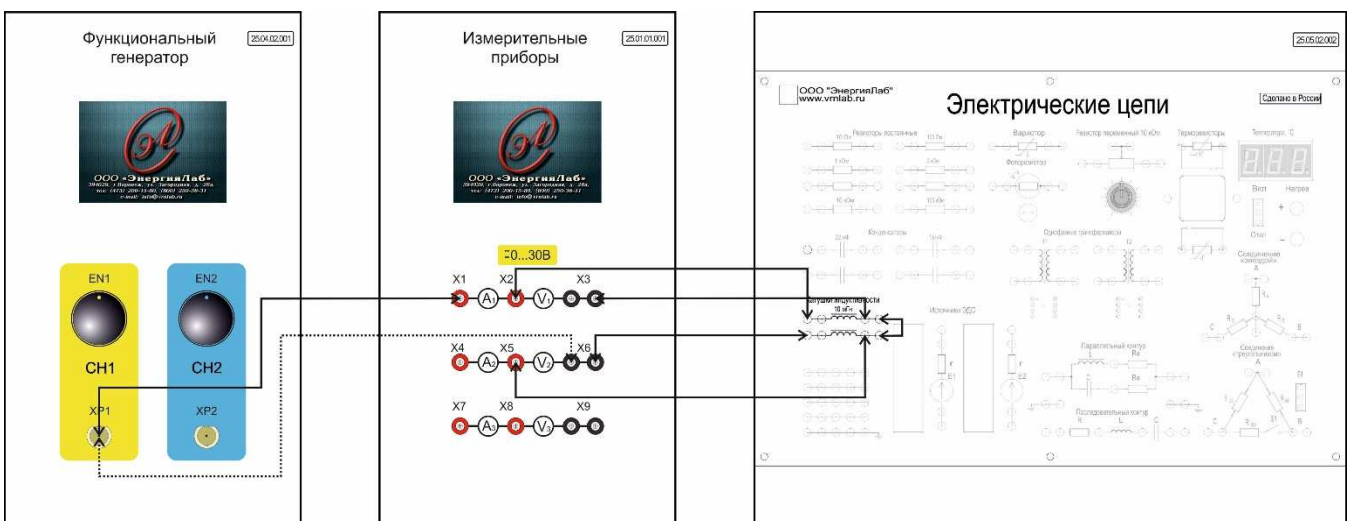


Рисунок 1 – Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 2 – Схема электрических соединений

## Порядок выполнения работы



1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Произведите расчет суммарного сопротивления последовательно соединенных катушек индуктивности. При условии, что  $f = 10$  кГц.
6. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
7. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
8. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измеритель импеданса» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Модуль, Ом	
Фаза, градус	
Частота, Гц	

9. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.
10. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

Примечание: При использовании ПО и ПК, расчет реактивного сопротивления производится автоматически.

11. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
12. Сравните результаты измерений и расчетов.
13. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
14. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 2.
15. Используя известные формулы, рассчитать ток в цепи последовательного соединения конденсаторов, а также напряжение на каждом конденсаторе. При условии, что напряжение питания 10 В, с частотой 250 Гц.
16. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
17. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
18. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:  
Форма сигнала – синус;  
Частота – 250 Гц;  
Амплитуда – 10 В.
19. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.
20. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение на первой катушке индуктивности, В	
Напряжение на второй катушке индуктивности, В	
Ток, мА	

21. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

22. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

23. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

24. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

25. Сравните результаты расчетов и измерений.

Составьте отчет, занесите в него полученные результаты.

## Лабораторная работа № 2.4.4.

**Параллельное соединение катушек индуктивности.**

**Цель работы:** исследование параллельного соединения катушек индуктивности.

## Схема электрических соединений

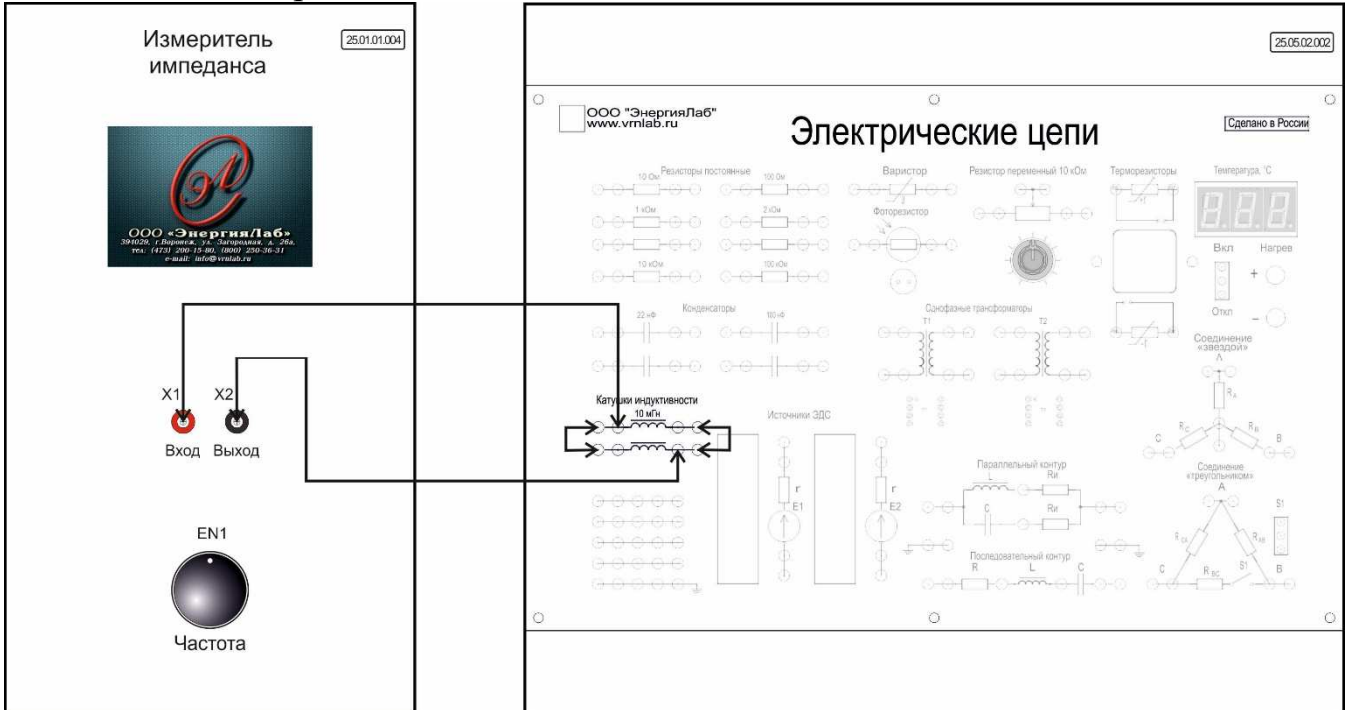
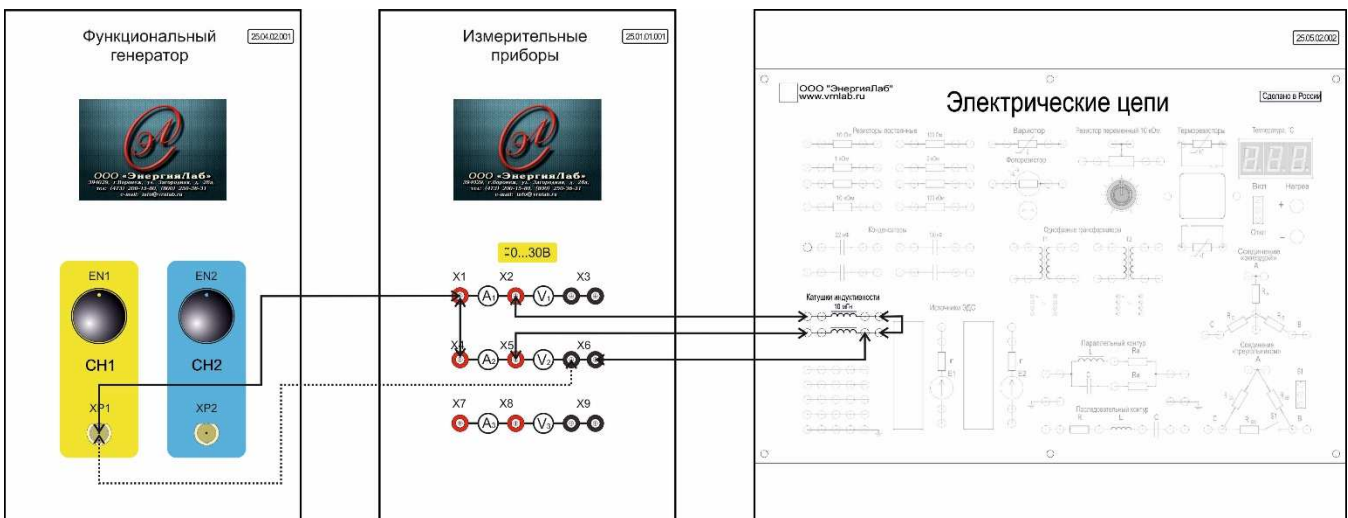


Рисунок 1 – Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 2 – Схема электрических соединений

## Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Произведите расчет суммарного сопротивления параллельно соединенных катушек индуктивности. При условии, что  $f = 1$  кГц.
6. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
7. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
8. Установите при помощи энкодера EN1 модуля «Измеритель импеданса» частоту 1 кГц.
9. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измеритель импеданса» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Модуль, Ом	
Фаза, градус	
Частота, Гц	

10. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.
11. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

Примечание: При использовании ПО и ПК, расчет реактивного сопротивления производится автоматически.

12. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
13. Сравните результаты измерений и расчетов.
14. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
15. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 2.
16. Используя известные формулы, рассчитать токи, протекающие по каждой из параллельно соединенных катушек индуктивности, а также напряжение, приложенное к ним. При условии, что напряжение питания 10 В, с частотой 1 кГц.
17. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
18. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
19. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:
  - Форма сигнала – синус;
  - Частота – 1 кГц;
  - Амплитуда – 10 В.
20. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.
21. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

$I_{L1}, \text{mA}$	
$I_{L2}, \text{mA}$	

U, В	
------	--

22. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.
23. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.
24. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.
25. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
26. Сравните результаты расчетов и измерений.
27. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты.

## Лабораторная работа № 2.4.5.

**Реактивная мощность катушки индуктивности.**

**Цель работы:** исследовать реактивную мощность катушки индуктивности.

## Схема электрических соединений

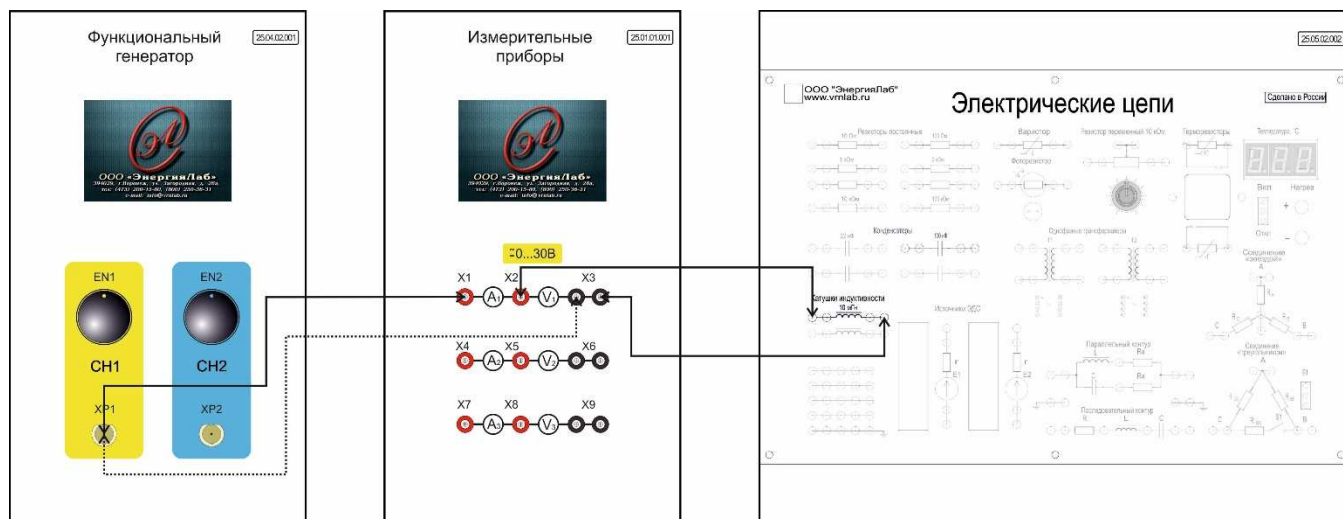


Рисунок 1 – Схема электрических соединений

## Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.



6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

Форма сигнала – синус;

Частота – 500 Гц;

Амплитуда – 10 В.

8. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.

9. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение, В			
Ток, мА			
Частота, Гц			

10. Повторите измерения для различных значений амплитуды и частоты выходного сигнала модуля «Функциональный генератор».

Примечание: превышение тока 500 мА не желательно.

11. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

12. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

13. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

14. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

15. Рассчитайте реактивную мощность цепи.

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

где  $\sin\varphi \approx 1$ , так как цепь содержит только реактивное сопротивление.

16. Проанализируйте полученные результаты измерений и расчетов.

17. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты.

## Лабораторная работа № 2.5.

**Цепи синусоидального тока с резисторами, конденсаторами и катушками индуктивности.**

**Цель работы:** ознакомиться с методикой исследования цепей синусоидального тока с резисторами, конденсаторами и катушками индуктивности: последовательное соединение резистора и конденсатора, параллельное соединение резистора и конденсатора, последовательное соединение резистора и катушки индуктивности, параллельное соединение резистора и катушки индуктивности, последовательное соединение конденсатора и катушки индуктивности, понятие о резонансе напряжений, последовательное соединение конденсатора и катушки индуктивности, понятие о резонансе токов, частотные характеристики последовательного резонансного контура, частотные характеристики параллельного резонансного контура, мощности в цепи синусоидального тока.

## Лабораторная работа № 2.5.1.

**Последовательное соединение резистора и конденсатора.**

**Цель работы:** исследовать последовательное соединение резистора и конденсатора.

### Схема электрических соединений

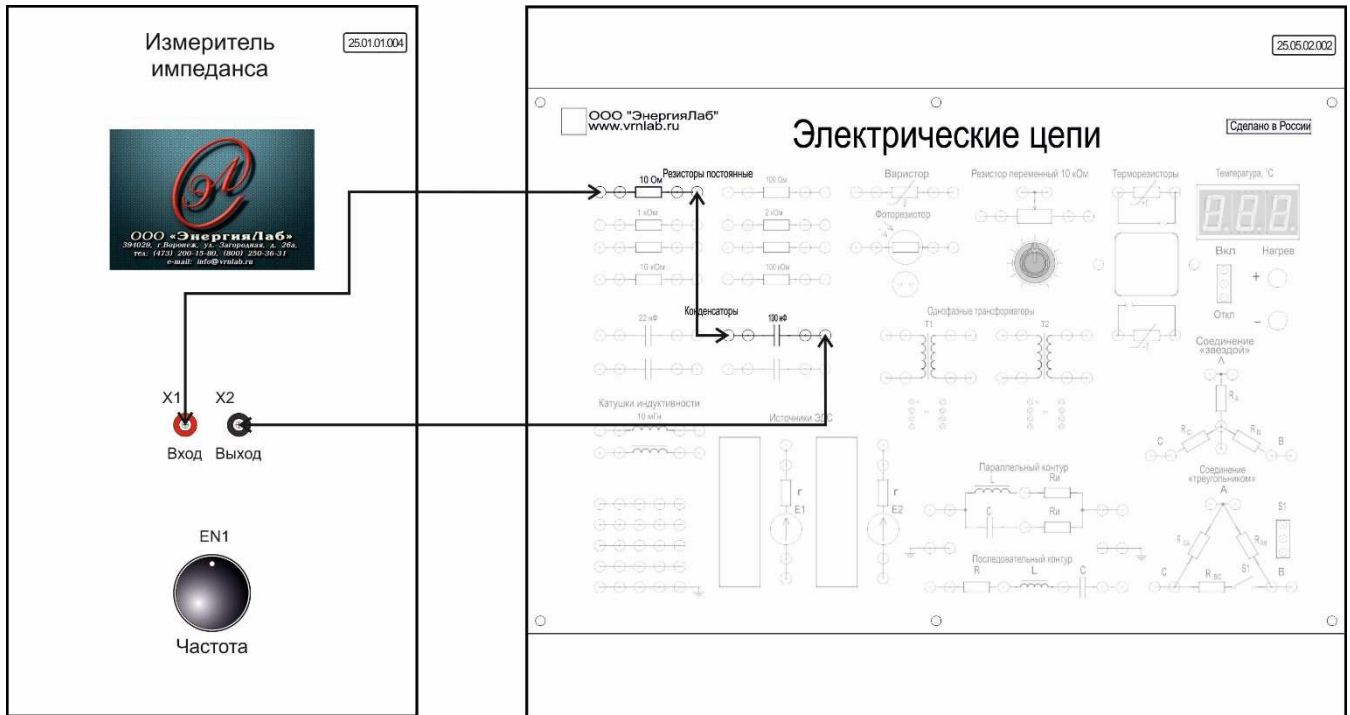
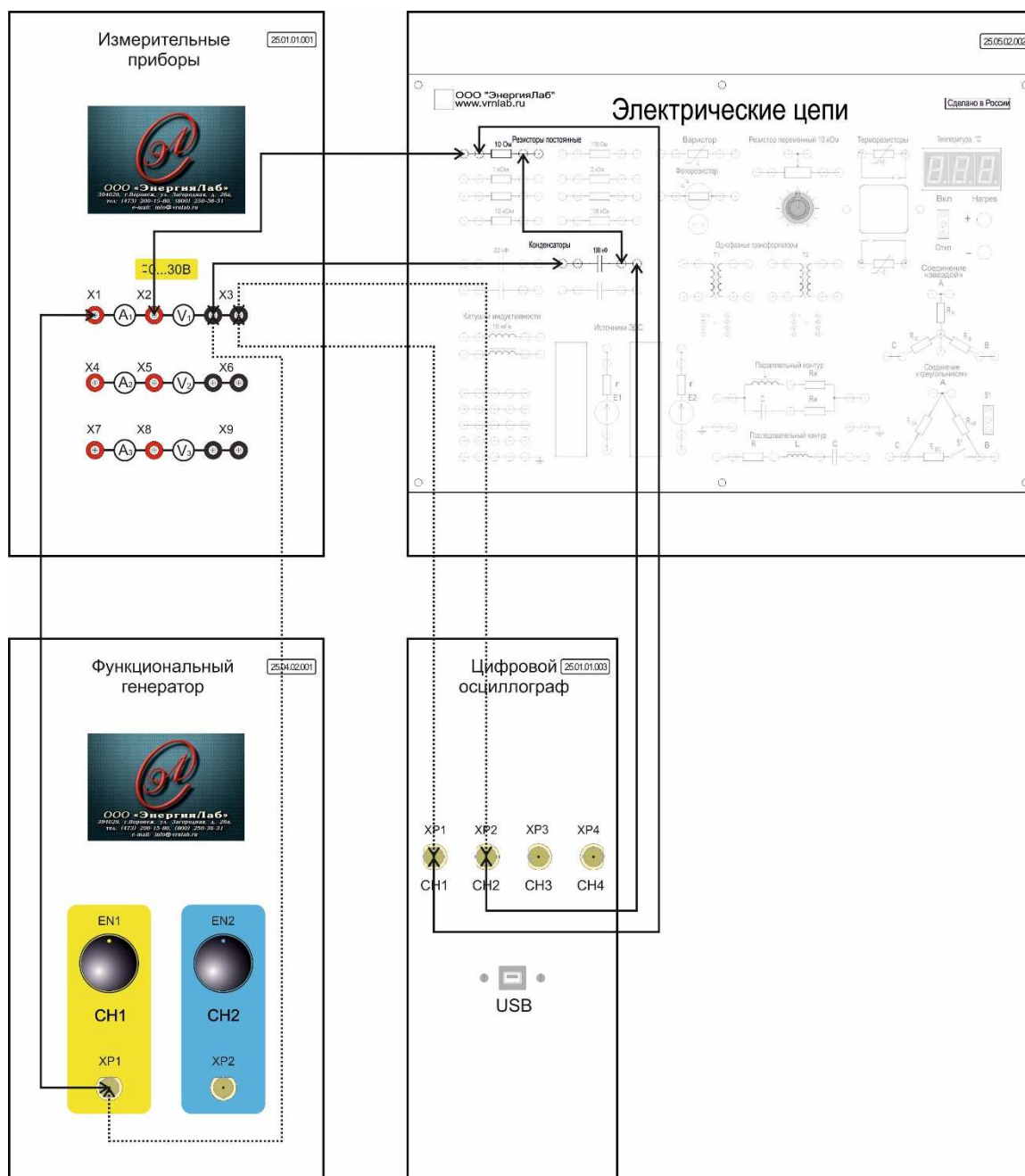


Рисунок 1 – Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 2 – Схема электрических соединений

### Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропита-

ния: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.

4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.

5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измеритель импеданса» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Модуль, Ом					
Фаза, градус					
Частота, Гц					

8. Повторите измерения для различной частоты. Значение частоты задается при помощи энкодера EN1 модуля «Измеритель импеданса».

9. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

10. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

11. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

12. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.

13. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 2.

14. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

15. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

16. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.

17. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

Форма сигнала – синус;

Частота – 10 кГц;

Амплитуда – 10 В.

18. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.

19. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение, В			
Ток, мА			

20. Изучите полученную осциллограмму и зарисуйте её.

21. Повторите пункт 19 - 20 для различных значений частоты и амплитуды выходного сигнала модуля «Функциональный генератор».

22. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

23. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

24. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

25. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.

26. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

27. Проанализируйте полученные результаты измерений и осциллограммы.
28. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты, осциллограммы и выводы.

## Лабораторная работа № 2.5.2.

**Параллельное соединение резистора и конденсатора.**

**Цель работы:** исследовать параллельное соединение резистора и конденсатора.

Схема электрических соединений

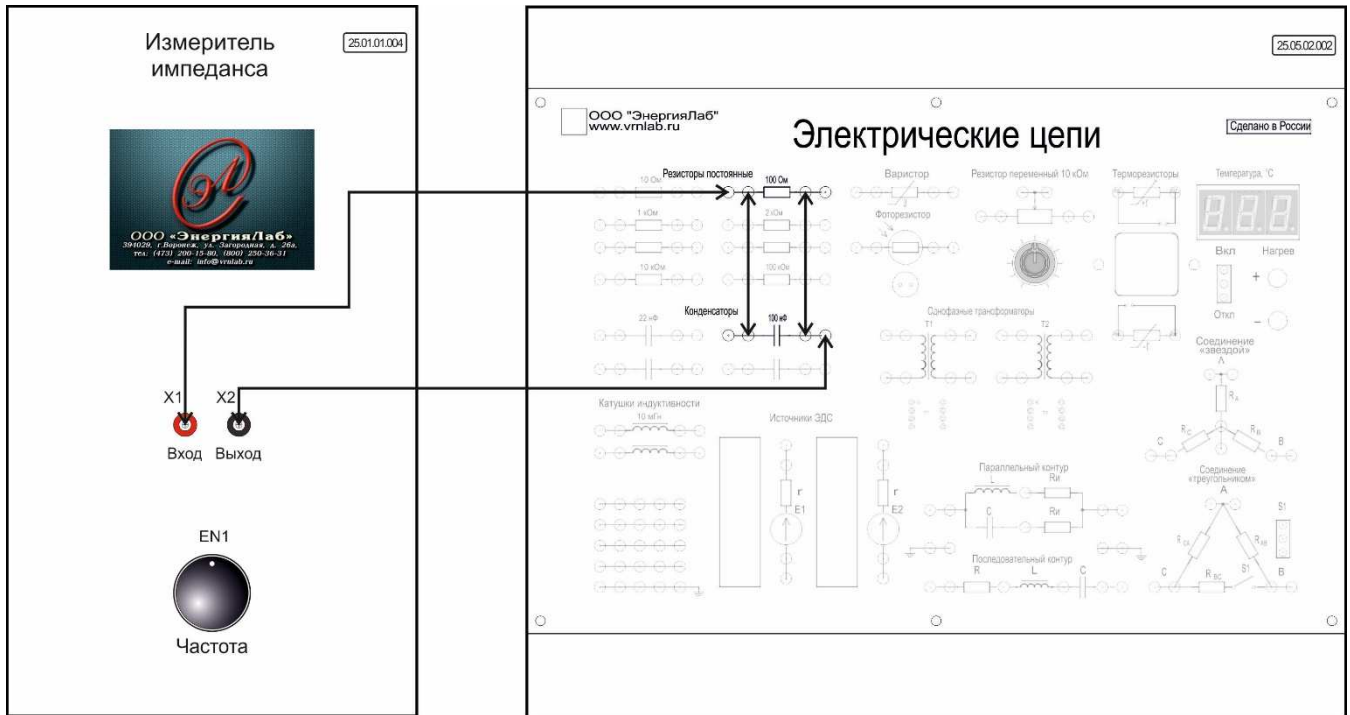
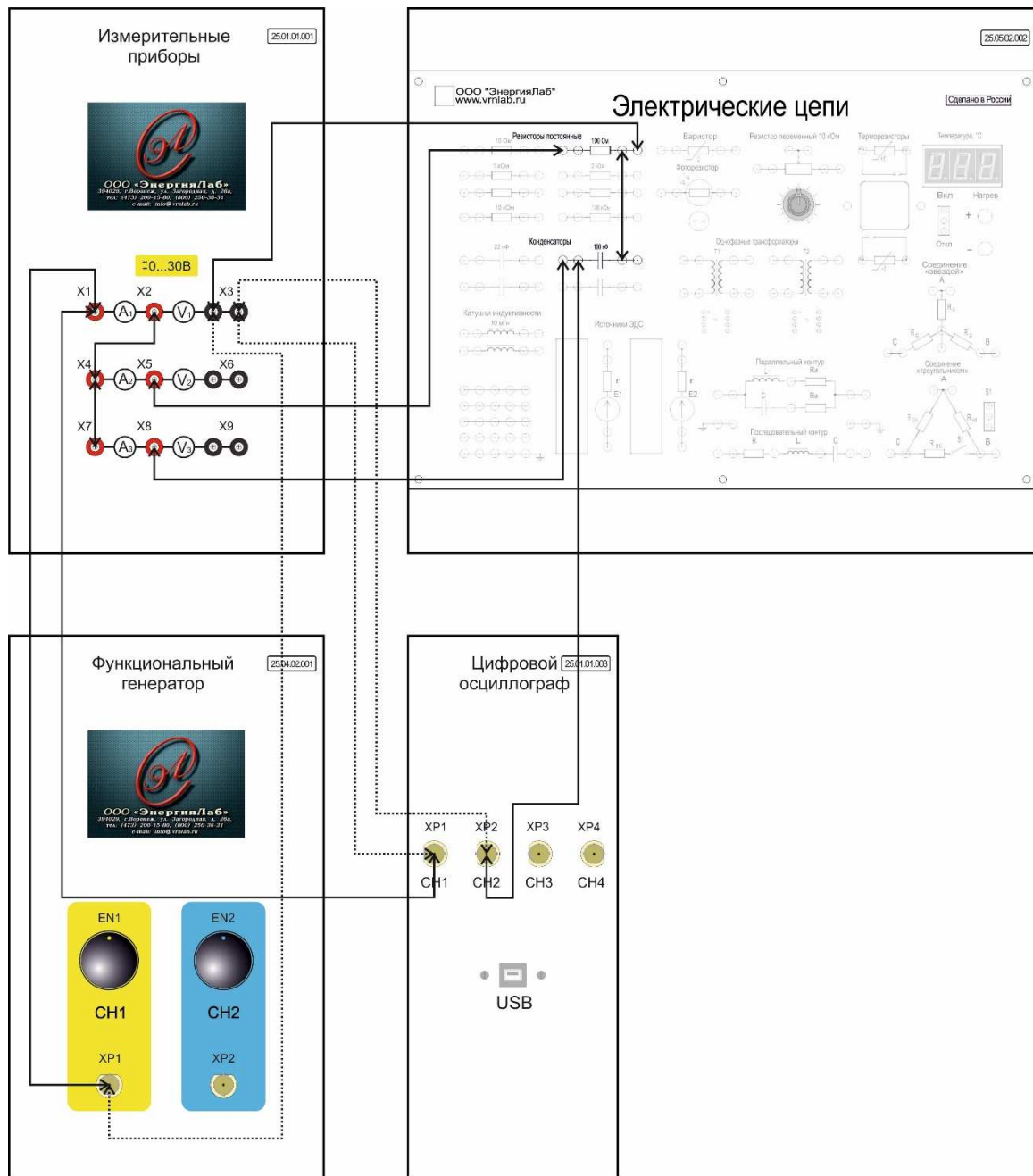


Рисунок 1 – Схема электрических соединений





Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 2 – Схема электрических соединений

### Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропита-

ния: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.

4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.

5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измеритель импеданса» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Модуль, Ом					
Фаза, градус					
Частота, Гц					

8. Повторите измерения для различной частоты. Значение частоты задается при помощи энкодера EN1 модуля «Измеритель импеданса».

9. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

10. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

11. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

12. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.

13. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 2.

14. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

15. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

16. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.

17. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

Форма сигнала – синус;

Частота – 10 кГц;

Амплитуда – 10 В.

18. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.

19. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение, В				
Ток резистора, мА				
Ток конденсатора, мА				
Общий ток цепи, мА				

20. Изучите полученную осциллограмму и зарисуйте её.

21. Повторите пункт 19 - 20 для различных значений частоты и амплитуды выходного сигнала модуля «Функциональный генератор».

22. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

23. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

24. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

25. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.
26. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
27. Проанализируйте полученные результаты измерений и осциллограммы.
28. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты, осциллограммы и выводы.

## Лабораторная работа № 2.5.3.

**Последовательное соединение резистора и катушки индуктивности.**

**Цель работы:** исследовать последовательное соединение резистора и катушки индуктивности.

## Схема электрических соединений

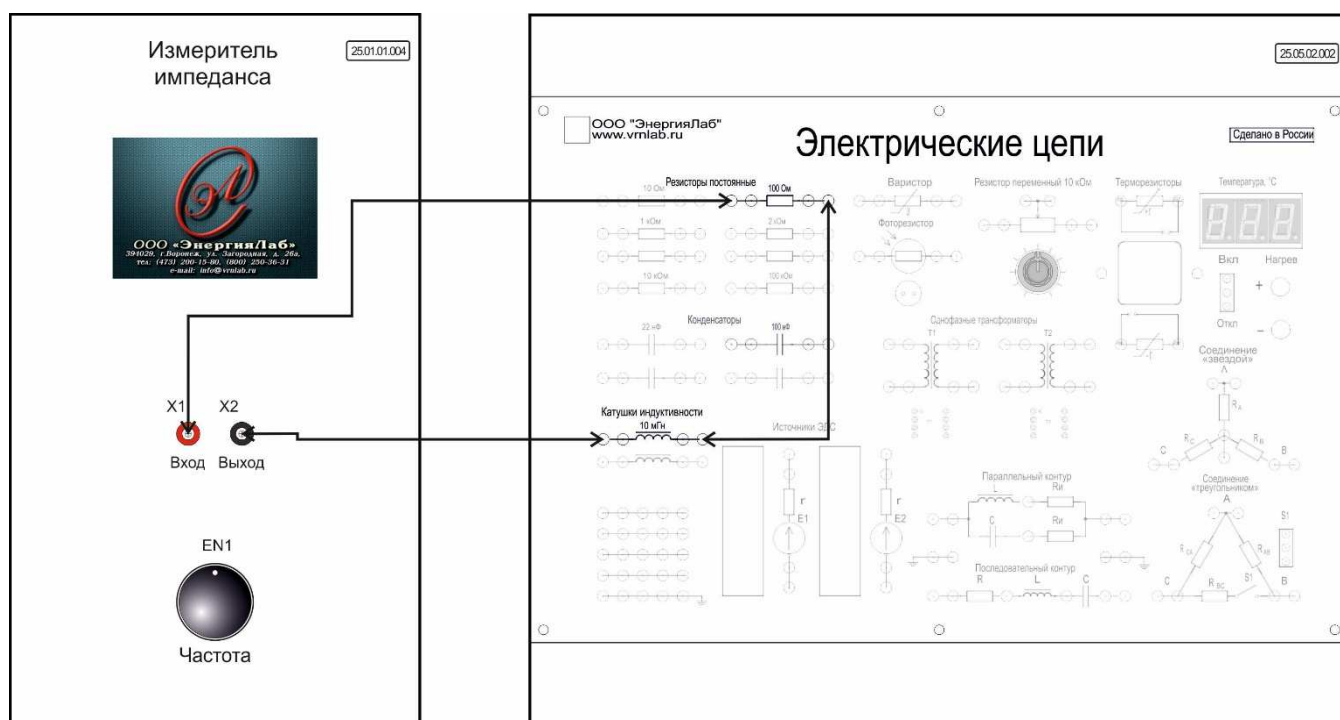
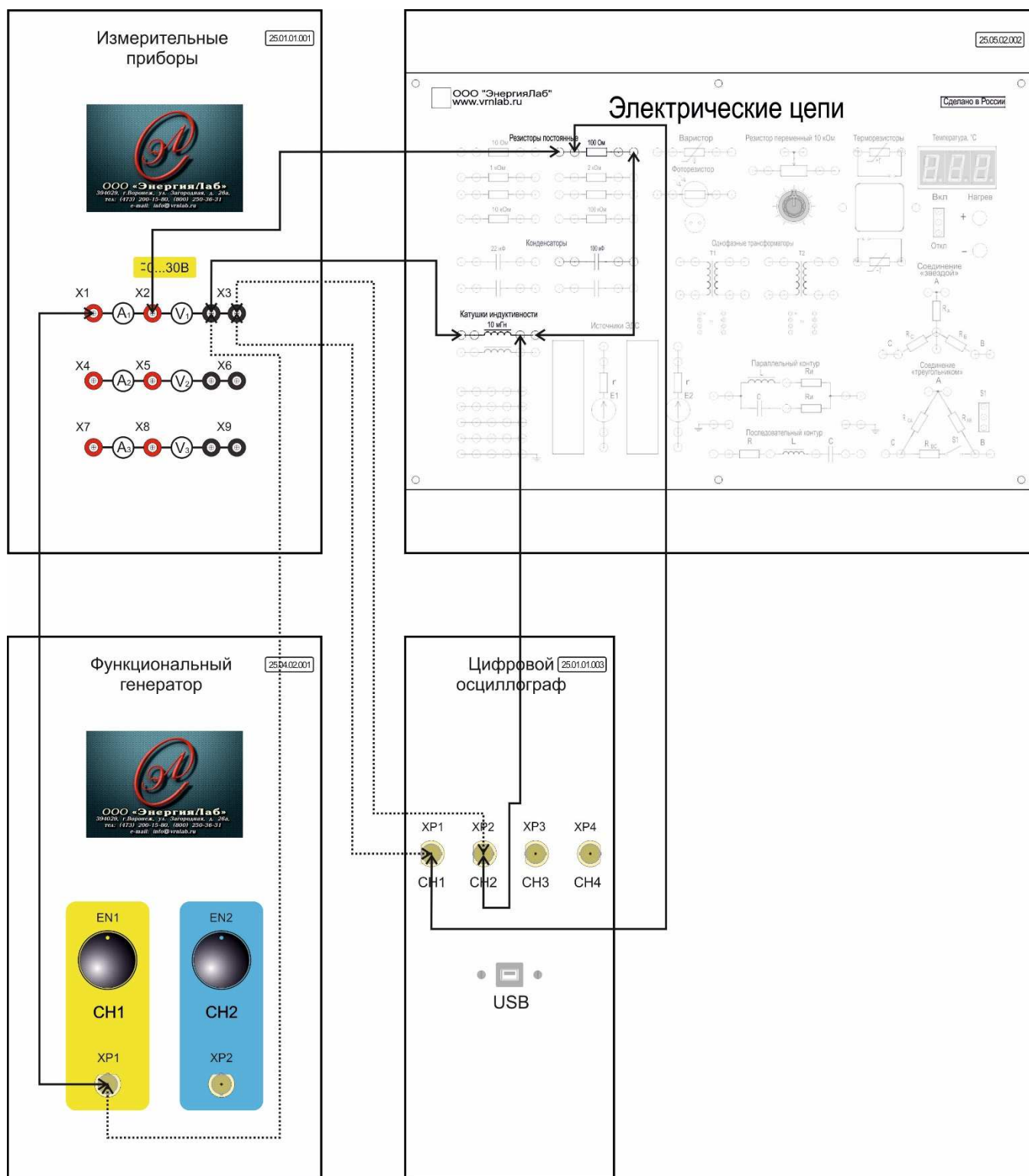


Рисунок 1 – Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 2 – Схема электрических соединений

### Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.

2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
7. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измеритель импеданса» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Модуль, Ом					
Фаза, градус					
Частота, Гц					

8. Повторите измерения для различной частоты. Значение частоты задается при помощи энкодера EN1 модуля «Измеритель импеданса».
9. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.
10. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.
11. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
12. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.

13. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 2.

14. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

15. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

16. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.

17. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

Форма сигнала – синус;

Частота – 100 Гц;

Амплитуда – 10 В.

18. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.

19. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение, В			
Ток, мА			

20. Изучите полученную осциллограмму и зарисуйте её.

21. Повторите пункт 19 - 20 для различных значений частоты и амплитуды выходного сигнала модуля «Функциональный генератор».

22. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

23. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

24. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.



25. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.
26. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
27. Проанализируйте полученные результаты измерений и осциллограммы.
28. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты, осциллограммы и выводы.

## Лабораторная работа № 2.5.4.

**Параллельное соединение резистора и катушки индуктивности.**

**Цель работы:** исследовать параллельное соединение резистора и катушки индуктивности.

## Схема электрических соединений

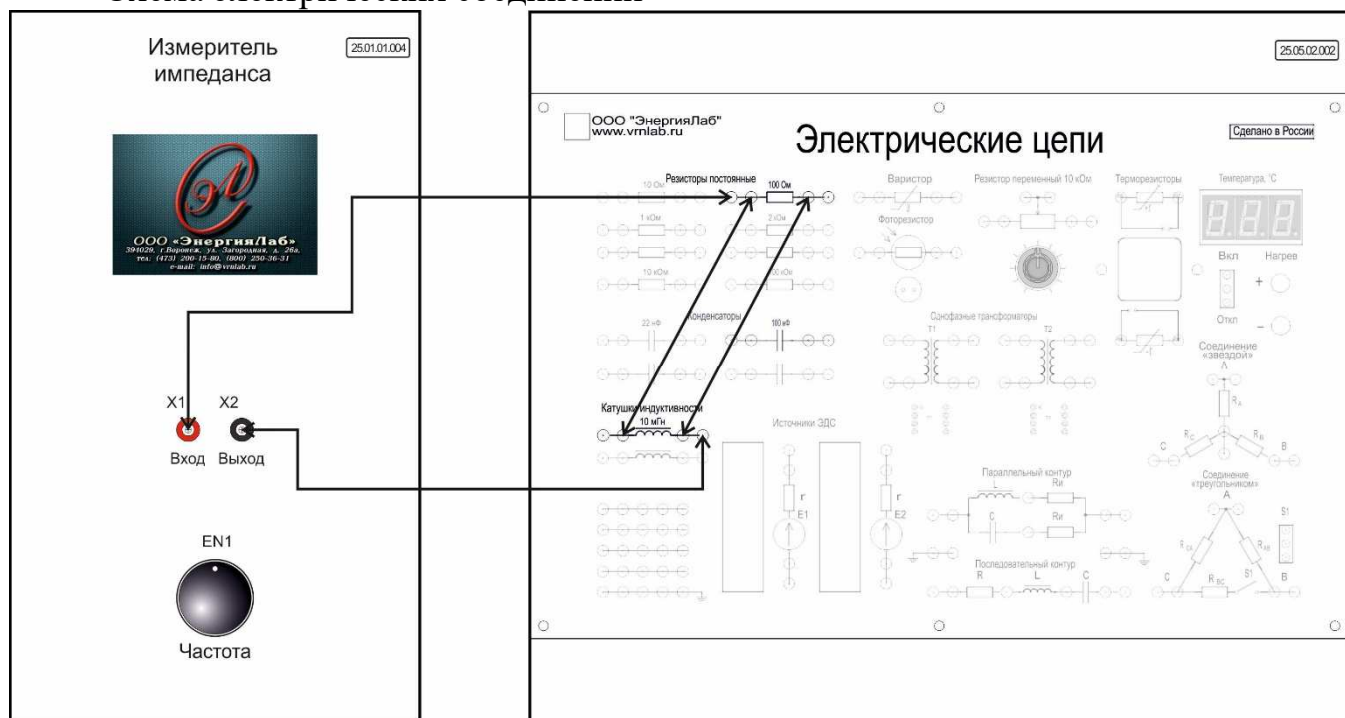
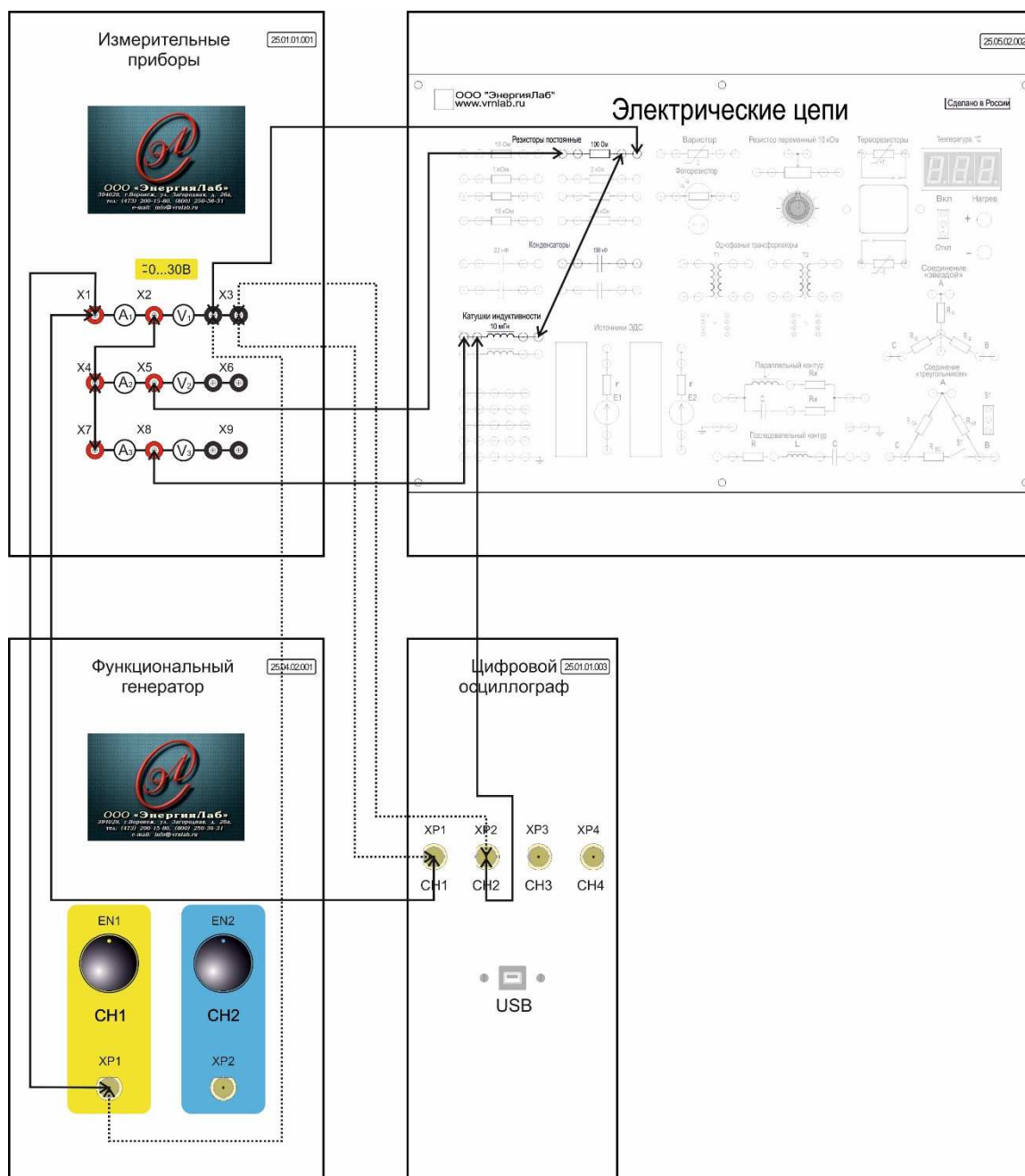


Рисунок 1 – Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 2 – Схема электрических соединений

### Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропита-

ния: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.

4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.

5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измеритель импеданса» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Модуль, Ом					
Фаза, градус					
Частота, Гц					

8. Повторите измерения для различной частоты. Значение частоты задается при помощи энкодера EN1 модуля «Измеритель импеданса».

9. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

10. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

11. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

12. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.

13. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 2.

14. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

15. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

16. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.

17. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

Форма сигнала – синус;

Частота – 1 кГц;

Амплитуда – 10 В.

18. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.

19. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение, В				
Ток резистора, мА				
Ток катушки индуктивности, мА				
Общий ток цепи, мА				

20. Изучите полученную осциллограмму и зарисуйте её.

21. Повторите пункт 19 - 20 для различных значений частоты и амплитуды выходного сигнала модуля «Функциональный генератор».

22. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

23. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

24. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

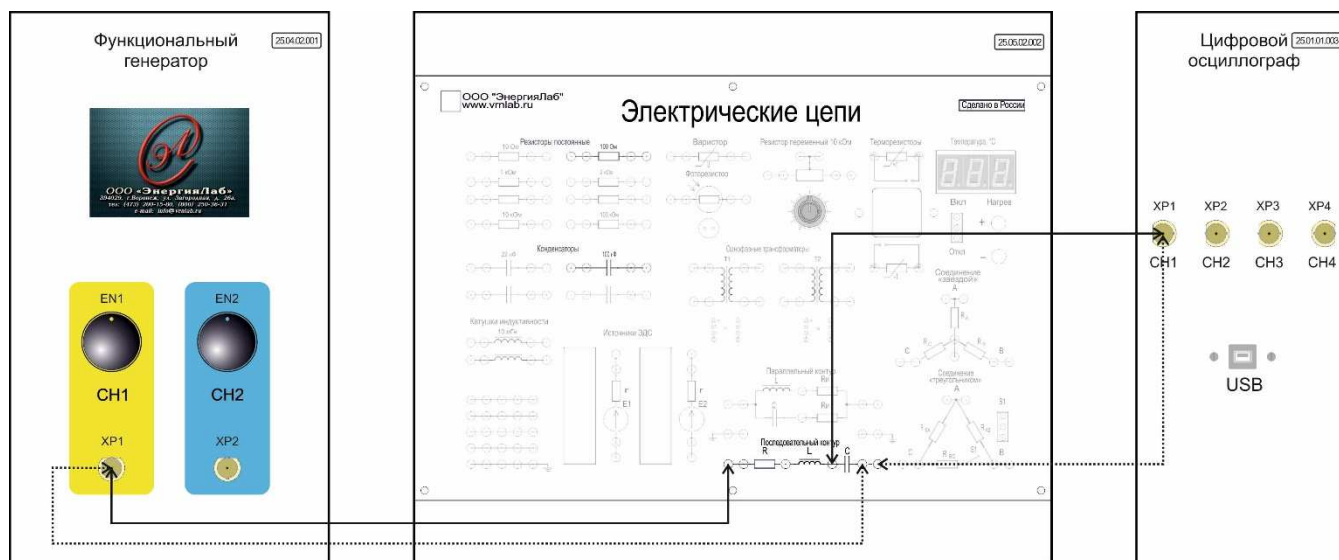
25. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.
26. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
27. Проанализируйте полученные результаты измерений и осциллограммы.
28. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты, осциллограммы и выводы.

## Лабораторная работа № 2.5.5.

## Последовательное соединение конденсатора и катушки индуктивности. Понятие о резонансе напряжений.

**Цель работы:** исследовать последовательное соединение конденсатора и катушки индуктивности, а также понятие о резонансе напряжений.

### Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 1 – Схема электрических соединений

### Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку

Вкл.

6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.

8. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

Форма сигнала – синус;

Частота – 100 Гц;

Амплитуда – 5 В.

9. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.

10. Изменяя частоту выходного сигнала модуля «Функциональный генератор» добейтесь резонанса напряжения.

11. Зарисуйте полученную осциллограмму.

12. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

13. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

14. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

15. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.

16. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

17. Опишите явление резонанса напряжения опираясь на полученную осциллограмму.

18. Составьте отчет, занесите в него полученную осциллограмму и описание явления резонанса напряжения.

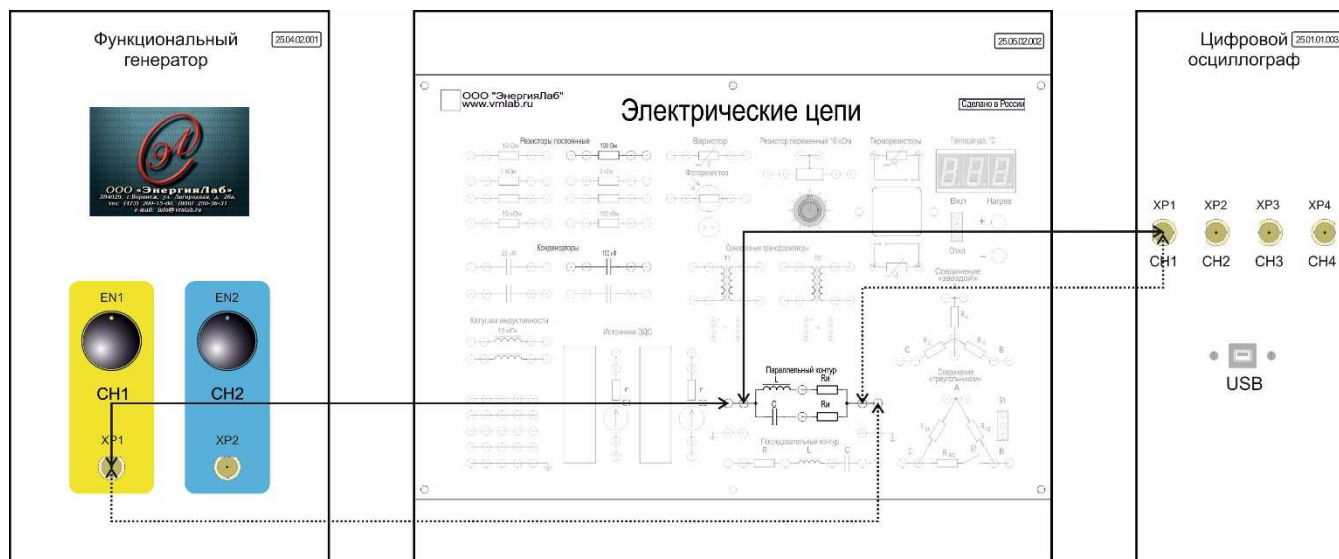


## Лабораторная работа № 2.5.6.

## Последовательное соединение конденсатора и катушки индуктивности. Понятие о резонансе токов.

**Цель работы:** исследовать последовательное соединение конденсатора и катушки индуктивности, а также понятие о резонансе токов.

### Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 1 – Схема электрических соединений

### Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1

модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.

8. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

Форма сигнала – синус;

Частота – 100 Гц;

Амплитуда – 5 В.

9. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.

10. Изменяя частоту выходного сигнала модуля «Функциональный генератор» добейтесь резонанса токов.

11. Зарисуйте полученную осциллограмму.

12. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

13. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

14. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

15. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.

16. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

17. Опишите явление резонанса токов опираясь на полученную осциллограмму.

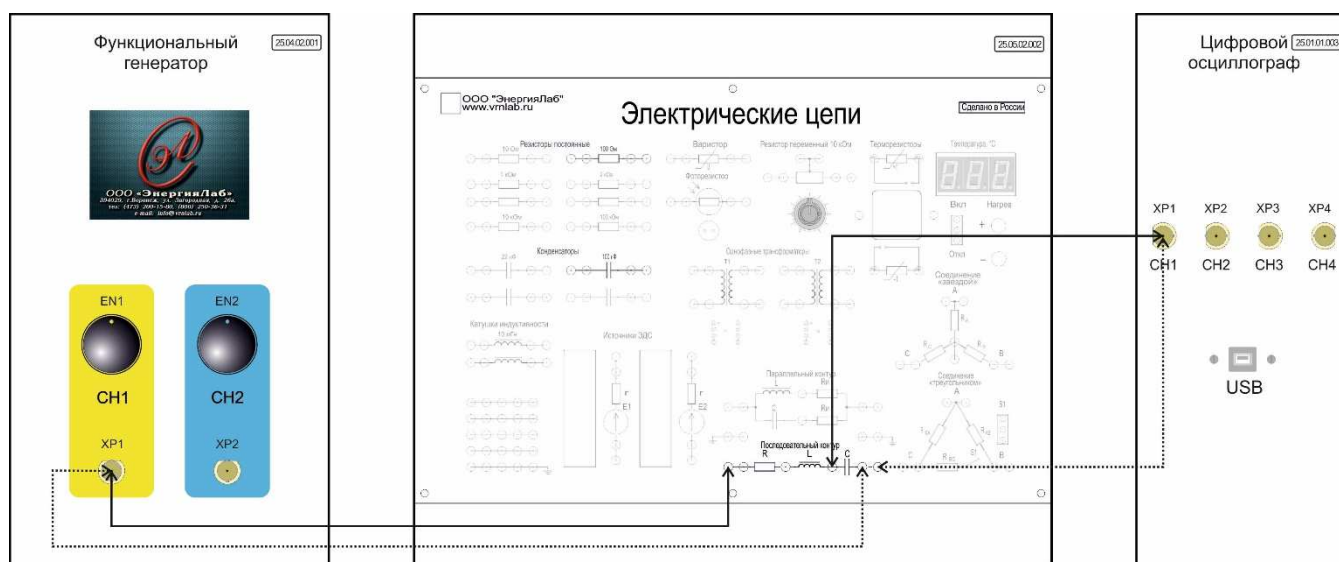
18. Составьте отчет, занесите в него полученную осциллограмму и описание явления резонанса токов.

## Лабораторная работа № 2.5.7.

**Частотные характеристики последовательного резонансного контура.**

**Цель работы:** исследовать частотные характеристики последовательного резонансного контура.

## Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 1 – Схема электрических соединений

## Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.

8. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

Форма сигнала – синус;

Частота – 100 Гц;

Амплитуда – 5 В.

9. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.

10. Изменяя частоту выходного сигнала модуля «Функциональный генератор» измеряйте амплитуду напряжения, данные записывайте в таблицу 1.

Таблица 1

Частота, Гц									
Амплитуда напряжения, В									

11. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

12. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

13. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

14. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.

15. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

16. По данным записанным в таблице 1 постройте амплитудно-частотную характеристику последовательного резонансного контура.

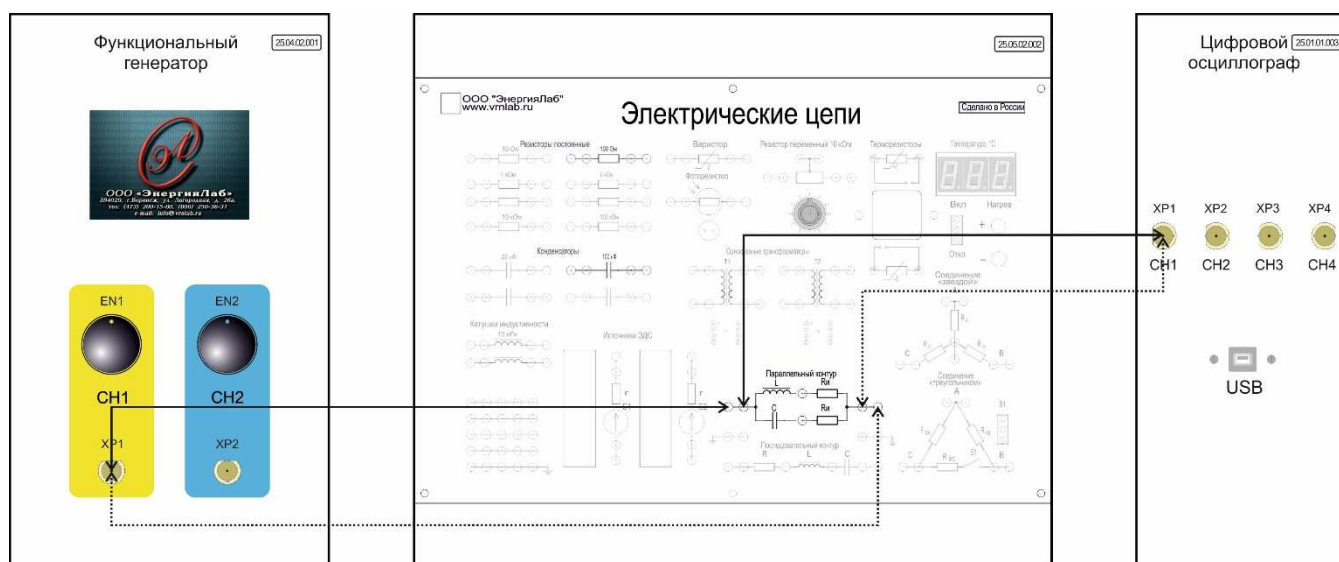
Составьте отчет, занесите в него полученную характеристику.

## Лабораторная работа № 2.5.8.

**Частотные характеристики параллельного резонансного контура.**

**Цель работы:** исследовать частотные характеристики параллельного резонансного контура.

## Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 1 – Схема электрических соединений

## Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.

8. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

Форма сигнала – синус;

Частота – 100 Гц;

Амплитуда – 5 В.

9. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.

10. Изменяя частоту выходного сигнала модуля «Функциональный генератор» измеряйте амплитуду напряжения, данные записывайте в таблицу 1.

Таблица 1

Частота, Гц									
Амплитуда напряжения, В									

11. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

12. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

13. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

14. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.

15. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

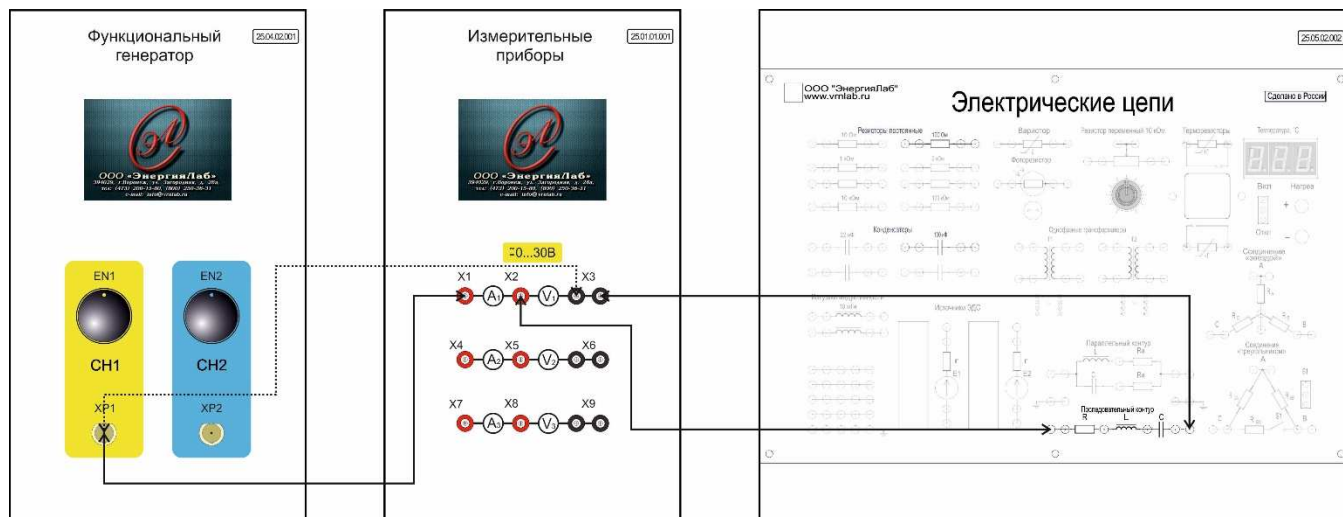
16. По данным записанным в таблице 1 постройте амплитудно-частотную характеристику параллельного резонансного контура.

17. Составьте отчет, занесите в него полученную характеристику.

## Лабораторная работа № 2.5.9. Мощности в цепи синусоидального тока.

**Цель работы:** исследовать мощности в цепи синусоидального тока.

Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 1 – Схема электрических соединений

Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите

клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:

Форма сигнала – синус;

Частота – 50 Гц;

Амплитуда – 5 В.

8. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.

9. Изменяя частоту выходного сигнала модуля «Функциональный генератор» зафиксируйте показания модуля «Измерительные приборы», данные записывайте в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение, В									
Ток, мА									

10. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.

11. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

12. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

13. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

14. По данным записанным в таблице 1 рассчитайте полную мощность, потребляемую в цепи.

$$P = U \cdot I$$

15. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты.

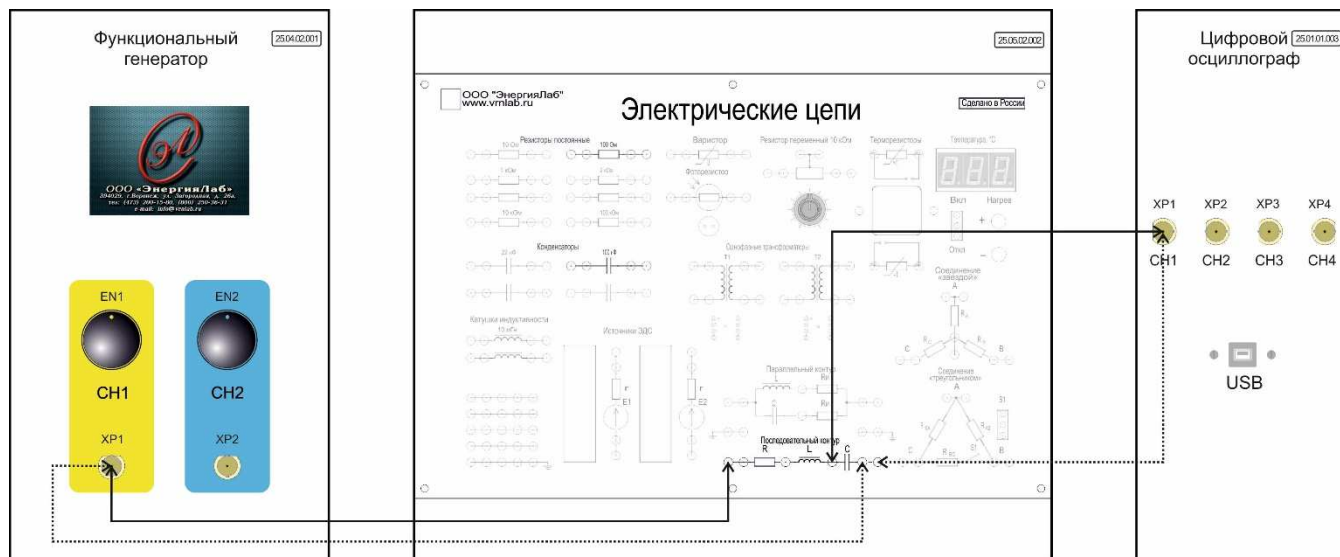


## Лабораторная работа № 2.7.

## Исследование резонансных явлений в электрических цепях.

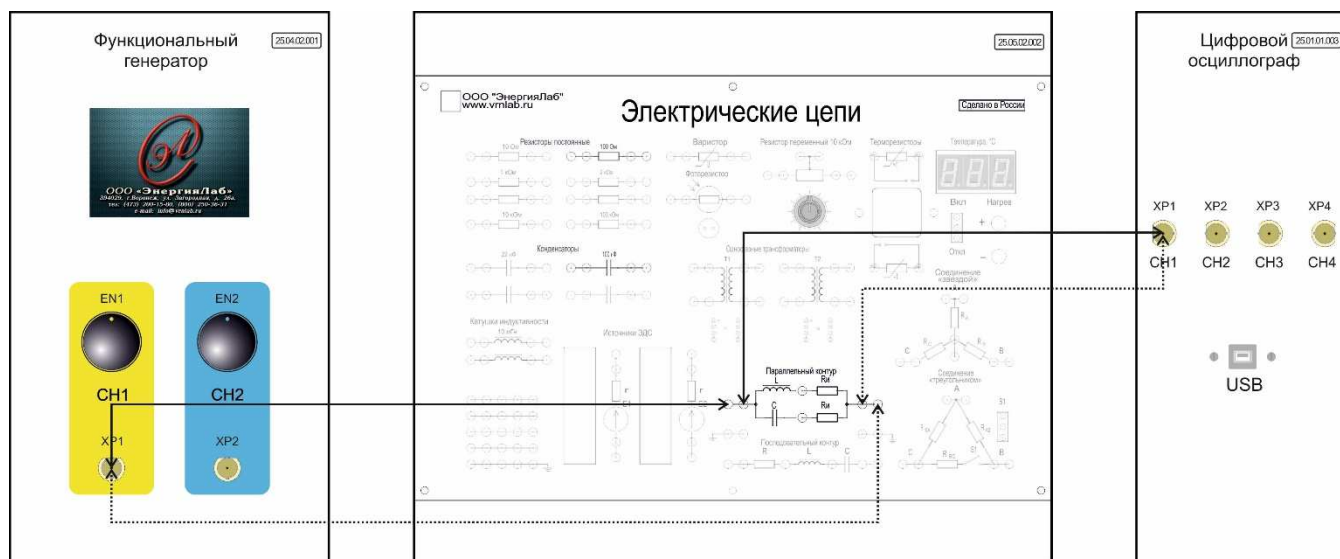
**Цель работы:** исследовать резонансные явления в электрических цепях.

## Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 1 – Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен провод черного цвета.

Рисунок 2 – Схема электрических соединений

## Порядок выполнения работы

## 1. Явление резонанса напряжений

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.
8. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:  
Форма сигнала – синус;  
Частота – 100 Гц;  
Амплитуда – 5 В.
9. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.
10. Изменяя частоту выходного сигнала модуля «Функциональный генератор» добейтесь резонанса напряжения.
11. Зарисуйте полученную осциллограмму.
12. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.
13. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

14. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.
15. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.
16. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

## **2. Явление резонанса токов**

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 2.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.
8. Установите следующие параметры выходного сигнала модуля «Функциональный генератор»:  
Форма сигнала – синус;  
Частота – 100 Гц;  
Амплитуда – 5 В.
9. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» во включенное состояние.
10. Изменяя частоту выходного сигнала модуля «Функциональный генератор» добейтесь резонанса токов.

11. Зарисуйте полученную осциллограмму.
  12. Переведите первый канал модуля «Функциональный генератор» в отключенное состояние.
  13. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.
  14. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.
  15. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.
  16. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.
- 3. Опишите исследованные явления резонанса опираясь на полученные осциллограммы.**
- 4. Составьте отчет, занесите в него полученные осциллограммы и описания резонансных явлений.**

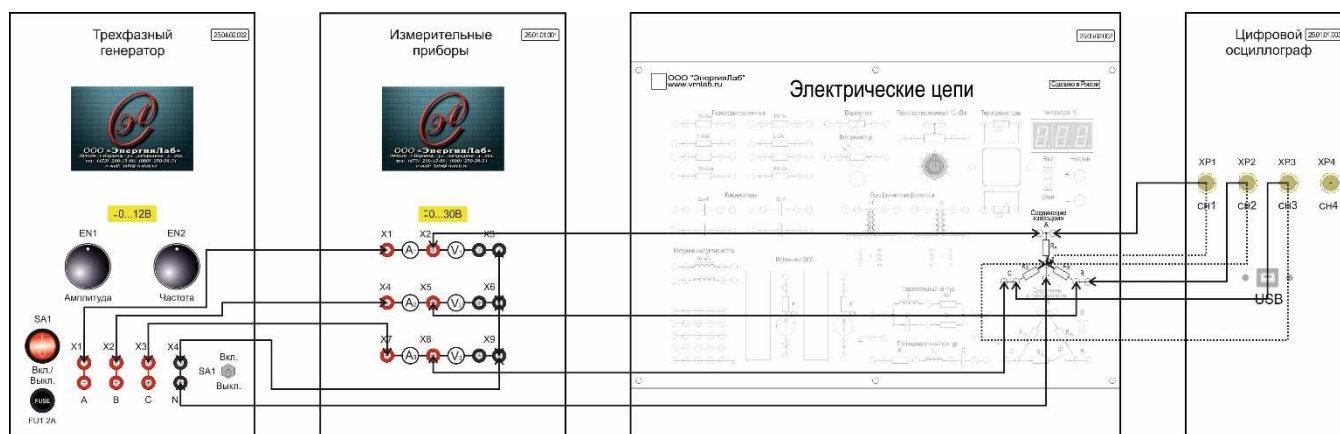
## 2. Методические указания к лабораторным работам по трехфазным электрическим цепям

Лабораторная работа № 3.1. и 3.2.

### Трехфазные цепи синусоидального тока. Напряжения и токи в трехфазной цепи.

**Цель работы:** исследования напряжений и токов в трехфазной цепи. Ознакомиться с методикой экспериментального исследования напряжений и токов в трехфазной цепи.

#### Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен проводник черного цвета.

Рисунок 1 – Схема электрических соединений

#### Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений, а также описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.

8. Включите модуль «Трехфазный генератор»: переведите клавишный переключатель SA1 в положение Вкл.

Установите следующие параметры выходного напряжения модуля «Трехфазный генератор»:

Частота – 50 Гц;

Амплитуда – 10 В.

9. Переведите тумблер SA1 модуля «Трехфазный генератор» в положение Вкл.

10. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение фазы А, В	
Ток фазы А, мА	
Напряжение фазы В, В	
Ток фазы В, мА	
Напряжение фазы С, В	
Ток фазы С, мА	

11. Изучите полученную осциллограмму. Зарисуйте осциллограмму.

12. Переведите тумблер SA1 модуля «Трехфазный генератор» в положение Выкл.

13. Отключите модуль «Трехфазный генератор»: переведите клавишный переключатель SA1 в положение Выкл.

14. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

15. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

16. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.

17. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

18. Проанализируйте полученные результаты измерений и осциллограммы и сделайте выводы.

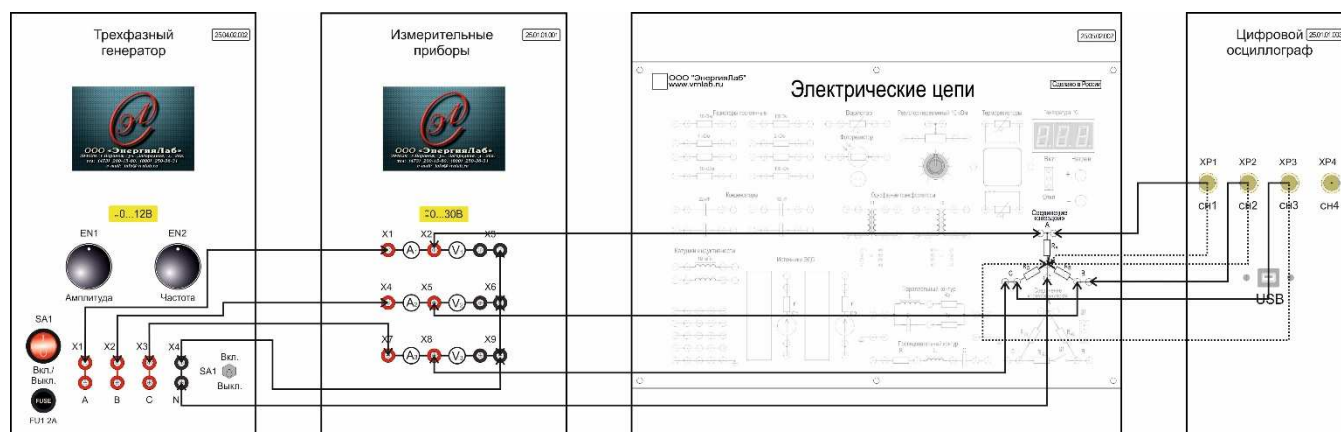
19. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты и выводы.

## Лабораторная работа № 3.2.

**Трехфазная нагрузка, соединенная по схеме «звезда».**

**Цель работы:** исследование трехфазной электрической цепи при соединении потребителей по схеме «звезда».

## Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен проводник черного цвета.

Рисунок 1

## Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений, а также описание лабораторного стенда.

2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.

3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.

4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.

5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.

8. Включите модуль «Трехфазный генератор»: переведите клавишный переключатель SA1 в положение Вкл.

Установите следующие параметры выходного напряжения модуля «Трехфазный генератор»:

Частота – 50 Гц;

Амплитуда – 10 В.

9. Переведите тумблер SA1 модуля «Трехфазный генератор» в положение Вкл.

10. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение фазы А, В	
Ток фазы А, мА	
Напряжение фазы В, В	
Ток фазы В, мА	
Напряжение фазы С, В	
Ток фазы С, мА	

11. Изучите полученную осциллограмму. Зарисуйте осциллограмму.

12. Переведите тумблер SA1 модуля «Трехфазный генератор» в положение Выкл.

13. Отключите модуль «Трехфазный генератор»: переведите клавишный переключатель SA1 в положение Выкл.

14. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

15. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

16. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.

17. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

18. Проанализируйте полученные результаты измерений и осциллограммы и сделайте выводы.

19. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты и выводы.

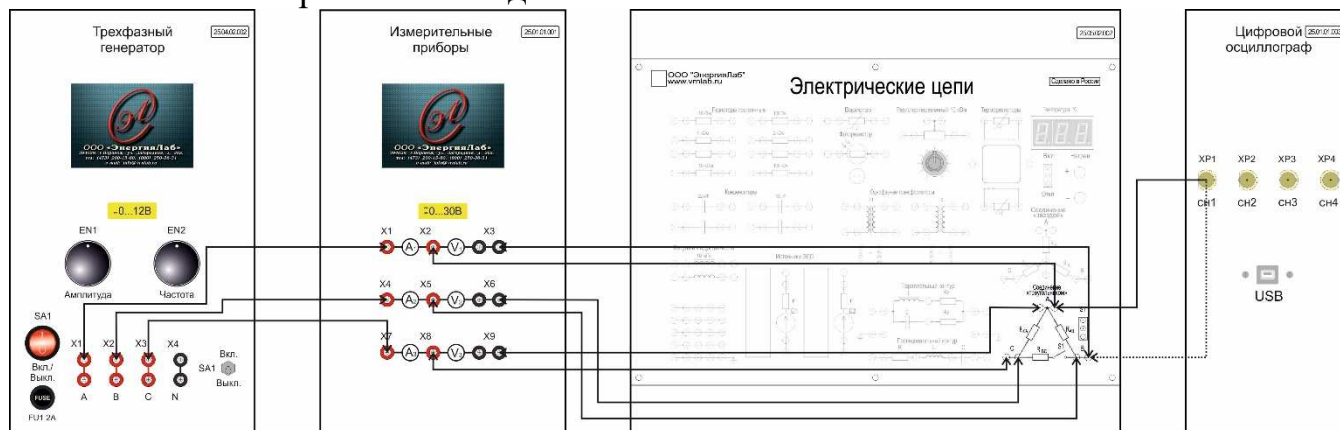


## Лабораторная работа № 3.3.

**Трехфазная нагрузка, соединенная по схеме «треугольник».**

**Цель работы:** исследование трехфазной электрической цепи при соединении потребителей по схеме «треугольник».

## Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен проводник черного цвета.

Рисунок 1

## Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений, а также описание лабораторного стенда.
  2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
  3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
  4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
  5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
  6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.
  7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.
  8. Включите модуль «Трехфазный генератор»: переведите клавишный переключатель SA1 в положение Вкл.
- Установите следующие параметры выходного напряжения модуля «Трехфазный генератор»:
- Частота – 50 Гц;
  - Амплитуда – 10 В.
9. Переведите тумблер SA1 модуля «Трехфазный генератор» в положение

Вкл.

10. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

$U_{AB}, В$	
$I_A, мА$	
$U_{BC}, В$	
$I_B, мА$	
$U_{CA}, В$	
$I_C, мА$	

11. Изучите полученную осциллограмму. Зарисуйте осциллограмму.

12. Переведите тумблер SA1 модуля «Трехфазный генератор» в положение Выкл.

13. Отключите модуль «Трехфазный генератор»: переведите клавишный переключатель SA1 в положение Выкл.

14. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

15. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

16. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.

17. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

18. Проанализируйте полученные результаты измерений и осциллограммы и сделайте выводы.

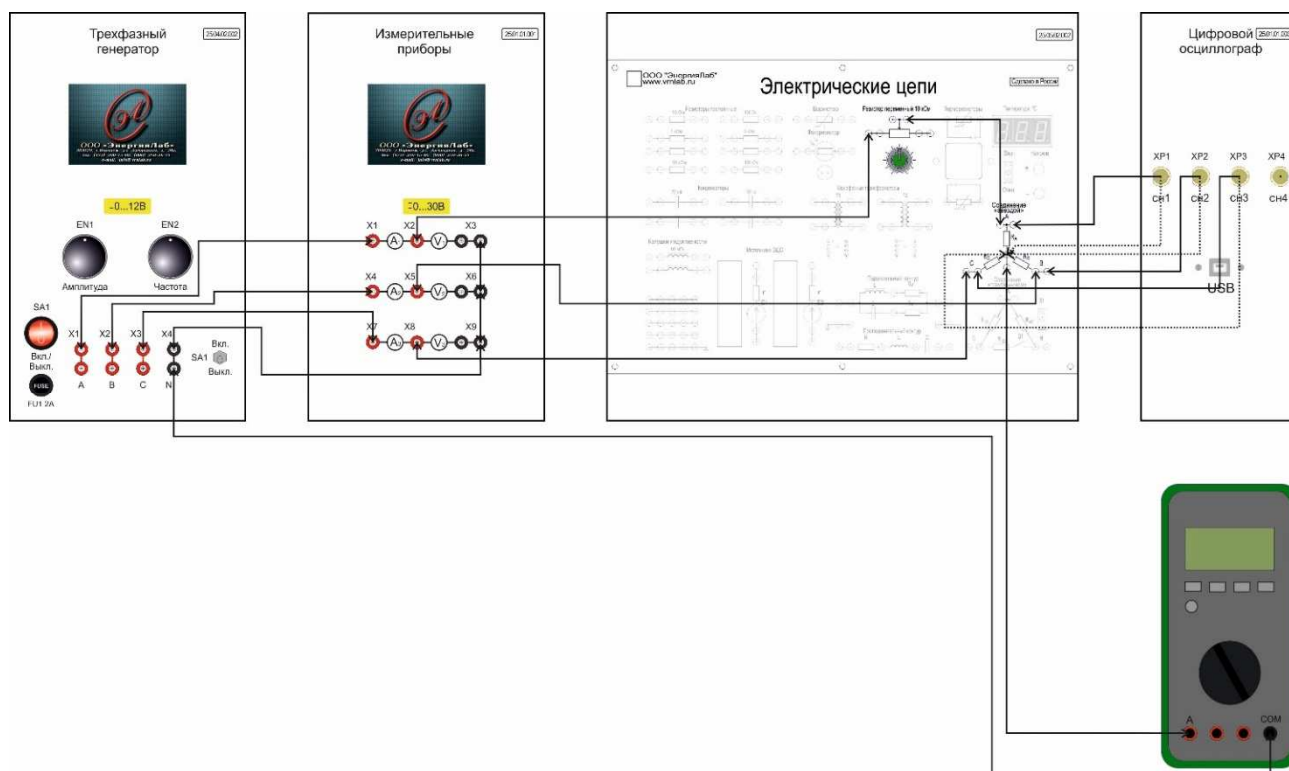
19. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты и выводы.

## Лабораторная работа № 3.4.

**Аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки по схеме «звезда».**

**Цель работы:** исследование аварийных режимов трёхфазной цепи при соединении нагрузки по схеме «звезда».

## Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен проводник черного цвета.

Рисунок 1

## Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений, а также описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.
4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.
5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.
6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

Включите мультиметр (режим измерения переменного тока).

7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.

8. Включите модуль «Трехфазный генератор»: переведите клавишный переключатель SA1 в положение Вкл.

Установите следующие параметры выходного напряжения модуля «Трехфазный генератор»:

Частота – 50 Гц;

Амплитуда – 10 В.

9. Переведите тумблер SA1 модуля «Трехфазный генератор» в положение Вкл.

10. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

Напряжение фазы А, В				
Ток фазы А, мА				
Напряжение фазы В, В				
Ток фазы В, мА				
Напряжение фазы С, В				
Ток фазы С, мА				
Ток нейтрали,				

11. Изучите полученную осциллограмму. Зарисуйте осциллограмму.

12. Повторите измерения для различных положений регулировочной рукоятки переменного резистора.

13. Переведите тумблер SA1 модуля «Трехфазный генератор» в положение Выкл.

14. Отключите модуль «Трехфазный генератор»: переведите клавишный переключатель SA1 в положение Выкл.

15. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

16. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

17. Отключите мультиметр.

18. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.

19. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

20. Проанализируйте полученные результаты измерений и осциллограммы и сделайте выводы.

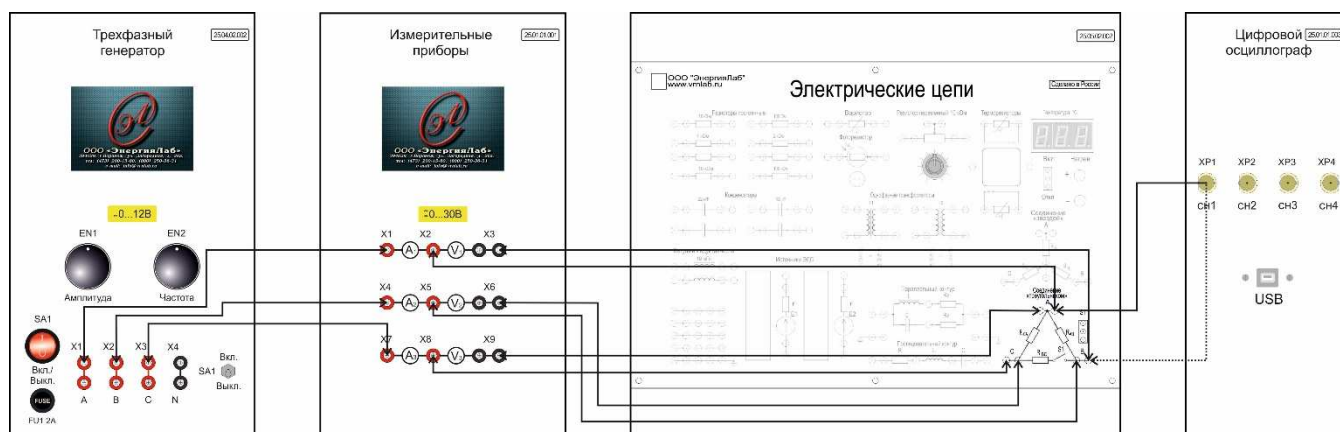
21. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты и выводы.

## Лабораторная работа № 3.5.

**Аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки по схеме «треугольник».**

**Цель работы:** исследование аварийных режимов трёхфазной цепи при соединении нагрузки по схеме «треугольник».

## Схема электрических соединений



Примечание: пунктирной линией обозначен проводник черного цвета.

Рисунок 1

## Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений, а также описание лабораторного стенда.

2. Убедитесь, что лабораторный стенд подключены к системе защитного заземления и сети электрического питания.

3. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания: автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» находится в положении Выкл.

4. Соберите схему электрических соединений, представленную на рисунке 1.

5. Включите питание лабораторного стенда: переведите автомат QF1 модуля «Однофазный источник питания» в положение Вкл. и нажмите кнопку Вкл.

6. Включите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Вкл.

7. Подключите осциллограф к компьютеру и запустите ПО.

8. Включите модуль «Трёхфазный генератор»: переведите клавишный переключатель SA1 в положение Вкл.

Установите следующие параметры выходного напряжения модуля «Трёхфазный генератор»:

Частота – 50 Гц;  
Амплитуда – 10 В.

9. Переведите тумблер SA1 модуля «Трехфазный генератор» в положение Вкл.

10. Зафиксируйте данные на экране модуля «Измерительные приборы» и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1

$U_{AB}, В$		
$I_A, мА$		
$U_{BC}, В$		
$I_B, мА$		
$U_{CA}, В$		
$I_C, мА$		

11. Изучите полученную осциллограмму. Зарисуйте осциллограмму.

12. Смоделируйте аварийный режим при помощи переключателя S1.

13. Повторите измерения, результаты занесите в таблицу 1.

14. Переведите тумблер SA1 модуля «Трехфазный генератор» в положение Выкл.

15. Отключите модуль «Трехфазный генератор»: переведите клавишный переключатель SA1 в положение Выкл.

16. Отключите модуль «Модуль связи (Источник питания)»: переведите клавишный выключатель SA1 в положение Выкл.

17. Отключите питание лабораторного стенда: нажмите кнопку Выкл. модуля «Однофазный источник питания», и переведите автомат QF1 в положение Выкл.

18. Отключите осциллограф и отсоедините его от компьютера.

19. Разберите схему и наведите порядок на рабочем месте.

20. Проанализируйте полученные результаты измерений и осциллограммы и сделайте выводы.

21. Составьте отчет, занесите в него полученные результаты и выводы.

## Литература

1. Савельев, Н. В. Курс общей физики: Электричество и магнетизм /Н. В. Савельев. – М.: Наука, 1982, Т. 2 – 356 с.
2. Кулик, Ю. А. Электрические машины /Ю. А. Кулик. – М.: Высшая школа, 1971 – 456 с.
3. Электротехника /Под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1983 – 480 с.
4. Электротехника и электроника: учеб. пособие для вузов /Конonenко В.В. и др.; под ред. В. В. Кононенко. – Ростов н/Д: Феникс, 2004 – 752 с.
5. Воденисов Д.Я., Александрова Н.Л. Основы электротехники и электроники: Учебное пособие. – Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, 2006.–107с.

Гуляев Валерий Генрихович  
Кондрашкин Олег Борисович  
Гулин Иван Анатольевич

## Электрические цепи

*Учебное пособие*

Редактор:  
А. А. Голодаева

Подписано в печать      Формат 60x90 1/16 Бумага газетная. Печать трафаретная.  
Уч. изд. л. 8,1. Усл. печ. л. 8,4. Тираж 300 экз. Заказ №

---

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.  
Полиграфический центр ННГАСУ, 603950, Н.Новгород, Ильинская, 65  
<http://www.nngasu.ru>, [srec@nngasu.ru](mailto:srec@nngasu.ru)