

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО  
И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
**ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТОЭ ч.1  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**

**Киров 1998**

УДК 621.3

Электрические цепи. Лабораторный практикум по ТОЭ ч.1 для студентов электротехнических специальностей. -Киров, изд. ВятГТУ,-1998.-58 с.

Методические указания предназначены для студентов дневного, вечернего и заочного обучения электротехнических специальностей, выполняющих лабораторные работы по ТОЭ ч.1.

В лабораторных работах №№ 1 - 7 экспериментально исследуются линейные электрические цепи постоянного, однофазного и трехфазного синусоидального токов, а также четырехполюсники и реактивные частотные фильтры.

В методических указаниях рассмотрено устройство универсального лабораторного стенда, приведены общие указания по выполнению работ, требования к оформлению отчета, некоторые справочные материалы. В описании к каждой лабораторной работе указана её цель, перечислено необходимое оборудование, даны предварительные теоретические сведения, рабочее задание, методические указания к выполнению отдельных пунктов рабочего задания и вопросы для самопроверки.

Работа подготовлена на кафедре электротехники и электроники Вятского Государственного технического университета.

Рецензент: доцент каф. ЭПС Соловьев С.Л.

## ВВЕДЕНИЕ

### В.1. Общие указания по выполнению лабораторных работ.

#### Требования по технике безопасности

Учебным планом по курсу ТОЭ предусмотрены лабораторные работы, цель которых - обеспечить закрепление студентами теоретического материала, приобретение ими практических навыков сборки электрических цепей, овладение техникой эксперимента и обработки, а также оценки результатов опыта.

Для проведения лабораторных работ учебная группа подразделяется преподавателем на бригады по 2 - 3 человека, в составе которых студенты под руководством преподавателя самостоятельно выполняют весь заданный преподавателем объём лабораторных работ.

До выполнения лабораторных работ студенты должны изучить соответствующий теоретический материал, ознакомиться с методикой проведения работы, чтобы отчетливо представлять её цель и содержание; оформить заготовку отчета. В начале занятия преподаватель проводит опрос студентов по предстоящей работе. Допущенные к работам студенты приступают к их выполнению.

Сборку цепи для проведения эксперимента следует проводить только при отключенном общем питании стенда и рекомендуется собирать сначала последовательную (токовую) цепь в направлении от одного зажима источника к другому, а затем подключать к ней параллельные ветви, обращая внимание на надежность контактов соединений. При сборке цепи необходимо стремиться к тому, чтобы схема соединений получилась наиболее простой и наглядной. В цепях постоянного тока важно соблюдать полярность при включении приборов.

После проверки самими студентами правильности собранной цепи она должна быть обязательно проверена преподавателем или лаборантом.

Перед включением собранной цепи ползунки реостатов и других регулирующих устройств необходимо установить в положения, соответствующие минимальным значениям токов и напряжений в цепи. У многопредельных измерительных приборов должны быть включены наибольшие пределы. Указательные стрелки измерительных приборов должны находиться на нулевых отметках шкал.

**Категорически запрещается включать электрическую цепь под напряжение без проверки схемы соединений руководителем работ и без его разрешения на её включение.**

В процессе выполнения работы все студенты обязаны строго соблюдать правила техники безопасности. Во время работы запрещается касаться токоведущих частей цепи, находящихся под напряжением, и оставлять включенную цепь без присмотра. Если возникает необходимость сделать какие-либо пересоединения в цепи, то её следует отключить от источника питания.

**При несчастном случае или при поражении током каждый студент должен оказать пострадавшему первую помощь и немедленно сообщить о случившемся преподавателю. Главным условием успеха оказания первой помощи является**

**быстрота освобождения пострадавшего от тока, что лучше всего сделать, отключив общий рубильник (питание стенда, лаборатории).**

В ходе экспериментов при регулировании токов и напряжений необходимо следить за показаниями приборов, не допуская их перегрузки (зашкаливания).

Результаты эксперимента следует показать руководителю работ. Без просмотра им результатов опыта и его согласия разбирать электрическую цепь не разрешается. После получения разрешения на разборку цепи её следует начинать с **отключения цепи** от источника питания.

По каждой лабораторной работе с каждым студентом при наличии отчета преподаватель проводит собеседование для оценки понимания студентом выполнения работы.

Лабораторные работы по электрическим цепям проводятся фронтальным методом на универсальных лабораторных стендах со сменными панелями.

## В.2. Описание универсального лабораторного стенда

Универсальный лабораторный стенд имеет 16 панелей, две из которых служат для питания исследуемых цепей постоянным или синусоидальным напряжениями, 4 панели содержат измерительные приборы (амперметры и вольтметры), на остальных сменных панелях расположены необходимые для различных лабораторных исследований элементы и устройства (резисторы, емкости, катушки индуктивности, реостаты, лампы и т.д.).

Лабораторный стенд включается в трехфазную сеть синусоидального тока частотой 50 Гц и напряжением  $U_n = 220$  В. Трехфазный источник питания соединен по схеме звезда с нейтральной точкой, о чем говорят соответствующие обозначения над клеммами (рис. В.2 - 1) на центральной панели стенда (А, В, С, 0).

В каждой фазе имеется предохранитель. Об исправности предохранителя сигнализируют лампочки, расположенные в верхней части панели питания.

Трехфазный источник питания ЭДС включается с помощью пакетного переключателя, вертикальное положение ручки которого соответствует положению «выключено».

На той же центральной панели выведены клеммы от двух источников постоянных ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . Включение этих источников осуществляется тумблерами, расположенными под клеммами источников ЭДС. Каждый источник постоянной ЭДС имеет устройство защиты от перегрузки по току. Сигнальная лампочка, расположенная над клеммами источника, гаснет при срабатывании устройства токовой защиты, при этом работа источника питания восстанавливается примерно через минуту после его отключения. Между источниками постоянной ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  расположены клеммы ещё одного источника постоянной ЭДС. Этот источник питается от трехфазной сети переменного тока через выпрямитель, поэтому для его включения необходимо повернуть в положение «включено» ручку пакетного переключателя, а затем тумблер под данным источником ЭДС.

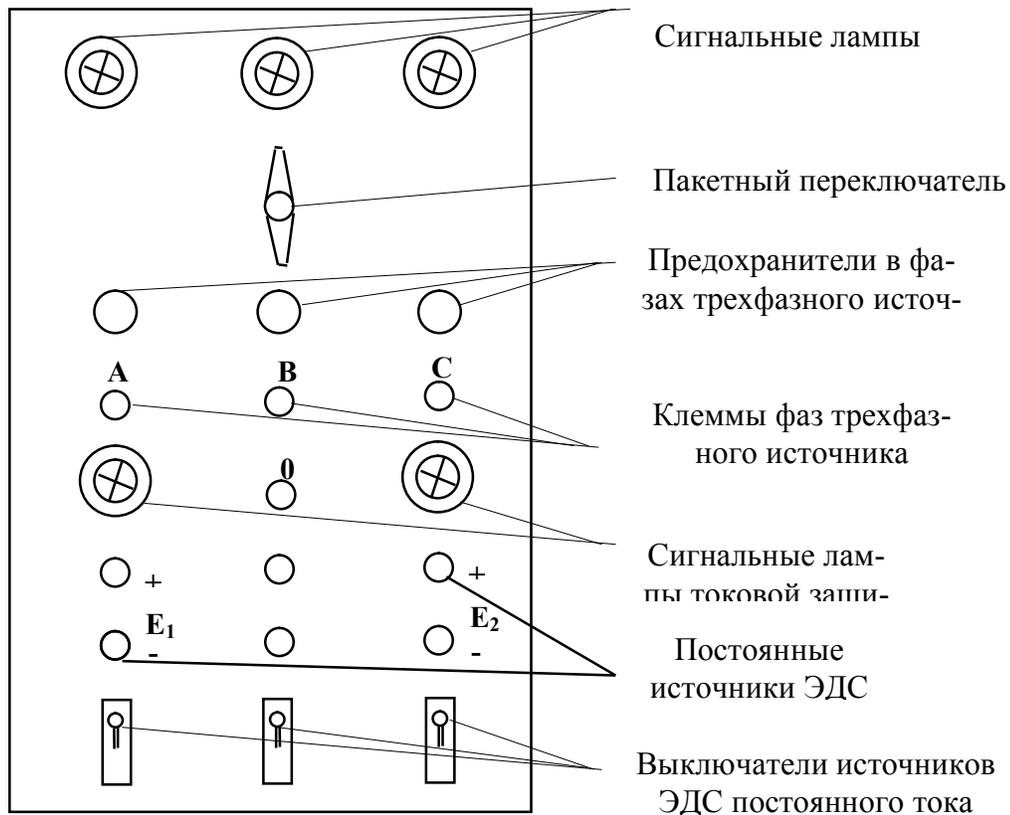


Рис. В.2 - 1. Расположение аппаратуры на панели питания лабораторного стенда

Регулируемый однофазный источник переменного напряжения можно получить с лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа), который смонтирован на центральной панели в нижнем ряду стенда. На панели выведены две выходные клеммы обмотки ЛАТРа, между которыми расположен тумблер, включающий питание автотрансформатора. Входные клеммы обмотки ЛАТРа подсоединены к одной из фаз трехфазного источника питания, поэтому для включения автотрансформатора необходимо повернуть ручку пакетного переключателя в положение «включено» и включить тумблер.

Напряжение на выходе ЛАТРа устанавливается ручкой регулировки, расположенной на той же панели, и контролируется по показаниям вольтметра, смонтированного на соседней панели и подключенного к выходным зажимам ЛАТРа.

## Лабораторная работа №1 РАЗВЕТВЛЁННАЯ ЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 1. Цель работы

Исследование простейших соотношений, непосредственно вытекающих из законов Кирхгофа и принципа наложения. Определение параметров эквивалентного генератора.

### 2. Предварительные сведения

#### 2.1. Источники энергии.

Ток  $I$  и напряжение  $U$  на зажимах реального источника энергии зависит от сопротивления приемника (нагрузки). Реальный источник энергии (рис.1-1) можно представить схемой замещения, изображенной на рис. 1-2, где  $E$  - э.д.с. источника, равная напряжению на его зажимах, когда  $I=0$  (режим холостого хода),  $R_{ex}$  - внутреннее сопротивление источника. При  $I \neq 0$ ,  $U < E$  из-за падения напряжения на  $R_{ex}$ .

В теории электрических цепей часто пользуются понятиями идеализированных источников - источника э.д.с. и источника тока.

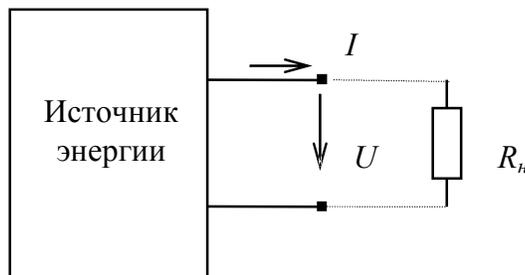


Рис. 1 - 1

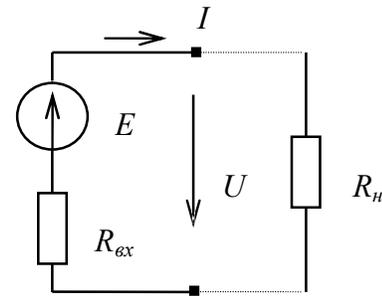


Рис. 1 - 2

Источник ЭДС – идеализированный источник, напряжение на зажимах которого неизменно при изменении сопротивления нагрузки, а внутреннее сопротивление равно нулю.

Источник тока – идеализированный источник, ток которого не изменяется при изменении сопротивления нагрузки, а внутреннее сопротивление бесконечно велико.

#### 2.2. Принцип наложения.

Принцип наложения заключается в том, что ток в какой-либо ветви цепи, имеющей несколько источников энергии, можно рассматривать как алгебраическую сумму токов, создаваемых в этой ветви каждым из источников, действующих независимо друг от друга.

В соответствии с принципом наложения ток в любой (например “к”-той) ветви можно выразить в виде суммы:

$$I_k = E_1 g_{k1} + E_2 g_{k2} + \dots + E_k g_{kk} + \dots + E_n g_{kn},$$

где  $E_1 g_{k1} = I_{k1}$  - составляющая тока в "к"-той ветви, обусловленная ЭДС  $E_1$ ,  $E_2 g_{k2} = I_{k2}$  - составляющая тока в "к"-той ветви, обусловленная ЭДС  $E_2$ ,  $E_k g_{kk} = I_{kk}$  - составляющая тока в "к" - той ветви, обусловленная источником этой же ветви, и так далее,  $g_{kk}$  - входная проводимость ветви "к",  $g_{k1}, g_{k2}, g_{kn}$  - взаимные проводимости.

Входные и взаимные проводимости можно определить как:

$$g_{k1} = \frac{I_{k1}}{E_1}, \quad g_{k2} = \frac{I_{k2}}{E_2}, \quad g_{kk} = \frac{I_{kk}}{E_k}.$$

Принцип наложения используется при расчете цепей по методу наложения. С этой целью в цепи вычисляются частичные токи, т.е. токи при действии только одного из источников, остальные источники исключаются, но в цепи остаются их внутренние сопротивления. Идеализированные источники ЭДС имеют внутреннее сопротивление равное нулю, а ветви, содержащие идеализированные источники тока, имеют бесконечно большое внутреннее сопротивление. Ток в любой ветви в исходной схеме рассчитывается как алгебраическая сумма частичных токов, например:

$$I_1 = \pm \sum_{k=1}^n I_{1k}; \text{ где } n - \text{ число источников в схеме.}$$

### 2.3. Потенциальная диаграмма.

Распределение потенциалов в контуре электрической цепи можно наглядно представить с помощью потенциальной диаграммы (рис.1 - 4). По оси абсцисс откладываются в масштабе сопротивления элементов в том порядке, в каком они следуют в цепи при обходе контура. Значения сопротивлений при этом суммируются, т.е. по оси абсцисс накапливается суммарное сопротивление контура. По оси ординат откладываются потенциалы соответствующих точек выбранного контура.

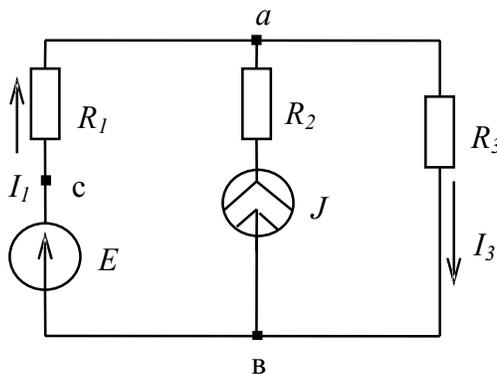


Рис. 1 - 3

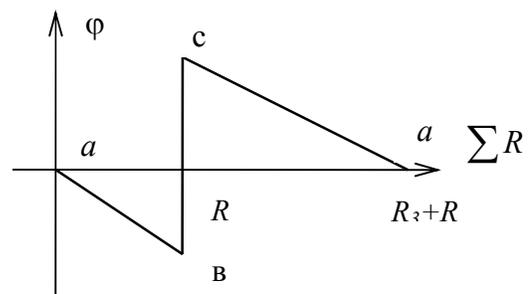


Рис. 1 - 4

Построим потенциальную диаграмму для контура цепи, включающего в себя элементы  $R_1, R_3, E$ . Схема цепи изображена на рис. 1 - 3.

Примем  $\varphi_a = 0$ , тогда  $\varphi_b = \varphi_a - I_3 R_3$ ,  $\varphi_c = \varphi_b + E$ ,  $\varphi_a = \varphi_c - I_1 R_1$ . Наклоны прямых "ав" и "са" на диаграмме (рис. 1 - 4) к оси абсцисс различны. Тангенсы этих углов наклона пропорциональны токам соответствующих участков цепи.

## 2.4. Эквивалентный генератор.

В любой электрической цепи можно выделить одну ветвь, а всю остальную часть цепи, независимо от её структуры и сложности, рассматривать как активный двухполюсник. К зажимам этого двухполюсника следует подсоединять выделенную ветвь. Активный двухполюсник имеет две характеристики: напряжение на разомкнутых зажимах двухполюсника (холостого хода)  $U_{xx}$  и входное сопротивление относительно этих зажимов  $R_{ex}$ .

Любой активный двухполюсник можно заменить эквивалентным генератором, ЭДС которого равна напряжению холостого хода, а внутреннее сопротивление - входному сопротивлению двухполюсника.

Ток в выделенной ветви:

$$I = \frac{U_{xx}}{R + R_{ex}}. \quad (1.1)$$

Если сопротивление выделенной ветви сделать равным нулю (режим короткого замыкания двухполюсника,  $R=0$ ), получим:

$$I_{кз} = \frac{U_{xx}}{R_{ex}}.$$

Отсюда следует простой метод опытного определения входного сопротивления двухполюсника:

$$R_{ex} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}. \quad (1.2)$$

Максимум мощности в выделенной ветви имеет место при  $R=R_{ex}$  и будет:

$$P_{max} = \frac{U_{xx}^2}{4R_{ex}}. \quad (1.3)$$

Рассмотрим расчет параметров эквивалентного генератора на примере цепи, схема которой изображена на рис. 1 - 3. Выделим ветвь с резистором  $R_3$ , а оставшуюся часть цепи заменим эквивалентным генератором, ЭДС которого равна  $U_{ав} = E - I_{1x}R_1$ . В режиме холостого хода  $I_{1x} = -J$ , и  $U_{авxx} = E + JR_1$ .

Для расчета  $R_{ex}$  ветвь с источником тока нужно разомкнуть, а участок с источником ЭДС - замкнуть накоротко (см. п.2.1). Тогда  $R_{ex} = R_1$ .

## 3. Лабораторное оборудование

В качестве источников энергии используются постоянные источники с ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , клеммы которых выведены на центральную панель. Резисторы и переключатели смонтированы на сменных панелях №№ 1,10. Приборы для измерения тока и напряжения установлены в левой части стенда.

## 4. Рабочее задание

### 4.1. Метод наложения.

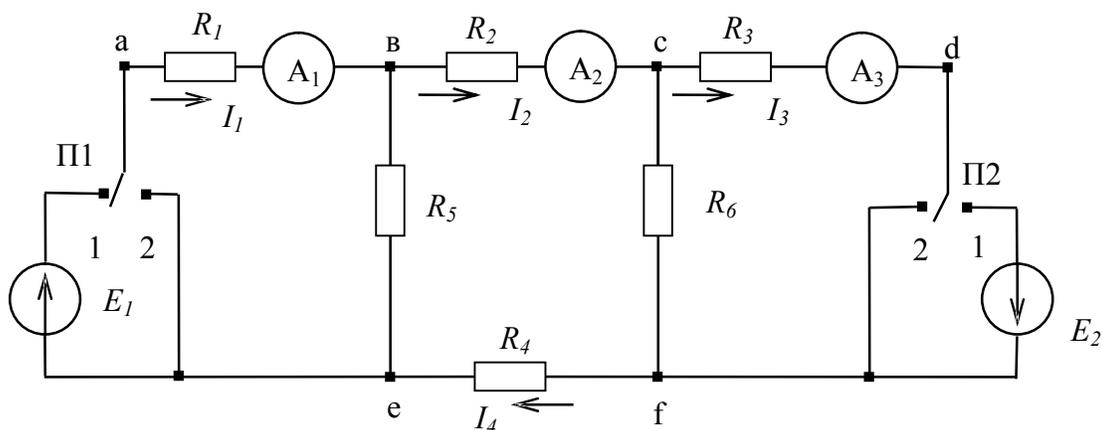


Рис. 1 - 5

4.1.1. Собрать цепь по рис.1-5.

4.1.2. Измерить токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  в следующих режимах:

- а)  $E_1$  - включена (переключатель П1 находится в положении 1),  $E_2$ - закорочена (переключатель П2 находится в положении 2);  
 б)  $E_2$ - включена,  $E_1$ - закорочена (противоположное положение переключателей).

4.1.3. Выбрать положительные направления токов в ветви с  $R_5$  и  $R_6$  и, используя первый закон Кирхгофа, рассчитать остальные токи цепи (рис. 1 - 5).

4.1.4. Используя метод наложения, рассчитать токи в ветвях от действия двух источников ЭДС одновременно.

4.1.5. Измерить токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  при работе цепи от двух источников (П1 и П2 находятся в положении 1).

Данные измерений и расчетов занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1.

Действуют источники	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$
	А	А	А	А	А	А
$E_1$						
$E_2$						
$E_1$ и $E_2$ (расчет)						
$E_1$ и $E_2$ (опыт)						

4.2. Потенциальная диаграмма.

4.2.1. Подключить оба источника (как в п. 4.1.5.).

4.2.2. Измерить напряжения на зажимах источников и записать. Измерить потенциалы всех точек, обозначенных на схеме рис. 1-5 (см. методические указания). Точка с нулевым потенциалом выбирается по таблице 4.2.

Таблица 4. 2.

№ варианта	1	2	3	4	5	6
Точка с нулевым потенциалом	а	в	с	d	f	е

1. Сопоставить значения напряжений на зажимах источников, измеренных в п. 4.2.2. с разностью потенциалов между точками их подключения.

2. По данным расчетов токов (п. п. 4.1.4) и измерений потенциалов точек (п. п. 4.2.2), найти сопротивления всех элементов цепи, воспользовавшись законом Ома.

3. Построить потенциальную диаграмму для контура а-в-с-d-f-e-а.

4.3. Эквивалентный генератор.

4.3.1. В цепи с двумя источниками (рис.1 - 5) найти параметры эквивалентного генератора относительно точек, заданных в таблице 4. 3.

Таблица 4. 3.

№ варианта	1	2	3	4	5	6
Точки	а-в	в-с	с-d	e-f	в-е	с-f

4.3.2. Провести опыты холостого хода и короткого замыкания в выделенной ветви, для чего вместо резистора поочередно подключать вольтметр и амперметр. По измеренным данным рассчитать входное сопротивление по формуле (1.2).

Сравнить полученное значение  $R_{вх}$  и  $U_{хх}$  со значениями, рассчитанными согласно п. 4.3.1.

4.3.3. Рассчитать ток в заданной ветви по формуле (1.1). Сопоставить полученный результат с током соответствующей ветви, полученным в п. 4.1.5.

4.3.4. Рассчитать максимальную мощность, которая может потребляться заданной ветвью, по формуле (1.3).

## 5. Методические указания

Знак измеренного потенциала определяется по полярности вольтметра, а именно: если “-“ вольтметра соединен с точкой, потенциал которой приняли равным нулю, а “+” вольтметра подключен к точке, потенциал которой измеряется, то потенциал будет положительным. При обратном включении вольтметра потенциал следует записать со знаком “-“.

## 6. Вопросы для самопроверки

6.1. В чём сущность принципа наложения?

6.2. Как учитываются внутренние сопротивления источников при расчёте цепей методом наложения?

6.3. Составьте уравнения по законам Кирхгофа для цепи, схема которой изображена на рис. 1 - 3.

6.4. Запишите в общем виде баланс мощностей для цепи, схема которой приведена на рис.1 - 3.

6.5. Что понимают под активным двухполюсником? Нарисуйте схему замещения.

6.6. Как определить входное сопротивление двухполюсника?

6.7. При каком сопротивлении нагрузки в нем потребляется максимальная мощность? Как ее вычислить?

## Лабораторная работа N2 РАЗВЕТВЛЁННЫЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

### 1. Цель работы

Исследование свойств цепи синусоидального тока и расчет её параметров с помощью векторных и топографических диаграмм.

### 2. Предварительные сведения

При расчете цепей синусоидального тока применяется символический (комплексный) метод. Метод называется символическим потому, что ток и напряжение заменяют их комплексными изображениями. Из математики известно, что если имеется показательная функция  $I_m e^{j\omega t}$ , где  $j$  - мнимая единица ( $j^2 = -1$ ), то по формуле Эйлера:

$$I_m e^{j\omega t} = I_m \cos \omega t + j I_m \sin \omega t,$$

т.е. синусоидальный ток  $i$ , может быть представлен как мнимая часть некоторой комплексной функции. Если мгновенное значение тока записано следующим образом:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i),$$

то соответствующая ему комплексная функция запишется в виде:

$$I_m e^{j(\omega t + \varphi_i)} = I_m e^{j\omega t} \cdot e^{j\varphi_i}.$$

Величина  $I_m e^{j\varphi_i} = \dot{I}_m$  называется комплексной амплитудой тока. При расчете токов используется комплексное действующее значение тока

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\varphi_i} = I e^{j\varphi_i}.$$

Аналогично можно представить в комплексном виде любое синусоидальное напряжение:  $\dot{U} = U e^{j\psi}$ . Любое комплексное число можно изобразить на комплексной плоскости в виде вектора (рис. 2 - 1).

Положительные углы на комплексной плоскости отсчитываются от оси +1 против часовой стрелки, а отрицательные - по часовой стрелке. Комплексное число мо-

жет быть представлено в алгебраической форме записи, т.е. в виде составляющих вектора по осям (рис.2 - 1)

$$\dot{I} = Ie^{j\varphi_i} = I_a + jI_p = \underbrace{I \cos \varphi_i}_{I_a} + \underbrace{jI \sin \varphi_i}_{I_p}.$$

При известном комплексном действующем значении тока  $\dot{I} = Ie^{j\varphi_i}$  его мгновенное значение записывается так:

$$i = I\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_i).$$

Следует учитывать, что токи и напряжения на различных участках электрической цепи различаются по фазе. Наглядное представление о фазовых соотношениях даёт векторная диаграмма токов и напряжений.

При синусоидальном токе  $i = I_m \sin \omega t$  мгновенное значение напряжения на резисторе  $u_r = i \cdot r = rI_m \sin \omega t$  совпадает по фазе с током. В комплексной форме записи

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}}; \quad \dot{U}_r = r \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = r\dot{I}. \quad (2.1)$$

Векторная диаграмма напряжения на резисторе и тока в нем изображена на рис.2-2.

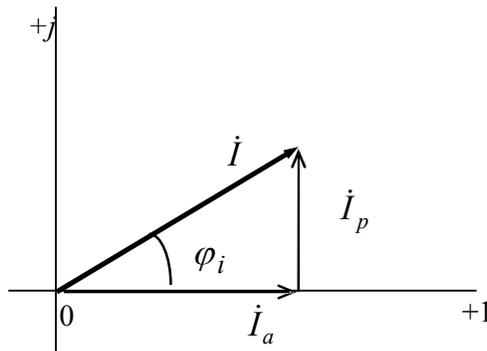


Рис. 2 - 1

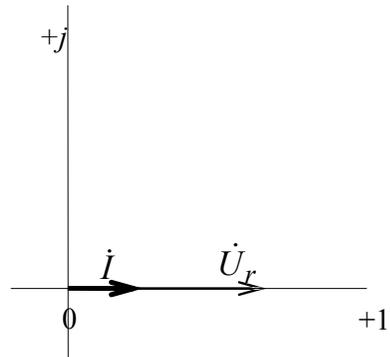


Рис. 2 - 2

Напряжение на индуктивном элементе

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

опережает по фазе ток на  $90^\circ$ . Комплекс действующего значения напряжения на индуктивности:

$$\dot{U}_L = \omega L \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} e^{j90^\circ} = j\omega L \cdot \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = j\omega L \dot{I}. \quad (2.2)$$

Величину  $\omega L = x_L$  называют индуктивным сопротивлением, а величину  $\underline{Z}_L = jx_L$  называют комплексным индуктивным сопротивлением элемента. Векторная диаграмма для идеальной индуктивной катушки изображена на рис. 2 - 3.

Напряжение на конденсаторе отстаёт по фазе от тока на  $90^\circ$ :

$$u_C = \frac{1}{C} \int idt = -\frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - 90^\circ).$$

Эта же запись в комплексной форме:

$$\dot{U}_C = \frac{1}{\omega C} \cdot \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} e^{-j90^\circ} = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I} \quad (2.3)$$

Величина  $\frac{1}{\omega C} = x_C$  - емкостное сопротивление, а  $\underline{Z}_C = -jx_C$  - комплексное ёмкостное сопротивление.

Векторная диаграмма для конденсатора представлена на рис. 2 - 4.

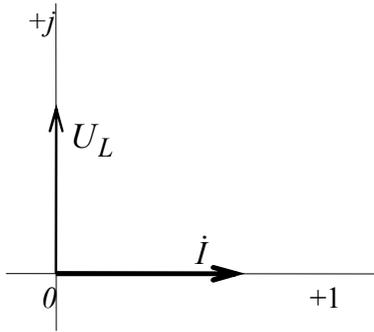


Рис. 2 - 3

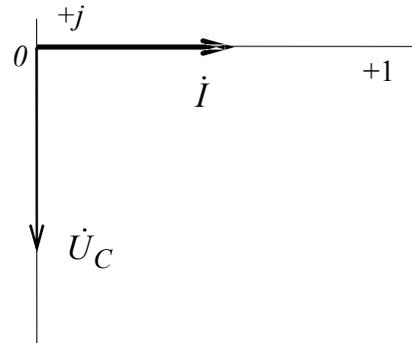


Рис. 2 - 4

Рассмотрим построение векторной диаграммы сложной цепи на примере схемы рис. 2 - 5.

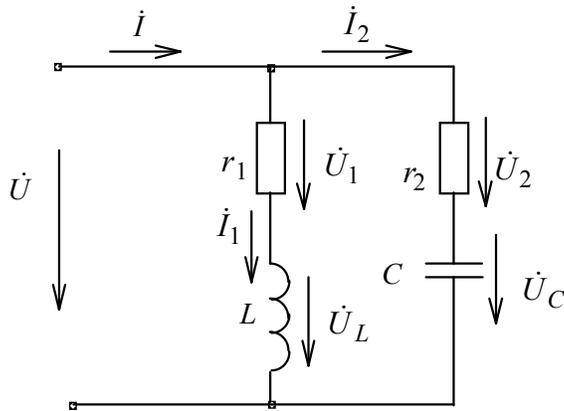


Рис. 2 - 5

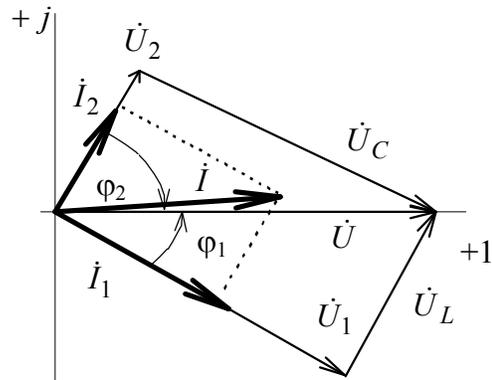


Рис. 2 - 6

Построение векторной диаграммы (рис. 2 - 6) удобнее начинать с построения вектора  $\dot{U}$ , общего для обеих ветвей. В ветви с активно-индуктивным сопротивлением ток  $\dot{I}_1$  отстаёт по фазе от напряжения  $\dot{U}$  на угол  $\varphi_1$ , а в ветви с активно-ёмкостным сопротивлением ток  $\dot{I}_2$  опережает напряжение на угол  $\varphi_2$ . Векторная сумма токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  равна общему току  $\dot{I}$ .

Вектор напряжения  $\dot{U}_1$  на активном сопротивлении катушки  $r_1$  построим по направлению тока  $\dot{I}_1$ . Значение напряжения можно определить по формуле (2.1). Из конца этого вектора под углом  $+90^\circ$  к току  $\dot{I}_1$  построим вектор напряжения на индуктивном сопротивлении, значение которого определится по формуле (2.2). Векторная сумма  $\dot{U}_1 + \dot{U}_L = \dot{U}$ .

Аналогично выполняется построение для второй ветви.

Вектор напряжения  $\dot{U}_2$  на резисторе  $r_2$  совпадает по направлению с вектором тока  $\dot{I}_2$ . Вектор напряжения на ёмкостном сопротивлении на  $90^\circ$  отстаёт от тока  $\dot{I}_2$  и построен из конца вектора  $\dot{U}_2$ . Значение напряжения  $\dot{U}_C$  можно вычислить по формуле (2.3).

Векторная сумма  $\dot{U}_2 + \dot{U}_C = \dot{U}$ .

Сопротивления приёмников можно рассчитать по закону Ома, если известны токи в ветвях и напряжения на отдельных элементах схемы. Из векторной диаграммы (рис. 2 - б) видно, что напряжения на элементах связаны следующими уравнениями:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_L^2} = \sqrt{I_1^2(r_1^2 + x_L^2)} = I_1\sqrt{r_1^2 + x_L^2}$$

$$U = \sqrt{U_2^2 + U_C^2} = \sqrt{I_2^2(r_2^2 + x_C^2)} = I_2\sqrt{r_2^2 + x_C^2}.$$

По закону Ома:

$$Z_1 = \frac{U}{I_1} = \sqrt{r_1^2 + x_L^2} - \text{полное сопротивление первой ветви,}$$

$$Z_2 = \frac{U}{I_2} = \sqrt{r_2^2 + x_C^2} - \text{полное сопротивление второй ветви.}$$

Разность фаз между напряжением и током в каждой ветви можно рассчитать так:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{U_L}{U_1} = \frac{x_L}{r_1}; \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{U_C}{U_2} = \frac{x_C}{r_2}.$$

При анализе цепей синусоидального тока часто пользуются топографической диаграммой. Она представляет собой векторную диаграмму токов и совмещённую с ней диаграмму комплексных потенциалов цепи, построенных на комплексной плоскости. Каждой точке схемы соответствует определённая точка на комплексной плоскости.

Рассмотрим построение топографической диаграммы для схемы на рис. 2 - 7.

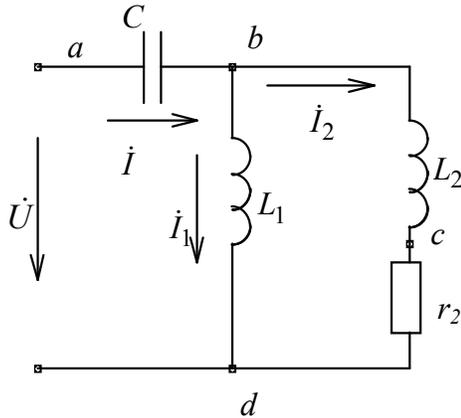


Рис. 2 - 7

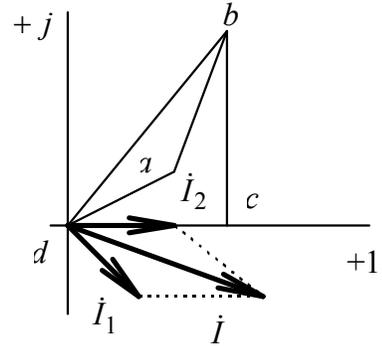


Рис. 2 - 8

Построение топографической диаграммы начинаем с построения векторной диаграммы токов. Для этого зададимся направлением одного из токов в схеме, например, направим ток  $\dot{I}_2$  по оси +1. Условимся считать комплексный потенциал точки “d” равным 0. Тогда положение точки “c” можно определить в соответствии с уравнением

$$\dot{\varphi}_c = \dot{\varphi}_d + \dot{I}_2 r_2,$$

т.е. в выбранном масштабе напряжения отложить отрезок равный напряжению  $\dot{I}_2 r_2$  по направлению вектора тока  $\dot{I}_2$ . Далее определяем положение точки “b”

$$\dot{\varphi}_b = \dot{\varphi}_c + \dot{I}_2 j \omega L_2.$$

Точка “b” на комплексной плоскости находится следующим образом: из конца отрезка  $\dot{I}_2 r_2$  (т.е. из точки “c”) под углом  $+90^\circ$  к вектору тока  $\dot{I}_2$  откладываем отрезок, по длине соответствующий  $\dot{I}_2 \omega L_2$  (напряжение на индуктивном сопротивлении опережает по фазе ток на  $90^\circ$ ). Сумма векторов  $\dot{I}_2 r_2$  и  $\dot{I}_2 j \omega L_2$  равна вектору напряжения  $\dot{U}_{bd}$ . Вектор тока  $\dot{I}_1$  нужно построить под углом  $-90^\circ$  к направлению  $\dot{U}_{bd}$ , т.к. ток в индуктивном сопротивлении отстаёт по фазе от напряжения на  $90^\circ$ . Векторная сумма токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  равна вектору тока  $\dot{I}$ . Потенциал точки “a”:

$$\dot{\varphi}_a = \dot{\varphi}_b + \dot{I} \left( -j \frac{1}{\omega C} \right)$$

Для нахождения точки “a” необходимо отложить из точки “b” вектор напряжения  $\dot{I}(-jx_c)$  под углом  $-90^\circ$  к вектору тока  $\dot{I}$ . Вектор напряжения  $\dot{U}_{ad}$  равен напряжению на входе цепи  $U$ .

### 3. Лабораторное оборудование

Работа выполняется на универсальном стенде со сменными панелями №№ 2,3,9,10. Источником питания служит сеть синусоидального напряжения, регулирование которого осуществляется с помощью ЛАТРа.

В качестве приёмников энергии в работе применяются резисторы (реостаты), конденсаторная батарея, индуктивная катушка с ферромагнитным сердечником, имеющая эквивалентное реактивное и активное сопротивления. Необходимые измерительные приборы установлены на стенде.

### 4. Рабочее задание

#### 4.1. Определение параметров приёмников.

В лаборатории выполняются пункты 4.1.1, 4.1.2, 4.2.1 и 4.2.2.

4.1.1. Вычертить схему цепи в соответствии с номером варианта, используя схему, изображенную на рис. 2 - 9 и таблицу 4.1.

Таблица 4.1.

№ варианта	1	2	3	4	5	6
$r$			0	0	0	0
$x$	0		0		0	
$r_1$	$\infty$	$\infty$			$\infty$	$\infty$
$r_3$	0		0		0	
$x_3$		0		0		0

4.1.2. Установить значение напряжения  $U$  на входе цепи по указанию преподавателя (см. п. 5.2 методических указаний). Измерить напряжения на участках цепи и токи в ветвях. Результаты измерений занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2.

Эксперимент									
$U$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{cd}$	$U_{cf}$	$U_{fd}$	$I$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
Размерности									

4.1.3. По измеренным данным построить векторные диаграммы токов и напряжений (см. п. 5.2 методических указаний).

Таблица 4.3.

Расчет							
$r$	$r_1$	$r_3$	$x_3$	$r_k$	$x_k$	$L_k$	$x$
Размерности							

4.1.4. Определить по векторной диаграмме угол сдвига фаз между входными током и напряжением. Приняв начальную фазу напряжения равной 0, записать мгновенное значение тока  $i$ , а также комплексное действующее значение тока.

4.1.5. Определить по векторной диаграмме активную и реактивную составляющие напряжения на катушке ( $U_a$  и  $U_L$ ). По известным напряжениям на элементах схемы и токам в ветвях рассчитать параметры приёмников. Результаты расчёта занести в таблицу 4.3.

4.1.6. По известным параметрам приёмников рассчитать полные сопротивления ветвей, а также разности фаз между напряжением  $\dot{U}_{cd}$  и токами  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ .

4.2. Топографическая диаграмма.

4.2.1. Используя рис. 2-9, вычертить схему в соответствии с номером варианта и данными, приведенными в таблице 4.4.

Таблица 4.4.

№ варианта	1	2	3	4	5	6
r	0			0		
$r_1$			$\infty$		$\infty$	$\infty$
$r_3$	$\infty$	0			$\infty$	0
x		0	0	0		0

4.2.2. Собрать цепь, установить в произвольный режим. Измерить токи и напряжения в ветвях, необходимые для построения топографической диаграммы (см. п. 5.1 методических указаний). Данные измерений занести в таблицу 4.5.

Таблица 4.5.

I	$I_1$	$I_2$	$I_3$	U	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ac}$	$U_{cf}$	$U_{fd}$	$U_{cd}$	$U_{bf}$	$U_{af}$	$U_{bd}$
A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B

4.2.3. По опытным данным построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

5. Методические указания

5.1. Вначале, не записывая показаний приборов, следует так экспериментально подобрать параметры цепи, чтобы возможно было приборами, установленными на стенде, измерить все необходимые токи и напряжения. Для уменьшения погрешно-

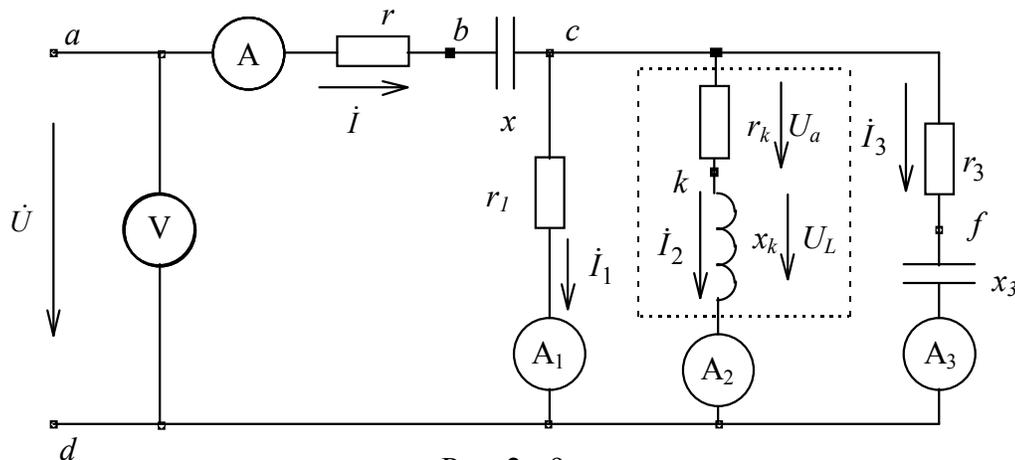


Рис. 2 - 9

сти измерений желательно добиться такого режима работы в цепи, чтобы все напряжения, по возможности, измерялись на одном и том же пределе вольтметра.

5.2. Построение векторной диаграммы проще всего начать с построения вектора  $\dot{U}_{cd}$ , общего для параллельных ветвей. (Рис. 2 - 10).

Вектор тока  $\dot{I}_1$  совпадает с  $\dot{U}_{cd}$ , т.к. это ток в резисторе. Напряжение  $\dot{U}_{cd} = \dot{U}_{cf} + \dot{U}_{fd}$ ; при этом ток  $\dot{I}_3$  и совпадающий с ним вектор  $\dot{U}_{cf}$  будут опережать по фазе напряжение  $\dot{U}_{cd}$ . Далее из начала и конца вектора  $\dot{U}_{cd}$  следует провести дуги, радиусы которых в выбранном масштабе напряжения  $m_U$  равны  $\dot{U}_{cf}$  и  $\dot{U}_{fd}$ . Точка пересечения этих дуг определит положение векторов  $\dot{U}_{cf}$  и  $\dot{U}_{fd}$ .

По первому закону Кирхгофа

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_3 + \dot{I}_2.$$

Сначала следует построить сумму векторов  $\dot{I}_1 + \dot{I}_3 = \dot{I}_{13}$ ; тогда  $\dot{I} = \dot{I}_{13} + \dot{I}_2$ . Построение векторов токов  $\dot{I}$  и  $\dot{I}_2$

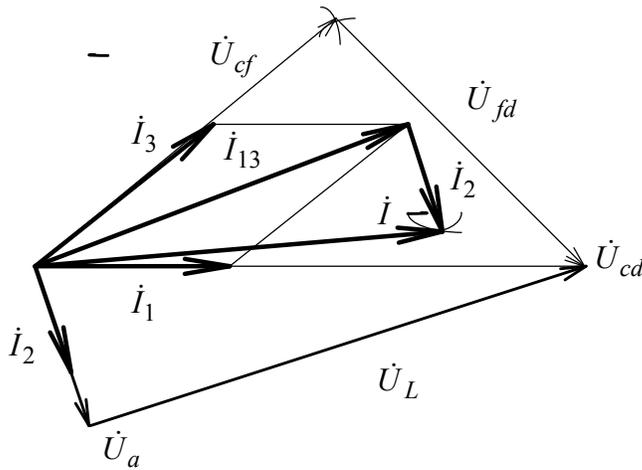


Рис. 2 - 10

представляет собой построение треугольника по трём известным сторонам, при этом вектор тока  $\dot{I}_2$  должен отставать по фазе от напряжения  $\dot{U}_{cd}$ .

Далее следует построить из начала и конца вектора  $\dot{I}_{13}$  дуги, радиусы которых в выбранном масштабе тока  $m_i$  равны  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}$ . Вектор  $\dot{I}_2$  следует перенести в начало координат. Проекция напряжения на катушке на направление тока  $\dot{I}_2$  будет равна активной составляющей напряжения  $\dot{U}_a$ , а напряжение  $\dot{U}_L$  на  $90^\circ$  опережает ток  $\dot{I}_2$ .

тока  $\dot{I}_2$  будет равна активной составляющей напряжения  $\dot{U}_a$ , а напряжение  $\dot{U}_L$  на  $90^\circ$  опережает ток  $\dot{I}_2$ .

## 6. Вопросы для самопроверки

6.1. Запишите полное сопротивление ветви, состоящей из последовательно соединённых сопротивления  $r$ , индуктивности  $L$  и ёмкости  $C$ ? Постройте векторную диаграмму для такой цепи для случая  $x_C > x_L$ .

6.2. Запишите комплексное действующее значение напряжения, если мгновенное его значение  $u = 200(\sin 100t - 60^\circ)$  В?

6.3. Вычислите мгновенное значение тока в индуктивности  $L=1$  Гн, если к его зажимам приложено напряжение из п.6.2?

6.4. Запишите мгновенное значение тока в ёмкости  $C=20$  мкФ, если к его зажимам приложено напряжение из п.6.2?

6.5. Как рассчитать разность фаз между током в ветви, состоящей из последовательно соединённых  $r$ ,  $L$  и  $C$ , и напряжением, приложенным к данной ветви?

6.6. Найдите действующее значение напряжения на входе схемы, составленной из последовательно соединённых  $r=10$  Ом,  $x_L = 20$  Ом,  $x_C = 10$  Ом, если действующее значение напряжения на ёмкости  $U_C = 100$  В?

6.7. Постройте векторную диаграмму для схемы, состоящей из последовательно соединённых резистора  $r$ , индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$ , если  $x_L > x_C$ .

6.8. Индуктивная катушка имеет параметры:  $r=3$  Ом и  $L= 10$  мГн. Определите мгновенное значение напряжения на катушке, если протекающий в ней ток изменяется по закону  $i = 2\sqrt{2} \sin 300t$  А. Запишите комплексное действующее значение этого напряжения. Постройте векторную диаграмму.

6.9. Цепь состоит из последовательно соединённых резистора  $r=5$  Ом и конденсатора  $C=100$  мкФ. Определите мгновенное значение напряжения на входе цепи, если протекающий ток изменяется по закону  $i = 3\sqrt{2} \sin 2000t$  А. Запишите амплитуду и действующее значение этого напряжения. Постройте векторную диаграмму цепи.

### Лабораторная работа N 3

## РЕЗОНАНСНЫЕ РЕЖИМЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

#### 1. Цель работы

Изучить свойства последовательной и параллельной цепи синусоидального тока при изменении параметров, исследовать особенности резонансных режимов.

#### 2. Предварительные сведения

В цепи с резистором, индуктивной катушкой и конденсатором в общем случае токи и напряжения сдвинуты по фазе. Значение разности фаз  $\varphi$  между током и напряжением зависит от соотношения между активным ( $R$ ), индуктивным ( $x_L$ ) и емкостным ( $x_C$ ) сопротивлениями. При определённом соотношении между этими сопротивлениями может оказаться, что ток и напряжение на входе цепи совпадают по фазе. Такой режим электрической цепи называют резонансным. Различают резонанс напряжений и резонанс токов.

##### 2.1. Резонанс напряжений.

Резонанс напряжений может возникать в цепи с последовательно соединёнными индуктивной катушкой и конденсатором. На рис. 3 - 1 приведена схема такой цепи с электроизмерительными приборами и дополнительным реостатом.

Для этой цепи уравнение равновесия напряжений в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= R\dot{I} + j\omega L_k \dot{I} - j\frac{1}{\omega C} \dot{I} = R\dot{I} + R_k \dot{I} + jx_{L_k} \dot{I} - jx_C \dot{I} = \\ &= (R + R_k + jx_{L_k} - jx_C) \dot{I}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

Комплексное сопротивление цепи:

$$\underline{Z} = R + R_k + jx_{L_k} - jx_C = Ze^{j\varphi}, \quad \text{где} \quad (3.2)$$

$$Z = \sqrt{(R + R_k)^2 + (x_{L_k} - x_C)^2} \quad \text{- модуль полного сопротивления,}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_{L_k} - x_C}{R + R_k} \quad \text{- тангенс угла сдвига фаз между напряжением и током.}$$

При резонансе  $\varphi = 0$ , что имеет место при  $x_{L_k} = x_C$  или  $\omega L_k = \frac{1}{\omega C}$ . Следовательно, резонанс напряжений возникает при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений последовательной цепи. При этом реактивное сопротивление цепи  $x = x_{L_k} - x_C = 0$  и комплексное входное сопротивление цепи  $\underline{Z} = R + R_k$  является чисто активным. Поэтому действующее значение тока в цепи при резонансе равно:

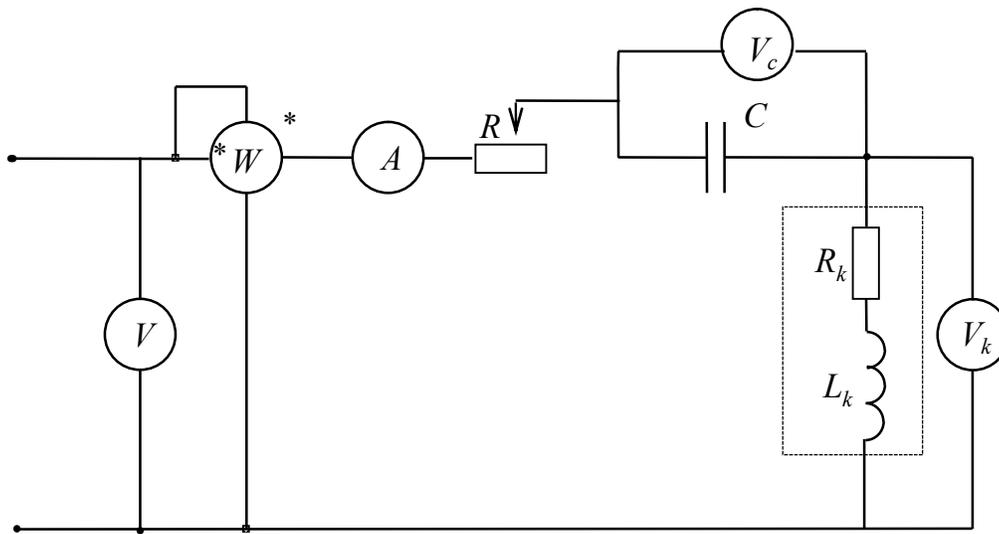


Рис. 3 - 1

$$I_0 = \frac{U}{R + R_k}. \quad (3.3)$$

Очевидно, что ток при резонансе имеет наибольшее значение.

Из условия возникновения резонанса следует, что резонанс можно получить, изменяя частоту входного напряжения, или индуктивность катушки, или ёмкость конденсатора. При этом значения угловой частоты, индуктивности и ёмкости, при которых наступает резонанс, определяются формулами:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_k C}}, \quad L_0 = \frac{1}{\omega^2 C}, \quad C_0 = \frac{1}{\omega^2 L_k}. \quad (3.4)$$

Частоту  $\omega_0$  называют резонансной.

На рис. 3 - 2 в соответствии с уравнением равновесия напряжений построена векторная диаграмма цепи для случая резонанса. При резонансе значения реактивной составляющей напряжения на катушке  $\dot{U}_{L_k}$  и напряжение на конденсаторе  $\dot{U}_C$  равны, противоположны по фазе и компенсируют друг друга. Поэтому входное напряжение  $\dot{U}$  полностью уравнивается падением напряжения на резисторах.

Если значения реактивных сопротивлений  $x_{L_k} = x_C$  значительно превосходят суммарное активное сопротивление цепи, то напряжения на конденсаторе и катушке значительно превосходят напряжение на входе цепи.

При резонансе

$$\omega_0 L_k = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L_k}{C}} = \rho. \quad (3.5)$$

Величина  $\rho$  называется характеристическим сопротивлением. Отношение напряжений при резонансе:

$$\frac{U_{C_0}}{U} = \frac{U_{L_0}}{U} = \frac{I_0 \omega_0 L_k}{I_0 (R + R_k)} = \frac{\omega_0 L_k}{R + R_k} = \frac{\rho}{R + R_k} = \theta \quad (3.6)$$

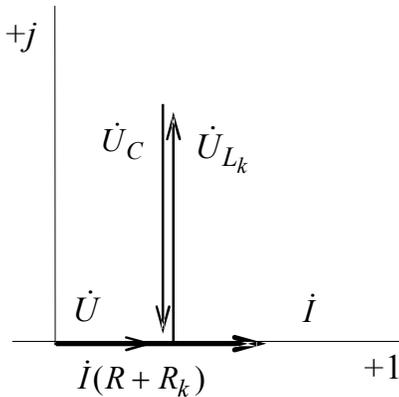


Рис. 3 - 2

определяет кратность превышения напряжения на индуктивном или емкостном сопротивлениях над напряжением на входе цепи и называется добротностью контура. Резонансные свойства цепи характеризуют также величиной  $d = 1/\theta$ , называемой затуханием контура.

При изменении частоты, индуктивности или ёмкости изменяются соответствующие сопротивления, токи и напряжения на участках цепи. Зависимости  $x_{L_k}$ ,  $x_C$ ,  $x = x_{L_k} - x_C$ ,  $\varphi$  от частоты называют частотными характеристиками, а зависимости тока  $I$  и напряжений  $U_{L_k}$ ,

$U_C$  от частоты называют резонансными кривыми. Эти кривые могут быть построены в соответствии с формулами:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(R + R_k)^2 + (\omega L_k - \frac{1}{\omega C})^2}},$$

$$U_{L_k} = \omega L_k \cdot I, \quad U_C = \frac{1}{\omega C} \cdot I. \quad (3.7)$$

## 2.2. Резонанс токов.

Резонанс токов может возникать в цепи при параллельном соединении ветвей, содержащих индуктивный и емкостный элементы. Схема такой цепи с электроизмерительными приборами изображена на рис. 3 - 3.

Комплексные действующие значения токов в ветвях определяются выражениями:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z_1} = \dot{U} \underline{Y}_1 = \dot{U}(g_1 - jb_1) = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{1p},$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{Z_2} = \dot{U} \underline{Y}_2 = \dot{U}(g_2 + jb_2) = \dot{I}_{2a} + \dot{I}_{2p}, \text{ где} \quad (3.8)$$

$\dot{I}_{1a}; \dot{I}_{2a}$  - действительные части комплексных значений токов;

$\dot{I}_{1p}; \dot{I}_{2p}$  - мнимые части комплексных значений токов.

Ток в неразветвлённой части цепи:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{U}(g_1 + g_2) - j\dot{U}(b_1 - b_2), \text{ где}$$

$g_1 = \frac{R_k}{Z_k^2} = \frac{R_k}{R_k^2 + x_{L_k}^2}$  и  $g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{R_2}{R_2^2 + x_C^2}$  - активные проводимости ветвей,

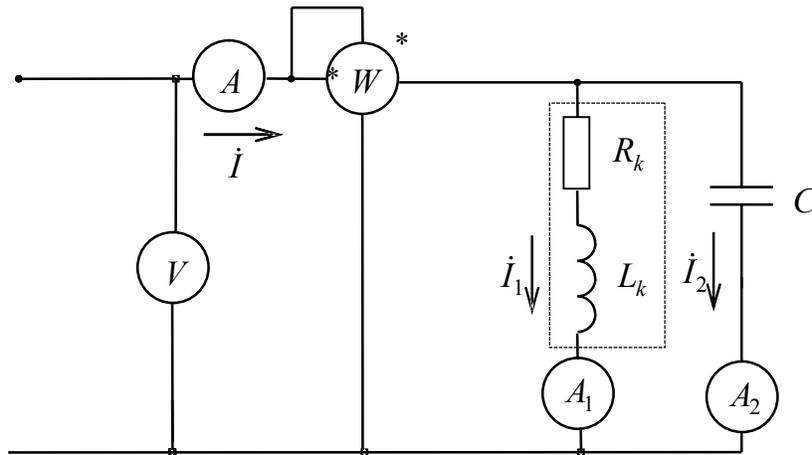


Рис. 3 - 3

$$b_1 = \frac{x_{L_k}}{Z_k^2} = \frac{x_{L_k}}{R_k^2 + x_{L_k}^2} \text{ и } b_2 = \frac{x_C}{Z_2^2} = \frac{x_C}{R_2^2 + x_C^2} - \text{реактивные проводимости ветвей.}$$

По определению резонансного режима ток в неразветвленной части цепи  $\dot{I}$  должен совпадать по фазе с напряжением  $\dot{U}$ . Это будет при условии, что  $b_1 - b_2 = 0$  или  $b_1 = b_2$ . Следовательно, условием резонанса токов является равенство реактивных проводимостей ветвей. Если  $R_2 = 0$ , то резонанс наступит при условии:

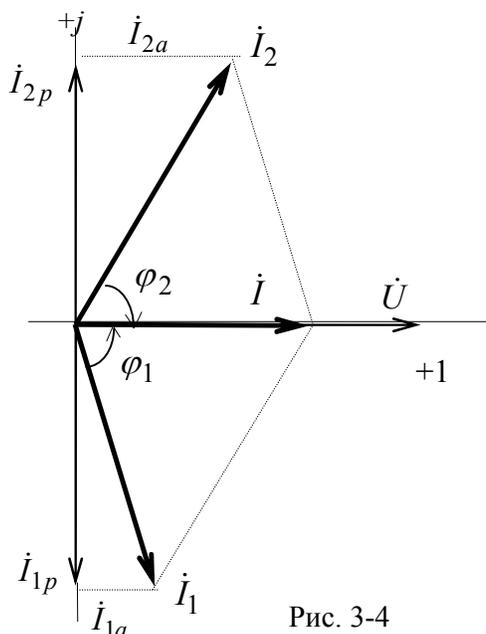


Рис. 3-4

$$\frac{\omega L_k}{R_k^2 + (\omega L_k)^2} = \omega C.$$

Резонанс токов можно получить не только изменением  $\omega$ ,  $L_k$ ,  $C$ , но и путём изменения  $R_k$  и  $R_2$ . Однако изменением одной из этих величин резонансный режим достигается не всегда.

На рис. 3 - 4 приведена векторная диаграмма токов и напряжений для резонансного режима. Мнимые части токов  $\dot{I}_{1p}$  и  $\dot{I}_{2p}$  равны между собой, отличаются по знаку и при сложении полностью компенсируют друг друга. Ток в неразветвлённой части цепи  $\dot{I}$  определяется суммой только действительных частей, и его вектор  $\dot{I}$  на диа-

грамме совпадает по направлению с вектором  $\dot{U}$  входного напряжения.

### 3. Лабораторное оборудование

Для выполнения работы на панелях стенда имеются: ЛАТР для регулирования входного напряжения, реостаты, индуктивная катушка, концы которой присоединены к клеммам на панели стенда, батарея конденсаторов, электроизмерительные приборы.

### 4. Рабочее задание

4.1. Собрать цепь по схеме рис. 3 - 1.

4.2. Измерить параметры индуктивной катушки. Для этого необходимо полностью вывести реостат ( $R=0$ ) и временно замкнуть накоротко зажимы конденсатора. При заданном преподавателем значении напряжения снять показания приборов и занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Показания приборов			Результаты расчетов				
$U_k$	$I$	$P$	$Z_k$	$R_k$	$x_{Lk}$	$L_k$	$C_0$
В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	мкФ

--	--	--	--	--	--	--	--

4.3. Убрать замыкающий проводник с конденсатора и снять зависимости тока  $I$ , мощности  $P$ , напряжений  $U_k$ ,  $U_C$  от емкости ( $R=0$ ). Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

Измерено					Расчет				
$U$	$C$	$I$	$P$	$U_C$	$U_k$	$\varphi$	$x_C$	$Z$	$U_{Lk}$
В	мкФ	А	Вт	В	В	град.	Ом	Ом	В

Эти зависимости рекомендуется снимать следующим образом. Установить заданное преподавателем напряжение на входе цепи и поддерживать его в дальнейшем неизменным. Изменяя значение емкости конденсатора, добиться резонанса по максимальному показанию амперметра. После этого выполнить измерения для 5-6 значений емкостей больших и меньших чем резонансная ёмкость.

4.4. Снять аналогичные зависимости при  $R > 0$  и результаты измерений занести в таблицу 3.2.

4.5. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 3 - 3.

4.6. Установить заданное преподавателем напряжение и, изменяя значение емкости, снять показания всех приборов. Результаты измерений занести в таблицу 3.3. Изменяя емкость вначале целесообразно добиться резонанса (по наименьшему показанию амперметра  $A$ ), а затем выполнить измерения для еще 5-6 значений емкостей больших и меньших, чем резонансная ёмкость.

Таблица 3.3

Измерено					Расчет			
$U$	$C$	$I$	$I_1$	$I_2$	$P$	$\varphi$	$Y$	$I_{Ip}$
В	мкФ	А	А	А	Вт	град.	См	А

По результатам измерений выполнить следующее:

4.7. По данным п. 4.2. рассчитать параметры индуктивной катушки и резонансную емкость  $C_0$ , принимая  $\omega = 314c^{-1}$ , по формулам:

$$Z_k = \frac{U_k}{I}; R_k = \frac{P}{I^2}; x_{Lk} = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2};$$

$$L_k = \frac{x_{Lk}}{\omega}; C_0 = \frac{1}{\omega^2 L_k}.$$

Результаты расчетов занести в таблицу 3.1. Емкость  $C_0$  сравнить с экспериментально полученным значением емкости при резонансе в п.п.4.3.

4.8. По данным измерений в п. 4.3 рассчитать разность фаз между входным напряжением и током, емкостное сопротивление  $x_C$ , полное сопротивление цепи  $Z$ , ре-

активную составляющую напряжения на катушке  $U_{Lk}$  и поместить результаты расчетов в таблицу 3.2. Расчетные формулы:

$$\varphi = \arccos \frac{P}{U \cdot I}; x_C = \frac{1}{\omega C}; Z = \frac{U}{I}; U_{Lk} = x_{Lk} \cdot I.$$

4.9. По данным таблицы 3.2 построить графики зависимостей  $I(C)$ ,  $U_C(C)$ ,  $U_{Lk}(C)$ ,  $\varphi(C)$ ,  $Z(C)$ .

4.10. Построить векторные диаграммы для трёх режимов:  $x_{Lk} = x_C$ ,  $x_{Lk} > x_C$ ,  $x_{Lk} < x_C$  (см. п. 5.1 методических указаний).

4.11. Рассчитать характеристическое сопротивление, добротность и затухание.

4.12. По результатам измерений в п. 4.4 рассчитать  $\varphi$ ,  $Z$  (результаты поместить в таблицу 3.2), добротность цепи, построить графики зависимостей  $I(C)$ ,  $Z(C)$ ,  $\varphi(C)$ . В этой же координатной системе для сравнения построить графики зависимостей тех же функций при  $R=0$  (по данным таблицы 3.2).

4.13. По результатам измерений в п. 4.6 (резонанс токов) рассчитать,  $Y$ ,  $\varphi$ ,  $I_{1p}$  (см. п. 5.2 методических указаний).

4.14. По данным таблицы 3.3 построить графики зависимостей  $I(C)$ ,  $I_{1p}(C)$ ,  $I_2(C)$ ,  $\varphi(C)$ .

4.15. Построить векторные диаграммы для трёх режимов:  $b_1 = b_2$ ,  $b_1 > b_2$ ,  $b_1 < b_2$  (см. п. 5.1 методических указаний).

## 5. Методические указания

А. Примеры построения векторных диаграмм приведены на рис. 3 - 5 (а - для последовательной цепи, б - для параллельной цепи). Для построения векторной диаграммы параллельной цепи на комплексной плоскости вначале откладывается в масштабе ток  $I_2$  в конденсаторе, опережающий на  $90^\circ$  напряжение. Затем из начала и конца этого вектора проводятся дуги окружностей радиусами, соответственно равными токам  $I$  и  $I_1$ . Точка их пересечения определяет положение векторов. Перенеся вектор  $I_1$  параллельно самому себе в начало координат, можно разложить вектор этого тока на активную  $I_{1a}$  и реактивную  $I_{1p}$  составляющие.

5.2. По формулам п. 4.8 рассчитываются  $\varphi$ ,  $Z$ , а полная проводимость  $Y$  есть величина, обратная полному сопротивлению  $Z$ . Реактивная составляющая тока катушки  $I_{1p} = U \cdot b_1$ .

## 6. Вопросы для самопроверки

6.1. Какое явление называют резонансом в электрической цепи?

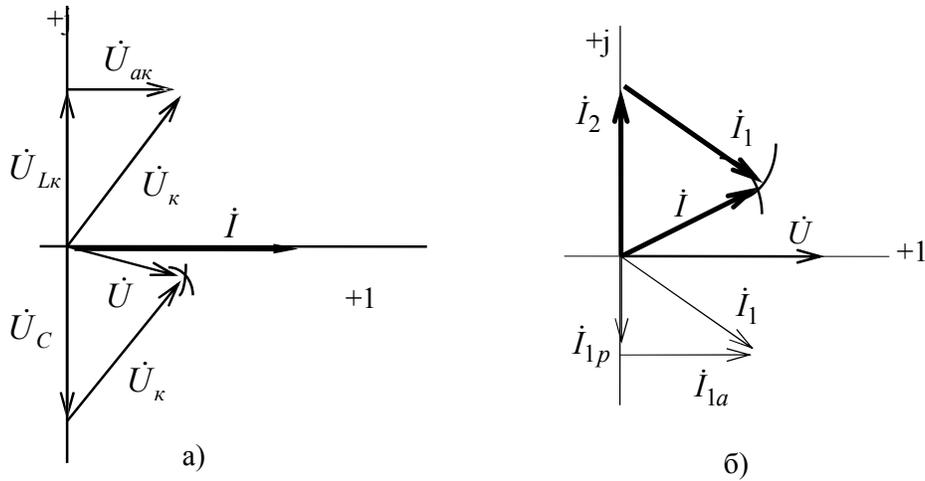


Рис. 3 - 5

- 6.2. При каком условии возникает резонанс напряжений и каковы его особенности?
- 6.3. Как изменяется реактивное сопротивление последовательной цепи с изменением частоты?
- 6.4. Каким образом можно получить резонанс напряжений?
- 6.5. Что характеризует добротность контура и от чего она зависит?
- 6.6. При каком условии возникает резонанс токов и каковы его особенности?
- 6.7. При каких условиях в параллельной цепи резонанс невозможен?
- 6.8. Каким образом можно получить резонанс токов?
- 6.9. Чему равна резонансная частота последовательной цепи?
- 6.10. Чему равна резонансная частота параллельной цепи?
- 6.11. Чему равен ток при резонансе в неразветвлённой части цепи?
- 6.12. Нарисуйте векторные диаграммы последовательной цепи для режимов:  
 1)  $x_L = x_C$ , 2)  $x_L > x_C$ , 3)  $x_L < x_C$ .
- 6.13. Нарисуйте графики изменения действующих значений тока, напряжения на индуктивной катушке и конденсаторе в зависимости от частоты.
- 6.14. Нарисуйте векторные диаграммы параллельной цепи для произвольного режима и для режима резонанса.
- 6.15. Приведите примеры практического использования явлений резонанса.

### Лабораторная работа № 4

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

### 1. Цель работы

Изучение распределения токов, напряжений и мощностей в цепях с взаимной индуктивностью при различных режимах их работы.

## 2. Предварительные сведения

Два элемента электрической цепи называют индуктивно связанными, если изменение тока в одном из них вызывает появление ЭДС взаимной индукции в другом.

С количественной стороны это явление характеризуется взаимной индуктивностью катушек и коэффициентом магнитной связи.

Значение взаимной индуктивности  $M$  зависит от геометрических размеров, числа витков и взаимного расположения магнитносвязанных катушек.

Степень магнитной связи катушек характеризуется коэффициентом магнитной связи, который зависит от собственных значений индуктивности катушек и взаимной индуктивности  $M$ :

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}},$$

где  $L_1$  и  $L_2$  - собственные индуктивности катушек.

Все эти величины непосредственно связаны с потоками самоиндукции и взаимной индукции, пронизывающими витки катушек. В зависимости от положительных направлений токов в магнитносвязанных катушках магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции могут как совпадать по направлению (суммироваться), так и быть встречными (вычитаться).

Чтобы определить знак потока взаимной индукции для двух магнитносвязанных катушек, вводят понятие одноименных зажимов. **Два зажима, принадлежащие разным катушкам с магнитной связью, называются одноименными, если при одинаковом направлении токов относительно этих зажимов магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции суммируются.** На схемах одноименные зажимы обозначают точками или звездочками.

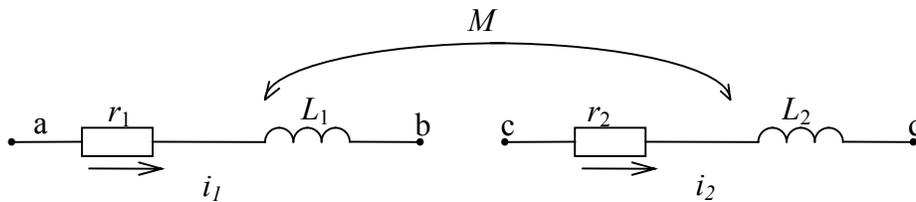


Рис. 4 - 1

На рис. 4 - 1 дана схема двух реальных магнитносвязанных катушек, по которым протекают токи  $i_1$  и  $i_2$ , одинаково ориентированные относительно одноименных зажимов. Запишем выражения мгновенных значений напряжений на катушках:

$$u_{ab} = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt};$$

$$u_{cd} = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}.$$

Величина  $M \frac{di_2}{dt}$  - это напряжение взаимной индукции, которое наводится в первой катушке изменяющимся во времени током второй катушки. Это напряжение входит

в уравнение со знаком « + », если токи в катушках одинаково направлены относительно одноименных зажимов.

Напряжение взаимной индукции, наведенное во второй катушке, определяется значением тока в первой катушке и равно  $M \frac{di_1}{dt}$ .

Переходя к комплексным действующим значениям токов и напряжений, можно записать:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{I}_1 r_1 + \dot{I}_1 j \omega L_1 + \dot{I}_2 j \omega M = \dot{U}_{r1} + \dot{U}_{L1} + \dot{U}_{M1}; \quad (4.1)$$

$$\dot{U}_{cd} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 j \omega L_2 + \dot{I}_1 j \omega M = \dot{U}_{r2} + \dot{U}_{L2} + \dot{U}_{M2}, \quad (4.2)$$

где  $\dot{U}_{M1} = \dot{I}_2 j \omega M$  - напряжение взаимной индукции в первой катушке,

$\dot{U}_{M2} = \dot{I}_1 j \omega M$  - напряжение взаимной индукции во второй катушке.

Величину  $\omega M = x_M$  называют сопротивлением магнитной связи.

По уравнениям (4.1) и (4.2) построим векторную диаграмму (рис. 4 - 2).

На комплексной плоскости изобразим векторные действующие значения токов в катушках  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ . (В данном случае при построении диаграммы направления  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  приняты произвольно). Для построения вектора напряжения  $\dot{U}_{ab}$  на первой катушке по направлению вектора тока  $\dot{I}_1$  отложим вектор падения напряжения  $\dot{U}_{r1}$  на активном сопротивлении катушки  $r_1$ . Так как напряжение на индуктивности опережает ток на угол  $\pi/2$ , под углом  $90^\circ$  к вектору тока  $\dot{I}_1$  из конца вектора  $\dot{U}_{r1}$  построим

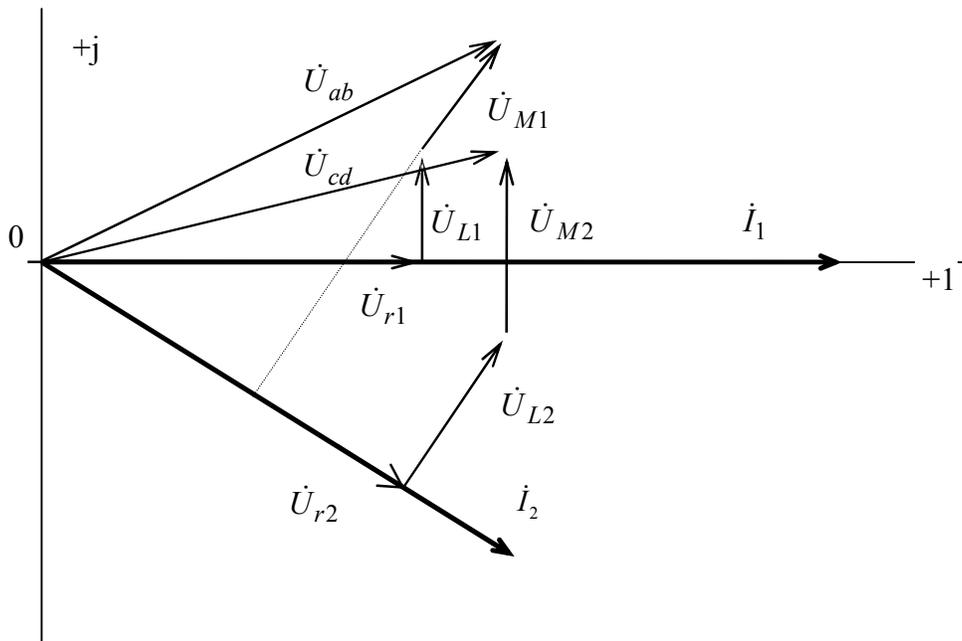


Рис. 4 - 2

вектор падения напряжения на реактивном сопротивлении катушки  $\dot{U}_{L1}$ . Из конца вектора  $\dot{U}_{L1}$  под углом  $90^\circ$  к вектору тока  $\dot{I}_2$  построим вектор напряжения взаимной

индукции на первой катушке  $\dot{U}_{M1}$ . Сумма векторов  $\dot{U}_{r1}$ ,  $\dot{U}_{L1}$  и  $\dot{U}_{M1}$  согласно уравнению (4.1) равна вектору  $\dot{U}_{ab}$ .

Построение вектора напряжения на второй катушке  $\dot{U}_{cd}$  выполняется аналогично по уравнению (4.2).

Если токи  $i_1$  и  $i_2$  в индуктивно связанных катушках направлены относительно одноименных зажимов по разному (рис. 4 - 3), то напряжение взаимоиндукции, наводимое в катушке 1 током  $i_2$ , в уравнение для мгновенных значений напряжений и токов входит со знаком "минус":

$$u_{ab} = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt};$$

$$u_{cd} = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt}.$$

Переходя к комплексным напряжениям и токам, получим:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{I}_1 r_1 + \dot{I}_1 j\omega L_1 - \dot{I}_2 j\omega M = \dot{U}_{r1} + \dot{U}_{L1} - \dot{U}_{M1} \quad (4.3)$$

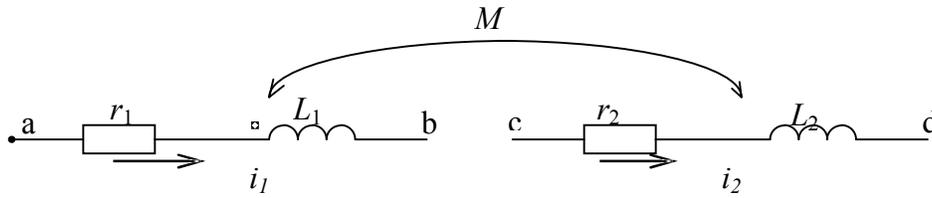


Рис. 4 - 3

$$\dot{U}_{cd} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 j\omega L_2 - \dot{I}_1 j\omega M = \dot{U}_{r2} + \dot{U}_{L2} - \dot{U}_{M2} \quad (4.4)$$

Построение векторной диаграммы для данной цепи выполняется так же, как было описано выше, только векторы напряжений  $\dot{U}_{M1}$  и  $\dot{U}_{M2}$  строятся перпендикулярно векторам токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  в сторону отставания (по часовой стрелке) от соответствующего тока.

При последовательном соединении магнитно связанных катушек возможны два варианта соединения элементов: а) ток одинаково ориентирован относительно одноименных зажимов катушек (рис. 4 - 4, а); б) ток различно ориентирован относительно одноименных зажимов катушек (рис. 4 - 4, б).

В случае (а) соединение катушек называют согласным, при этом потоки самоиндукции и взаимоиндукции в катушках складываются.

В случае (б) катушки соединены встречно, в результате магнитные потоки самоиндукции и взаимоиндукции вычитаются.

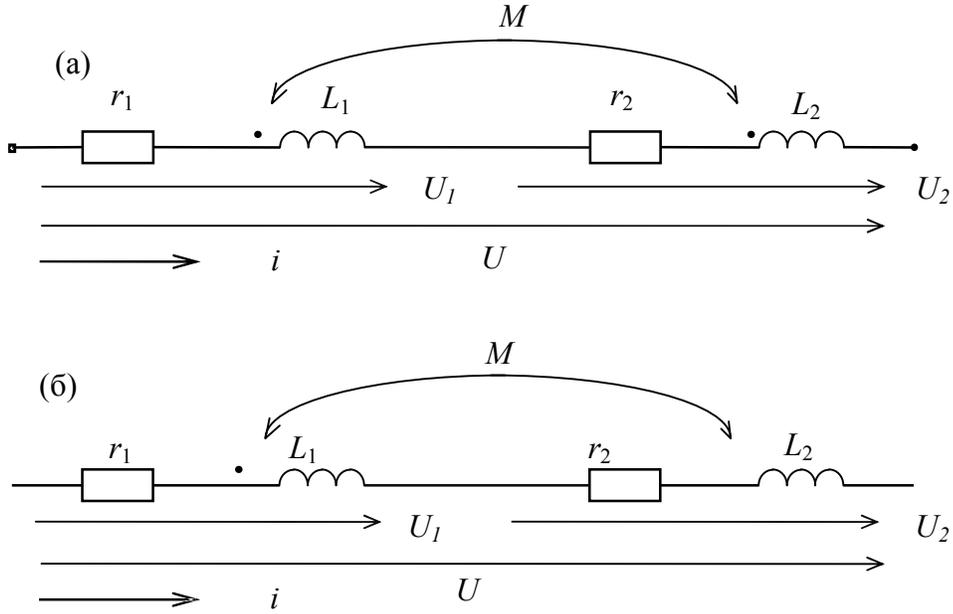


Рис. 4 - 4

Уравнения, описывающие работу этих цепей, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 u &= u_1 + u_2 = ir_1 + L_1 \frac{di}{dt} \pm M \frac{di}{dt} + ir_2 + L_2 \frac{di}{dt} \pm M \frac{di}{dt} = \\
 &= i(r_1 + r_2) + (L_1 + L_2 \pm M) \frac{di}{dt},
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

где знак "плюс" берется для согласного, а знак "минус" - для встречного включения катушек. Для комплексных величин напряжений и токов:

$$\dot{U} = \dot{I}(r_1 + r_2) + j\omega(L_1 + L_2 \pm 2M)\dot{I}.$$

Напряжения на катушках соответственно равны:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= \dot{I}r_1 + j\omega L_1 \dot{I} \pm j\omega M \dot{I} = \dot{I}(r_1 + jx_1 \pm jx_M) = \dot{I}z_1 \pm \dot{I}z_M; \\
 \dot{U}_2 &= \dot{I}r_2 + j\omega L_2 \dot{I} \pm j\omega M \dot{I} = \dot{I}(r_2 + jx_2 \pm jx_M) = \dot{I}z_2 \pm \dot{I}z_M,
 \end{aligned}$$

где  $z_1 = r_1 + jx_1$ ;  $z_2 = r_2 + jx_2$ ; - комплексные сопротивления первой и второй катушек, а  $z_M = jx_M$  - комплексное сопротивление взаимной индукции.

Комплексное сопротивление всей цепи определяется по формуле:

$$z = z_1 + z_2 \pm 2z_M.$$

Полная индуктивность цепи при согласном последовательном включении катушек определяется следующим образом:

$$L_C = L_1 + L_2 + 2M;$$

а при встречном:

$$L_B = L_1 + L_2 - 2M.$$

Эти формулы позволяют вычислить взаимную индуктивность катушек:

$$M = \frac{L_C - L_B}{4} = \frac{x_C - x_B}{4\omega}.$$

Приведем пример построения векторной диаграммы для случая встречного включения катушек.

Комплексная форма уравнения (4.5) для этого случая:

$$\dot{U} = \underbrace{\dot{I}r_1 + jx_1\dot{I} - jx_M\dot{I}}_{\dot{U}_1} + \underbrace{\dot{I}r_2 + jx_2\dot{I} - jx_M\dot{I}}_{\dot{U}_2}$$

Катушки соединены последовательно, поэтому протекающий по ним ток один и тот же.

Выберем направление вектора тока по оси +1 (рис. 4 - 5). По направлению вектора тока  $\dot{I}$  построим вектор падения напряжения на активном сопротивлении первой катушки  $\dot{I}r_1$ . Под углом  $90^\circ$  к току в сторону опережения построим вектор напряжения на реактивном сопротивлении первой катушки  $jx_1\dot{I}$ . Из конца вектора

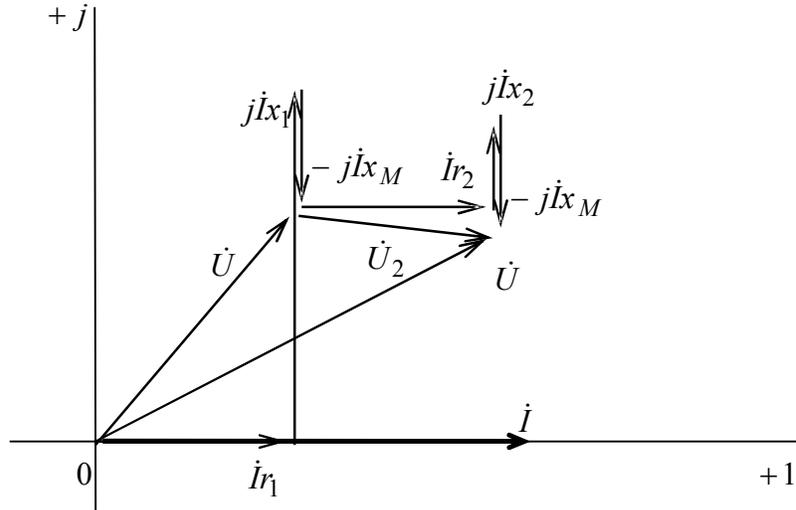


Рис.4 - 5

$jx_1\dot{I}$  под углом  $90^\circ$  к вектору тока  $\dot{I}$  в сторону отставания построим вектор напряжения  $-jx_M\dot{I}$ . Сумма трех векторов даст вектор напряжения  $\dot{U}_1$ . Для второй катушки построение выполняется аналогично. Все векторы строятся по принципу «один из конца другого». Сумма векторов  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  дает вектор входного напряжения цепи.

Явление индуктивной связи используется в трансформаторах (рис.4 - 6). Работу трансформатора без ферромагнитного сердечника можно описать следующими уравнениями:

а) для мгновенных значений

$$u_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt};$$

$$0 = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + u_2; \quad (4.6)$$

б) в комплексной форме

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2; \quad (4.7)$$

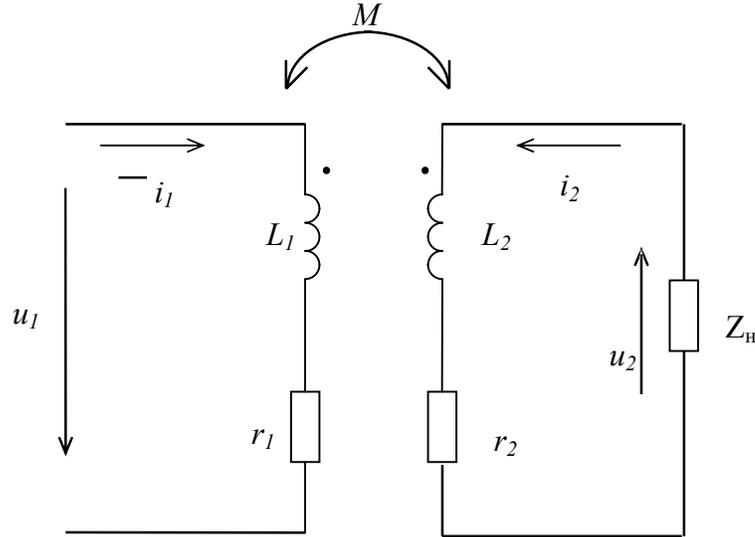


Рис. 4 - 6

$$0 = \dot{I}_2 r_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega M \dot{I}_1 + \dot{U}_2. \quad (4.8)$$

где  $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 z_{\text{н}} = \dot{I}_2 (r_{\text{н}} + jx_{\text{н}})$  - напряжение на нагрузке трансформатора.

Взаимная индуктивность  $M$ , входящая в эти уравнения, определяется из режима холостого хода трансформатора ( $\dot{I}_2 = 0$ ). Для холостого хода действующее значение выходного напряжения  $U_{2\text{хх}} = I_1 \omega M$ , откуда  $\omega M = \frac{U_{2\text{хх}}}{I_1}$  или  $M = \frac{U_{2\text{хх}}}{\omega I_1} = \frac{U_{2\text{хх}}}{2\pi f I_1}$ .

Векторная диаграмма трансформатора показана на рис. 4 - 7. Построение начато с вектора тока  $\dot{I}_2$ .

Этот вектор отложен по оси +1. Далее выполняют построения в соответствии с уравнением (4.8). Пусть сопротивление нагрузки имеет активно-индуктивный характер  $z_{\text{н}} = z_{\text{н}} e^{j\varphi_{\text{н}}}$ , тогда вектор напряжения  $\dot{U}_2$  опережает вектор тока на угол  $\varphi_{\text{н}}$ . Из конца вектора  $\dot{U}_2$  параллельно вектору тока  $\dot{I}_2$  построен вектор падения напряжения на сопротивлении вторичной обмотки  $\dot{I}_2 r_2$ .

Вектор падения напряжения  $j\omega L_2 \dot{I}_2$  на индуктивном сопротивлении вторичной обмотки построен из конца вектора  $\dot{I}_2 r_2$  под углом  $90^\circ$  к вектору тока  $\dot{I}_2$  в сторону опережения. Из уравнения (4.8) следует, что сумма вектора напряжения взаимной

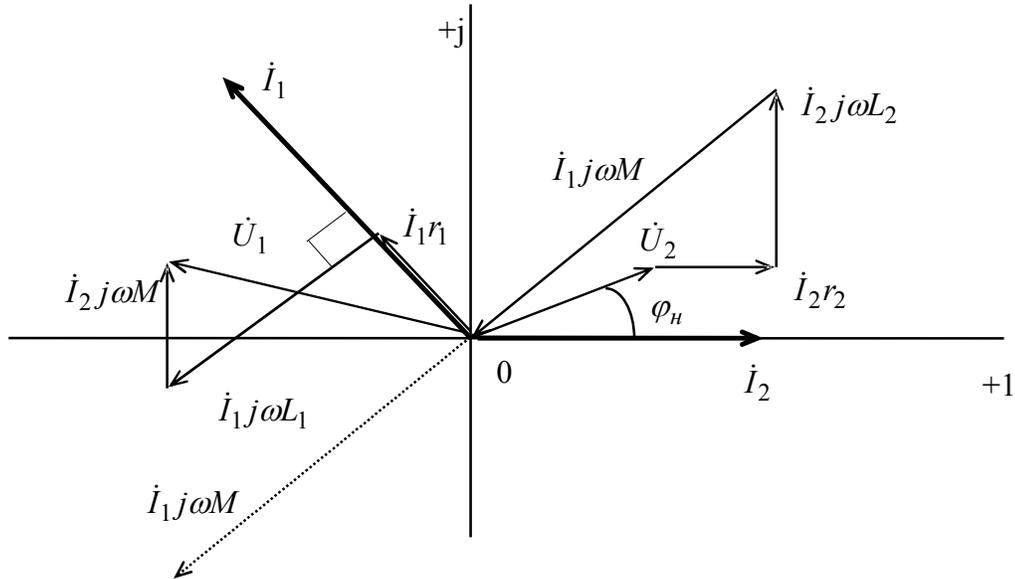


Рис. 4 - 7

индукции и трех ранее построенных векторов равна 0, поэтому вектор, соединяющий начало координат с концом вектора  $j\omega L_2 \dot{I}_2$ , равен  $j\omega M \dot{I}_1$  и направлен к точке 0.

Вектор тока  $\dot{I}_1$  в первичной цепи трансформатора на  $90^\circ$  отстает от вектора  $j\omega M \dot{I}_1$ . Он построен из начала координат перпендикулярно вектору  $j\omega M \dot{I}_1$ . Затем в соответствии с уравнением (4.7) строятся векторы падения напряжения на элементах первичной цепи трансформатора и находится вектор входного напряжения  $\dot{U}_1$ .

### 3. Лабораторное оборудование

Источником питания служит сеть синусоидального напряжения частотой 50 Гц, регулирование которого осуществляется с помощью ЛАТРа.

Работа выполняется на универсальном стенде с использованием сменных панелей №№ 2; 10. Катушка взаимной индуктивности, исследуемая в работе, имеет две отдельные обмотки, зажимы которых выведены на панель. Произведя разметку зажимов, можно соединить обмотки последовательно или параллельно.

## 4. Рабочее задание

В лаборатории выполняются пункты 4.1.1 - 4.1.3; 4.2.1 - 4.2.2; 4.3.1 - 4.3.2.

4.1. Разметка зажимов, определение параметров обмоток катушки.

4.1.1. Произвести разметку зажимов обмоток катушки, используя схему и методические указания в п.5.1 рабочего задания.

4.1.2. Собрать цепь по рис.4 - 8 сначала с одной из обмоток. После выполнения п. 4.1.3 собрать цепь с другой обмоткой и снова произвести измерения по п.4.1.3.

4.1.3. Установить на входе цепи произвольное значение напряжения. Записать показания всех приборов. Результаты измерений занести в таблицу 4.1

. Таблица 4.1.

Обмотка	Эксперимент			Расчет				
	$U$	$I$	$P$	$Z$	$r$	$x$	$L$	$\cos \varphi$
	Размерности			Размерности				
1								
2								

4.1.4. По полученным данным рассчитать параметры обмоток по формулам:

$$Z = \frac{U}{I}; \quad r = \frac{P}{I^2}; \quad x = \sqrt{Z^2 - r^2}; \quad L = \frac{x}{\omega}; \quad \cos \varphi = \frac{P}{UI};$$

Результаты расчетов занести в таблицу 4.1.

4.2. Последовательное соединение индуктивно связанных обмоток.

4.2.1. Собрать цепь по рис. 4-8, включив в нее обе последовательно соединенные обмотки (см. рис. 4 - 4).

4.2.2. Установить произвольное значение напряжение на входе цепи. Записать показания всех приборов при согласном и встречном соединениях обмоток. Результаты измерений записать в таблицу 4.2.

Таблица 4.2.

Включение обмоток	Эксперимент				Расчет						
	$U$	$I$	$P$	$U_1$	$U_2$	$Z$	$r$	$x$	$L$	$\cos \varphi$	$M$

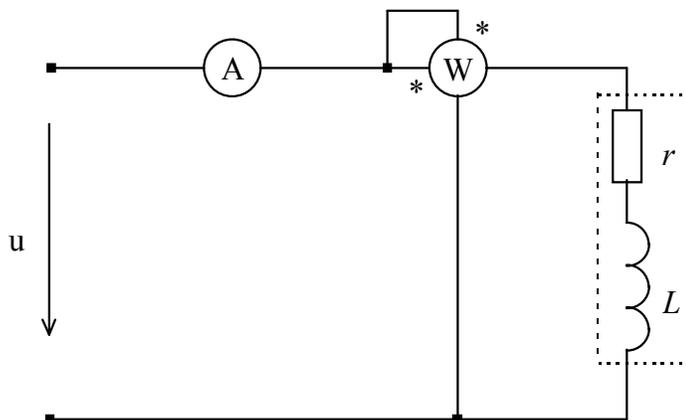


Рис. 4 - 8

	Размерности					Размерности				
Согласное										
Встречное										

4.2.3. По данным измерений в п.4.2.2 рассчитать полные, активные, индуктивные сопротивления всей цепи для обоих случаев, а также эквивалентную индуктивность цепи, взаимную индуктивность, коэффициент связи и  $\cos \varphi$ . Результаты расчетов записать в таблицу 4.2.

4.2.4. Построить векторные диаграммы напряжений для согласного и встречного включения обмоток, считая известными сопротивления обмоток (из п.4.1.4), сопротивление взаимной индукции и ток в цепи (из п.п. 4.2.2 и 4.2.3).

4.2.5. Сравнить значения напряжений на каждой обмотке, полученные из векторной диаграммы, с данными таблицы 4.2.

#### 4.3. Воздушный трансформатор.

4.3.1. Собрать цепь по рис. 4 - 6. В первичной цепи предусмотреть приборы для измерения тока, напряжения и активной мощности. Во вторичную цепь включить амперметр, а для измерения напряжения на нагрузке - вольтметр. Катушку с меньшей индуктивностью включить в первичную цепь, в качестве нагрузки во вторичную цепь включить реостат  $r_H$ .

4.3.2. Для трех режимов (холостого хода, короткого замыкания и с нагрузкой) измерить токи в первичной и вторичной цепях и напряжение на нагрузке при неизменном произвольном значении напряжения питания. Результаты измерений записать в таблицу 4.3.

Таблица 4.3.

Режим работы цепи	Эксперимент				
	$U_1$	$I_1$	$P_1$	$U_2$	$I_2$
	Размерности				
Холостой ход					
Короткое замыкание					
Нагрузка					

4.3.3. По режиму холостого хода определить сопротивление взаимной индуктивности и сравнить его с сопротивлением, вычисленным в п.4.2.3.

4.3.4. Для одного из режимов (по указанию преподавателя) записать уравнения воздушного трансформатора. Построить векторную диаграмму цепи для этого режима.

4.3.5. Для режима с нагрузкой вычислить мощность потерь энергии в обмотках и сложить ее с активной мощностью реостата. Результат сравнить с показаниями ваттметра.

## 5. Методические указания

5.1. Разметка зажимов обмоток состоит в определении одноименных зажимов. Одноименные зажимы можно определить по схеме на рис. 4-9. Примем зажим "а" за начало первой катушки. Тогда показания вольтметра  $V_1$ :

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1(r_1 + j\omega L_1) = \dot{I}_1 z_1;$$

а показания вольтметра  $V_2$  можно представить следующим образом:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{cd} + \dot{U}_{db} = \pm j\omega M \dot{I}_1 + \dot{U}_{db}.$$

Отсюда  $\dot{U}_{db} = \dot{U}_1 \mp \dot{I}_1 j\omega M$ , причем знак "-" соответствует согласному соединению обмоток, и, следовательно, одноименным с зажимом "а" будет зажим "с". В этом случае показание вольтметра  $V_2 < V_1$ . Если включение обмоток встречное, то  $V_2 > V_1$  и одноименным с "а" будет зажим "d".

## 6. Вопросы для самопроверки

I. В каком случае входное сопротивление цепи будет больше: при последовательном встречном или последовательном согласном соединениях индуктивно связанных катушек?

II. Как определить  $x_M = \omega M$ , если известны реактивные сопротивления цепи при согласном ( $x_c$ ) и встречном ( $x_g$ ) соединениях?

III. Определите показания вольтметра, включенного параллельно только одной катушке при последовательном встречном их соединении.

IV. Постройте векторную диаграмму трансформатора, если нагрузка имеет емкостный характер?

V. Вычислите мощность, передаваемую из первичной обмотки во вторичную в режиме короткого замыкания трансформатора.

VI. Две индуктивно связанные катушки имеют коэффициент связи  $K = 0.8$  и сопротивление магнитной связи  $x_M = 8$  Ом. Определите реактивное сопротивление первой катушки  $x_1$ , если сопротивление второй  $x_2 = 25$  Ом.

VII. В режиме холостого хода трансформатора напряжение на выходных зажимах  $U_{2xx} = 30$  В. Определите ток в первичной обмотке, если известно, что реактивные сопротивления обмоток одинаковы  $x_1 = x_2 = 200$  Ом, а коэффициент связи  $K = 0.1$ .

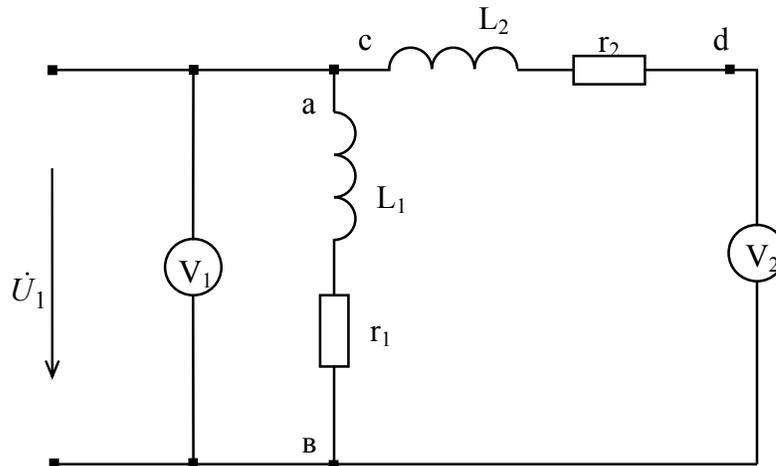


Рис. 4 - 9

VIII. Две реальные катушки соединены параллельно. Одноименные зажимы катушек подсоединены к одному узлу. Запишите уравнения по законам Кирхгофа для данной схемы. Как следует изменить эти уравнения, если катушки будут соединены разноименными зажимами в одном узле?

IX. При согласном последовательном соединении двух катушек напряжение на одной из них  $U_1 = 120$  В, а ток в цепи  $I = 2$  А. Определите активное сопротивление катушки  $r_1$ , если  $x_M = 10$  Ом, а  $x_1 = 38$  Ом.

## Лабораторная работа №5

### ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

#### 1. Цель работы

Исследование трехпроводной трехфазной цепи в симметричном и несимметричном режимах при соединении приемника звездой и треугольником. Исследование четырехпроводной трехфазной цепи, выявление роли нейтрального провода.

#### 2. Предварительные сведения

Симметричный трехфазный генератор создает систему трех синусоидальных ЭДС, имеющих одинаковую амплитуду и частоту, и сдвинутых относительно друг друга по фазе на треть периода  $T/3$  или  $2\pi/3$ . Фазные ЭДС обозначаются  $E_A, E_B, E_C$ . При прямой последовательности чередования фаз ЭДС фазы С опережает, а ЭДС фазы В отстает от ЭДС фазы А на угол  $2\pi/3$ .

На рис. 5 - 1 изображена векторная диаграмма

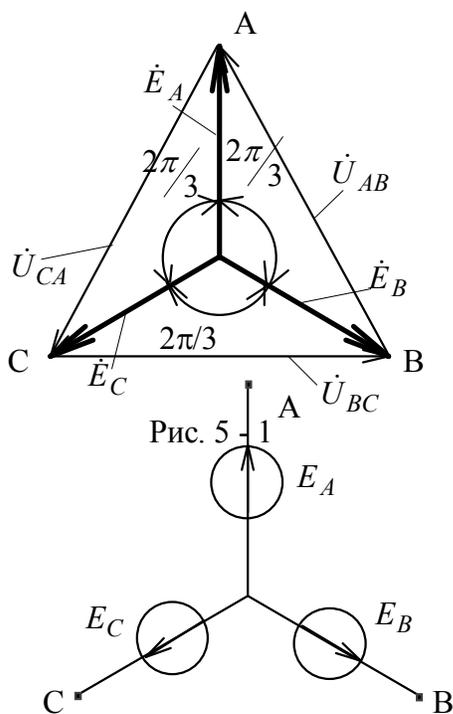


Рис. 5 - 2

трехфазной системы ЭДС. Фазные обмотки трехфазного генератора (а так же и фазные сопротивления приемника) могут быть соединены или звездой (рис. 5 - 2) или треугольником (рис. 5 - 3).

Три провода, соединяющие генератор и приёмник, называются **линейными проводами**. Токи в них называются **линейными**, а токи в фазах – **фазовыми**. Напряжение на фазной обмотке (ЭДС) генератора называется фазным, а между любы-

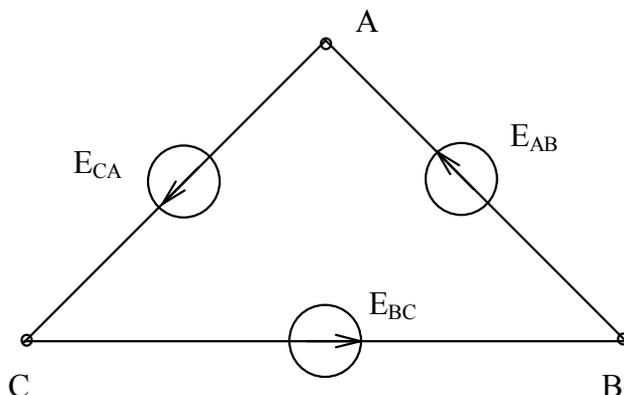


Рис. 5 - 3

ми двумя линейными проводами - **линейным напряжением**.

Из векторной диаграммы (рис. 5 - 1) видно, что при соединении звездой:

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{Л}} = U_{\phi} \sqrt{3},$$

а при соединении треугольником

$$U_{\text{Л}} = U_{\phi} = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}.$$

### 2.1. Трёхфазная цепь звезда-звезда.

При соединении генератора и приёмника в звезду возможны два случая:

- а) нейтральные точки генератора и нагрузки соединены между собой нейтральным (нулевым) проводом. Это четырёхпроводная система;
- б) нейтральные точки генератора и нагрузки не соединены между собой. Это трёхпроводная система.

На рис. 5 - 4 изображена схема четырёхпроводной трёхфазной цепи.

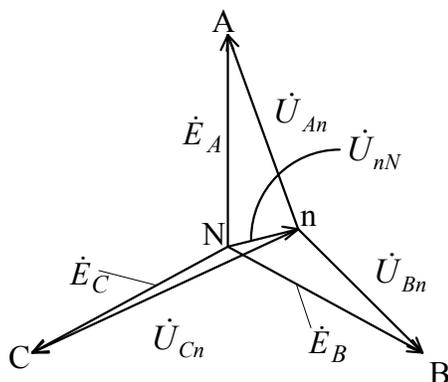


Рис. 5 - 6

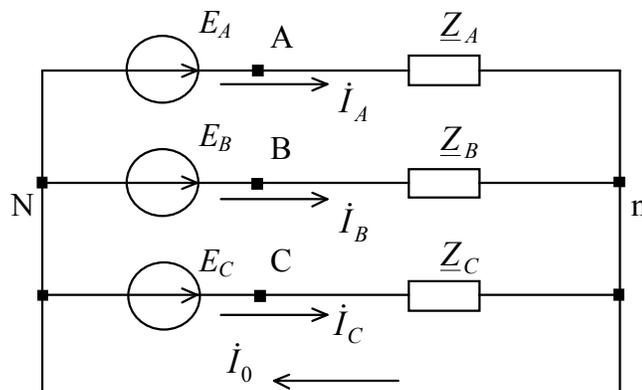


Рис. 5 - 4

В случае симметричного приёмника ( $Z_A = Z_B = Z_C = Z_\phi$ ) расчет ведется на одну фазу, т.к. напряжение  $\dot{U}_{nN}$  (смещение нейтрали) отсутствует и нейтральный провод не оказывает влияния на работу цепи.

Из рис. 5 - 4 видно, что  $I_L = I_\phi$ . При заданных сопротивлениях приёмника токи определяются по формулам (5.1):

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{Z_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B}{Z_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C}{Z_C}. \quad (5.1)$$

Ток в нейтральном проводе в этом случае равен нулю. На комплексной плоскости токи образуют симметричную систему векторов, сдвинутых относительно друг друга на  $2\pi/3$  (Рис. 5 - 5).

При несимметричной нагрузке ( $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$ ) режим работы цепи существенно зависит от наличия или отсутствия нейтрального провода:

а) при наличии нейтрального провода токи в фазах подсчитываются по формулам (5.1), так как сопротивлением нейтрального провода можно пренебречь.

Ток в нейтральном проводе:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \neq 0;$$

б) при отсутствии нейтрального провода токи рассчитываются по формулам (5.2):

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{An}}{Z_A} = \frac{\dot{E}_A - \dot{U}_{nN}}{Z_A}; \quad (5.2)$$

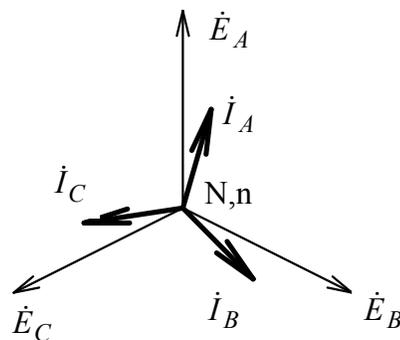


Рис. 5 - 5

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{Bn}}{\underline{Z}_B} = \frac{\dot{E}_B - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_B};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{Cn}}{\underline{Z}_C} = \frac{\dot{E}_C - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_C}.$$

Напряжение смещения нейтрали рассчитывается методом двух узлов:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}. \quad (5.3)$$

Диаграмма напряжений для этого случая показана на рис. 5 - 6.

## 2.2. Трёхфазная цепь звезда-треугольник.

Схема подключения приёмника для данного случая приведена на рис. 5 - 7.

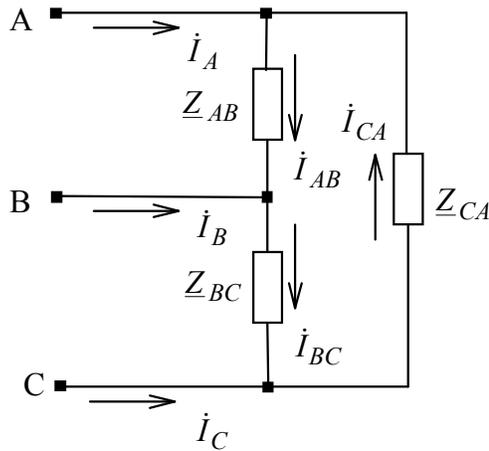


Рис. 5 - 7

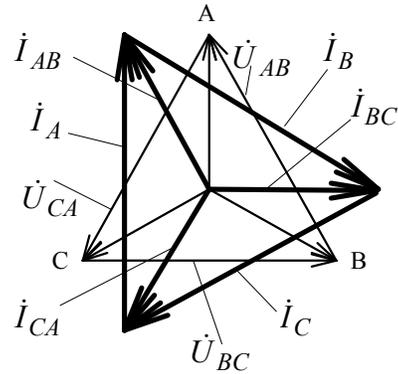


Рис. 5 - 8

Из рисунка видно, что фазные напряжения приёмника равны линейным, т.е.  $U_\phi = U_L$ . Токи в линейных проводах при любой нагрузке определяются по первому закону Кирхгофа через фазные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \quad (5.4)$$

Фазные токи рассчитываются по закону Ома:

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

Для симметричного приёмника эти токи на векторной диаграмме представляют три равных вектора, сдвинутых относительно друг друга на  $2\pi/3$ , а по модулю они в  $\sqrt{3}$  раз меньше линейных токов.

Векторная диаграмма токов при резистивной нагрузке для этого случая показана на рис. 5 - 8.

### 3. Лабораторное оборудование

Работа выполняется на универсальном стенде с необходимыми измерительными приборами. Трёхфазный генератор подключен к клеммам А, В, С, О центральной панели стенда. В качестве трёхфазного приёмника используется три группы ламп накаливания. В одной группе ламп имеются два тумблера, позволяющие включать в нагрузку одну, две или три лампы. Можно выключать все лампы, при этом получается режим холостого хода. В качестве индуктивной нагрузки используется катушка с сердечником, в качестве емкостной – батарея конденсаторов.

### 4. Рабочее задание

#### 4.1. Трёхпроводная система звезда-звезда.

4.1.1. Измерить и записать фазные ( $U_A, U_B, U_C$ ) и линейные ( $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ ) напряжения трёхфазного генератора.

4.1.2. Собрать цепь по рис.5 - 9. В качестве приёмника использовать три группы ламп. В фазу, сопротивление которой нужно изменять (см. вариант по табл.5.1), включить группу ламп с тумблерами.

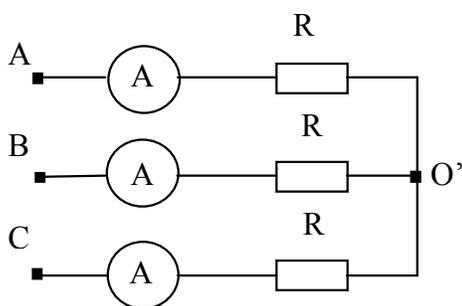


Рис. 5 - 9

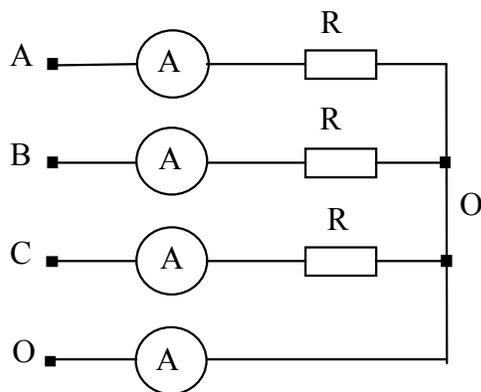


Рис. 5 - 10

Таблица 5.1

Пункт задания	Что делать	Номер варианта					
		1	2	3	4	5	6
4.1.3	Изменять	А	В	С	А	С	В
4.1.5	сопротивление	В	С	А	С	В	А
4.2.2.	в фазе	С	А	В	В	А	С
	Оставить R в фазе	А	В	А	С	В	С

4.2.3	Включить L в фазу	B	C	C	A	A	B
4.3.2.	Обрыв линейного провода	A	B	C	A	B	C
	Обрыв фазы	a-b	b-c	c-a	b-c	c-a	a-b

4.1.3. Изменять сопротивление фазы в соответствии с номером варианта, по очереди выключая лампы с помощью переключателей. В каждом режиме измерить фазные напряжения приёмника и смещение нейтрали. В одном из режимов измерить токи. Данные занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

Режим работы	$U_{AO'}$	$U_{BO'}$	$U_{CO'}$	$U_{O'O}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$
1.Холостой ход							
2.Включен правый тумблер (одна лампа)							
3.Включен левый тумблер (две лампы)							
4.Включены оба тумблера (три лампы)							

4.1.4. По результатам измерений в п.п. 4.1.1. и 4.1.3. построить векторную диаграмму напряжений генератора, на ней же построить линию перемещения нейтральной точки нагрузки (см. методические указания). Здесь же построить векторную диаграмму токов для одного из режимов.

4.1.5. Заменить в одной из фаз лампы на конденсаторную батарею в соответствии с номером варианта (см. табл. 5.1). Изменяя емкостное сопротивление от максимального (режим холостого хода, все конденсаторы батареи отключены) до минимального, подключая постепенно конденсаторы батареи (3-4 режима), измерить те же величины, что и в п.4.1.3. Данные измерений занести в таблицу, аналогичную табл.5.2.

Выполнить построения, аналогичные п.4.1.4.

#### 4.2. Четырехпроводная система.

4.2.1. Собрать цепь по рис. 5 - 10. В соответствии с табл.5.1 включить группу ламп с тумблерами в фазу, сопротивление которой надо изменять.

4.2.2. Изменять сопротивление заданной фазы аналогично п.4.1.3. В каждом режиме измерять токи в фазах и проводе. Убедиться, что при равенстве токов в фазах ( $I_A = I_B = I_C$ ) ток в нейтральном проводе отсутствует ( $I_0 = 0$ ).



3. Обрыв фазы (указать, какой)									
-----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

4.3.3. По результатам измерений п. 4.3.2. построить векторные диаграммы токов и напряжений для всех режимов (См. рис. 5 - 8).

## 5. Методические указания

Положение нейтральной точки нагрузки на векторной диаграмме в каждом режиме можно определить с помощью засечек, проведенных из вершин А, В, С треугольника напряжений генератора (см. рис.5 - 6), радиусами, равными соответствующим фазным напряжениям нагрузки.

Нейтральные точки нагрузки всех режимов наносятся на одну диаграмму. Определяется положение нейтрали в режиме короткого замыкания. Через получившиеся 5 точек проводится линия смещения нейтрали.

## 6. Вопросы для самопроверки

6.1. Какую трёхфазную систему ЭДС называют симметричной?

6.2. Дайте определение фазного и линейного напряжений.

6.3. Каково соотношение между фазными и линейными напряжениями при соединении обмоток генератора звездой?

6.4. Покажите линию смещения нейтрали нагрузки в трехпроводной трехфазной системе, если приёмник имеет ёмкостные сопротивления фаз, одно из которых изменяется.

6.5. Как изменится накал нитей ламп в симметричной системе звезда-звезда без нейтрального провода:

а) при размыкании одной из фаз?

б) при коротком замыкании одной из фаз?

6.6. Можно ли добиться нулевого показания амперметра в нейтральном проводе при неоднородной нагрузке фаз, когда в фазу А включен резистор, в фазу В – конденсатор, в фазу С – идеальная индуктивная катушка?

6.7. В трехфазной четырехпроводной системе, питающей осветительную нагрузку, произошел обрыв нейтрального провода. Будут ли лампы во всех фазах гореть одинаково ярко, если:

а) мощность ламп в одной из фаз намного больше, чем в двух других фазах?

б) мощность ламп во всех фазах одинакова?

А. В симметричном генераторе, соединенном звездой,  $\dot{E}_A = 220e^{j90^\circ}$  В. Определите мгновенное значение линейного напряжения  $u_{BC}$ .

В. Запишите формулу для определения смещения нейтрали  $\dot{U}_{o'o}$ , если обмотки генератора и приёмника соединены звездой без нейтрального провода.

С. Как изменятся напряжения, фазные и линейные токи при переключении симметричного трехфазного приёмника из звезды в треугольник?

## Лабораторная работа № 6 ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК

### 1. Цель работы

Исследование несимметричного пассивного четырехполюсника в режимах холостого хода, короткого замыкания и с заданной нагрузкой при питании от источника синусоидального напряжения.

### 2. Предварительные сведения

Линейным пассивным (обратимым) четырехполюсником называют часть линейной электрической цепи, не содержащую источников энергии и имеющую два входных (1- 1') и два выходных (2 - 2') зажима (полюса, вывода).

На рис. 6 - 1 изображена схема прямого включения четырехполюсника между источником питающего напряжения  $\dot{U}_1$  и нагрузкой  $Z_2$ . При обратном питании контакты 2 - 2' подключают к источнику, а нагрузку - к выводам 1 - 1'.

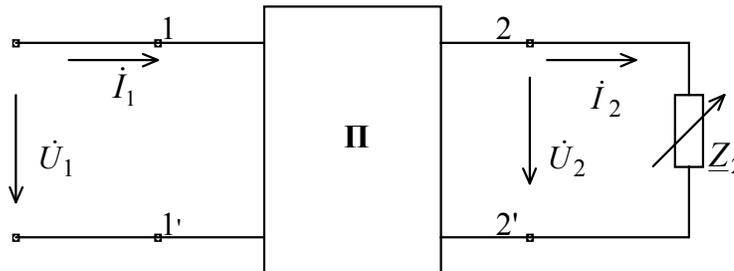


Рис. 6-1

Основные уравнения четырехполюсника в форме А:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= A_{11}\dot{U}_2 + A_{12}\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= A_{21}\dot{U}_2 + A_{22}\dot{I}_2. \end{aligned} \quad (6.1)$$

Здесь А - комплексные коэффициенты, постоянные для каждого конкретного четырехполюсника независимо от режима его работы.

Четырехполюсник называют симметричным, если значения тока и напряжения на нагрузке не зависят от того на какие зажимы подано входное напряжение: 1 - 1' или 2 - 2'. Для симметричного четырехполюсника  $A_{11} = A_{22}$ .

Известно, что между А-коэффициентами существует связь в виде уравнения:

$$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1. \quad (6.2)$$

Найти значения коэффициентов можно по входным сопротивлениям четырехполюсника в режимах холостого хода и короткого замыкания при прямом и обратном питании.

$$\text{Так, } A_{11} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1xx}\underline{Z}_{1kз}}{\underline{Z}_{2kз}(\underline{Z}_{1xx} - \underline{Z}_{1kз})}}, \text{ или } A_{11} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1xx}}{\underline{Z}_{2xx} - \underline{Z}_{2kз}}}, \quad (6.3)$$

а остальные коэффициенты определяются так:

$$A_{12} = A_{11}\underline{Z}_{2kз}, \quad A_{21} = \frac{A_{11}}{\underline{Z}_{1xx}}, \quad A_{22} = A_{21}\underline{Z}_{2xx} \quad \text{или} \quad A_{22} = \frac{A_{12}}{\underline{Z}_{1kз}}.$$

Здесь:

$$\underline{Z}_{1xx} = \frac{\dot{U}_{1xx}}{\dot{I}_{1xx}} = Z_{1xx}e^{j\varphi_{1xx}} \text{ - комплексное входное сопротивление четырехполюсника при питании со стороны выводов 1-1' при отключенной нагрузке на зажимах 2-2'}$$

ника при питании со стороны выводов 1-1' при отключенной нагрузке на зажимах 2-2';

$$\underline{Z}_{1kз} = \frac{\dot{U}_{1kз}}{\dot{I}_{1kз}} = Z_{1kз}e^{j\varphi_{1kз}} \text{ - комплексное входное сопротивление четырехполюсника при питании со стороны выводов 1-1' и закороченных зажимах 2-2'}$$

ника при питании со стороны выводов 1-1' и закороченных зажимах 2-2'.

Значения  $\underline{Z}_{2xx} = Z_{2xx}e^{j\varphi_{2xx}}$  и  $\underline{Z}_{2kз} = Z_{2kз}e^{j\varphi_{2kз}}$  определяются аналогично рассмотренным, но при обратном питании четырехполюсника (источник подключен к выводам 2-2').

Для определения коэффициентов достаточно любых трех  $\underline{Z}$  из четырех указанных сопротивлений, поэтому можно провести только три опыта.

Если А-коэффициенты четырехполюсника определены, то параметры режима цепи (токи, напряжения, мощности) при заданном сопротивлении нагрузки и известном напряжении источника могут быть рассчитаны из уравнений четырехполюсника в форме А с учетом соотношения  $\dot{U}_2 = \dot{I}_2\underline{Z}_2$ .

### 3. Лабораторное оборудование

Работа выполняется на универсальном стенде со сменными панелями, на которых размещены исследуемый четырехполюсник, необходимые приборы, батарея конденсаторов, регулируемый лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), являющийся источником питания исследуемой цепи, реостат и т.д. Дополнительно к имеющемуся на стенде оборудованию необходимо использовать ваттметр.

На рисунке 6 - 2 изображена схема для проведения эксперимента.

### 4. Рабочее задание

4.1. Собрать цепь по схеме рис. 6 - 2.

4.2. В соответствии с вариантом (см. таблицу 6.1) провести три опыта для определения входных сопротивлений четырехполюсника при холостом ходе и коротком замыкании. Рассчитать значения этих сопротивлений (см. методические указания).

Таблица 6.1

№ варианта	1	2	3	4
п.п. 4.2.	$Z_{1x}; Z_{1k}; Z_{2k}$	$Z_{2x}; Z_{2k}; Z_{1k}$	$Z_{1x}; Z_{2x}; Z_{1k}$	$Z_{1x}; Z_{2x}; Z_{2k}$
п.п. 4.5.	$\dot{U}_1; \dot{I}_1$	$\dot{U}_2; \dot{I}_2$	$\dot{U}_1; \dot{I}_1$	$\dot{U}_2; \dot{I}_2$

4.3. Рассчитать по найденным сопротивлениям А-коэффициенты четырехполюсника.

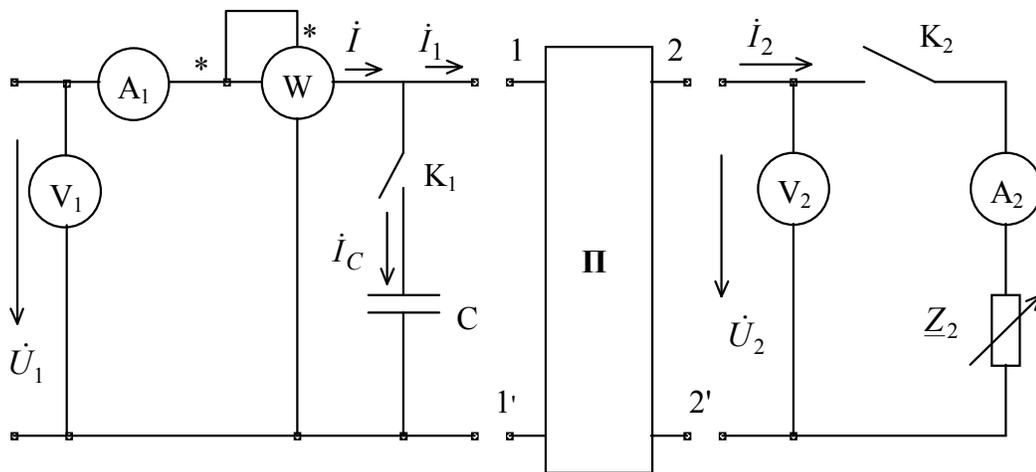


Рис. 6 - 2

4.4. Установить на стенде заданные преподавателем значения напряжения питания и сопротивления нагрузки и экспериментально определить параметры режима работы цепи. Для вариантов 2 и 4 исследуется схема обратного питания (задано напряжение питания на зажимах 2 - 2').

4.5. По заданным в п.п. 4.4 напряжению питания и сопротивлению нагрузки рассчитать параметры режима работы цепи, указанные в таблице 6.1, используя полученные А-коэффициенты.

4.6. По указанию преподавателя определить характеристические параметры четырехполюсника, либо параметры одной из схем его замещения (Т или Π).

## 5. Методические указания

5.1. Для определения знака  $\varphi_{вх}$  необходимо включить  $K_1$ , и, если вследствие этого показания амперметра  $A_1$  уменьшатся, то аргумент  $\varphi_{вх} > 0$ ; при увеличении показаний  $A_1$  аргумент  $\varphi_{вх} < 0$ .

5.2. По показаниям вольтметра и амперметра определяется только модуль входного сопротивления. Разность фаз между напряжением и током (аргумент  $Z_{вх}$ ) рассчитывается из соотношения

$$|\varphi_{вх}| = \arccos \frac{P}{U_1 I_1}. \quad (6.4)$$

Здесь  $U_1$  и  $I_1$  - показания вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  при выключенном ключе  $K_1$ .

## 6. Вопросы для самопроверки

6.1. Поясните на векторной диаграмме определение знака аргумента ( $\varphi_{вх}$ ), описанное в методических указаниях (см. п.п. 5.1)? Имеет ли существенное значение величина емкости  $C$  в цепи по рис. 6 - 2?

6.2. Может ли ток  $I_{Ixx}$  быть больше, чем  $I_{Ikз}$ ?

6.3. Как связаны А-коэффициенты четырехполюсника с параметрами элементов Т - образной схемы замещения?

6.4. Как связаны А-коэффициенты с параметрами П - образной схемы замещения четырехполюсника?

6.5. Могут ли при изменении  $0 < Z_2 < \infty$  иметь экстремум показания ваттметра? Рассмотрите отдельно изменение активной и реактивной нагрузок.

6.6. Могут ли при изменении  $0 < Z_2 < \infty$  иметь экстремум показания амперметра  $A_1$ ?

6.7. Могут ли при изменении  $0 < Z_2 < \infty$  иметь экстремум показания амперметра  $A_2$ ?

## Лабораторная работа № 7 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

### 1. Цель работы

Исследование зависимости коэффициента затухания и коэффициента фазы одного из симметричных реактивных фильтров от частоты.

### 2. Предварительные сведения

Электрическим фильтром называется статическое устройство, служащее для выделения колебаний определенной полосы частот.

Любой реактивный фильтр собирается из катушек индуктивности и конденсаторов и может состоять из одного или нескольких Г -, Т -, П - образных, мостовых и других звеньев. Принцип работы реактивных фильтров основан на свойстве индуктивности оказывать токам низких частот значительно меньшее сопротивление, чем токам высоких частот, так как индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте ( $X_L = \omega L$ ). Емкость оказывает значительно меньшее сопротивление токам

высоких частот, чем токам низких частот, поскольку емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте ( $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ).

Фильтр представляет собой пассивный четырехполюсник. Простейший реактивный фильтр состоит из одного звена Г - образного типа. Он несимметричен и поэтому имеет два характеристических сопротивления, вычисляемых относительно входных (1-1') и выходных (2-2') зажимов. Симметричные фильтры Т - и П - образного типа состоят из двух Г - образных звеньев. У симметричных фильтров только одно характеристическое сопротивление  $Z_C$ . При теоретическом анализе работы фильтра считают, что на любой частоте фильтр нагружен на характеристическое сопротивление  $Z_C$  (рис. 7 - 1).

При этом условии связь между токами и напряжениями на входе и выходе фильтра будет выражаться формулами:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cdot e^\gamma = \dot{U}_2 \cdot e^\alpha \cdot e^{j\beta}, \quad (7.1)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \cdot e^\gamma = \dot{I}_2 \cdot e^\alpha \cdot e^{j\beta}, \quad (7.2)$$

где  $\gamma = \alpha + j\beta$  - коэффициент передачи, в общем случае, комплексное число, действительная часть которого  $\alpha$  - коэффициент затухания, а мнимая часть  $\beta$  - коэффициент фазы.

Полоса частот, для которых затухание мало, или, в идеальном случае, равно нулю, называется полосой пропускания (ПП) или зоной прозрачности фильтра. Остальную область частот составляет полоса задерживания (ПЗ) фильтра. Частоты, лежащие на границе полосы пропускания, называются частотами среза.

В зависимости от пропускаемого спектра частот фильтры разделяются на низкочастотные, высокочастотные, полосовые и заграждающие.

Классификация фильтров по характеристикам выделяет простейшие фильтры типа **К** и фильтры более высокого класса - производные фильтры типа **м**.

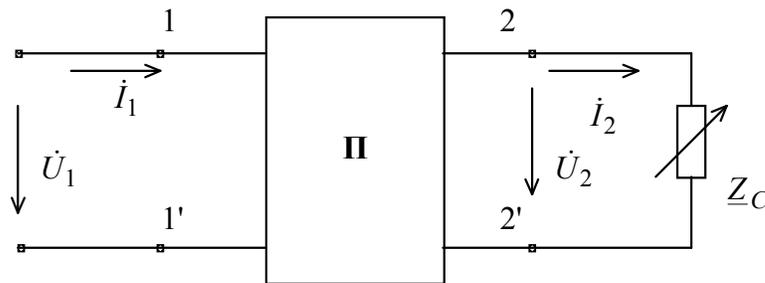


Рис. 7 - 1

В работе исследуются симметричные Т - и П - образные фильтры (рис. 7 - 2) типа К. Расчет характеристических сопротивлений и коэффициентов четырехполюсника может производиться через продольное  $Z_1$  и поперечное  $Z_2$  сопротивления фильтра.

Схемы реактивных фильтров и их основные характеристики приведены в таблице 7.1.

Расчет граничных частот, меры передачи, коэффициента затухания и коэффи-

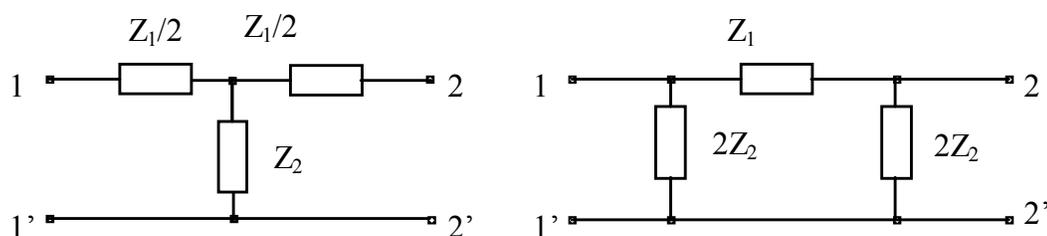


Рис.7 - 2

циента фазы подробно рассматривается в [1], [2], [4].

Анализ работы фильтра производится по формуле:

$$A_{11} = ch\gamma = ch\alpha \cdot \cos\beta + jsh\alpha \cdot \sin\beta = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2}. \quad (7.3)$$

В полосе пропускания  $\alpha = 0$  и, следовательно,

$$A_{11} = \cos\beta. \quad (7.4)$$

В полосе задерживания  $\alpha \neq 0$  и, следовательно,  $\sin\beta = 0$ , т.е.  $\beta = 0$  или  $\beta = \pm\pi$ . Для всех указанных в таблице 7.1 фильтров  $\beta = \pm\pi$ , поэтому  $\cos\beta = -1$  и

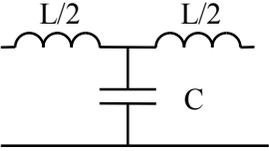
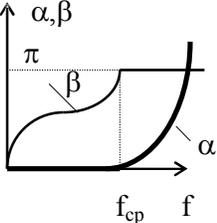
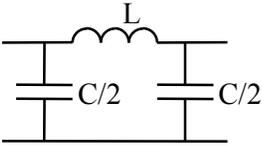
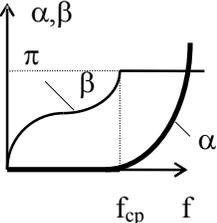
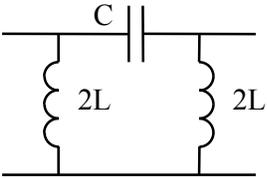
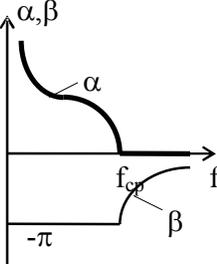
$$A_{11} = -ch\alpha. \quad (7.5)$$

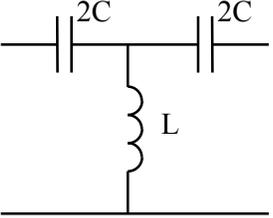
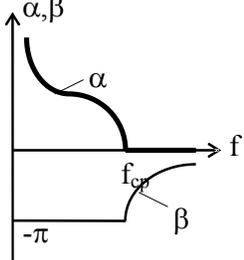
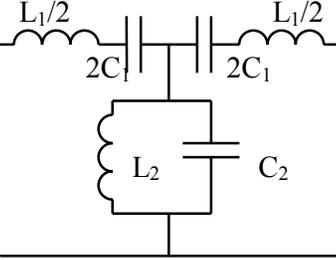
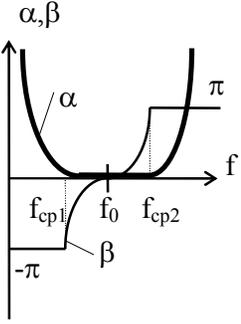
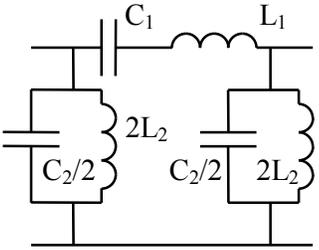
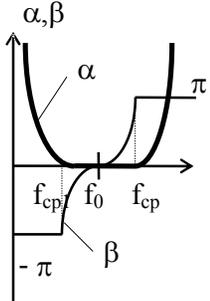
Из сопоставления формул (7.4) и (7.5) получаем, что граничная частота, отделяющая полосу пропускания от полосы задерживания, должна удовлетворять условию

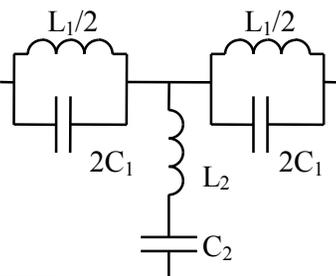
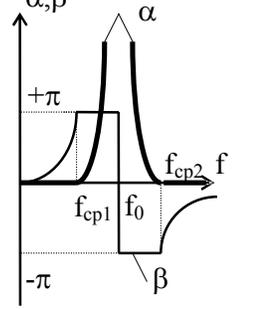
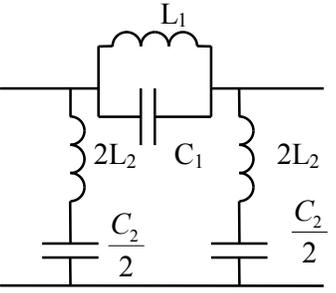
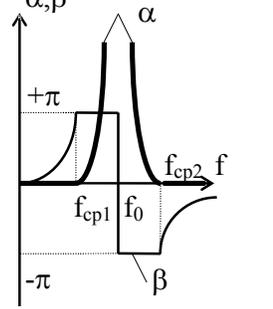
$$A_{11} = -1. \quad (7.6)$$

Используя это условие, можно найти граничные частоты через параметры фильтра. Формулы этих частот приведены в таблице 7.1. В этой же таблице даны формулы для коэффициента  $A_{11}$ , выраженные через граничные частоты. В формулы

Таблица 7.1

Наименование фильтра	Схема фильтра	Частота среза	Коэффициент $A_{11}$	Зависимость $\alpha$ и $\beta$ от частоты	$Z_c$
1	2	3	4	5	6
Низкочастотный Т - образный		$f_{cp} = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$	$1 - 2 \cdot \frac{f^2}{f_{cp}^2}$		$\sqrt{L/C}$
Низкочастотный П - образный		$f_{cp} = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$	$1 - 2 \cdot \frac{f^2}{f_{cp}^2}$		$\sqrt{L/C}$
Высокочастотный П - образный		$f_{cp} = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}$	$1 - 2 \cdot \frac{f_{cp}^2}{f^2}$		$\sqrt{L/C}$

1	2	3	4	5	6
<p>Высокочастотный Т - образный</p>		$f_{cp} = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}$	$1 - 2 \cdot \frac{f_{cp}^2}{f^2}$		$\sqrt{L/C}$
<p>Полосовой Т - образный</p>		$f_{cp1,2} = f_0 \cdot (\sqrt{m^2 + 1} \pm m),$ <p>где</p> $m = \sqrt{L_2 / L_1},$ $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$	$1 - \frac{(\frac{f^2}{f_0^2} - 1)^2}{2 \cdot \frac{f^2}{f_0^2} \cdot m^2}$		$\sqrt{L_2 / C_1}$
<p>Полосовой П - образный</p>		$f_{cp1,2} = f_0 \cdot (\sqrt{m^2 + 1} \pm m),$ <p>где</p> $m = \sqrt{L_2 / L_1},$ $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$	$1 - \frac{(\frac{f^2}{f_0^2} - 1)^2}{2 \cdot \frac{f^2}{f_0^2} \cdot m^2}$		$\sqrt{L_2 / C_1}$

1	2	3	4	5	6
<p>Заграждающий Т - образный</p>		$f_{cp1,2} = \frac{f_0}{4m} \cdot (\sqrt{16m^2 + 1} \pm m)$ <p>где</p> $m = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}};$ $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$	$1 - \frac{f^2}{f_0^2}$ $2m^2 \left(\frac{f^2}{f_0^2} - 1\right)^2$		$\sqrt{\frac{L_1}{C_2}}$
<p>Заграждающий П - образный</p>		$f_{cp1,2} = \frac{f_0}{4m} \cdot (\sqrt{16m^2 + 1} \pm m),$ <p>где</p> $m = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}};$ $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$	$1 - \frac{f^2}{f_0^2}$ $2m^2 \left(\frac{f^2}{f_0^2} - 1\right)^2$		$\sqrt{\frac{L_1}{C_2}}$

для полосового и заграждающего фильтров кроме граничных частот входит и резонансная частота  $f_0$ , на которую настроены последовательные и параллельные контуры фильтров.

В случае Т - образного фильтра характеристическое сопротивление

$$\underline{Z}_T = \sqrt{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2}\right)}; \quad (7.7)$$

в случае П - образного фильтра

$$\underline{Z}_П = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{1 + \frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2}}}. \quad (7.8)$$

Из формул следует, что характеристическое сопротивление зависит от частоты, поскольку и продольное  $\underline{Z}_1$  и поперечное  $\underline{Z}_2$  сопротивления зависят от частоты.

Если перемножить (7.7) на (7.8), получим

$$\underline{Z}_T \cdot \underline{Z}_П = \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 = K^2. \quad (7.9)$$

Фильтры, удовлетворяющие условию (7.9), получили название фильтров типа **К**. Можно собрать множество фильтров одного типа с одной и той же полосой пропускания, но с разным значением параметра К. Физически параметр К характеризует величину характеристического сопротивления на одной из частот полосы пропускания. При выполнении работы величина сопротивления нагрузки принимается постоянной и равной  $Z_C$ , указанной в таблице 7.1.

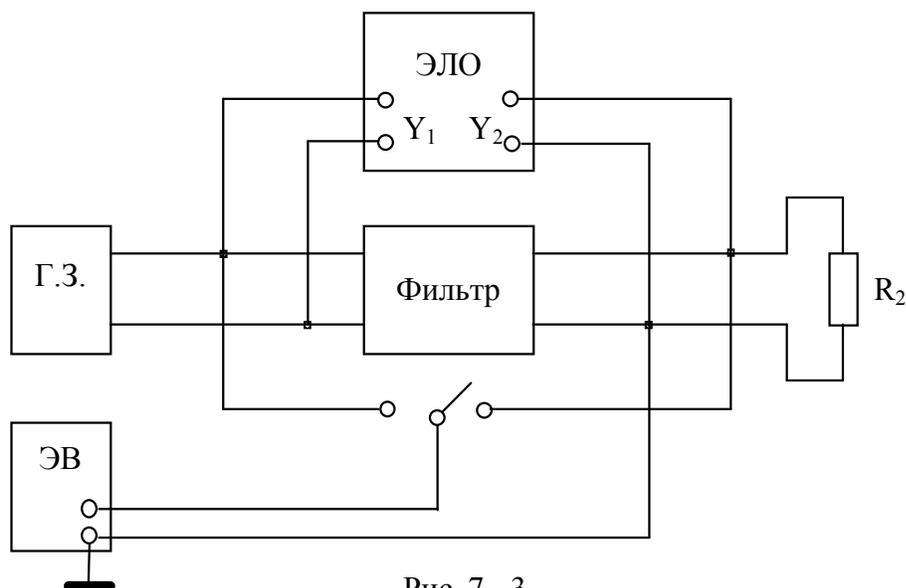


Рис. 7 - 3

### 3. Лабораторное оборудование

Источником питания является измерительный генератор синусоидальных колебаний (ГЗ), частота которого может изменяться в широких пределах. Фильтр наби-

рается из элементов, имеющихся на сменных панелях стендов. Нагрузкой служит магазин сопротивлений  $R_2$ . Напряжение на входе и выходе фильтра измеряется одним электронным вольтметром (ЭВ). Сдвиг фаз измеряется с помощью электронного осциллографа (ЭЛО).

#### 4. Рабочее задание

4.1. По указанию преподавателя исследуются 1 или 2 фильтра из табл. 7.1. Собрать схему по рис. 7 - 3.

4.2. По формулам таблицы 7.1 рассчитать граничные частоты фильтра.

4.3. Рассчитать и установить на магазине сопротивлений  $R_2 = Z_C$ .

А. Подключить фильтр к измерительному генератору. Изменяя его частоту, измерять электронным вольтметром напряжение на входе и выходе фильтра, а с помощью электронного осциллографа измерить отрезки «ab», и «cd» (см. методические указания). Данные измерений занести в таблицу 7.2.

4.5. По результатам измерений рассчитать амплитудную характеристику фильтра  $\ln \frac{U_1}{U_2} = \alpha(f)$  и фазовую характеристику фильтра  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \beta(f)$ . Построить

Таблица 7.2

№№ п/п	Эксперимент					Расчет			
	f	$U_1$	$U_2$	ab	ac	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\Delta\varphi$
	Размерности					Размерности			

полученные зависимости на графике. На этом же графике построить теоретические характеристики. Объяснить их разницу.

#### 5. Методические указания

Для измерения разности фаз  $\Delta\varphi$  между входным и выходным напряжениями фильтра использовать двухканальный осциллограф С1-77. На вход первого канала

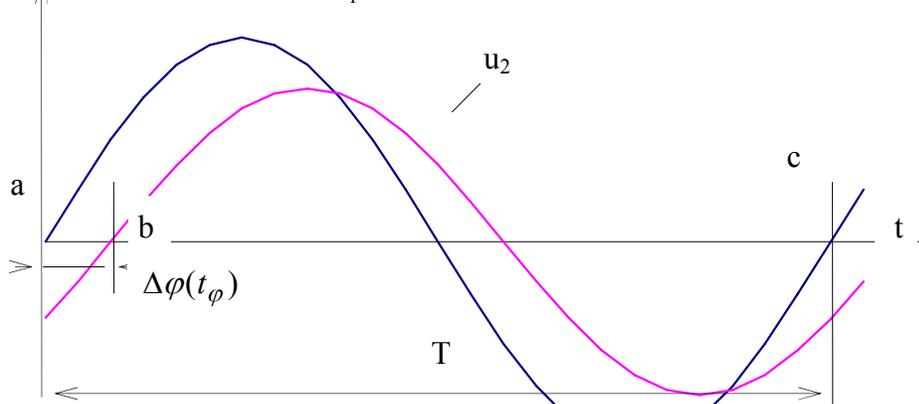


Рис. 7 - 4

$U_1$  подается входное напряжение фильтра  $u_1$ , а выходное напряжение  $u_2$  - на вход  $U_2$  второго канала. Переключатель режимов работы усилителя ставится в положение «...». На экране осциллографа наблюдаются неподвижные осциллограммы напряжений с обоих каналов (рис. 7 - 4). Если измерить в одинаковых единицах отрезки «ab» и «ac», соответствующие временам  $t_\varphi$  и  $T$ , то фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  можно определить по формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{ab}{ac} \cdot 360^\circ.$$

## 6. Вопросы для самопроверки

- 6.1. Что называют характеристическим сопротивлением фильтра и как его рассчитать?
- 6.2. Нарисуйте схемы Г - образных низкочастотного, высокочастотного, полосового и заграждающего фильтров.
- 6.3. Что показывает коэффициент затухания?
- 6.4. Что показывает коэффициент фазы?
- 6.5. Укажите характер характеристического сопротивления в полосах пропускания и задерживания для всех Г - и П - образных фильтров. Как определяется тип фильтра?
- 6.6. Объясните физический смысл параметра К для низкочастотных фильтров типа К?
- 6.7. Как рассчитать значения сопротивлений элементов схемы низкочастотного фильтра по заданной полосе пропускания и параметру К?
- 6.8. Как рассчитать значения сопротивлений высокочастотного фильтра по заданной полосе пропускания и параметру К?
- 6.9. Укажите основные недостатки фильтров типа К.

## **Требования кафедры к отчетам студентов по лабораторным работам**

Отчеты студентов по выполненным лабораторным работам должны быть оформлены аккуратно, без зачеркивания и вставок. Рекомендуется использовать для материалов отчета обе стороны каждого листа. Титульная сторона первого листа оформляется так, как показано на стр.56.

Текст должен быть написан разборчиво и грамотно. Графическую часть следует выполнять в соответствии с ЕСКД с применением чертежных инструментов (для изображения схем целесообразно использовать трафаретные линейки). Графики, векторные диаграммы необходимо строить на миллиметровой бумаге. На диаграммах должны быть указаны масштабы, принятые для изображенных величин. На графиках возле стрелок осей координат следует указать обозначения соответствующих физических величин и их размерности. На осях координат необходимо нанести деления через 1 - 2 - 3 - 4 - 5 см и возле этих делений указать соответствующие им зна-

чения физических величин (эти числа для удобства отсчета должны быть кратны 2, 5 или 10).

Название работы указывается на титульном листе, а уже в самой работе - ее цель и использованное лабораторное оборудование (с указанием измерительных приборов, их систем и класса точности). По каждому пункту задания нужно дать краткое описание хода работы, изобразить схему электрической цепи, в которой проводились опыты, привести результаты экспериментов (как правило, в виде таблиц), а также выполнить необходимые расчеты с обязательной записью формул, по которым они проводились. В конце отчета необходимо изложить сделанные выводы и дать перечень использованной литературы. Если работа проводится по нетиповой методике, то в отчет необходимо еще ввести раздел с теоретическим обоснованием эксперимента.

Отчеты должны быть подписаны выполнившими работу студентами.

Вятский технический университет  
Кафедра электротехники и электроники

О Т Ч Е Т

о лабораторной работе № 1 по ТОЭ ч.1

---

---

Работу выполнил:

студент \_\_\_\_\_  
(фамилия, инициалы, группа)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Отчет принял: \_\_\_\_\_  
(фамилия, инициалы преподавателя)

1998 г.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Теоретические основы электротехники.- М.: Энергоатомиздат.-1989.-528с.
2. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч.1. Линейные электрические цепи.- М.: Энергия.-1978.-592с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.1.- Л.: Энергоиздат.-1981.-536с.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи.- М.: Высшая школа.-1978.-528с.
5. Теоретические основы электротехники. Т.1. Основы теории цепей./ Под ред. Ионкина П.А.- М.: Высшая школа.-1976.-544с.
6. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Т.1. Электрические цепи с сосредоточенными параметрами.- М.-Л.: Энергия.-1972.-360с.
7. Попов В.П. Основы теории цепей.- М.: Высшая школа.-1985.-496с.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	3
Лабораторная работа №1 РАЗВЕТВЛЁННАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	6
Лабораторная работа N2 РАЗВЕТВЛЁННЫЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА.....	11
Лабораторная работа N 3 РЕЗОНАНСНЫЕ РЕЖИМЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА	19
Лабораторная работа № 4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ.....	26
Лабораторная работа №5 ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ .....	36
Лабораторная работа № 6 ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК.....	43
Лабораторная работа № 7 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ.....	47
Требования кафедры к отчетам студентов по лабораторным работам.....	55
ЛИТЕРАТУРА.....	57

Гинзбург Елена Леонидовна  
Кривошеина Маргарита Анатольевна  
Труль Людмила Семеновна

Э Л Е К Т Р И Ч Е С К И Е   Ц Е П И  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТОЭ ч.1  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Редактор О.Г.Ласточкина

Подписано в печать

Бумага писчая № 1

Заказ №

Офсетная печать

Тираж

Усл.печ. л.

Уч.-изд. л.

Формат

---

610 000, г. Киров, ул. Московская, 36.

© Вятский государственный технический университет, 1998