

Департамент внутренней и кадровой политики Белгородской области  
Областное государственное автономное  
профессиональное образовательное учреждение  
**«Белгородский индустриальный колледж»**

Рассмотрено цикловой комиссией  
«Информатики и ПОВТ»  
Протокол заседания №1  
от «30»августа 2020 г.  
Председатель цикловой комиссии  
\_\_\_\_\_ Третьяк И.Ю.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
по выполнению практических работ  
по дисциплине  
**ОП.10 ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

по специальности  
09.02.06 Сетевое и системное администрирование

Квалификация специалист по администрированию сети

Разработчик:  
Преподаватель  
Белгородский индустриальный  
колледж  
Завьялова В.Н.

Белгород, 2020 г.

## Содержание

	Стр.
1. Пояснительная записка	3
1.1. Краткая характеристика дисциплины, ее цели и задачи. Место практических работ в курсе дисциплины	3
1.2. Организация и порядок проведения практических работ	3
1.3. Общие указания по выполнению практических работ	3
1.4. Критерии оценки результатов выполнения практических работ	4
2. Тематическое планирование практических работ	5
3. Содержание практических работ	6
Практическая работа №1 Электроизмерительные приборы и измерения	6
Практическая работа № 2 Исследование электрических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединении конденсаторов	12
Практическая работа № 3 Исследование электрических цепей при последовательном и параллельном соединении резисторов	16
Практическая работа № 4 Изучение расчета электрических цепей методом преобразование схем	21
Практическая работа № 5 Изучение расчета электрических цепей методом наложения	28
Практическая работа № 6 Расчет магнитных цепей	30
Практическая работа № 7 Исследование переходных процессов в цепи R,L	33
Практическая работа № 8 Исследование переходных процессов в цепи R,C	37
Практическая работа № 9 Построение векторных диаграмм	40
Практическая работа № 10 Исследование последовательной резонансной цепи	45
4. Информационное обеспечение обучения	52

## 1. Пояснительная записка

### 1.1. Краткая характеристика дисциплины ОП.10 «Основы электротехники», ее цели и задачи. Место практических работ в курсе дисциплины ОП.10 «Основы электротехники»

Дисциплина ОП.10 «Основы электротехники» является частью рабочей основной образовательной программы в соответствии с ФГОС по специальности СПО 09.02.06 Сетевое и системное администрирование.

Дисциплина изучается в V семестре. В целом рабочей программой предусмотрено 20 часов на выполнение практических работ, что составляет 45 % от обязательной аудиторной нагрузки, которая составляет 44 часа, при этом максимальная нагрузка составляет 46 часа, из них 2 часа приходится на самостоятельную работу обучающихся.

Цель настоящих методических рекомендаций: оказание помощи обучающимся в выполнении практических работ по дисциплине ОП.10 «Основы электротехники», качественное выполнение которых поможет обучающимся освоить обязательный минимум содержания дисциплины и подготовиться к промежуточной аттестации в форме дифференцированного зачета.

### 1.2. Организация и порядок проведения практических работ

Практические работы проводятся после изучения теоретического материала. Введение практических работ в учебный процесс служит связующим звеном между теорией и практикой. Они необходимы для закрепления теоретических знаний, а также для получения практических навыков и умений. При проведении практических работ задания, выполняются студентом самостоятельно, с применением знаний и умений, усвоенных на предыдущих занятиях, а также с использованием необходимых пояснений, полученных от преподавателя. Обучающиеся должны иметь методические рекомендации по выполнению практических работ, конспекты лекций, измерительные и чертежные инструменты, средство для вычислений.

### 1.3. Общие указания по выполнению практических работ

Курс практических работ по дисциплине ОП.10 «Основы электротехники» предусматривает проведение 10 работ, посвященных изучению:

- Электроизмерительных приборов и измерений.
- Исследованию электрических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединении конденсаторов.
- Исследованию электрических цепей при последовательном и параллельном соединении резисторов.
- Изучению расчета электрических цепей методом преобразование схем.
- Изучению расчета электрических цепей методом наложения.
- Расчету магнитных цепей.
- Исследованию переходных процессов в цепи R,L
- Исследованию переходных процессов в цепи R,C
- Построению векторных диаграмм.
- Исследованию последовательной резонансной цепи.

При подготовке к проведению практической работы необходимо:

- ознакомиться с целями проведения практической работы;
- ознакомиться с порядком выполнения работы.

После выполнения практической работы обучающийся к следующему занятию оформляет отчет, который должен содержать:

- название практической работы, ее цель;
- краткие, теоретические сведения об изучаемой теме;
- все необходимые, предусмотренные практической работой, расчеты;
- выводы по итогам работы;
- ответы на контрольные вопросы.

#### 1.4. Критерии оценки результатов выполнения практических работ

Критериями оценки результатов работы обучающихся являются:

- уровень усвоения обучающимся учебного материала;
  - умение обучающегося использовать теоретические знания при выполнении практических задач;
  - сформированность общих и профессиональных компетенций:
- ОК 01 Выбирать способы решения задач профессиональной деятельности, применительно к различным контекстам;
- ОК 02 Осуществлять поиск, анализ и интерпретацию информации, необходимой для выполнения задач профессиональной деятельности;
- ОК 04 Работать в коллективе и команде, эффективно взаимодействовать с коллегами, руководством, клиентами;
- ОК 05 Осуществлять устную и письменную коммуникацию на государственном языке с учетом особенностей социального и культурного контекста;
- ОК 09 Использовать информационные технологии в профессиональной деятельности;
- ОК 10 Пользоваться профессиональной документацией на государственном и иностранном языках;
- ПК 1.1 Выполнять проектирование кабельной структуры компьютерной сети;
- ПК 3.1 Устанавливать, настраивать, эксплуатировать и обслуживать технические и программно-аппаратные средства компьютерных сетей;
- ПК 3.2 Проводить профилактические работы на объектах сетевой инфраструктуры и рабочих станциях.
- обоснованность и четкость изложения материала;
  - уровень оформления работы.
  - анализ результатов.

#### Критерии оценивания практической работы

Оценка	Критерии оценивания
5	Работа выполнена в полном объеме с соблюдением необходимой последовательности проведения, содержит результаты и выводы, все записи, таблицы, рисунки, чертежи, графики выполнены аккуратно. Обучающийся владеет теоретическим материалом, формулирует собственные, самостоятельные, обоснованные, представляет полные и развернутые ответы на дополнительные вопросы.
4	Работа выполнена в полном объеме с соблюдением необходимой последовательности проведения, содержит результаты и выводы, все записи, таблицы, рисунки, чертежи, графики выполнены аккуратно. Обучающийся владеет теоретическим материалом, допуская незначительные ошибки на дополнительные вопросы.
3	Работа выполнена в полном объеме, содержит результаты и выводы, все записи, таблицы, рисунки, чертежи, графики выполнены аккуратно. Обучающийся владеет теоретическим материалом на минимально допустимом уровне, допуская ошибки на дополнительные вопросы.
2	Работа выполнена не полностью. Студент практически не владеет теоретическим материалом, допускает ошибки при ответе на дополнительные вопросы.

## 2. Тематическое планирование практических работ

	Наименование тем	Вид и название работы студента	Количество часов на выполнение работы
<b>Раздел 1</b>			<b>6</b>
1.2.	Электрические измерения	<b>Практическая работа №1</b> «Электроизмерительные приборы и измерения»	2
		<b>Практическая работа №2</b> «Исследование электрических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединении конденсаторов»	2
1.3.	Постоянный электрический ток	<b>Практическая работа №3</b> «Исследование электрических цепей при последовательном и параллельном соединении резисторов»	2
		<b>Практическая работа №4</b> «Изучение расчета электрических цепей методом преобразование схем»	2
		<b>Практическая работа №5</b> «Изучение расчета электрических цепей методом наложения»	2
1.4.	Электромагнетизм	<b>Практическая работа №6</b> «Расчет магнитных цепей»	2
1.5.	Однофазные электрические цепи переменного тока	<b>Практическая работа №7</b> «Исследование переходных процессов в цепи R,L»	2
		<b>Практическая работа №8</b> «Исследование переходных процессов в цепи R,C»	2
		<b>Практическая работа №9</b> «Построение векторных диаграмм»	2
		<b>Практическая работа №10</b> «Исследование последовательной резонансной цепи»	2
		<b>Итого:</b>	<b>20</b>

## 2. Содержание практических работ

### Практическая работа №1. «Электроизмерительные приборы и измерения».

**Цель работы:** сформировать знания и умения определять погрешности электроизмерительных приборов и различия между классами точности.

**Порядок выполнения работы:**

1. Проработайте теоретический материал и ответьте на контрольные вопросы.
2. Ознакомьтесь с заданием и выполните его.
3. Оформите результаты работы.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ



### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электроизмерительным прибором называют средство измерений, которое предназначено для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

В настоящее время измерения электрических величин производят приборами различных систем, основными из которых являются: магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая и ферродинамическая.

## Точность измерительных приборов

Точность - важнейшее свойство измерительных приборов и измерений, выполняемых с их помощью. Точность прибора характеризуется его погрешностями. Различают несколько видов погрешностей: абсолютную, относительную и приведенную. Абсолютная погрешность  $\Delta$  представляет собой разность между показанием прибора (значением измеряемой величины)  $a_u$  и действительным значением  $a_0$  измеряемой величины

$$\Delta = a_u - a_0$$

Относительная  $\delta$  и приведенная  $\gamma$  погрешности представляет собой отношение, в процентах, абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины или к нормирующему значению  $a_N$ , в качестве которого принимают диапазон измерений или верхний предел измерений прибора.

$$\delta = \frac{\Delta}{a_u} \cdot 100\%$$

$$\gamma = \frac{\Delta}{a_N} \cdot 100\%$$

Погрешности конкретных экземпляров измерительных приборов носят индивидуальный характер и могут принимать разные значения, однако они у исправных приборов не должны выходить за пределы допускаемых погрешностей, устанавливаемых в нормативной документации на приборы данного типа. Для электроизмерительных приборов такой предел без учета знака устанавливают для приведенной погрешности  $\gamma_n$  и называют его классом точности. Класс точности указывается в документации на измерительные приборы, а также наносится на их лицевые панели или циферблаты без указания обозначения процента. Количество и значения классов точности установлены стандартами в виде ограниченного числового ряда, который для электроизмерительных рабочих приборов имеет вид: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5- 1015-2,5; 4,0.

Для оценки точности результата конкретного измерения с помощью данного измерительного прибора необходимо знать пределы допускаемой абсолютной погрешности  $\pm \Delta_n$ , которые можно вычислить по известным классу точности и верхнему пределу (диапазону) измерений прибора по формуле

$$\Delta = \pm \frac{\gamma_n \cdot a_N}{100}$$

Зная пределы допускаемой абсолютной погрешности, можно представить полный результат измерения в виде

$$a_u \pm \Delta_n$$

Таблица 4

Наименование объекта обозначения	Условное обозначение
Амперметр	$\rho A, A$
Вольтметр	$\rho V, V$
Ваттметр	$\rho W, W$
Прибор магнитоэлектрической системы	
Прибор электромагнитной системы	
Прибор электродинамической системы	
Прибор ферродинамической системы	
Постоянный ток	
Переменный ток	
Постоянный и переменный ток	
Трехфазный ток	
Трехфазный ток для неравномерной нагрузки	
Горизонтальное положение прибора	
Вертикальное положение прибора	
Наклонное положение прибора, например, под углом $60^\circ$	
Класс точности прибора, например, 1,5	1,5 
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2 кВ	
Защита от внешних магнитных полей	
Защита от внешних электрических полей	
Выпрямительный прибор	













## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Задание 1

Вычислить допустимую абсолютную погрешность измерительных приборов и записать в таблицу.

Таблица 5

Название прибора	Наименование системы	Условное обозначение системы	Класс точности	Диапазон измерений	Цена деления	Остальные данные прибора	Допускаемая абсолютная погрешность, $\Delta_n$
Вольтметр	Магнитоэлектрическая		1,5	$0 \div 50\text{В}$	$C_V = 2 \text{ В/дел}$		
Ваттметр	Ферродинамическая		1,5	$0 \div 2\text{КВт}$	$C_W = 0,1 \text{ КВт/дел}$		
Амперметр	Электромагнитная		0,5	$0 \div 2,5\text{А}$ $0 \div 5\text{А}$	$C_{A'} = 0,025 \text{ А/дел}$ $C_{A''} = 0,05 \text{ А/дел}$		
Вольтметр	Электромагнитная		0,5	$0 \div 75\text{В}$ $0 \div 150\text{В}$ $0 \div 300\text{В}$ $0 \div 600\text{В}$	$C_{V'} = 0,5 \text{ В/дел}$ $C_{V''} = 1 \text{ В/дел}$ $C_{V'''} = 2 \text{ В/дел}$ $C_{V''''} = 4 \text{ В/дел}$		
Ваттметр	Ферродинамическая		0,5	$0 \div 75\text{Вт} * 5; 10$ $0 \div 150\text{Вт} * 5; 10$ $0 \div 300\text{Вт} * 5; 10$ $0 \div 600\text{Вт} * 5; 10$	2,5; 5 Вт/дел 5; 10 Вт/дел 10; 20 Вт/дел 20; 40 Вт/дел		




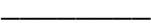

### Задание 2

Напишите формулы:

1. Абсолютной погрешности
2. Относительной погрешности
3. Приведённой погрешности

### Задание 3

Найти соответствие между условными обозначениями и родом тока, для которого они предназначены:

Род тока	Условные обозначения
А. Постоянный	а. 
Б. Переменный (однофазная система)	б. 
В. Постоянный и переменный	в. 
Г. Трёхфазная система (общее обозначение)	г. 
Д. Трёхфазная система (при несимметричной нагрузке фаз)	д. 

Ответ:

А	Б	В	Г	Д

### Задание 4

1. Класс точности прибора 1,0. Чему равна приведённая погрешность?

- а. 1,0
- б. 0,1
- в. 1

**2. Какой системы амперметры и вольтметры имеют равномерную шкалу?**

- а. Магнитоэлектрической
- б. Электромагнитной
- в. Электродинамической

**Контрольные вопросы:**

1. Что такое абсолютная погрешность электроизмерительного прибора?
2. Что такое класс точности электроизмерительного прибора?
3. Какие условные обозначения имеются на шкале электроизмерительного прибора?
4. Какие виды погрешностей вы знаете?
5. Как классифицируются электроизмерительные приборы?

## Практическая работа №2

### «Исследование электрических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединении конденсаторов».

**Цель работы:** Изучить методы соединения конденсаторов в электрических цепях постоянного тока. Рассчитать эквивалентную емкость, напряжение и заряд батареи конденсаторов при смешанном соединении конденсаторов.

#### Теоретическая часть:

Сообщение электрического заряда проводнику называется электризацией. Чем больший заряд принял проводник, тем больше его электризация, или, иначе говоря, тем выше его электрический потенциал.

Между количеством электричества и потенциалом данного уединенного проводника существует линейная зависимость: отношение заряда проводника к его потенциалу есть величина постоянная:

$$\frac{q}{\varphi} = C.$$

Для какого-либо другого проводника отношение заряда к потенциалу есть также величина постоянная, но отличная от этого отношения для первого проводника.

Одной из причин, влияющих на эту разницу, являются размеры самого проводника. Один и тот же заряд, сообщенный различным проводникам, может создать различные потенциалы. Чтобы повысить потенциал какого-либо проводника на одну единицу потенциала, необходим определенный заряд.

Свойство проводящих тел накапливать и удерживать электрический заряд, измеряемое отношением заряда уединенного проводника к его потенциалу, называется электрической емкостью, или просто емкостью, и обозначается буквой  $C$ .

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Приведенная формула позволяет установить единицу емкости.

Практически заряд измеряется в куллонах, потенциал в вольтах, а емкость в фарадах:

$$1 \text{ фарада} = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ вольт}}.$$

Емкостью в 1 фараду обладает проводник, которому сообщают заряд в 1 кулон и при этом потенциал проводника увеличивается на 1 вольт.

Единица емкости — фарада (обозначается  $\text{ф}$  или  $\text{F}$ ) очень велика. Поэтому чаще пользуются более мелкими единицами — микрофарадой ( $\text{мкф}$  или  $\mu\text{F}$ ), составляющей миллионную часть фарады:

$$1 \text{ мкф} = 10^{-6} \text{ ф},$$

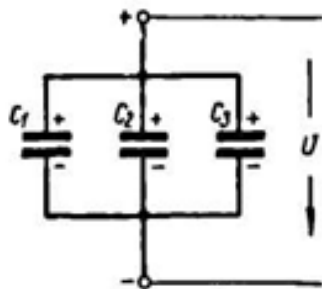
и пикофарадой (*пф*), составляющей миллионную часть микрофарады:

$$1 \text{ пф} = 10^{-5} \text{ мкф} = 10^{-12} \text{ ф}.$$

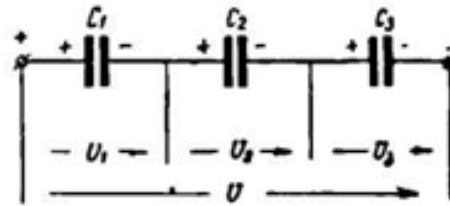
Найдем выражение практической единицы — фарады в абсолютных единицах:

$$\frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ вольт}} = \frac{3 \cdot 10^9}{1/300} = 9 \cdot 10^{11} \text{ абс. ед. емкости (сантиметров)}.$$

Устройство, предназначенное для накопления электрических зарядов, называется электрическим конденсатором. Конденсатор состоит из двух металлических пластин (обкладок), разделенных между собой слоем диэлектрика. Чтобы зарядить конденсатор, нужно его обкладки соединить с полюсами электрической машины. Разноименные заряды, скопившиеся на обкладках конденсатора, связаны между собой электрическим полем. Близко расположенные пластины конденсатора, влияя одна на другую, позволяют получить на обкладках большой электрический заряд при относительно невысокой разности потенциалов между обкладками. Емкость конденсатора есть отношение заряда конденсатора к разности потенциалов между его обкладками:



Параллельное  
соединение конденсаторов



Последовательное соедине-  
ние конденсаторов

При параллельном соединении конденсаторов напряжение на обкладках каждого конденсатора одно и то же. Поэтому можно написать:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U.$$

Количество электричества (заряд) каждого конденсатора:

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

Общий заряд батареи конденсаторов:

$$q = q_1 + q_2 + q_3; \\ q = C_1 U + C_2 U + C_3 U = U(C_1 + C_2 + C_3).$$

Обозначая емкость батареи конденсаторов через  $C$ , получаем:

$$q = CU,$$

тогда

$$CU = U(C_1 + C_2 + C_3)$$

или окончательно

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

Следовательно, при параллельном соединении конденсаторов общая емкость равна сумме емкостей отдельных конденсаторов. При параллельном соединении каждый конденсатор окажется включенным на полное напряжение сети. Рассмотрим последовательное соединение конденсаторов:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q.$$

Напряжение, приложенное ко всей батарее конденсаторов, равно сумме напряжений на обкладках каждого конденсатора:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Так как

$$U_1 = \frac{q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{q}{C_2}, \quad U_3 = \frac{q}{C_3},$$

для всей батареи

$$U = \frac{q}{C}.$$

Теперь можно написать

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

или, сокращая на  $q$ , получим окончательно:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

### Практическое задание:

Определить заряд, напряжение, энергию электрического поля каждого конденсатора, эквивалентную емкость цепи.

Номер варианта	Номер рисунка схемы	Задаваемые величины						
		U, кВ	C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ	C4, мкФ	C5, мкФ	C6, мкФ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
00	2.1	1	10	20	30	40	50	60
01	2.2	10	20	30	40	50	60	10
02	2.3	9	30	40	50	60	10	20
03	2.4	8	40	50	60	10	20	30
04	2.5	7	50	60	10	20	30	40
05	2.1	2	60	10	20	30	40	50
06	2.2	9	10	20	30	40	50	60
07	2.3	8	20	30	40	50	60	10
08	2.4	7	30	40	50	60	10	20
09	2.5	6	40	50	60	10	20	30
10	2.1	3	50	60	10	20	30	40
11	2.2	8	60	10	20	30	40	50
12	2.3	7	10	20	30	40	50	60
13	2.4	6	20	30	40	50	60	10
14	2.5	5	30	40	50	60	10	20
15	2.1	4	40	50	60	10	20	30
16	2.2	7	50	60	10	20	30	40
17	2.3	6	60	10	20	30	40	50
18	2.4	5	10	20	30	40	50	60
19	2.5	4	20	30	40	50	60	10
20	2.1	5	30	40	50	60	10	20

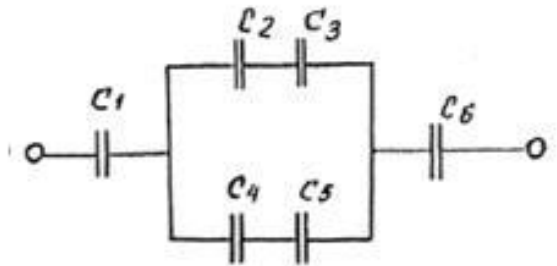


Рис. 2.3

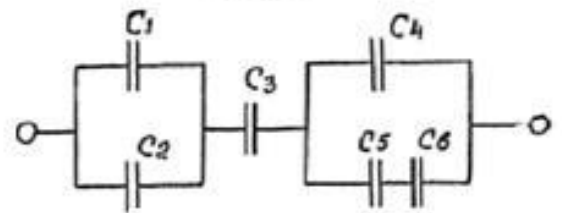


Рис. 2.4

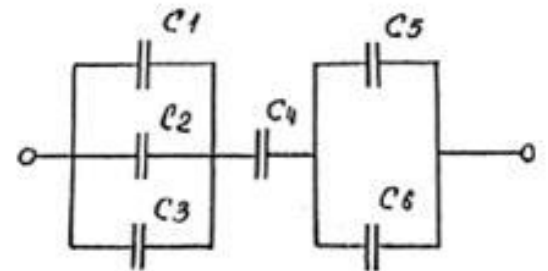


Рис. 2.5

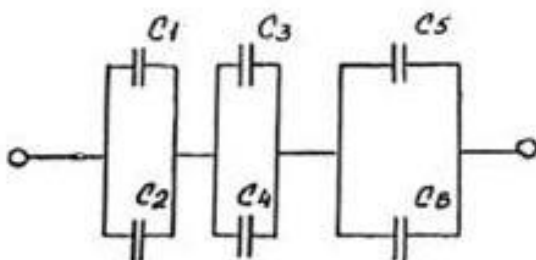


Рис. 2.1

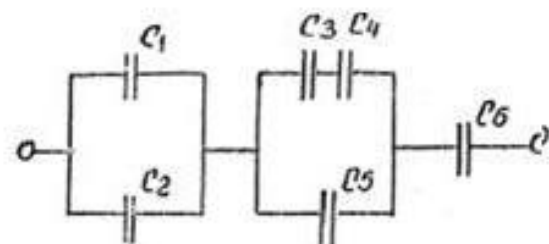


Рис. 2.2

### Контрольные вопросы:

1. Какое соединение называется последовательным?
2. Какое соединение называется параллельным?
3. Как рассчитывается эквивалентная емкость при разных типах подключения?
4. Единицы измерения емкости?
5. Принцип расчета эквивалентной емкости?

## Практическая работа № 3

### «Исследование электрических цепей при последовательном и параллельном соединении резисторов».

#### Цель работы:

- Исследование последовательного соединения резисторов.
- Исследование параллельного соединения резисторов.
- Исследование смешанного соединения резисторов.

#### Краткие теоретические сведения.

**Последовательное** соединение резисторов - это такое соединение, при котором конец первого резистора соединяется с началом второго, конец второго - с началом третьего и так далее. На принципиальных электрических схемах последовательное соединение резисторов изображается таким образом.

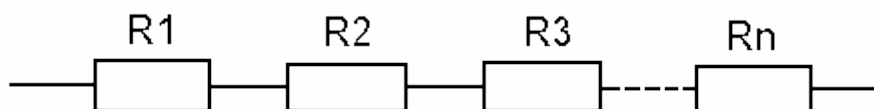


Рисунок 1.

При последовательном соединении резисторов их общее сопротивление, т. е. эквивалентное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных резисторов равно сумме сопротивлений включенных резисторов.

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

**Параллельное** соединение резисторов - это такое соединение, при котором начала всех резисторов соединяются в одной точке, называемой узлом, а концы всех резисторов соединяются в другой точке, в другом узле. На **рисунке 2** показано параллельное соединение резисторов на принципиальной схеме.

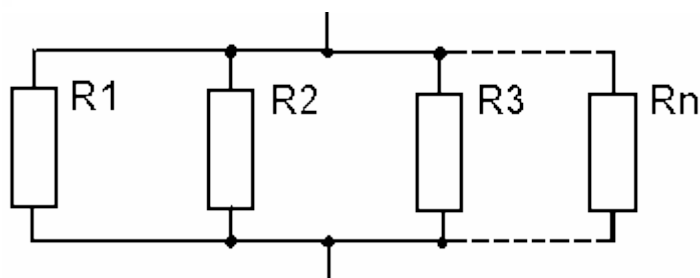


Рисунок 2.



Величина, обратная сопротивлению резистора, называется проводимостью. Проводимость

$$G = \frac{1}{R}$$

При параллельном соединении резисторов складываются проводимости. Общая проводимость нескольких параллельно соединенных резисторов равно

$$G_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Тогда, эквивалентное общее входное сопротивление цепи будет равно

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{G_{\text{ЭКВ}}}$$

Например, общее или эквивалентное сопротивление двух параллельно соединенных резисторов можно рассчитать по формуле:

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Если же известно общее сопротивление двух параллельно соединенных резисторов и величина сопротивления одного из них, то сопротивление второго резистора рассчитывается по формуле:

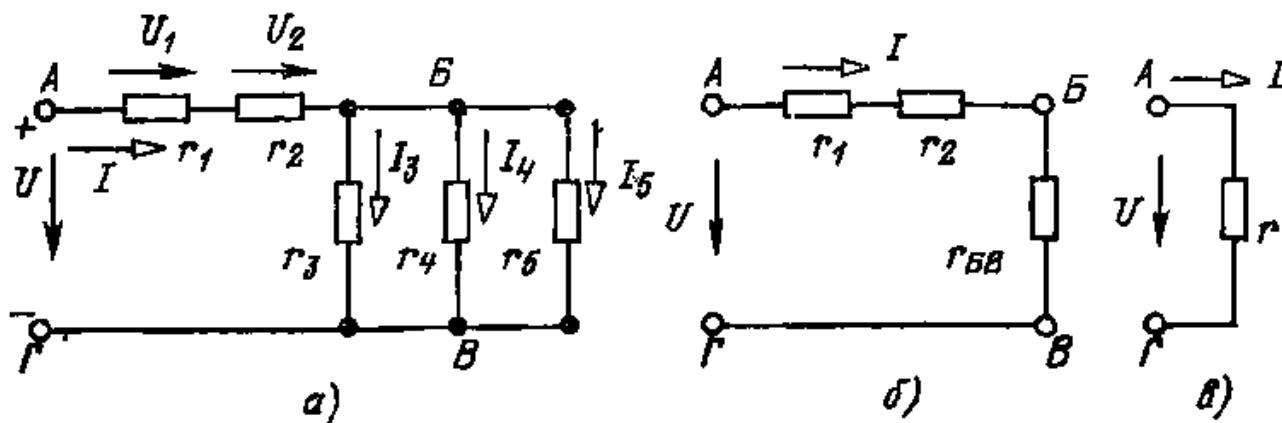
$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_{\text{ЭКВ}}}{R_2 - R_{\text{ЭКВ}}}$$

При параллельном соединении резисторов к каждому из них приложено одно и то же напряжение. Однако, токи, протекающие через каждый из резисторов, неодинаковы и зависят обратно пропорционально от величины сопротивления каждого из резисторов.

В радиоэлектронных цепях помимо последовательного и параллельного соединения встречается и смешанное, где одновременно могут присутствовать оба вида соединений.

**Смешанным** соединением называется последовательно-параллельное соединение резисторов или участков цепи, каждый из которых, в свою очередь, может состоять из последовательно или параллельно соединенных резисторов.

Наиболее типично смешанное соединение, при котором параллельно включенные приемники энергии соединены последовательно с сопротивлением подводящих проводов и внутренним сопротивлением источника питания.



**Рисунок 3.** Смешанное соединение резисторов (а), упрощенная (б) и эквивалентная схема (в)

Расчет такой цепи при заданной ЭДС или напряжения источника питания (**рисунок 3 ,а**) и известных сопротивлений резисторов заключается в нахождении токов и напряжений на всех участках цепи.

При расчете цепи со смешанным соединением резисторов пользуются обычно методом последовательного упрощения (свертывания) схемы.

Применяя этот метод, сначала определяем проводимость разветвленного участка цепи:

$$G_{\text{ЭКВ1}} = G_3 + G_4 + G_5 = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}$$

Эквивалентное сопротивление этого участка

$$R_{\text{ЭКВ1}} = \frac{1}{G_{\text{ЭКВ1}}}$$

Теперь заданную цепь можно представить схемой, состоящей из трех последовательно соединенных сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_{\text{ЭКВ1}}$ . (**рисунок 3, б**). Эквивалентное сопротивление этой цепи:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2 + R_{\text{ЭКВ1}}$$

Полученная эквивалентная схема показана на **рисунке 3, в**. По закону Ома ток цепи:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_{\text{ЭКВ1}}}$$

Напряжение  $U$  на **рисунке 3**, как указывалось, обозначено стрелкой, направленной от вывода с большим потенциалом «+» к выводу с меньшим потенциалом «—».

Напряжения на последовательно соединенных участках цепи:

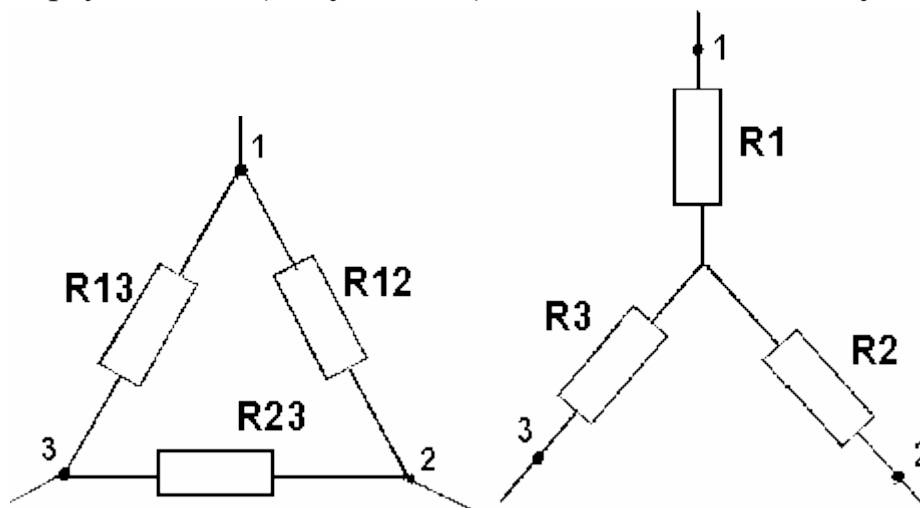
$$U_1 = R_1 \cdot I ; U_2 = R_2 \cdot I ; U_{\text{ЭКВ1}} = R_{\text{ЭКВ1}} \cdot I$$

Токи в параллельных ветвях:

$$I_3 = \frac{U_{\text{ЭКВ1}}}{R_3}; I_4 = \frac{U_{\text{ЭКВ1}}}{R_4}; I_5 = \frac{U_{\text{ЭКВ1}}}{R_5}$$

Согласно  $U = U_1 + U_2 + U_{\text{ЭКВ1}}$ , откуда следует, что  $U_{\text{ЭКВ1}} = U - U_1 - U_2$  меньше напряжения питания  $U$ , т. е. схема **рисунок 3, а**—пример построения делителя напряжения.

Кроме перечисленных видов соединений в радиоэлектронных цепях резисторы, как, впрочем, и другие двухполюсники, могут включаться по схеме "треугольник" (**Рисунок 4, а**) и по схеме "звезда" **Рисунок 4, б**.



а) б)

**Рисунок 4.** Соединение резисторов по схеме "треугольник" (а) и по схеме "звезда" (б)

Соединение резисторов, включенных по схеме треугольник, можно преобразовать в эквивалентное соединение резисторов по схеме звезда. Эквивалентность такой замены предполагает неизменность токов, входящих в каждый из трех узлов, при одинаковых напряжениях между одноименными узлами треугольника и звезды. Для преобразования треугольника в звезду сопротивления резисторов сторон треугольника **R12**, **R13**, **R23** должны быть пересчитаны в сопротивления резисторов лучей эквивалентной звезды **R1**, **R2**, **R3** по формулам:

$$R_1 = \frac{R_{13} \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}}$$

$$R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}}$$

$$R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{13}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}}$$

Сопротивление резистора луча звезды равно произведению сопротивлений резисторов прилегающих сторон треугольника, деленному на сумму сопротивлений резисторов трех сторон треугольника.

Для обратного преобразования звезды в треугольник сопротивления резисторов пересчитываются по формулам:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}$$

$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}$$

$$R_{13} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2}$$

Сопротивление резисторов сторон треугольника равно сумме сопротивлений резисторов двух прилегающих лучей звезды и их произведения, деленного на сопротивление резистора третьего луча. Схемное преобразование треугольника в звезду или обратное преобразование звезды в треугольник бывает необходимо при расчете электрических цепей и расчете величин токов, протекающих через каждый из резисторов.

### **Контрольные вопросы:**

1. Какое соединение называется последовательным?
2. Какое соединение называется параллельным?
3. Как рассчитывается эквивалентное сопротивление при разных типах подключения?
4. Единицы измерения сопротивления, тока и напряжения?
5. Принцип расчета эквивалентной емкости, проводимости?

## Практическая работа № 4

### «Изучение расчета электрических цепей методом преобразования схем».

**Цель работы:** Изучить расчет электрических цепей методом преобразования схем.

#### Решение задач

**Задача 1.** Для цепи (рис. 1), *определить эквивалентное сопротивление* относительно входных зажимов  $a-g$ , если известно:  $R_1 = R_2 = 0,5$  Ом,  $R_3 = 8$  Ом,  $R_4 = R_5 = 1$  Ом,  $R_6 = 12$  Ом,  $R_7 = 15$  Ом,  $R_8 = 2$  Ом,  $R_9 = 10$  Ом,  $R_{10} = 20$  Ом.

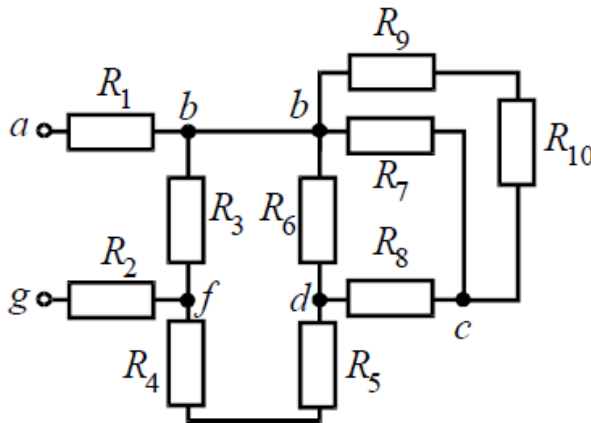


Рис. 1

#### Решение

Начнем эквивалентные преобразования схемы с ветви наиболее удаленной от источника, т.е. от зажимов  $a-g$ :

$$R_{11} = R_9 + R_{10} = 10 + 20 = 30 \text{ Ом}; \quad R_{12} = \frac{R_{11} \cdot R_7}{R_{11} + R_7} = \frac{30 \cdot 15}{30 + 15} = 10 \text{ Ом};$$

$$R_{13} = R_8 + R_{12} = 2 + 10 = 12 \text{ Ом}; \quad R_{14} = \frac{R_6 \cdot R_{13}}{R_6 + R_{13}} = \frac{12 \cdot 12}{12 + 12} = 6 \text{ Ом};$$

$$R_{15} = R_{14} + R_5 + R_4 = 6 + 1 + 1 = 8 \text{ Ом}; \quad R_{16} = \frac{R_3 \cdot R_{15}}{R_3 + R_{15}} = \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} = 4 \text{ Ом};$$

$$R_9 = R_1 + R_{16} + R_2 = 0,5 + 4 + 0,5 = 5 \text{ Ом}.$$

**Задача 2.** Для цепи (рис. 2, а), *определить входное сопротивление* если известно:  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 40$  Ом.

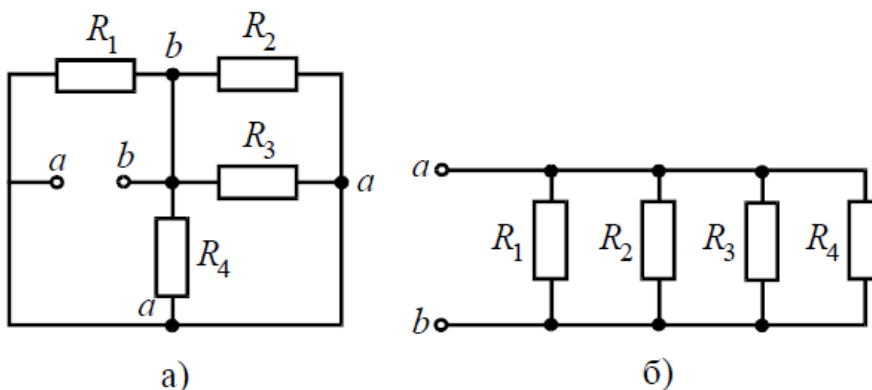


Рис. 2

Решение

Исходную схему можно перечертить относительно входных зажимов (рис. 2, б), из чего видно, что все сопротивления включены параллельно. Так как величины сопротивлений равны, то для определения величины эквивалентного сопротивления можно воспользоваться формулой:

$$R_{\text{э}} = \frac{R}{n},$$

где  $R$  – величина сопротивления, Ом;

$n$  – количество параллельно соединенных сопротивлений.

$$R_{\text{э}} = \frac{40}{4} = 10 \text{ Ом.}$$

**Задача 3. Определить эквивалентное сопротивление** относительно зажимов  $a-b$ , если  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 10$  Ом (рис. 3, а).

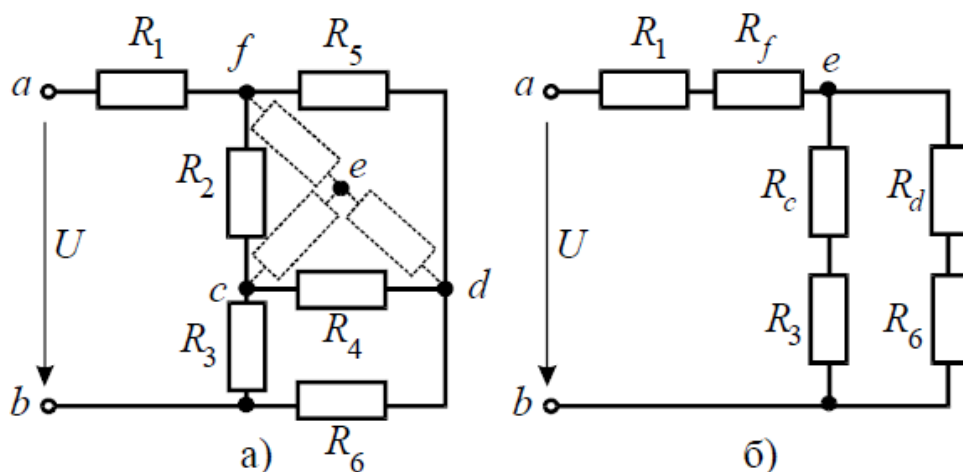


Рис. 3

Решение

Преобразуем соединение «треугольник»  $f-d-c$  в эквивалентную «звезду». Определяем величины преобразованных сопротивлений (рис. 3, б):

$$R_f = \frac{R_2 \cdot R_5}{R_2 + R_5 + R_4} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10 + 10} = \frac{100}{30} = 3,33 \text{ Ом.}$$

По условию задачи величины

всех сопротивлений равны, а значит:

$$R_f = R_d = R_c = 3,33 \text{ Ом.}$$

На преобразованной схеме получили параллельное соединение ветвей между узлами  $e-b$ , тогда эквивалентное сопротивление равно:

$$R_{eb} = \frac{(R_c + R_3) \cdot (R_d + R_6)}{(R_c + R_3) + (R_d + R_6)} = \frac{(3,33 + 10) \cdot (3,33 + 10)}{(3,33 + 10) + (3,33 + 10)} = 6,67 \text{ Ом.}$$

И тогда эквивалентное сопротивление исходной схемы представляет последовательное соединение сопротивлений:

$$R_{ab} = R_1 + R_f + R_{eb} = 10 + 3,33 + 6,67 = 20 \text{ Ом.}$$

**Задача 4.** В заданной цепи (рис. 4, а) *определить методом эквивалентных преобразований* входные сопротивления ветвей  $a-b$ ,  $c-d$  и  $f-b$ , если известно, что:  $R_1 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 8 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 8 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_6 = 8 \text{ Ом}$ ,  $R_7 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_8 = 8 \text{ Ом}$ .

Решение

Для определения входного сопротивления ветвей исключают из схемы все источники ЭДС. При этом точки  $c$  и  $d$ , а также  $b$  и  $f$  соединяются накоротко, т.к. внутренние сопротивления идеальных источников напряжения равны нулю.

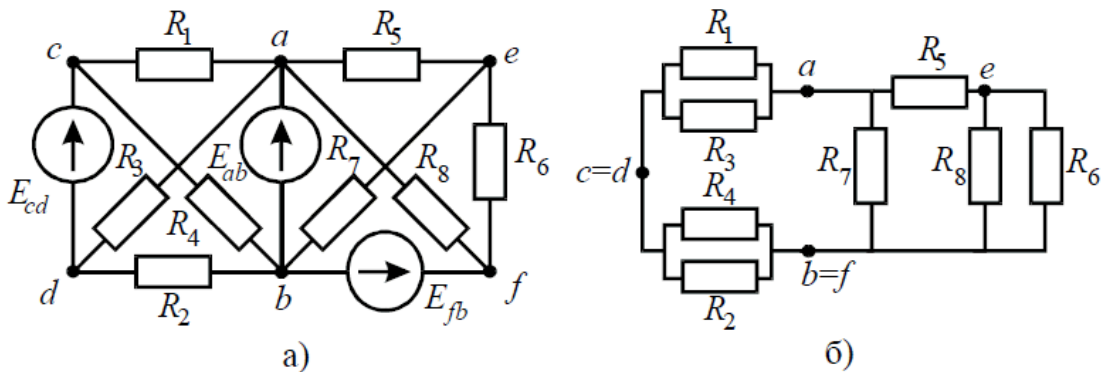


Рис. 4

Ветвь  $a-b$  разрывают, и т.к. сопротивление  $R_{a-b} = 0$ , то входное сопротивление ветви равно эквивалентному сопротивлению схемы относительно точек  $a$  и  $b$  (рис. 4, б):

$$R'_{ab} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_4} = \frac{4 \cdot 4}{4 + 4} + \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} = 6 \text{ Ом};$$

$$R''_{ab} = \frac{\left( R_5 + \frac{R_6 \cdot R_8}{R_6 + R_8} \right) \cdot R_7}{R_5 + \frac{R_6 \cdot R_8}{R_6 + R_8} + R_7} = \frac{\left( 2 + \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} \right) \cdot 6}{2 + \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} + 6} = 3 \text{ Ом};$$

$$R_{ab} = \frac{R'_{ab} \cdot R''_{ab}}{R'_{ab} + R''_{ab}} = \frac{6 \cdot 3}{6 + 3} = 2 \text{ Ом.}$$

Аналогично *методом эквивалентных преобразований* определяются входные сопротивления ветвей  $R_{cd}$  и  $R_{bf}$ . Причем, при вычислении сопротивлений учтено, что соединение накоротко точек  $a$  и  $b$  исключает («закорачивает») из схемы сопротивления  $R_1, R_2, R_3, R_4$  в первом случае, и  $R_5, R_6, R_7, R_8$  во втором случае.

$$R_{cd} = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{4 \cdot 8}{4 + 8} + \frac{8 \cdot 4}{8 + 4} = \frac{16}{3} \text{ Ом}$$

$$R_{bf} = \frac{\left( R_6 + \frac{R_5 \cdot R_8}{R_5 + R_8} \right) \cdot R_7}{R_6 + \frac{R_5 \cdot R_8}{R_5 + R_8} + R_7} = \frac{\left( 8 + \frac{2 \cdot 8}{2 + 8} \right) \cdot 6}{8 + \frac{2 \cdot 8}{2 + 8} + 6} = \frac{48}{13} \text{ Ом.}$$

**Задача 5.** В цепи (рис. 5) *определить методом эквивалентных преобразований* токи  $I_1, I_2, I_3$  и *составить баланс мощностей*, если известно:  $R_1 = 12 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 30 \text{ Ом}$ ,  $U = 120 \text{ В}$ .

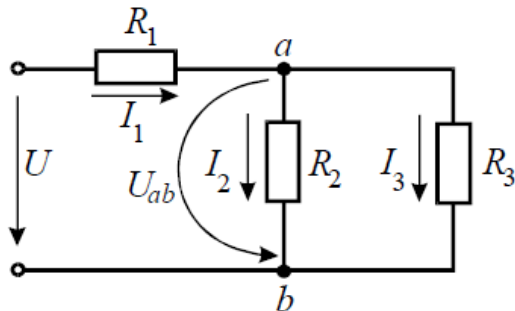


Рис. 5

Решение

*Эквивалентное сопротивление* для параллельно включенных сопротивлений:

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30} = 12 \text{ Ом.}$$

*Эквивалентное сопротивление* всей цепи:

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_{23} = 12 + 12 = 24 \text{ Ом.}$$

Ток в неразветвленной части схемы:

$$I_1 = U / R_{\Sigma} = 120 / 24 = 5 \text{ А.}$$

Напряжение на параллельных сопротивлениях:

$$U_{ab} = R_{23} \cdot I_1 = 12 \cdot 5 = 60 \text{ В.}$$

Токи в параллельных ветвях:

$$I_2 = U_{ab} / R_2 = 60 / 20 = 3 \text{ А;}$$

$$I_3 = U_{ab} / R_3 = 60 / 30 = 2 \text{ А.}$$

**Баланс мощностей:**

$$P_{ист} = I_1 \cdot U = 5 \cdot 120 = 600 \text{ Вт;}$$

$$P_{потр} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 = 5^2 \cdot 12 + 3^2 \cdot 20 + 2^2 \cdot 30 = 600 \text{ Вт.}$$

**Задача 6.** В цепи (рис. 6, а), *определить методом эквивалентных преобразований показания амперметра*, если известно:  $R_1 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_3 =$



30 Ом,  $R_4 = 40$  Ом,  $R_5 = 10$  Ом,  $R_6 = 20$  Ом,  $E = 48$  В. Сопротивление амперметра можно считать равным нулю.

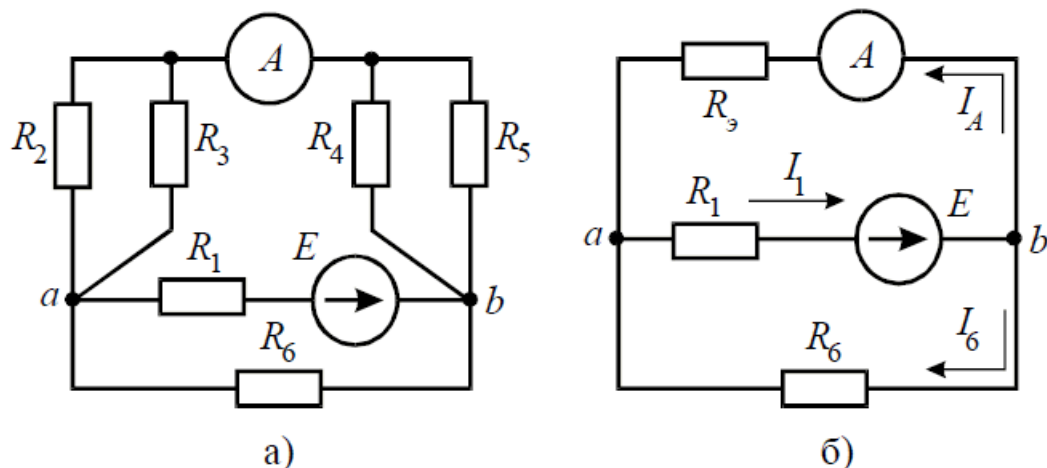


Рис. 6

Решение

Если сопротивления  $R_2, R_3, R_4, R_5$  заменить одним эквивалентным сопротивлением  $R_3$ , то исходную схему можно представить в упрощенном виде (рис. 6, б).

Величина эквивалентного сопротивления:

$$R_3 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} + \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30} + \frac{40 \cdot 10}{40 + 10} = 20 \text{ Ом}$$

Преобразовав параллельное соединение сопротивлений  $R_3$  и  $R_6$  схемы (рис. 6, б), получим замкнутый контур, для которого по второму закону Кирхгофа можно записать уравнение:

$$I_1 \cdot \left( R_1 + \frac{R_3 \cdot R_6}{R_3 + R_6} \right) = E,$$

откуда ток  $I_1$ :

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + \frac{R_3 \cdot R_6}{R_3 + R_6}} = \frac{48}{2 + \frac{20 \cdot 20}{20 + 20}} = 4 \text{ А.}$$

Напряжение на зажимах параллельных ветвей  $U_{ab}$  выразим из уравнения по закону Ома для пассивной ветви, полученной преобразованием  $R_3$  и  $R_6$ :

$$U_{ab} = I_1 \cdot \frac{R_3 \cdot R_6}{R_3 + R_6}.$$

Тогда амперметр покажет ток:

$$I_A = I_1 \cdot \frac{R_6}{R_3 + R_6} = 4 \cdot \frac{20}{20 + 20} = 2 \text{ А.}$$

**Задача 7. Определить токи ветвей схемы методом эквивалентных преобразований** (рис. 7, а), если  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 3 \text{ Ом}$ ,  $J = 5 \text{ А}$ ,  $R_5 = 5 \text{ Ом}$ .

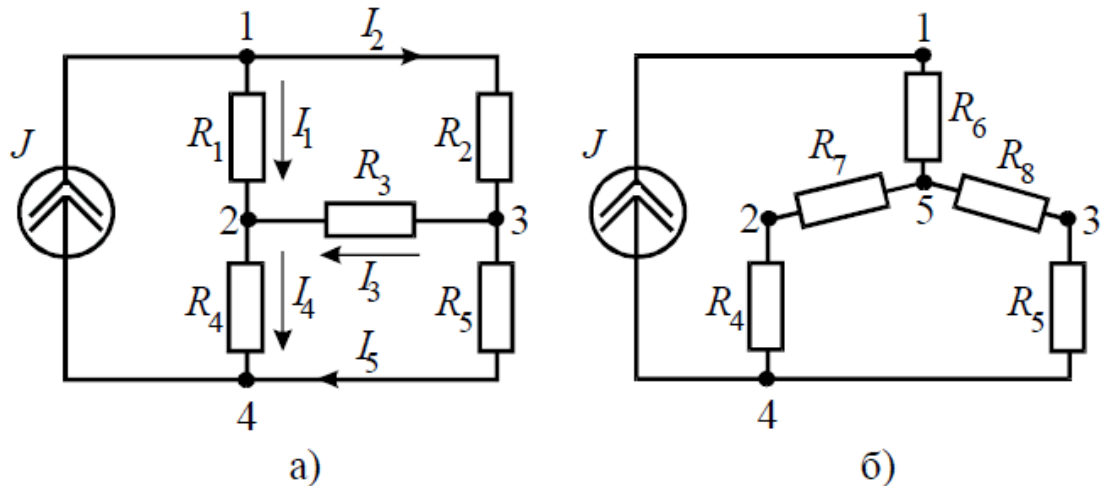


Рис. 7

Решение

Преобразуем «треугольник»

сопротивлений  $R_1, R_2, R_3$  в эквивалентную «звезду»  $R_6, R_7, R_8$  (рис. 7, б) и определим величины полученных сопротивлений:

$$R_6 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{3 \cdot 3}{3 + 3 + 3} = 1 \text{ Ом};$$

$$R_7 = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{3 \cdot 3}{3 + 3 + 3} = 1 \text{ Ом};$$

$$R_8 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{3 \cdot 3}{3 + 3 + 3} = 1 \text{ Ом}.$$

Преобразуем параллельное соединение ветвей между узлами 4 и 5

$$R_9 = \frac{(R_4 + R_7) \cdot (R_5 + R_8)}{(R_4 + R_7) + (R_5 + R_8)} = \frac{(1 + 3) \cdot (1 + 5)}{1 + 3 + 1 + 5} = 2,4 \text{ Ом}.$$

Ток в контуре, полученном в результате преобразований, считаем равным току источника тока  $J$ , и тогда напряжение:

$$U_{54} = J \cdot R_9 = 5 \cdot 2,4 = 12 \text{ В}.$$

И теперь можно определить токи  $I_4$  и  $I_5$ :

$$I_4 = \frac{U_{54}}{R_7 + R_4} = \frac{12}{1 + 3} = 3 \text{ А}; \quad I_5 = \frac{U_{54}}{R_8 + R_5} = \frac{12}{1 + 5} = 2 \text{ А}.$$

Возвращаясь к исходной схеме, определим напряжение  $U_{32}$  из уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$U_{32} + I_4 R_4 - I_5 R_5 = 0 \Rightarrow U_{32} = I_5 R_5 - I_4 R_4 = 2 \cdot 5 - 3 \cdot 3 = 1 \text{ В}.$$

Тогда ток в ветви с сопротивлением  $R_3$  определится:

$$I_3 = \frac{U_{32}}{R_3} = \frac{1}{3} = 0,33 \text{ А.}$$

Величины оставшихся неизвестными токов можно определить из уравнений по первому закону Кирхгофа для узлов 3 и 1:

$$I_2 - I_3 - I_5 = 0 \Rightarrow I_2 = I_3 + I_5 = 0,33 + 2 = 2,33 \text{ А;}$$

$$J - I_1 - I_2 = 0 \Rightarrow I_1 = J - I_2 = 5 - 2,33 = 2,67 \text{ А.}$$

## Практическая работа № 5

### «Изучение расчета электрических цепей методом наложения».

**Цель работы:** Изучить расчет электрических цепей методом наложения.

**Задача 1.** В электрической цепи рис. 1 с тремя источниками энергии определить все токи в ветвях, воспользовавшись методом наложения.

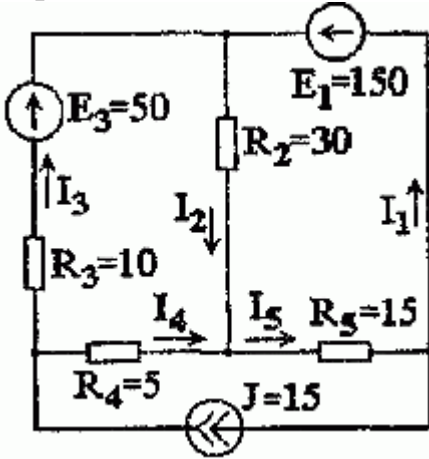
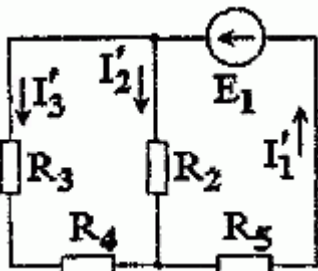


Рис. 1. Решение

1. Выполним расчет цепи при воздействии источника ЭДС  $E_1$ , полагая  $E_3 = 0, J = 0$ . Источники считаем идеальными, поэтому внутренние сопротивления ЭДС равны нулю, а источника тока – бесконечности. С учетом этого изобразим расчетную схему (рис. 1.2.2).

Рис. 1.2.2



Определение токов в полученной схеме будем вести, пользуясь методом эквивалентных преобразований:

$R'_{\text{Э}} = R_5 + R_2 \cdot (R_3 + R_4) / R_2 + (R_3 + R_4) = 15 + 30 \cdot (10 + 5) / 30 + (10 + 5) = 25 \text{ Ом}$ ;  $I'_1 = E_1 / R'_{\text{Э}} = 150 / 25 = 6 \text{ А}$ ;  $I'_5 = I'_1 = 6 \text{ А}$ ;  $I'_2 = I'_1 \cdot R_3 + R_4 / R_2 + (R_3 + R_4) = 6 \cdot 10 + 5 / 30 + (10 + 5) = 6 \text{ А}$ ;  $I'_3 = I'_1 \cdot R_2 / R_2 + (R_3 + R_4) = 6 \cdot 30 / 30 + (10 + 5) = 4 \text{ А}$ ;  $I'_3 = I'_4 = 4 \text{ А}$ .

2. Расчет электрической цепи при воздействии ЭДС источника  $E_3$  выполним, полагая  $E_1 = 0, J = 0$  (рис. 1.2.3).

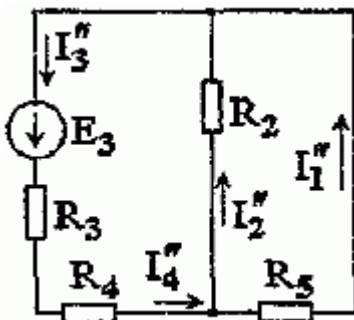
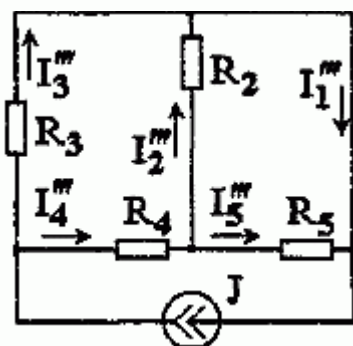


Рис. 1.2.3

В соответствии с рис. 1.2.3 имеем:

$R''_{\text{Э}} = R_3 + R_4 + R_2 \cdot R_5 / R_2 + R_5 = 10 + 5 + 30 \cdot 15 / 30 + 15 = 25 \text{ Ом}$ ;  $I''_3 = E_3 / R''_{\text{Э}} = 50 / 25 = 2 \text{ А}$ ;  $I''_4 = I''_3 = 2 \text{ А}$ ;  $I''_2 = I''_4 \cdot R_5 / R_2 + R_5 = 2 \cdot 15 / 15 + 30 = 0,66 \text{ А}$ ;  $I''_5 = I''_4 \cdot R_2 / R_2 + R_5 = 2 \cdot 30 / 15 + 30 = 1,33 \text{ А}$ ;  $I''_1 = I''_5 = 1,33 \text{ А}$ .



3. Расчет электрической цепи при действии источника тока выполним, полагая  $E_1 = 0, E_2 = 0$  (рис. 1.2.4).

Рис. 1.2.4

В соответствии с рис. 1.2.4 имеем:

$$R_{\text{Э}} = R_4 + R_2 \cdot R_5 / R_2 + R_5 = 5 + 30 \cdot 15 / 30 + 15 = 15 \text{ Ом.}$$

Находим токи в параллельных ветвях:

$$I_3 = J \cdot R_{\text{Э}} / R_{\text{Э}} + R_3 = 15 \cdot 15 / 15 + 10 = 9 \text{ А}; I_4 = J \cdot R_3 / R_{\text{Э}} + R_3 = 15 \cdot 10 / 15 + 10 = 6 \text{ А}; I_2 = I_4 \cdot R_5 / R_2 + R_5 = 6 \cdot 15 / 15 + 30 = 2 \text{ А}; I_5 = I_4 \cdot R_2 / R_2 + R_5 = 6 \cdot 30 / 15 + 30 = 4 \text{ А.}$$

Ток  $I_1$  рассчитываем по первому закону Кирхгофа:

$$I_1 + I_5 - J = 0; I_1 = J - I_5 = 15 - 4 = 11 \text{ А.}$$

4. В соответствии с принятыми направлениями токов в исходной схеме определим их значения по **методу наложения** как алгебраическую сумму *частичных токов* всех промежуточных расчетных схем:

$$I_1 = I'_1 + I''_1 - I'''_1 = 6 + 1,33 - 11 = -3,67 \text{ А}; I_2 = I'_2 - I''_2 - I'''_2 = 2 - 0,66 - 2 = -0,66 \text{ А}; I_3 = -I'_3 - I''_3 + I'''_3 = -4 - 2 + 9 = 3 \text{ А}; I_4 = I'_4 + I''_4 + I'''_4 = 4 + 2 + 6 = 12 \text{ А}; I_5 = I'_5 + I''_5 + I'''_5 = 6 + 1,33 + 4 = 11,33 \text{ А.}$$

Правильность решения задачи проверяем по первому закону Кирхгофа:

$$-J + I_3 + I_4 = 0; -15 + 3 + 12 = 0; -I_2 - I_4 + I_5 = 0; -(-0,66) - 12 + 11,33 = 0.$$

Токи  $I_1$  и  $I_2$  получились отрицательными, т.е. их истинное направление в схеме противоположно принятому положительному направлению.

## Практическая работа №6

### «Расчет магнитных цепей».

**Цель работы:** Изучение параметров магнитной цепи, методики расчета неразветвленной магнитной цепи.

#### Краткие теоретические сведения.

Магнитная цепь (МЦ) — это устройство из ферромагнитных сердечников с воздушными зазорами или без них, по которым замыкается магнитный поток. Применение ферромагнетиков имеет целью получение наименьшего магнитного сопротивления, при котором требуется наименьшая МДС для получения нужной магнитной индукции или магнитного потока.

Простейшая магнитная цепь — это сердечник кольцевой катушки. Применяются магнитные цепи неразветвленные и разветвленные, отдельные участки которых выполняются из одного или из разных материалов. Расчет магнитной цепи сводится к определению МДС по заданному магнитному потоку, размерам цепи и ее материалам. Для расчета цепь делят на участки  $l_1$ ,  $l_2$  и т. д. с одинаковым сечением по всей длине участка, т. е. с однородным полем, определяют

магнитную индукцию  $B = \frac{\Phi}{S}$  на каждом из них и по кривым намагничивания находят соответствующие напряженности магнитного поля. **Магнитная цепь (МЦ)** состоит из двух основных элементов: - источника магнитной энергии; - магнитопровода.

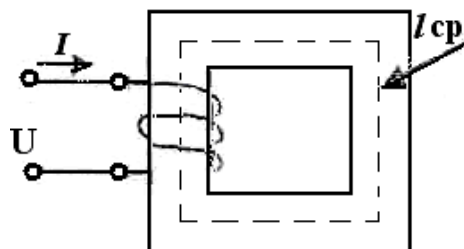
Источник магнитной энергии в реальных МЦ бывает двух видов:

- постоянный магнит; - электромагнит.

Электромагнит представляет собой катушку индуктивности, размещенную на магнитопроводе, и подключенную к источнику напряжения.

Магнитопровод по своей конструкции может быть разветвленным и неразветвленным.

На рис.1. показана неразветвленная магнитная цепь с электромагнитом.



#### Основные параметры МЦ:

1. МДС – магнитодвижущая сила (основной параметр источника магнитной энергии):

$F = I w$  (А), где  $I$  - ток в обмотке (А),  $w$  - число витков обмотки электромагнита.

2. Напряженность магнитного поля на любом участке МЦ.

$$H = \frac{F}{l_{CP}} = w \frac{I}{l_{CP}}, \left( \frac{A}{M} \right).$$
  $l_{CP}$  – длина средней линии магнитопровода (м).  $I_{CP}$  проводится на чертеже строго по середине сечения магнитопровода.

3. магнитная индукция:  $B = \mu \mu_0 H$  (Тл), где  $\mu$  - магнитная проницаемость вещества, из которого изготовлен магнитопровод.

$\mu_0$  - магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  Гн /м

3. Магнитный поток:  $\Phi = B \cdot S$  (Вб), где  $S$  - площадь поперечного сечения магнитопровода.

Задача на расчет магнитной цепи

По заданному магнитному потоку в цепи необходимо определить намагничивающую силу (МДС), необходимую для создания этого потока.

Определить число витков  $w$  катушки электромагнита, если известны габариты магнитопровода, индукция  $B\delta$  в воздушном зазоре, материал магнитопровода и ток  $I$  в обмотке электромагнита Толщина провода магнитопровода по всей длине одинакова и составляет 100 мм.

вариант	А, мм	В, мм	а, мм	b, мм	с, мм	d, мм	δ, мм	Прямая задача		
								Вδ, Тл	I, А	материал
1	300	250	20	40	35	30	7	0,2	0,4	чугун
2	380	190	70	60	50	50	3	0,9	0,9	литая сталь
3	350	300	50	80	100	120	9	1,3	0,5	электрот. сталь
4	300	250	35	20	40	30	5	0,3	0,1	чугун
5	360	220	70	60	50	40	4	1,0	0,7	литая сталь
6	340	290	60	70	80	100	2	1,1	0,3	электрот. сталь
7	320	280	40	20	45	40	9	0,4	0,4	чугун
8	380	240	80	60	60	50	7	1,1	0,8	литая сталь
9	330	260	60	70	80	110	3	1,8	0,2	электрот. сталь

10	340	280	40	60	20	30	6	0,7	0,4	чугун
11	310	270	70	50	40	30	10	1,4	0,3	литая сталь
12	370	340	60	70	80	40	8	1,6	0,7	Электрот сталь
13	300	280	20	40	40	30	7	0,8	0,3	чугун
14	310	190	30	20	40	50	5	1,3	0,6	литая сталь
15	350	240	40	80	100	110	9	1,7	0,4	электрот. сталь
16	330	290	60	70	40	30	4	0,9	0,6	чугун
17	250	300	10	20	30	35	8	1,45	0,7	литая сталь
18	190	380	50	60	50	70	4	1,5	0,1	Электрот сталь
19	300	350	100	50	90	80	5	1.0	0,5	литая сталь
20	250	300	40	35	20	30	6	0,7	0,4	чугун
21	220	360	50	60	40	70	3	1,7	0,8	Электрот сталь
22	290	340	80	70	60	90	4	1,1	0,2	литая сталь
23	280	320	20	40	40	45	7	0,6	0,7	чугун
24	240	380	60	80	60	50	6	1,9	0,5	Электрот сталь
25	260	330	70	60	110	80	9	1,4	0,1	Литая сталь



## Практическая работа №7

### «Исследование переходных процессов в цепи R,L».

**Цель работы:** Целью работы является выяснение сущности переходных процессов в электрических цепях первого порядка, развитие навыков теоретического анализа и экспериментального исследования переходных режимов в подобных цепях.

Исследуем, как изменяется ток  $i(t)$  в цепи с резистором  $R$  и катушкой  $L$  в переходном режиме. В качестве примера рассмотрим переходный процесс при включении цепи  $R, L$  к источнику а) постоянной ЭДС  $e(t)=E=\text{const}$  и б) переменной ЭДС  $e(t)=E_m \sin(\omega t + \alpha)$  (рис. 68.1).

Расчет переходного процесса выполним классическим методом.

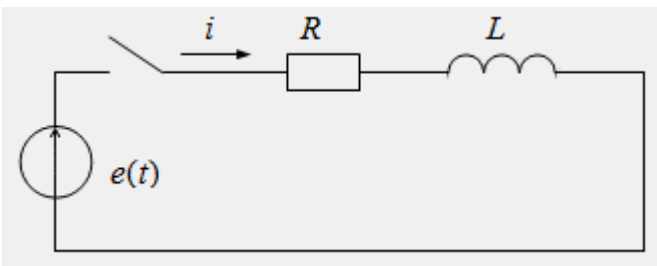


Рис. 68.1

а) Включение цепи  $R, L$  к источнику постоянной ЭДС  $e(t)=E=\text{const}$

Общий вид решения для тока:  $i(t)=i_y(t)+i_{св}(t)=I_y+Ae^{pt}$

Установившаяся составляющая тока:  $I_y=E/R$

Характеристическое уравнение и его корни:

$$Z(p) = R + pL = 0 \Rightarrow p = -\frac{R}{L} = -\frac{1}{\tau}.$$

Независимое начальное условие:  $i(0)=0$ .

Постоянная интегрирования:

$$i(0) = I_y + A = 0 \Rightarrow A = -I_y = -\frac{E}{R}.$$

Окончательное решение для искомой функции:

$$i(t) = \frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

где  $\tau=L/R$  – постоянная времени, численно равная времени, за которое амплитуда свободной составляющей затухает в  $e=2,72$  раза. Чем больше  $\tau$ , тем медленнее затухает переходной процесс. Теоретически затухание свободной составляющей продолжается до бесконечности. Техническое время переходного процесса  $T_{пп}$  определяется из условия, что за это время свободная составляющая уменьшается до 0,01 от ее первоначального значения:

$$e^{-\frac{T_{пп}}{\tau}} = 0,01,$$

откуда

$$T_{пп} \approx 4\tau = 4\frac{L}{R}.$$

На рис. 68.2 представлена графическая диаграмма искомой функции  $i(t)$ .

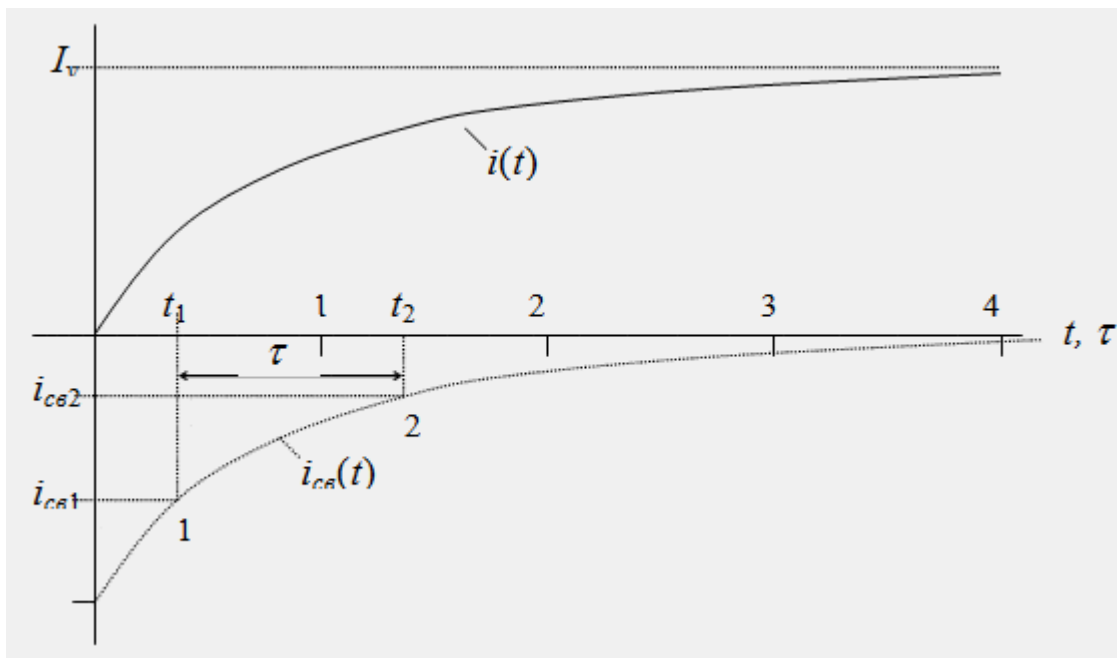


Рис. 68.2

Для приближенного построения графической диаграммы свободной составляющей  $i_{св}(t)=Ae^{-(t/\tau)}$  можно воспользоваться таблицей значений этой функции в интервале времени  $T_{пп}=4\tau$ :

$t$	0	0,5	1,0	1,5	2	3	4
$e^{-\frac{t}{\tau}}$	1	0,61	0,37	0,22	0,14	0,05	0,02

Постоянная времени  $\tau$  может быть определена из графической диаграммы функции  $i_{св}(t)$  как отрезок времени  $t_2-t_1$ , по краям которого отношение значений функции равно  $i_{св1}/i_{св2}=e=2,72$  раза (рис. 68,2).

б) Включение цепи  $R, L$  к источнику синусоидальной ЭДС  $e(t)=E_m \sin(\omega t + \alpha)$

Общий вид решения для тока:

$$i(t) = i_y(t) + i_{св}(t) = I_m \sin(\omega t + \psi) + Ae^{pt}$$

Характеристическое уравнение и его корни:

$$Z(p) = R + pL = 0 \Rightarrow p = -\frac{R}{L} = -\frac{1}{\tau}$$

Установившаяся составляющая тока:

$$\underline{I}_{ум} = \frac{\underline{E}_m}{\underline{Z}_э} = \frac{E_m e^{j\alpha}}{R + jX_L} = \frac{E_m e^{j\alpha}}{Z e^{j\varphi}} = \frac{E_m}{Z} e^{j(\alpha - \varphi)},$$

откуда следует

$$i_y(t) = \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi),$$

$$\text{где } X_L = \omega L, \quad Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{X_L}{R}.$$

Независимое начальное условие:  $i(0)=0$

Постоянная интегрирования:

$$i(0) = \frac{E_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) + A = 0,$$

откуда

$$A = -\frac{E_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi)$$

Окончательное решение для искомой функции:

$$i(t) = i_y(t) + i_{св}(t) = \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \frac{E_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Из анализа решения видно, что амплитуда свободной составляющей  $A$  зависит от начальной фазы  $\alpha$  источника ЭДС. При  $\alpha - \varphi = \pm \alpha$  эта амплитуда имеет максимальное значение  $A = A_{max} = E_m/Z$ , при этом переходной процесс протекает с максимальной интенсивностью. При  $\alpha - \varphi = 0$  амплитуда свободной составляющей равна нулю, и

переходной процесс в цепи вообще отсутствует. На рис. 68.3 представлена графическая диаграмма искомой функции  $i(t)$  при  $\alpha - \varphi = -90$ ,  $A = A_{\max} = E_m / Z = I_m$ .

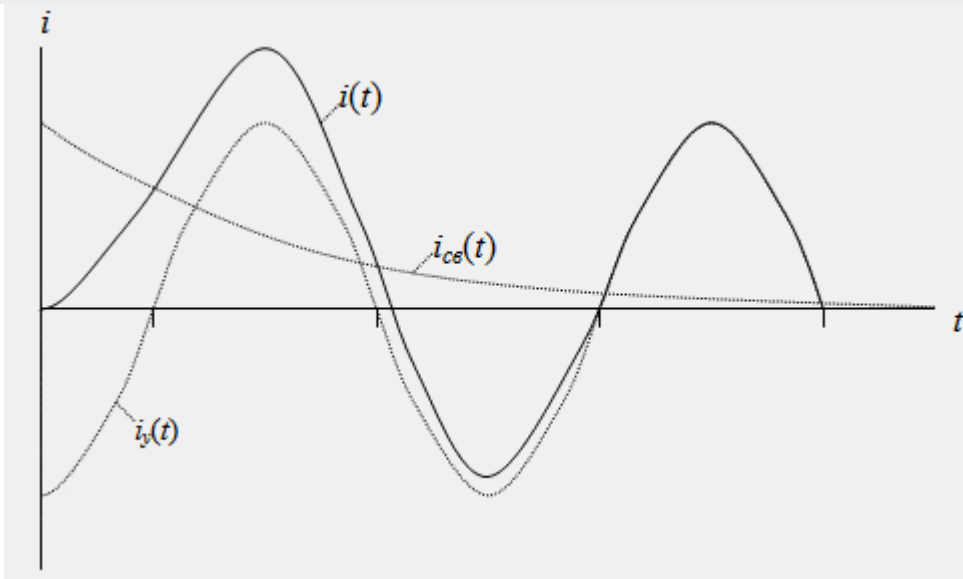


Рис. 68.3

### Контрольные вопросы

1. Какие процессы в электрических цепях называются переходными?
2. Что является причиной возникновения переходных процессов в электрических цепях?
3. Как формулируются законы коммутации?
4. Как определить постоянную времени по известным параметрам цепи?
5. Как определить постоянную времени по графику переходного процесса?
6. Что называется начальными условиями?
7. Какие методы расчета переходных процессов известны?
8. Записать уравнение переходного процесса для цепи RL.

«Исследование переходных процессов в цепи R,C».

**Цель работы:** Целью работы является уяснение сущности переходных процессов в электрических цепях первого порядка, развитие навыков теоретического анализа и экспериментального исследования переходных режимов в подобных цепях.

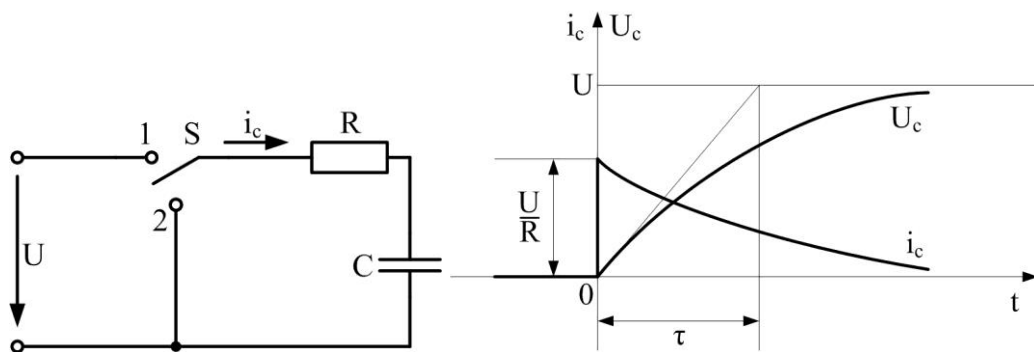


Рис. 1.

Рис. 2.

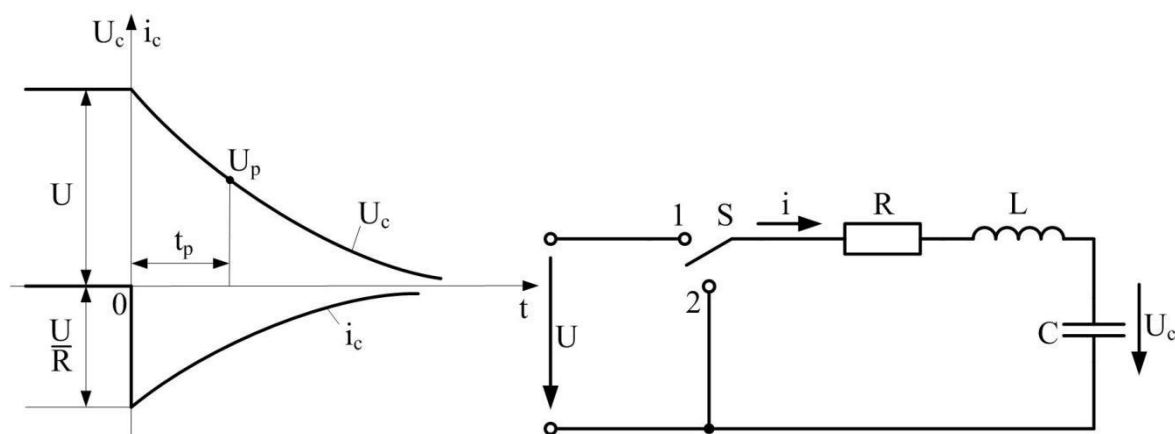


Рис. 3. Рис. 4.

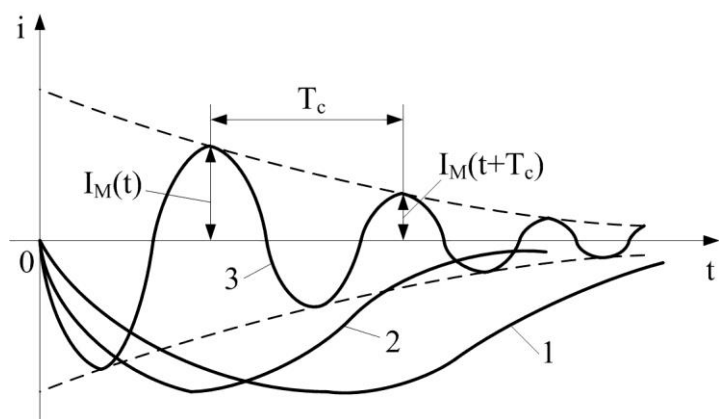


Рис. 5.

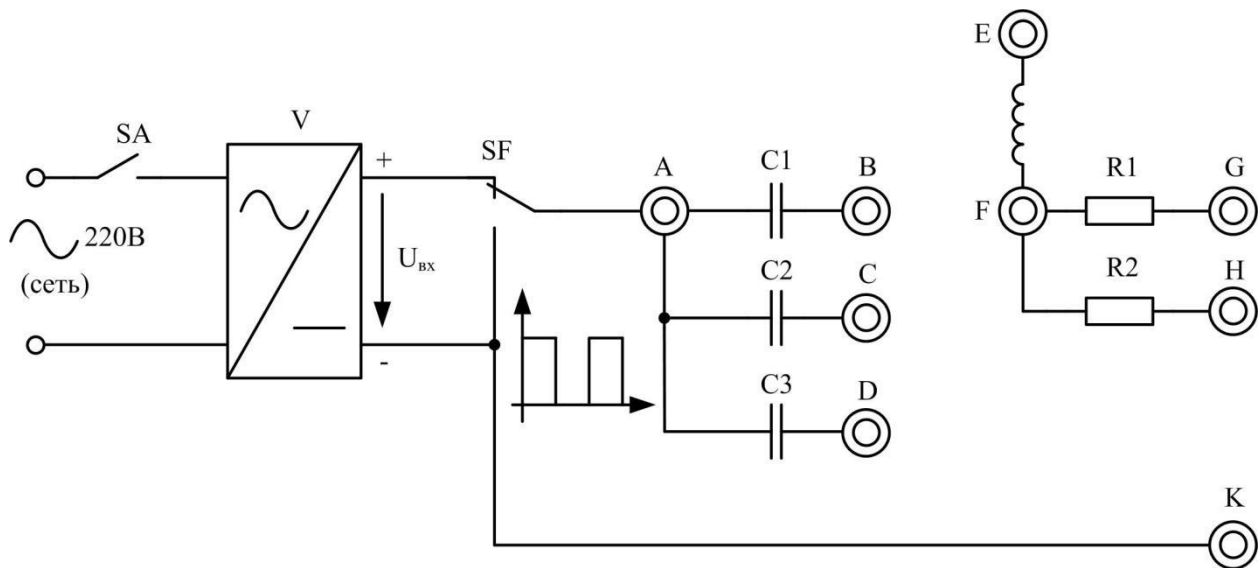


Рис. 6.

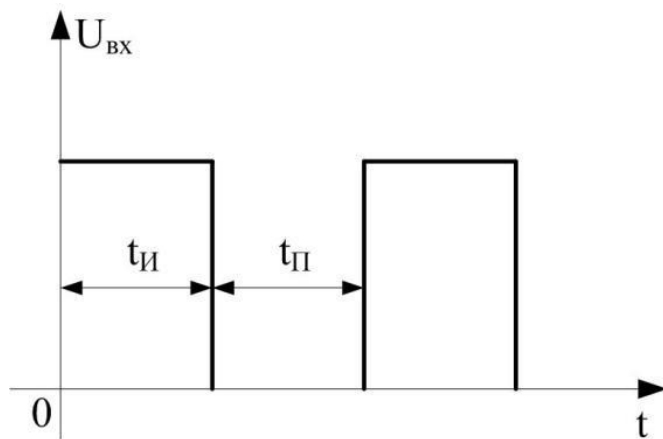


Рис. 7.

Переходными процессами, возникающими в электрических цепях, называют явления (процессы), которые происходят в них после того как один из параметров испытал быстрое изменение. Например, включение и выключение ЭДС в цепи с сопротивлением и индуктивностью. RC цепью называется электрическая цепь, которая состоит из конденсатора (конденсаторов) (емкость  $C$ ), сопротивления (сопротивлений) ( $R$ ) и источника ЭДС (рис.1). В такой цепи могут происходить только релаксационные неперiodические процессы. Рисунок 1. Присутствие в цепи конденсатора исключает возможность существования в ней постоянного тока. Разность потенциалов между обкладками конденсатора полностью компенсирует действие сторонней ЭДС (источника). Переменный же ток в такой сети возможен благодаря переменному заряду на конденсаторе. Разность потенциалов на обкладках не компенсирует действия сторонней ЭДС, в результате чего поддерживается некоторая сила тока. Закон Ома для RC цепи имеет вид: где  $q$  -- заряд на обкладке конденсатора,  $qC$  -- разность потенциалов между обкладками конденсатора,  $U_0$  -- постоянное напряжение. Иногда уравнение (1) используют в виде: Ничего

непонятно? Попробуй обратиться за помощью к преподавателям

**Решение задач**

**Контрольные работы**

**Эссе**

**Включение (выключение) постоянной ЭДС в RC цепи**

Допустим, что постоянное напряжение ( $U_0$ ) включают в момент времени, который мы принимаем за начальный ( $t=0$ ). Из уравнения (1) следует, что: Уравнение (2) при  $t>0$  запишем как: Решением уравнения (4) при заданном начальном условии (3) является функция: Из формулы (5) следует, что при  $t \rightarrow \infty$ ,  $I \rightarrow 0$ .  $I_{\max} = U_0 R$ . Время убывания силы тока ( $\tau$ ) равно: График функции  $I(t)$  представлен на рис.2. Рисунок 2.

Если в RC цепи емкость конденсатора велика, то ток после того как выключили источник постоянного напряжения может течь в цепи продолжительное время. Если в цепь включить лампу, то она сначала вспыхнет, за тем постепенно погаснет. В момент времени, когда в RC цепи ток упал до нулевого значения, конденсатор зарядился максимально, разность потенциалов его обкладок равна величине сторонней ЭДС с противоположным знаком. Эти две величины компенсируют друг друга. Если каким-либо образом в этот момент выключить стороннюю ЭДС, то в цепи начнет течь ток, который возникает за счет некомпенсированной разности потенциалов на обкладках конденсатора. Начальная сила такого тока будет равна  $U_0 R$ , закон изменения тока. При этом закон изменения тока совпадет с функцией (5).

## Контрольные вопросы

1. Какие процессы в электрических цепях называются переходными?
2. Что является причиной возникновения переходных процессов в электрических цепях?
3. Как формулируются законы коммутации?
4. Как определить постоянную времени по известным параметрам цепи?
5. Как определить постоянную времени по графику переходного процесса?
6. Что называется начальными условиями?
7. Какие методы расчета переходных процессов известны?
8. Записать уравнение переходного процесса для цепи RC.

«Построение векторных диаграмм».

Техника построения векторов

Техника построения векторов для двух э. д. с. поясняется рисунком 10, а. Слева на нем изображены синусоиды и ясно видно, что э. д. с.  $e_2$  опережает  $e_1$  на угол  $\alpha$ . Справа э. д. с.  $e_1$  изображена вектором  $\vec{E}_{1M}$ , который расположен горизонтально (то есть так, чтобы его проекция на ось  $1-1$  была равна мгновенному значению  $e_1$  в точке  $O$ ) и стрелкой показано направление вращения<sup>1</sup>. Затем по этому направлению отложен угол  $\alpha$  и построен вектор э. д. с.  $\vec{E}_{2M}$ .

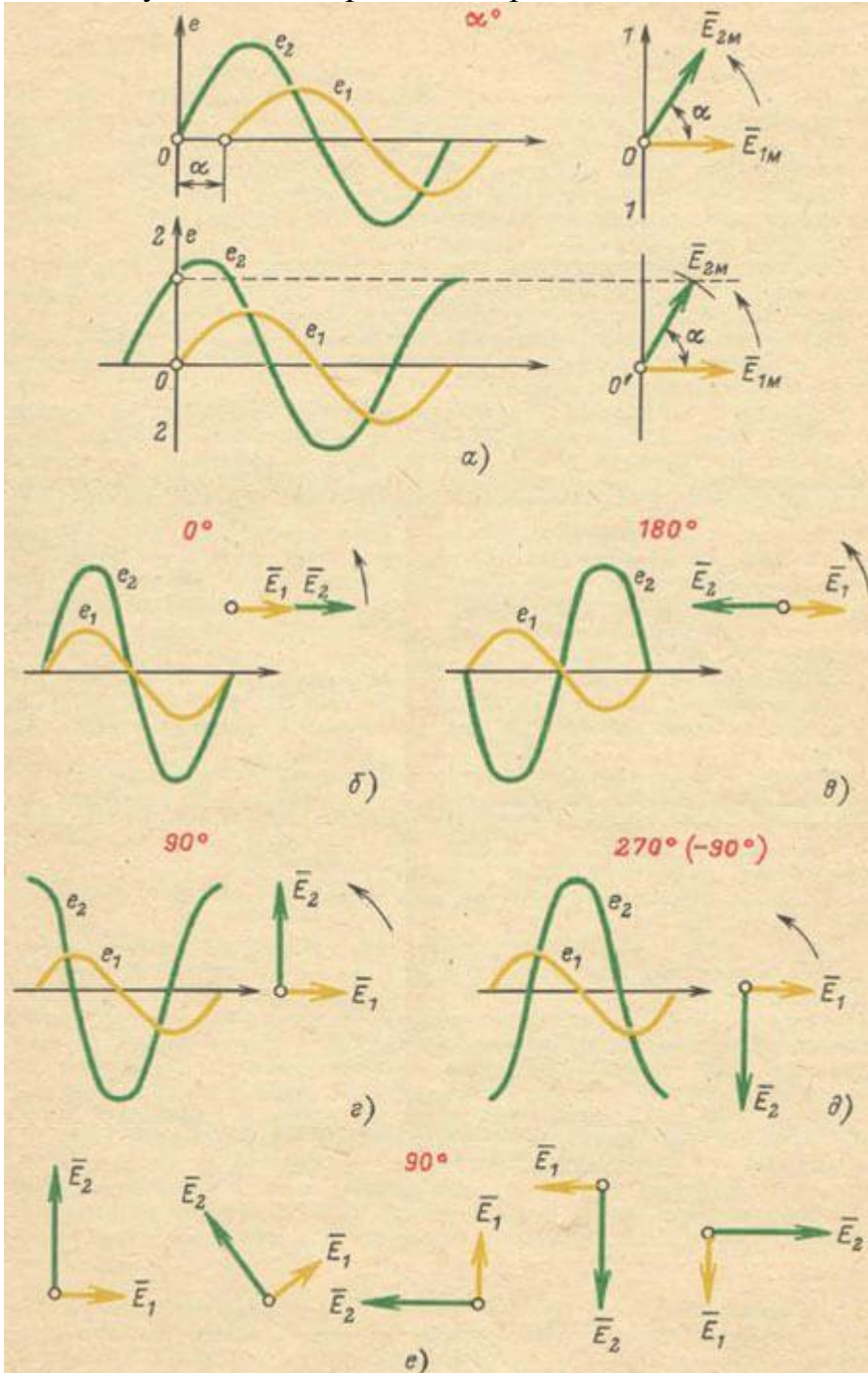




Рисунок 10. Определение сдвига фаз при помощи вектора

Построение можно выполнить иначе. После построения вектора  $E_{1M}$  (который расположен горизонтально) через точку пересечения синусоиды  $e_2$  с вертикалью 2–2 проведена горизонтальная штриховая линия (она отсекает мгновенное значение э. д. с.  $e_2$ , соответствующее точке  $O$ ). Затем радиусом длиной  $E_{2M}$  из точки  $O'$  как из центра сделана засечка, после чего построен вектор  $E_{2M}$ . При таком построении угол  $\alpha$  получается автоматически.

Примеры векторных диаграмм (то есть совокупности векторов, изображающих синусоидальные величины одинаковой частоты для различных углов сдвига фаз между  $e_1$  и  $e_2$ ) даны на рисунке 10, б–е.

Обратите особое внимание на рисунок 10, е, который соответствует рисунку 10, г и показывает, что как бы ни располагалась на чертеже векторная диаграмма, сдвиг фаз от этого на ней не изменяется и это весьма важно.

Можно ли изображать векторами действующие (эффективные) значения э. д. с. и токов?

Этот важный вопрос вызывает обычно недоумение. Ответить на него можно следующим образом.

Если нужно определять мгновенные значения синусоидальной величины, то удобнее брать вектор, изображающий ее максимальное значение, потому, что именно его проекция на ось дает мгновенные значения. Но в практической деятельности обычно имеют дело не с мгновенными, а с действующими значениями, например говорят 220 В, понимая под этим действующее значение и не думая ни о максимальных значениях, которые на 41% больше, ни о других мгновенных значениях. Поэтому векторные диаграммы обычно строят для действующих значений. При этом углы сдвига фаз между током, э. д. с., напряжением и тому подобными видны совершенно отчетливо, а результаты сложения и вычитания векторов непосредственно получаются в действующих значениях, что удобно.

Сложение и вычитание синусоид

В электроустановках, в которых действует несколько э. д. с., они в зависимости от способа соединения могут либо складываться, либо вычитаться. Это же относится к токам в местах разветвлений.

В цепях **постоянного** тока сложение и вычитание производят алгебраически. Это значит, что если одна э. д. с. равна 5 В, а другая 18 В, то их сумма составляет  $5 + 18 = 23$  В, а разность  $5 - 18 = -13$  В. Знак минус указывает на изменение направления тока на обратное по сравнению с тем, которое было бы только от одной э. д. с. 5 В.

В цепях **переменного** тока сложение и вычитание производятся более сложно. Чтобы сложить две синусоиды  $e_1$  и  $e_2$  нужно: а) пересечь их в нескольких местах вертикалями 0, 1, 2, 3, 4, 5 ... и так далее, на которых синусоиды отсекут мгновенные значения э. д. с. (рисунок 11, а); б) попарно алгебраически сложить мгновенные значения и полученные суммы, представляющие собой мгновенные значения суммарной э. д. с., отложить на тех же вертикалях (рисунок 11, б); в) соединить плавной кривой вершины суммарных мгновенных значений, получив, таким образом, суммарную синусоиду из другой, например  $e_1 + e_2$ .

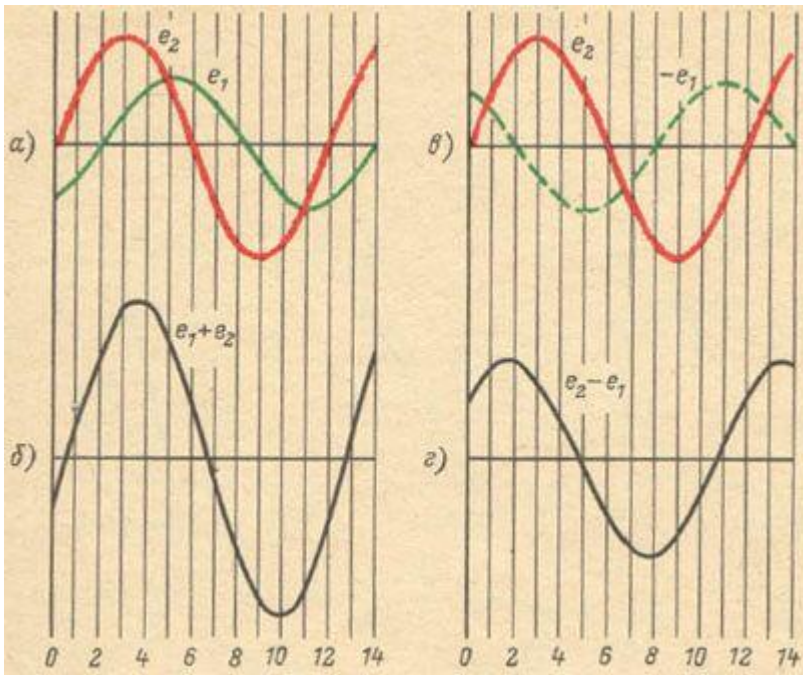


Рисунок 11. Сложение и вычитание синусоид

Чтобы вычесть одну синусоиду из другой, например  $e_1$  из  $e_2$  (рисунок 11, а), нужно вычитаемой синусоиде дать обратный знак, то есть попросту начертить ее зеркальное изображение  $-e_1$  (рисунок 11, б). Затем синусоиды  $e_2$  и  $-e_1$  складывают (рисунок 11, з), как описано выше. Одним словом, вычитание синусоид основывается на известном правиле, которое гласит, что вычесть – все равно, что прибавить то же самое с обратным знаком.

#### Сложение и вычитание векторов

На рисунке 12, а изображены три вектора  $A$ ,  $B$  и  $C$ . На рисунке 12, б показано их сложение по правилу параллелограмма, а именно: сначала найдена сумма двух векторов  $A$  и  $B$  ( $B$  и  $C$ ,  $A$  и  $C$ ), а затем к ней прибавлен вектор  $C$  ( $A$ ,  $B$ ). Рисунок 12, в показывает другой способ сложения этих же векторов в четырех вариантах. Обратите внимание на направление вектора суммы. Сравнивая рисунки 12, б и в, легко видеть, что в любом случае получены одинаковые результаты.

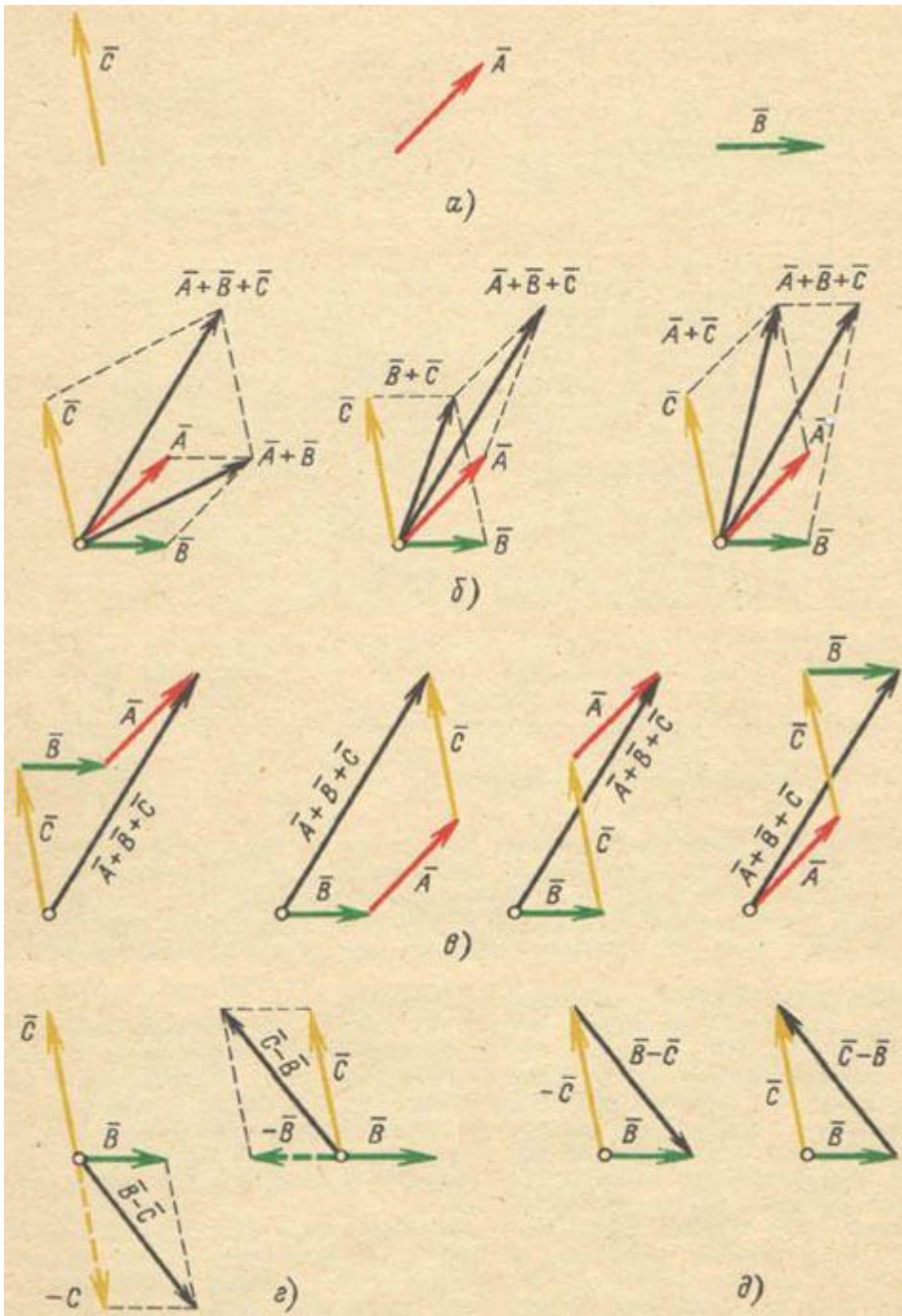


Рисунок 12. Сложение и вычитание векторов

Для **вычитания** одного вектора из другого вычитаемый вектор поворачивают на  $180^\circ$  (то есть ему дают обратный знак), после чего по правилу параллелограмма производят сложение (рисунок 12, з). Другой способ вычитания этих же векторов иллюстрирует рисунок 12, д. Заметьте: вектор-разность направлен к **концу** того вектора, из которого сделано вычитание. Так, на рисунке 12, д, слева, вектор-разность направлен к концу вектора  $B$ .

### Трёхфазная система

Наибольшее распространение в электротехнике получила симметричная трёхфазная система э. д. с. Она представляет три одинаковые по частоте и амплитуде переменные э. д. с., между которыми существует сдвиг на  $1/3$  периода.

Совокупность токов, возникающих под действием этих э. д. с., называется трехфазной системой токов или, как обычно говорят, трехфазным током.

Если нагрузки всех трех фаз во всех отношениях одинаковы (например, представляют собой обмотки трехфазного электродвигателя, или театральную люстру, в которой каждая из фаз питает одинаковое количество одинаковых ламп, или является трехфазной конденсаторной батареей и тому подобным), то трехфазная система токов будет симметричной. Это самый благоприятный и самый простой случай.

В симметричной системе значения токов всех фаз равны, токи одинаково сдвинуты относительно соответствующих напряжений, а между токами смежных фаз сдвиг равен  $1/3$  периода.

В практике же часто встречаются несимметричные нагрузки. Например, всегда существует несимметрия в осветительных сетях, значительную асимметрию создает электрическая тяга на переменном токе. Симметрия резко нарушается в аварийных режимах (короткое замыкание, обрыв одного провода, нарушение контакта в одной из фаз и тому подобное).

Трехфазный ток был изобретен в 1891 г. русским инженером М. О. Доливо-Добровольским и получил широчайшее распространение благодаря своим замечательным свойствам:

а) с помощью трехфазного тока можно передать энергию с затратой значительно меньшего количества проводникового материала, чем потребовалось бы при передаче однофазным током;

б) с помощью трехфазного тока в неподвижных обмотках электродвигателей создается вращающееся магнитное поле, увлекающее за собой роторы самых простых по конструкции и самых распространенных асинхронных электродвигателей.

В зависимости от вида соединений трехфазных генераторов, трансформаторов и электроприемников можно получить те или иные практические результаты.

## Практическая работа №10

### «Исследование последовательной резонансной цепи».

**Цель работы:** исследование резонансных явлений в последовательном RLC контуре.

В электрических цепях, как правило, в качестве критерия режима резонанса принимают условие совпадения по фазе тока и напряжения в пассивных двухполюсниках, содержащих индуктивные, емкостные и резистивные элементы. На рис. 7.1 представлено последовательное соединение резистивного, индуктивного и емкостного элементов (RLC – контур).

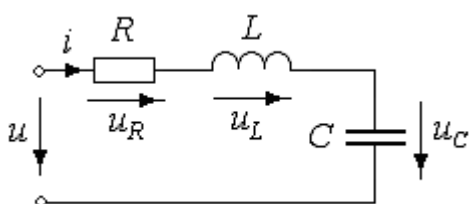


Рис. 7.1. Схема RLC – контура

Пусть напряжение на входе – синусоидальное  $u(t) = U_m \sin \omega t$ , частота  $\omega$  может меняться в пределах от нуля до  $\infty$ . Составим уравнение для контура:

$$u(t) = u_R(t) + u_L(t) + u_C(t), \quad u_R(t) = Ri(t), \quad u_L(t) = L \frac{di}{dt}, \quad u_C(t) = \frac{1}{C} \int idt.$$

Применим комплексный метод расчета. Комплексная схема замещения и векторные диаграммы комплексных напряжений на заданной частоте

( $X_L = \omega L$ ,  $X_C = 1/\omega C$ ) имеют вид, представленный на рис. 7.2:

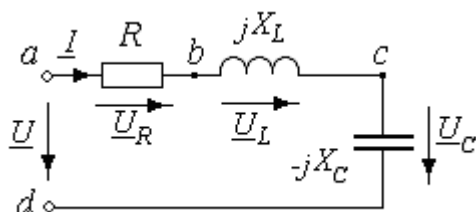
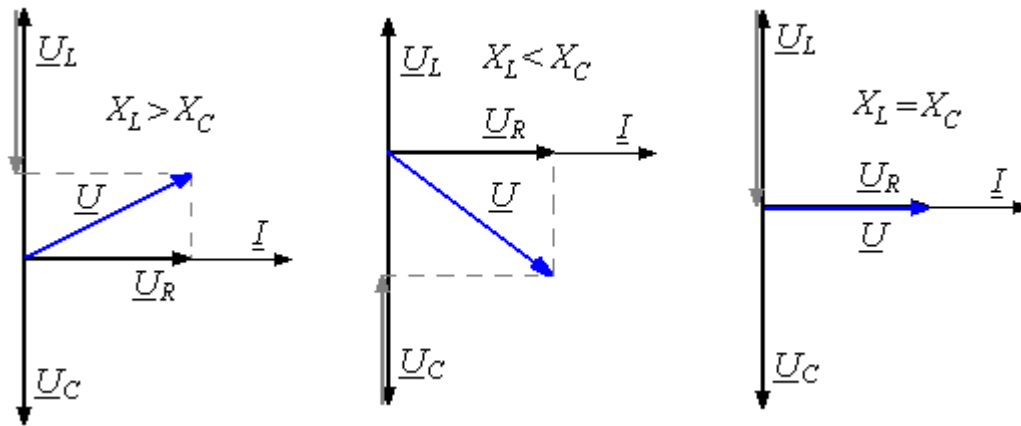


Рис. 7.2. Комплексная схема RLC – контура

При  $X_L > X_C$  характер цепи – резистивно-индуктивный (ток отстает от напряжения, рис. 7.3,а); при  $X_L < X_C$  – резистивно-емкостной (ток опережает напряжение, рис. 7.3,б); при  $X_L = X_C$  – резистивный, т. е. ток совпадает по фазе с напряжением (рис. 7.3,в). В таком случае цепь настроена в резонанс, а на участке (b d) наблюдается резонанс напряжений.



а) б) в)

Рис. 7.3. Векторные диаграммы для:

- (а) резистивно-индуктивного характера цепи;
- (б) резистивно-емкостного характера цепи;
- (в) в режиме резонанса.

Действительно, если  $X_L = X_C$ , то

$$\underline{U}_{bd} = \underline{U}_{bc} + \underline{U}_{cd} = \underline{U}_L + \underline{U}_C = jX_L \underline{I} - jX_C \underline{I} = j\underline{I}(X_L - X_C) = 0 \quad \text{и} \quad \underline{Z}_{bd} = 0.$$

Тогда  $\underline{U} = \underline{U}_{ab} + \underline{U}_{bd} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = \underline{U}_R = R\underline{I}$ . Входное сопротивление цепи  $\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \underline{Z}_{ab} = R$  – чисто активное.

Из условия  $X_L = X_C$  следует, что резонанса можно достичь, изменяя частоту напряжения источника или параметры реактивных элементов – индуктивность и

емкость. Угловая частота, при которой наступает резонанс, называется резонансной

угловой частотой:  $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$  и  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ . Индуктивное и емкостное сопротивление

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho$$

при резонансной частоте равны  $\rho$ . Величина  $\rho$  называется характеристическим сопротивлением цепи или контура. Напряжения на индуктивности и емкости при резонансе равны и могут значительно превышать входное напряжение, которое равно напряжению на активном сопротивлении. Отношение напряжения на индуктивности или емкости к входному напряжению при резонансе называют добротностью контура:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\rho I}{RI} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$$

В общем случае комплексное входное сопротивление зависит от частоты и параметров элементов:

$$\underline{Z}(\omega) = R + jX(\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = Z(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

модуль комплексного входного сопротивления  $Z(\omega) = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ , угол

комплексного входного сопротивления  $\varphi(\omega) = \arctg \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{R}$ .

В теоретическом случае при  $R=0$  полное сопротивление цепи при резонансе равно нулю, а ток в контуре бесконечно велик. При  $R \neq 0$  полное сопротивление

при  $X_L = X_C$  минимально, а ток максимален и равен  $I = I_p = \frac{U}{R}$ .

Зависимости действующего (или амплитудного) значения тока, напряжений на

элементах  $I(\omega) = \frac{U}{Z(\omega)}$ ,  $U_R(\omega) = RI(\omega)$ ,  $U_L(\omega) = \omega LI(\omega)$  и  $U_C(\omega) = \frac{I(\omega)}{\omega C}$  от частоты

приложенного напряжения называют резонансными кривыми. Зависимость параметров цепи  $Z(\omega)$ ,  $X(\omega)$ ,  $\varphi(\omega)$  от частоты приложенного напряжения называют частотными характеристиками. Действующее значение входного

напряжения при этом  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \text{const}$ . Резонансные кривые тока и напряжения также

строят в относительных единицах; для разных значений добротности контура

кривые  $\frac{I}{I_p}(\omega)$  имеют вид, представленный на рис. 7.4.

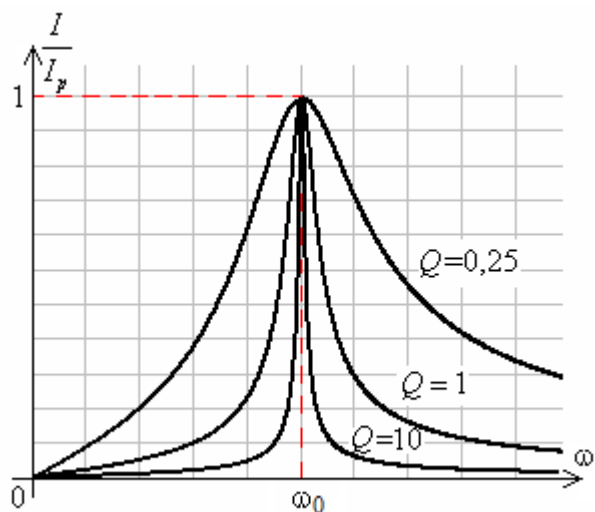
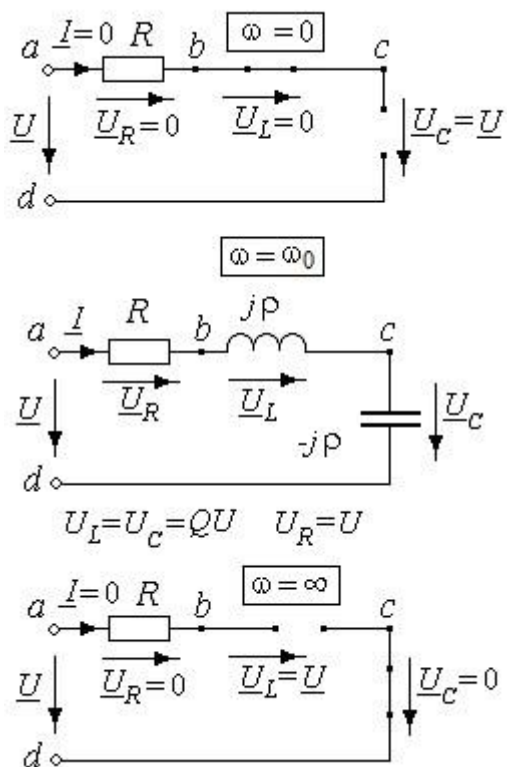


Рис. 7.4. Резонансные кривые (в относительных единицах) при разной добротности



Резонансные кривые напряжений и пояснения к построению представлены на рис. 7.5:



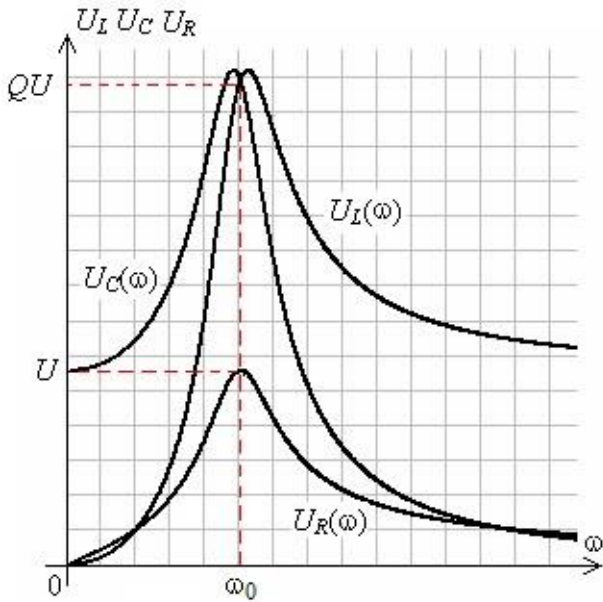


Рис. 7.5. Резонансные кривые и пояснения к построению кривых

Замечание: Для цепи с добротностью  $Q < 1/\sqrt{2}$  возрастание  $U_L$  от нуля до значения  $U$  происходит монотонно, а для цепи с добротностью  $Q > 1/\sqrt{2}$  напряжение  $U_L$  при некоторой частоте  $\omega_L > \omega_0$  достигает максимального значения  $U_{Lmax} > U$ , а затем уменьшается до значения  $U$ . Для цепи с добротностью  $Q < 1/\sqrt{2}$  напряжение  $U_C$  монотонно убывает от  $U$  до нуля, а для цепи с добротностью  $Q > 1/\sqrt{2}$  напряжение  $U_C$  при некоторой частоте  $\omega_C < \omega_0$  достигает максимального значения  $U_{Cmax} > U$ , а затем уменьшается до нуля.

Частотные характеристики последовательного контура имеют вид, представленный на рис. 7.6:

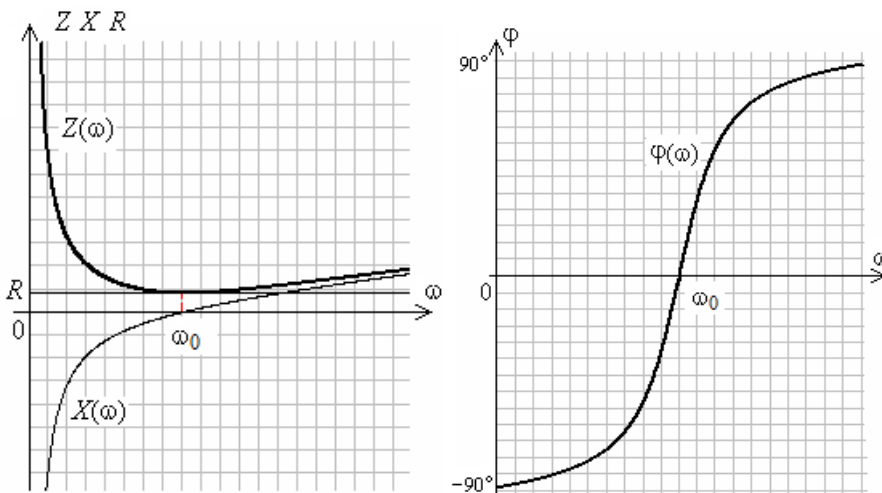


Рис. 7.6. Частотные характеристики последовательного контура

Резонансные кривые и частотные характеристики показывают, что цепь обладает избирательными свойствами: обладает наименьшим сопротивлением для тока той частоты, которая наиболее близка к резонансной. Избирательные свойства широко используются в [электротехнике](#) и радиотехнике. При этом режим резонанса является нормальным режимом работы устройства. Наоборот, в устройствах, где резонансный режим не предусмотрен, значительные токи и напряжения могут быть опасными. Для оценки избирательных свойств цепи вводят условное понятие ширины резонансной кривой или полосы пропускания контура, которую

определяют как разность частот, между которыми ток превышает значение  $\frac{I_p}{\sqrt{2}}$  ( $\frac{I}{I_p} \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$ ). Пересечение горизонтальной линии  $I = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$  ( $\frac{I}{I_p} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ ) с резонансными кривыми определяет граничные частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , между которыми расположена полоса пропускания (рис. 7.7).

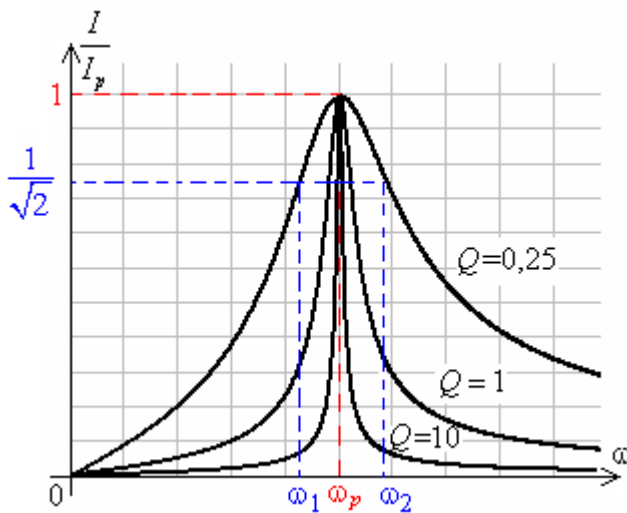


Рис. 7.7. Полоса пропускания на резонансной кривой

Чем выше добротность, тем уже полоса пропускания:  $Q = \frac{\omega_0}{|\omega_1 - \omega_2|}$ . Модуль комплексного сопротивления цепи

$$Z(\omega) = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + \omega_0^2 L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{1}{\omega_0 \omega LC}\right)^2} = R \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}$$

$$I(\omega) = \frac{I_p}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

Действующее значение тока

Замечание: При  $\omega = \omega_1$  и  $\omega = \omega_2$  выполняется соотношение  $I = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$ , следовательно  
 полное сопротивление цепи  $Z|_{\omega=\omega_{1,2}} = \sqrt{2}R$ , реактивная  
 составляющая  $X|_{\omega=\omega_{1,2}} = |X_L - X_C| = R$ , сдвиг фаз  $\varphi_{\omega=\omega_{1,2}} = \pm 45^\circ$ .

#### 4. Информационное обеспечение обучения

##### Перечень рекомендуемых учебных изданий, Интернет-ресурсов, дополнительной литературы

###### Основные источники:

1. Ярочкина Г.В. Основы электротехники. – М.: «Академия», 2016г.
2. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники. – М.: «Мастерство», 2018г.
3. Зайчик М.Ю. Сборник задач и упражнений по теоретической электротехнике – М.: «Энергия», 2017г.
4. Кацман М.М. Электрические машины. Учебник – М: «Высшая школа», 2017г.
5. Морозова Н.Ю. Электротехника и электроника. Учебник – М: «Академия», 2017г.
6. Панфилов В.А. Электрические измерения. Учебник – М: «Форум», 2017г.
7. Полупроводниковые приборы. Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: Справочник /Под ред. Перельманы Б.А./ – М.: «Радио и связь», 2017г.
8. Федотов В.И. Основы электроники. – М: «Высшая школа», 2016г.

###### Дополнительные источники:

1. Москаленко В.В. Электрический привод, учебное пособие – М: «Академия», 2016.
2. Евдокимов Ф.Е. Общая электротехника. – М: «Энергия», 2004г.
3. Немцов М.В., Светлакова Н.Н. Электротехника, учебное пособие, Ростов-на-Дону «Феникс», 2013г.
4. Хромоин П.К. Электрические измерения, учебник-М: «Форум», 2011г.