

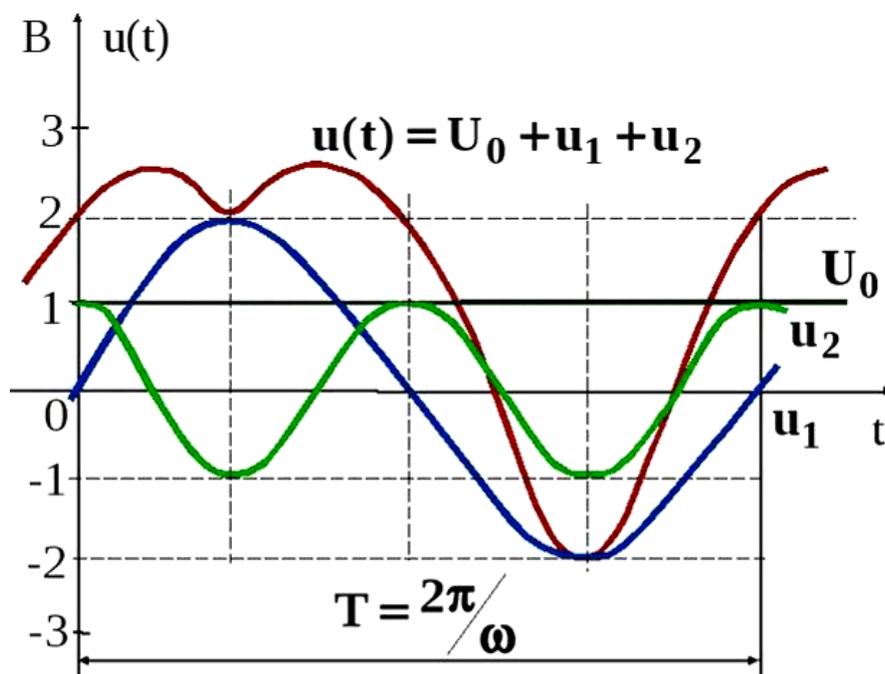
МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ ЗАОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(ФГБОУ ВО РГАУ)

Факультет электроэнергетики и технического сервиса  
Кафедра электрооборудования и электротехнических систем

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ И ВЫПОЛНЕНИЮ  
КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

студентам 4 курса направления подготовки бакалавров 35.03.06 Агроинженерия  
по профилю «Электрооборудование и электротехнологии»



Балашиха 2016

Составители: д.т.н., профессор Копылов С.И., к.т.н., доцент Переверзев А.А.,  
к.т.н., доцент Попова М.В.

УДК 621.3 (075.5)

Теоретические основы электротехники: Методические указания по изучению  
дисциплины и выполнению контрольной работы / Росс. гос. аграр. заоч. ун-т;  
Сост. Копылов С.И., Переверзев А.А., Попова М.В. М., 2016 г.

Предназначены для студентов 4 курса

Утверждены методической комиссией факультета энергетики и технического  
сервиса протокол № от 2016 г.

Рецензенты:

к.т.н., доцент Мохова О.П., к.т.н., доцент Лычкин В.Н. (ФГБОУ ВО РГАЗУ)

## Раздел 1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина «Теоретические основы электротехники» относится к дисциплинам вариативной части блока 1 «Дисциплины (модули)» ООП. Методические указания по данной дисциплине составлены в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия (уровень бакалавриата), утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 1172 от 20 октября 2015 г.; рабочей учебной программы и учебного плана, утвержденными учёным советом ФГБОУ ВО РГАЗУ.

### 1.1 Цели и задачи дисциплины

*Цель* - изучение основных понятий и законов электротехники; методы анализа линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей; овладение методами расчета электромагнитных полей; овладение методами расчета и синтеза электрических и магнитных цепей.

*Задачами* изучения дисциплины являются:

- усвоение основных законов нелинейных электрических цепей;
- овладение методами расчета электромагнитных полей, электрических и магнитных цепей;
- изучение организации сетевого питания;
- усвоение методов расчёта цепей несинусоидального тока;
- изучение динамических режимов работы цепей постоянного и синусоидального токов;
- формирование понятия о работе цепей с распределёнными параметрами.

**В результате изучения дисциплины студент должен:**

**обладать общепрофессиональными компетенциями:**

– способностью решать инженерные задачи с использованием основных законов механики, электротехники, гидравлики, термодинамики и тепломассообмена (ОПК-4);

– способностью проводить и оценивать результаты измерений (ОПК-6);

**обладать профессиональными компетенциями**, соответствующими виду профессиональной деятельности, на который ориентирована программа бакалавриата – *научно-исследовательская деятельность (основная)*:

– готовностью к обработке результатов экспериментальных исследований (ПК-3).

**знать:** фундаментальные законы теории электромагнитного поля и теории цепей, современные методы расчета электрических цепей и электромагнитных полей, принципы действия и области применения основных электротехнических устройств; основные законы электротехники, методы расчета электрических цепей; способы расчёта несинусоидальных цепей; способы упрощённого расчёта нелинейных цепей;

**уметь:** применять теоретические знания к расчету, анализу и синтезу электрических цепей, а также составлять и решать уравнения конкретных цепей; исследовать электрические и магнитные цепи в статическом и динамическом режимах работы; подключать и использовать электротехнические и измерительные устройства; пользоваться осциллографом и другой измерительной аппаратурой;

**владеть:** методами построения и чтения электрических, функциональных и блок-схем основных электротехнических устройств, методами формирования и решения уравнений электрических цепей в установившихся и динамических режимах.

## 1.2. Библиографический список

### *Основной*

1. Карабашев, Г.П. Трёхфазные цепи: учеб. пособие [Электронный ресурс] / Г.П. Карабашев. – Ижевск: ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2012. – 74 с. // ФГБОУ ВО РГАЗУ. – Режим доступа: <http://ebs.rgazu.ru/?q=node/2353>
2. Афанасьева, Н.А. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] / Н.А. Афанасьева, Л.П. Булат. – СПб.: СПНИУ ИТМО, 2005. – 178 с. // ФГБОУ ВО РГАЗУ. – Режим доступа: <http://ebs.rgazu.ru/?q=node/3046>

### *Дополнительный*

3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. для бакалавров/ Л.А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2012.–701с.
4. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле: учеб. пособие/ под ред. Г.И. Атабекова. – СПб: Лань, 2010. – 432 с.
5. Электрические машины: учеб. для бакалавров/ под ред. И.П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2012. – 675с.
6. Касаткин А.С. Электротехника: учеб. для вузов/А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М.: Академия, 2008. – 544 с.
7. Аполлонский, С.М. Теоретические основы электротехники/ С.М. Аполлонский, А.Л. Виноградов. – М.: Кнорус, 2016. – 250 с.
8. Ермуратский П.В. Электротехника и электроника/ П.В. Ермуратский, Г.П. Лычкина, Ю.Б. Минкин. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 416 с.
6. Козлова И.С. Электротехника: конспект лекций/И.С. Козлова. – М.: ЭКСМО, 2007. – 160 с.
9. Атабеков Г.И. Основы теории цепей: учебник/ Г.И.Атабеков. – 2-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2006. – 424с.
10. Теоретические основы электротехники: методические указания по изучению дисциплины и выполнению контрольной работы / Рос. гос. аграр.

заоч. ун-т; Сост. Копылов С.И., Переверзев А.А., Попова М.В. – М., 2016. – 23 с.

11. Теоретические основы электротехники: методические указания по изучению дисциплины и выполнению курсовой работы / Рос. гос. аграр. заоч. ун-т; Сост. Копылов С.И., Переверзев А.А., Попова М.В. – М., 2016. – 23 с.

12. Теоретические основы электротехники: методические указания по выполнению практических и лабораторных работ / Рос. гос. аграр. заоч. ун-т; Сост.: Л.В. Беляева, А.А. Переверзев, С.И. Копылов. – М., 2014. – 24 с.

### *Электронный ресурс*

12. Пономаренко, В.К. Электротехника: учеб. пособие [Электронный ресурс] / В.К. Пономаренко. – СПб.: ГОУ ВПО СПбГТУРП, 2010. – 105 с. // Федеральный портал "Российское образование". – Режим доступа: <http://window.edu.ru/resource/331/76331>

13. Макаричев, Ю.А. Синхронные машины: учеб. пособие [Электронный ресурс] / Ю.А. Макаричев, В.Н. Овсянников. – Самара: ГОУ ВПО СГТУ, 2010. – 156 с. // ФГБОУ ВО РГАЗУ. – Режим доступа: <http://ebs.rgazu.ru/?q=node/873>

14. Ткаченко, Н.И. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] / Н.И. Ткаченко, С.Е. Башняк. – Ростов н/Д.: Донской ГАУ, 2015. – 61 с. // ФГБОУ ВО РГАЗУ. – Режим доступа: <http://ebs.rgazu.ru/?q=node/4342>

15. Панфилов, С.А. Общая электротехника и электроника [Электронный ресурс] / С.А. Панфилов, Н.Р. Некрасова, О.Ю. Коваленко. – Саранск: МГУ имени Н.П. Огарёва, 2013. – 142 с. – Режим доступа: [http://toe.stf.mrsu.ru/demo\\_versia/Book/index.htm](http://toe.stf.mrsu.ru/demo_versia/Book/index.htm)

16. Калинин, В.Ф. Теоретическая электротехника в электрооборудовании [Электронный ресурс] / В.Ф. Калинин, В.М. Иванов. – Тамбов: ТГТУ, 2010. – 316 с. // ФГБОУ ВО РГАЗУ. – Режим доступа: <http://ebs.rgazu.ru/?q=node/866>

17. Усольцев А.А. Общая электротехника [Электронный ресурс] / А.А. Усольцев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с. // ФГБОУ ВО РГАЗУ. – Режим доступа: <http://ebs.rgazu.ru/?q=node/822>

### 1.3. Распределение учебного времени по модулям (разделам) и темам

#### ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование модуля (раздела) дисциплины	Всего час.	В том числе				Рекомендуемая литература
			лекц.	лаб. зан.	прак. зан.	СРС	
1.	Модуль 1. Нелинейные цепи постоянного и синусоидального токов	36	2			34	1, 3, 4, 5
	Тема 1.1. Нелинейные цепи постоянного тока	18	1			17	3, 4
	Тема 1.2. Нелинейные цепи синусоидального тока	18	1			17	3, 5
2.	Модуль 2. Магнитные цепи и цепи с распределенными параметрами	36	2	2	2	30	1, 2, 6
	Тема 2.1. Магнитные цепи при постоянных магнитных потоках	18	1	2	1	14	1, 2, 6
	Тема 2.2. Электрические цепи с	18	1		1	16	1, 2

№ п/п	Наименование модуля (раздела) дисциплины	Всего час.	В том числе				Рекомендуемая литература
			лекц.	лаб. зан.	прак. зан.	СРС	
	распределенными параметрами						
3.	Модуль 3. Электрические цепи несинусоидального периодического тока	36	2	4	2	28	1, 2, 4
	Тема 3.1. Методы разложения несинусоидальных функций в ряд Фурье	18	1	2	1	14	1, 4
	Тема 3.2. Методы расчета цепей несинусоидального тока	18	1	2	1	14	1, 2
4.	Модуль 4. Работа электрических цепей в динамическом режиме	36	2	2	2	30	2, 7, 8
	Тема 4.1. Понятие о переходных процессах в электрических цепях	18	1	1	1	15	2, 7, 8
	Тема 4.2. Методы расчета переходных процессов	18	1	1	1	15	2, 8
<b>Всего:</b>		<b>144</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>122</b>	

## Раздел 2. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНЫХ МОДУЛЕЙ ДИСЦИПЛИНЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ИЗУЧЕНИЮ

### 2.1. Нелинейные цепи постоянного и синусоидального токов

#### 2.1.1. Содержание модуля

**Тема 1.1. Нелинейные цепи постоянного тока.** Понятия о нелинейных цепях, замена нелинейного участка цепи линейным, статическое и дифференциальное сопротивление, расчет цепей при различном соединении элементов.

**Тема 1.2. Нелинейные цепи синусоидального тока.** Особенности цепей переменного тока, методы расчета, нелинейное сопротивление как генератор высших гармоник.

#### 2.1.2. Методические указания по изучению модуля

Изучите материал модуля в межсессионный период, используя рекомендуемую литературу. Кратко законспектируйте его основное содержание, чтобы быть готовым устно изложить его материал. Для самопроверки используйте ниже приведённые вопросы для самоконтроля.

#### 2.1.3. Вопросы для самоконтроля

1. Основные определения нелинейных цепей.
2. Вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений.
3. Общая характеристика методов расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока.
4. Электрические цепи с последовательным соединением нелинейных сопротивлений.
5. Вольтамперная характеристика параллельного соединения нелинейных сопротивлений.

#### 2.1.4. Задания для самостоятельной работы

Используя вопросы для самоконтроля и рекомендуемую литературу, прежде всего, из основного списка проверьте свои знания. Кратко законспектируйте ответы. Дополнительно используйте для самоконтроля знаний тесты:

1. Статическое сопротивление нелинейной цепи:

- производная напряжения по току;
- отношение напряжения к току в рабочей точке вольтамперной характеристики;
- эквивалентное сопротивление всей цепи.

2. Появление высших гармоник в кривой тока при синусоидальном напряжении связано:

- с наличием нелинейного элемента в цепи;
- со схемой соединения цепи;
- с методикой расчета.

3. Симметричную вольтамперную характеристику имеют:

- стабилизаторы;                    - триоды;                    - диоды.

## **2.2. Магнитные цепи и цепи с распределенными параметрами**

### **2.2.1. Содержание модуля**

**Тема 2.1. Магнитные цепи при постоянных магнитных потоках.**

Основные характеристики магнитного поля, основные законы магнитных цепей, нелинейная электрическая аналогия, расчет магнитных цепей.

**Тема 2.2. Электрические цепи с распределенными параметрами.**

Примеры цепей с распределенными параметрами, уравнение линии с распределенными параметрами.

### **2.2.2. Методические указания по изучению модуля**

Изучите материал модуля в межсессионный период, используя рекомендуемую литературу. Кратко законспектируйте его основное содержание, чтобы быть готовым устно изложить его материал. Для самопроверки используйте ниже приведённые вопросы для самоконтроля.

### **2.2.3. Вопросы для самоконтроля**

1. Разделение всех веществ на две группы – ферромагнитные и неферромагнитные.
2. Основные величины, характеризующие магнитное поле.
3. Элементы теории ферромагнетизма.
4. Основные характеристики ферромагнитных материалов.
5. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы.

### **2.2.4. Задания для самостоятельной работы**

Используя вопросы для самоконтроля и рекомендуемую литературу, прежде всего, из основного списка проверьте свои знания. Кратко законспектируйте ответы. Дополнительно используйте для самоконтроля знаний тесты:

1. В момент коммутации при нулевых начальных условиях ёмкость ведет себя как...

- источник ЭДС;                    - разрыв цепи;                    - короткое замыкание.

2. При подключении цепи RC к постоянному напряжению установившееся значение напряжения  $U_c$  будет равно:

- $i \cdot R$                     - нулю;                    - входному напряжению.

3. В установившемся режиме в цепи постоянного тока индуктивность ведет себя как...

- короткое замыкание; - разрыв цепи; - линейное индуктивное сопротивление.

## **2.3. Электрические цепи несинусоидального периодического тока**

### **2.3.1. Содержание модуля**

**Тема 3.1.** *Методы разложения несинусоидальных функций в ряд Фурье.* Аналитический и графический методы разложения в ряд Фурье несинусоидальных величин, виды симметрии, количественная оценка несинусоидальных токов и напряжений.

**Тема 3.2.** *Методы расчета цепей несинусоидального тока.* Методы расчета, высшие гармоники в трехфазных цепях.

### **2.3.2. Методические указания по изучению модуля**

Изучите материал модуля в межсессионный период, используя рекомендуемую литературу. Кратко законспектируйте его основное содержание, чтобы быть готовым устно изложить его материал. Для самопроверки используйте ниже приведённые вопросы для самоконтроля.

### **2.3.3. Вопросы для самоконтроля**

1. Причины возникновения несинусоидальных напряжений и токов.
2. Условие разложения несинусоидальных величин в ряд Фурье.
3. Формулы разложения в ряд Фурье.
4. Разложение в ряд Фурье аналитически и графическим методом.
5. Четные и нечетные синусные и косинусные гармоники.

### **2.3.4. Задания для самостоятельной работы**

Используя вопросы для самоконтроля и рекомендуемую литературу, прежде всего, из основного списка проверьте свои знания. Кратко законспектируйте ответы. Дополнительно используйте для самоконтроля знаний тесты:

1. Феррорезонанс токов возникает в цепях:

- с последовательным соединением катушки с сердечником и конденсатора;
- с последовательным соединением катушки с сердечником и резистора;
- с параллельным соединением катушки с сердечником и конденсатора.

2. Для уменьшения потерь мощности на гистерезис выбирается материал:

- с широкой петлёй гистерезиса;
- с узкой петлёй гистерезиса;
- ширина петли гистерезиса не имеет значения.

3. Феррорезонанс напряжений возникает в цепях:

- с параллельным соединением резистора, катушки с сердечником и конденсатора;
- с последовательным соединением резистора и катушки индуктивности;
- с последовательным соединением катушки с сердечником и конденсатора.

## **2.4. Работа электрических цепей в динамическом режиме.**

### **2.4.1. Содержание модуля**

**Тема 4.1.** *Понятие о переходных процессах в электрических цепях.* Причины возникновения и сущность переходных процессов.

**Тема 4.2.** *Методы расчета переходных процессов.*

Классический метод расчета переходных процессов, порядок расчета, расчет переходного процесса в цепи с одним накопителем и несколькими

накопителями электрической энергии, операторный метод расчета, преобразование Лапласа.

#### **2.4.2. Методические указания по изучению модуля**

Изучите материал модуля в межсессионный период, используя рекомендуемую литературу. Кратко законспектируйте его основное содержание, чтобы быть готовым устно изложить его материал. Для самопроверки используйте ниже приведённые вопросы для самоконтроля.

#### **2.4.3. Вопросы для самоконтроля**

1. Причины возникновения переходного процесса в электрических цепях.
2. Каким явлением в электрических цепях сопровождается переходный процесс?
3. Первый закон коммутации.
4. Второй закон коммутации.
5. Методы расчета переходных процессов. Классический и операторный методы.

#### **2.4.4. Задания для самостоятельной работы**

Используя вопросы для самоконтроля и рекомендуемую литературу, прежде всего, из основного списка проверьте свои знания. Кратко законспектируйте ответы. Дополнительно используйте для самоконтроля знаний тесты:

1. Две последовательно соединенные индуктивно связанные катушки включены встречно, причем взаимная индуктивность равна половине собственной индуктивности первой катушки. Как изменится напряжение на первой катушке, если в условиях режима заданного тока уменьшить до нуля коэффициент связи? Активным сопротивлением катушек пренебречь.

- увеличится вдвое;      - уменьшится вчетверо;      - уменьшится вдвое.

2. Как изменится взаимная индуктивность двух катушек без ферромагнитного сердечника, если ток в одной из них увеличить в два раза?

- не изменится;      - увеличится в 4 раза;      - увеличится в 2 раза.

3. Как изменится взаимная индуктивность двух катушек без ферромагнитного сердечника, если числа витков обеих катушек уменьшить в два раза?

- не изменится;      - уменьшится в 4 раза;      - уменьшится в 2 раза.

### **Раздел 3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЮ**

При выполнении контрольной работы использовать общепринятые обозначения, расшифровывая их при первом применении и указывая единицы измерения в Международной системе единиц СИ. Контрольная работа должна быть выполнена в печатном виде на листах формата А4 с полями справа в 3 см для замечаний рецензента. Расчетные формулы первоначально приводятся в общем виде с разъяснением входящих в них физических величин и указанием их размерностей. Затем в формулы подставляют соответствующие числовые значения и приводят конечный результат. Схемы и графические построения выполняют с применением чертежных инструментов в соответствии с требованиями ЕСКД. В конце контрольной работы нужно дать список использованной литературы, поставить свою

подпись и указать дату окончания задания. Контрольная работа в бумажном виде сдаётся в деканат, кроме того в электронном виде контрольная работа обязательно должна быть размещена на ресурсах электронной информационно-образовательной среды (ЭИОС) ФГБОУ ВО РГАЗУ в форме для сдачи контрольной работы.

### Задания для контрольной работы

#### Задача 1. Расчет разветвленной цепи несинусоидального тока

Вычертить схему индивидуального задания и найти:

1. Действующие и мгновенные значения гармоник токов ветвей;
2. Действующие и мгновенные значения токов ветвей;
3. Действующее значение ЭДС;
4. Мощности и коэффициент мощности несинусоидальной цепи, а также коэффициент мощности для первой гармоники.

#### УКАЗАНИЯ ПО ВЫБОРУ ВАРИАНТА ЗАДАНИЯ И РАСЧЕТУ:

– номер варианта схемы индивидуального задания определяют по двум последним цифрам шифра. Если число, образованное двумя последними цифрами, больше 20, то для получения номера варианта из этого числа вычитают 20, 40, 60 или 80. Например, для шифра 5257 номер варианта  $57 - 40 = 17$ ;

– схему индивидуального задания строят, исходя из общего вида разветвленной цепи (рис. 3.1), а элементы схемы индивидуального задания выбирают из таблицы 3.1, где заданные элементы отмечены знаком  $\times$  в строке, соответствующей номеру варианта. При этом для всех вариантов:

$$e_1 = e_2 = e_3 = e = E_o + E_m^{(1)} \sin(\omega t + \psi_1) + E_m^{(3)} \sin(3\omega t + \psi_3) = \\ = 20 + 100\sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ) + 50\sqrt{2} \sin(3\omega t - 60^\circ), B;$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R; L_1 = L_2 = L_3 = L; C_1 = C_2 = C_3 = C; \text{ частота } f = 50 \text{ Гц}.$$

Из таблицы 3.1 видно, что каждая индивидуальная схема будет содержать только один источник ЭДС, и лишь только одна ветвь заданной схемы будет содержать последовательное соединение резистора и реактивного элемента ( $L$  или  $C$ ); другие же ветви будут содержать только по одному элементу –  $R$ ,  $L$  или  $C$ ;

– численные значения  $R$ ,  $L$  или  $C$  выбирают из таблицы 3.2 по последней цифре учебного шифра;

– индуктивные и ёмкостные сопротивления для первой гармоники, а также аргументы комплексных чисел, вычислять с точностью до десятых, а комплексы сопротивлений и токов – до сотых;

– все комплексные величины записывать и в **алгебраической**, и в **показательной** формах;

– при обозначении токов и сопротивлений номер ветви указывать нижним индексом, а номер гармоники – верхним индексом в скобках, например:

$$I_2^{(3)}; \underline{Z}_1^{(1)} \text{ и т.п.};$$

– правильность расчета токов ветвей для каждой гармоники проверять по первому закону Кирхгофа.

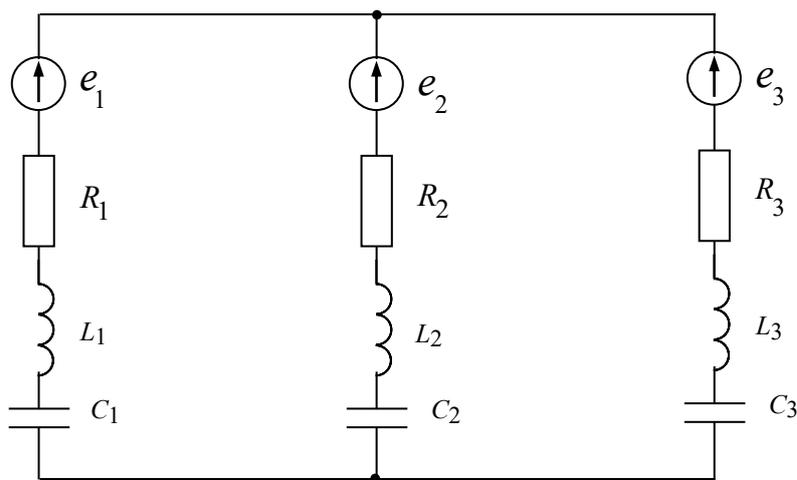


Рис. 3.1. Общий вид цепи несинусоидального тока.

Таблица 3.1

Выбор схемы индивидуального задания

Вариант	Параметры											
	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$R_1$	$L_1$	$C_1$	$R_2$	$L_2$	$C_2$	$R_3$	$L_3$	$C_3$
01	×			×				×		×		×
02		×		×	×				×	×		
03			×			×	×		×		×	
04	×			×			×	×				×
05		×			×		×	×				×
06			×			×	×	×				×
07	×				×		×		×	×		
08		×			×		×			×		×
09			×		×		×		×			×
10	×				×		×	×				×
11		×				×		×		×	×	
12			×		×		×	×				×
13	×			×	×			×				×
14		×			×				×	×	×	
15			×	×			×	×				×
16	×					×	×		×		×	
17		×		×	×			×				×
18			×	×		×		×		×		

Вариант	Параметры											
	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$R_1$	$L_1$	$C_1$	$R_2$	$L_2$	$C_2$	$R_3$	$L_3$	$C_3$
19	×					×	×	×				×
20		×				×			×	×	×	

Таблица 3.2

Исходные данные для расчета

Параметр	Последняя цифра шифра										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
$R, Ом$	7	3	5	6	8	3	6	7	8	9	
$L, мГн$	16	19	13	10	19	13	16	10	26	22	
$C, мкФ$	265	212	177	152	133	152	177	212	265	133	

**Задача 2. Расчет переходных процессов в разветвленных цепях постоянного тока с одним накопителем**

**УКАЗАНИЯ ПО ВЫБОРУ ВАРИАНТА ЗАДАНИЯ И РАСЧЕТУ:**

1. Номер схемы индивидуального задания равен числу, образованному двумя последними цифрами учебного шифра, если это число  $\leq 20$ . Если это число  $>20$ , нужно вычесть 20, 40, 60 или 80.
2. Схема задания по ее номеру выбирается из таблицы 3.3.
3. Для всех вариантов принять  $E = 18 В$ ;
4. В зависимости от наличия в схеме индуктивности или емкости, требуется найти закон изменения во времени:
  - тока и напряжения на индуктивности;
  - напряжения и тока на емкости.
5. Всё решение ведется в общем виде, а числовые значения подставляют лишь в окончательное выражение.
6. Исходные данные для вычислений берутся следующим образом:
  - индуктивность, измеряемая в миллигенри ( $1 мГн = 10^{-3} Гн$ ), равна последней цифре шифра, умноженной на 100;
  - ёмкость в микрофарадах ( $1 мкФ = 10^{-6} Ф$ ) равна последней цифре учебного шифра, умноженной на 1000;
  - сопротивление резистора ( $Ом$ ) равно предпоследней цифре шифра;
  - если цифра, по которой определяется индуктивность  $L$ , емкость  $C$  или сопротивление  $R$ , равна нулю, то берется число 10.

Таблица 3.3

### Схемы индивидуальных заданий

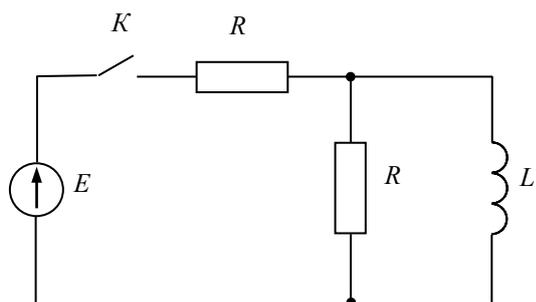


Схема 1. Ключ  $K$  замыкается

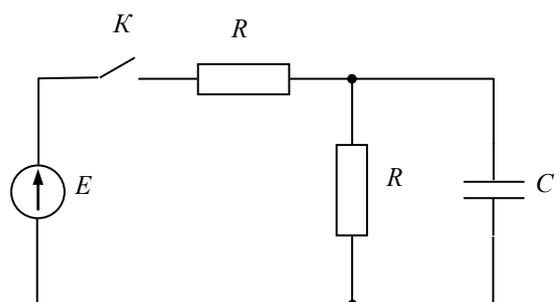


Схема 2. Ключ  $K$  замыкается

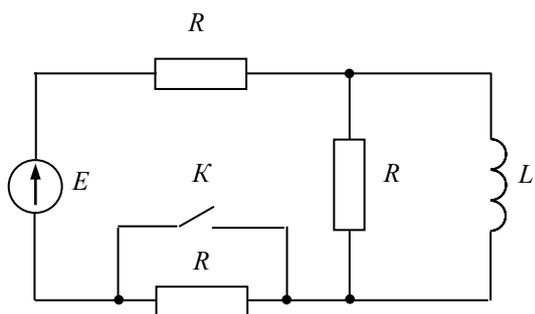


Схема 3. Ключ  $K$  замыкается

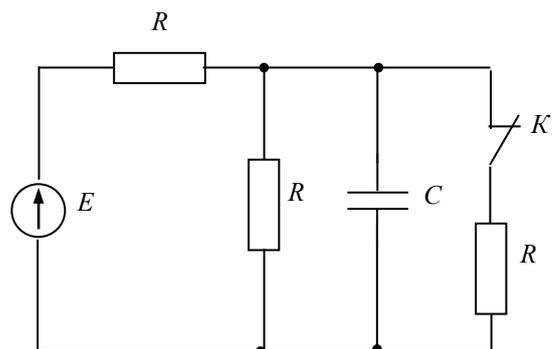


Схема 4. Ключ  $K$  размыкается

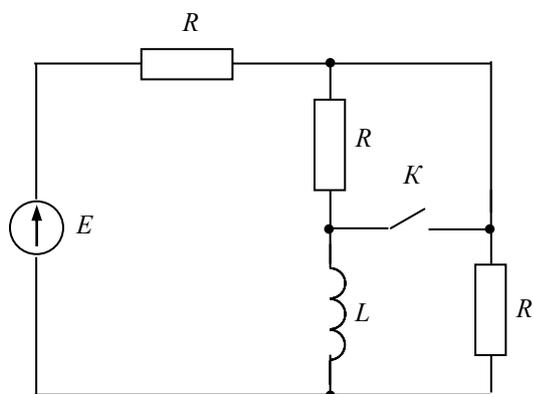


Схема 5. Ключ  $K$  замыкается

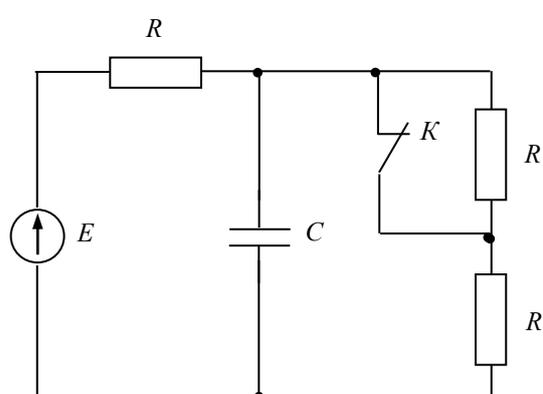


Схема 6. Ключ  $K$  размыкается

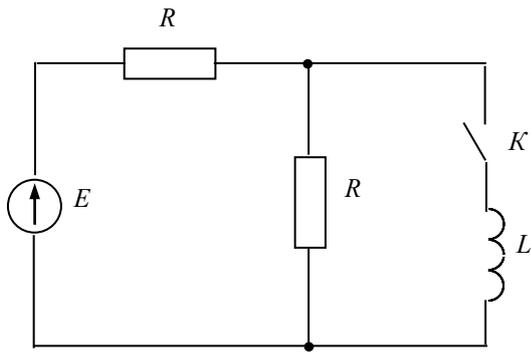


Схема 7. Ключ  $K$  замыкается

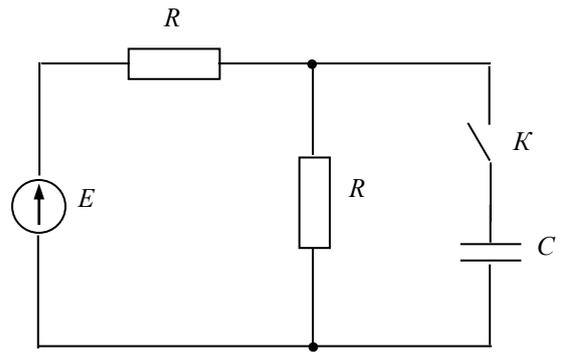


Схема 8. Ключ  $K$  замыкается

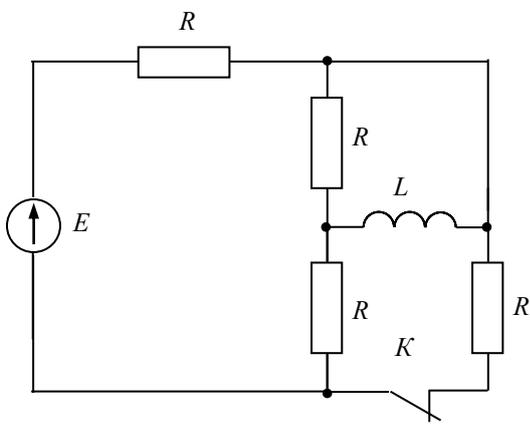


Схема 9. Ключ  $K$  размыкается

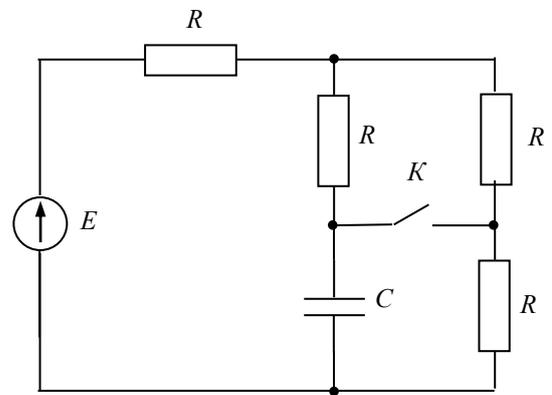


Схема 10. Ключ  $K$  замыкается

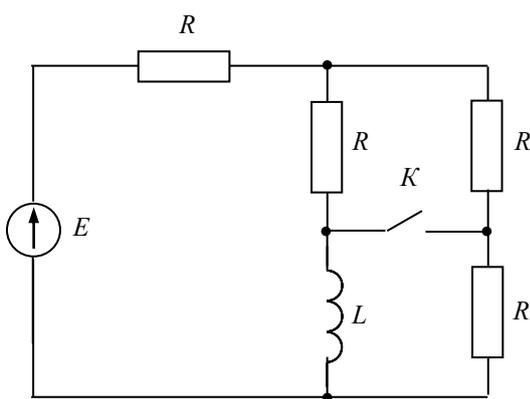


Схема 11. Ключ  $K$  замыкается

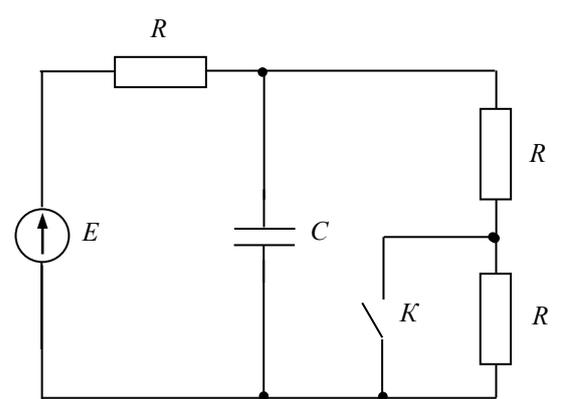


Схема 12. Ключ  $K$  замыкается

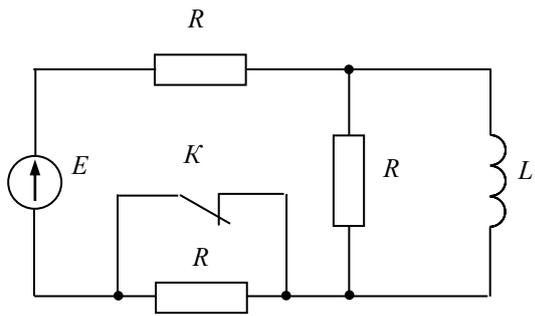


Схема 13. Ключ  $K$  размыкается

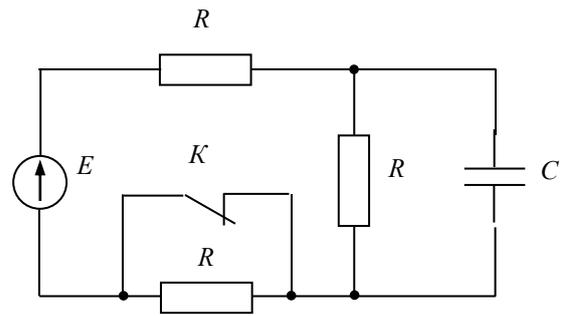


Схема 14. Ключ  $K$  размыкается

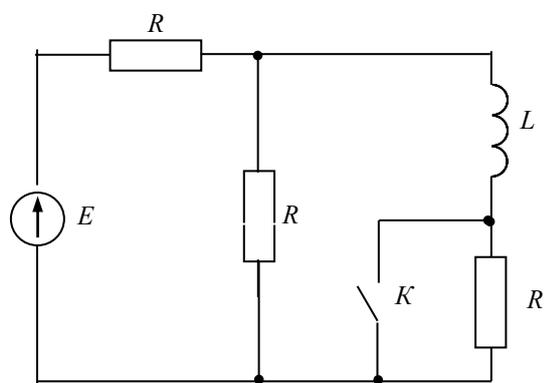


Схема 15. Ключ  $K$  замыкается

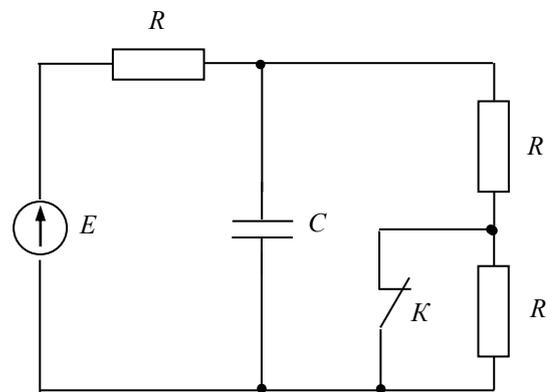


Схема 16. Ключ  $K$  размыкается

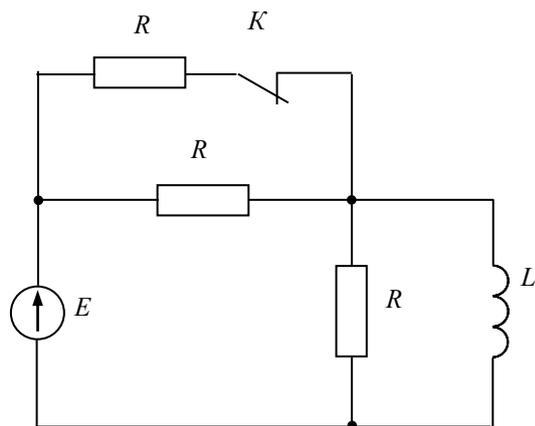


Схема 17. Ключ  $K$  размыкается

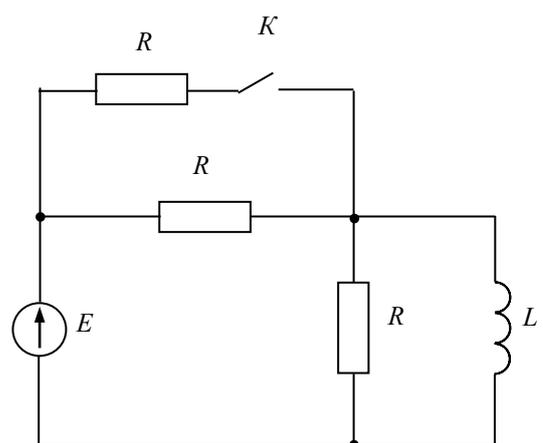
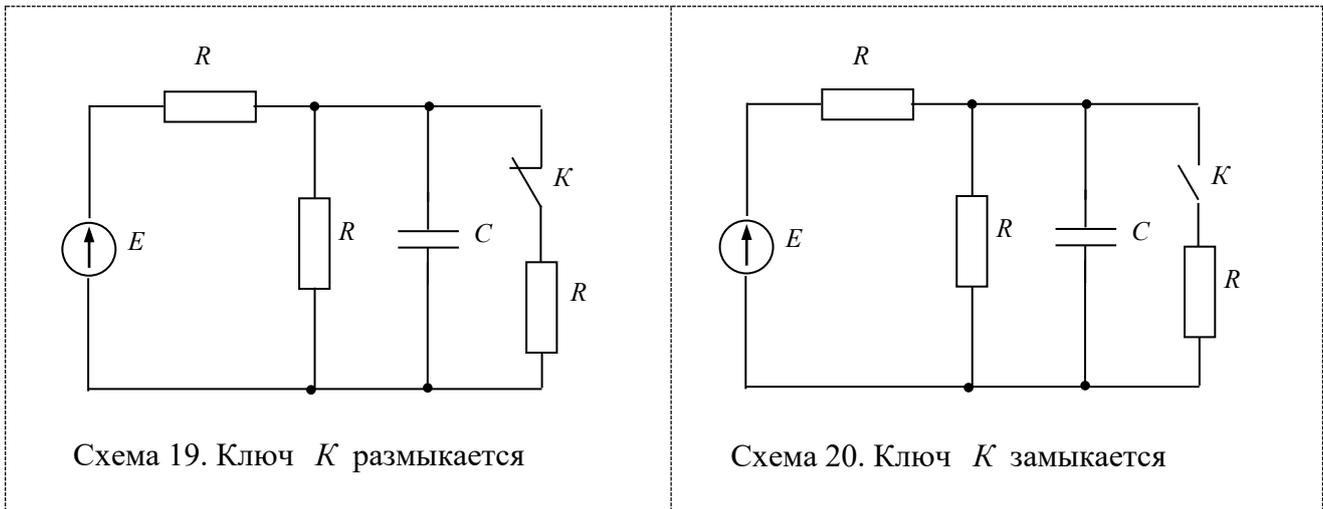


Схема 18. Ключ  $K$  замыкается



### 3.3. Примеры выполнения задания

#### Пример решения задачи 1

Пусть по двум последним цифрам шифра выбран вариант 01, по которому (согласно первой строке таблицы 3.1) в первой ветви индивидуальной схемы должны быть включены ЭДС  $e_1 = e$  и резистор  $R_1 = R$ , во второй ветви – индуктивность  $L_2 = L$ , а в третьей ветви – резистор  $R_3 = R$  и емкость  $C_3 = C$ . Числовые значения параметров  $R$ ,  $L$  и  $C$ , разумеется, заданы в примере произвольно (а не выбраны по последней цифре 1 шифра из таблицы 3.2):

$$R = 4 \text{ Ом}, L = 20 \text{ мГн}, C = 220 \text{ мкФ}.$$

Итак, записываем условие задачи и чертим схему индивидуального задания (рис. 3.2):

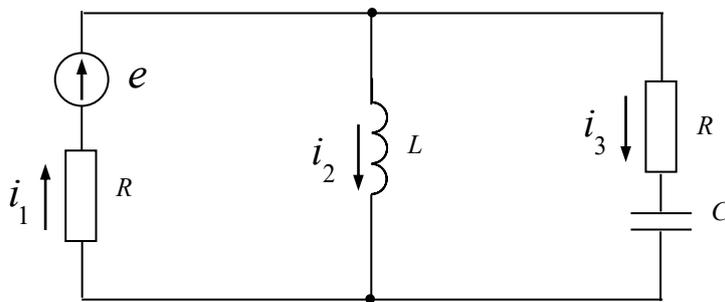


Рис. 3.2. Схема разветвленной цепи несинусоидального тока.

Дано:

$$\begin{aligned}
 e &= E_o + E_m^{(1)} \sin(\omega t + \psi_1) + E_m^{(3)} \sin(3\omega t + \psi_3) = \\
 &= 20 + 100\sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ) + 50\sqrt{2} \sin(3\omega t - 60^\circ), \text{ В} \\
 R &= 4 \text{ Ом}, L = 20 \text{ мГн}, C = 220 \text{ мкФ}; \text{ частота } f = 50 \text{ Гц}.
 \end{aligned}$$

Найти:

1. Действующие и мгновенные значения гармоник токов ветвей;
2. Действующие и мгновенные значения токов ветвей;
3. Действующее значение ЭДС;
4. Мощности и коэффициент мощности несинусоидальной цепи, а также коэффициент мощности для первой гармоники.

### Решение

1. Действующие и мгновенные значения гармоник токов ветвей находим по методу наложения от каждой гармоники ЭДС в отдельности:

а) при включении цепи на нулевую гармонику ЭДС, т.е. на постоянное напряжение  $E^{(0)} = 20\text{ В}$ :

– входное сопротивление цепи  $R_{\text{вх}}^{(0)} = R_1$ , т.к. на постоянном токе индуктивность второй ветви ведет себя как короткое замыкание, а емкость третьей ветви – как разрыв цепи;

– токи нулевой гармоники

$$I_1^{(0)} = I_2^{(0)} = \frac{E^{(0)}}{R_{\text{вх}}^{(0)}} = \frac{20}{4} = 5\text{ А}; \quad I_3^{(0)} = 0;$$

б) при включении цепи на первую гармонику

$$e^{(1)} = E_m^{(1)} \sin(\omega t + \psi_1) = 100\sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ), \text{ В};$$

– угловая частота  $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}$ ;

– индуктивное и емкостное сопротивления для первой гармоники:

$$X_L^{(1)} = \omega L = 314 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 6,3 \text{ Ом};$$

$$X_C^{(1)} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 220 \cdot 10^{-6}} = 14,5 \text{ Ом};$$

– комплекс действующего значения ЭДС первой гармоники:

$$\dot{E}^{(1)} = \frac{E_m^{(1)}}{\sqrt{2}} e^{j\psi_1} = 100e^{j30^\circ} \text{ В};$$

– комплексы сопротивлений:

$$\text{первой ветви} \quad \underline{Z}_1^{(1)} = R = 4 \text{ Ом},$$

$$\text{второй ветви} \quad \underline{Z}_2^{(1)} = jX_L^{(1)} = j6,3 = 6,3e^{j90^\circ} \text{ Ом},$$

$$\text{третьей ветви} \quad \underline{Z}_3^{(1)} = R - jX_C^{(1)} = 4 - j14,5 = 15,04e^{-j74,6^\circ} \text{ Ом};$$

– комплекс входного сопротивления цепи:

$$\underline{Z}_{\text{вх}}^{(1)} = \underline{Z}_1^{(1)} + \frac{\underline{Z}_2^{(1)} \cdot \underline{Z}_3^{(1)}}{\underline{Z}_2^{(1)} + \underline{Z}_3^{(1)}} = 4 + \frac{6,3e^{j90^\circ} \cdot 15,04e^{-j74,6^\circ}}{j6,3 + 4 - j14,5} = 5,91 + j10,21 = 11,8e^{j60^\circ} \text{ Ом},$$

откуда следует, что активное и реактивное входные сопротивления цепи для первой гармоники соответственно равны:

$$R_{\text{вх}}^{(1)} = 5,91 \text{ Ом}, \quad X_{\text{вх}}^{(1)} = 10,21 \text{ Ом}$$

(по этим значениям удобно будет вычислить активную и реактивную мощности первой гармоники);

– комплексы первых гармоник токов ветвей:

$$\dot{I}_1^{(1)} = \frac{\dot{E}^{(1)}}{\underline{Z}_{\text{вх}}^{(1)}} = \frac{100e^{j30^\circ}}{11,8e^{j60^\circ}} = 8,47e^{-j30^\circ} = 7,34 - j4,24 \text{ А},$$

$$\dot{I}_2^{(1)} = \dot{I}_1^{(1)} \cdot \frac{\underline{Z}_3^{(1)}}{\underline{Z}_2^{(1)} + \underline{Z}_3^{(1)}} = 8,47e^{-j30^\circ} \cdot \frac{15,04e^{-j74,6^\circ}}{j6,3 + 4 - j14,5} = 13,97e^{-j40,6^\circ} = 10,61 - j9,09 \text{ А},$$

$$\dot{I}_3^{(1)} = \dot{I}_1^{(1)} \cdot \frac{\underline{Z}_2^{(1)}}{\underline{Z}_2^{(1)} + \underline{Z}_3^{(1)}} = 8,47e^{-j30^\circ} \cdot \frac{6,3e^{j90^\circ}}{j6,3 + 4 - j14,5} = 5,85e^{j124^\circ} = -3,27 + j4,85 \text{ А};$$

– проверка по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_2^{(1)} + \dot{I}_3^{(1)} = 10,61 - j9,09 - 3,27 + j4,85 = 7,34 - j4,24 = \dot{I}_1^{(1)} \quad \text{– верно};$$

– действующие и мгновенные значения первых гармоник токов ветвей:

$$I_1^{(1)} = 8,47 \text{ А}, \quad i_1^{(1)} = 8,47\sqrt{2} \sin(\omega t - 30^\circ) \text{ А};$$

$$I_2^{(1)} = 13,97 \text{ А}, \quad i_2^{(1)} = 13,97\sqrt{2} \sin(\omega t - 40,6^\circ) \text{ А};$$

$$I_3^{(1)} = 5,85 \text{ А}, \quad i_3^{(1)} = 5,85\sqrt{2} \sin(\omega t + 124^\circ) \text{ А};$$

в) при включении цепи на третью гармонику

$$e^{(3)} = E_m^{(3)} \sin(3\omega t + \psi_3) = 50\sqrt{2} \sin(3\omega t - 60^\circ), \quad B;$$

– индуктивное и емкостное сопротивления для третьей гармоники:

$$X_L^{(3)} = 3\omega L = 3X_L^{(1)} = 3 \cdot 6,3 = 18,9 \text{ Ом},$$

$$X_C^{(3)} = \frac{1}{3\omega C} = \frac{X_C^{(1)}}{3} = \frac{14,5}{3} = 4,8 \text{ Ом};$$

– комплекс действующего значения ЭДС третьей гармоники:

$$\dot{E}^{(3)} = \frac{E_m^{(3)}}{\sqrt{2}} e^{j\psi_3} = 50e^{-j60^\circ} \text{ В};$$

– комплексы сопротивлений:

$$\text{первой ветви} \quad \underline{Z}_1^{(3)} = R = 4 \text{ Ом};$$

второй ветви  $\underline{Z}_2^{(3)} = jX_L^{(3)} = j18,9 = 18,9e^{j90^\circ} \text{ Ом};$

третьей ветви  $\underline{Z}_3^{(3)} = R - jX_C^{(3)} = 4 - j4,8 = 6,25e^{-j50,2^\circ} \text{ Ом};$

– комплекс входного сопротивления цепи:

$$\underline{Z}_{\text{вх}}^{(3)} = \underline{Z}_1^{(3)} + \frac{\underline{Z}_2^{(3)} \cdot \underline{Z}_3^{(3)}}{\underline{Z}_2^{(3)} + \underline{Z}_3^{(3)}} = 4 + \frac{18,9e^{j90^\circ} \cdot 6,25e^{-j50,2^\circ}}{j18,9 + 4 - j4,8} = 10,67 - j4,53 = 11,59e^{-j23^\circ} \text{ Ом},$$

откуда следует, что активное и реактивное входные сопротивления цепи для третьей гармоники соответственно равны:

$$R_{\text{вх}}^{(3)} = 10,67 \text{ Ом}, \quad X_{\text{вх}}^{(3)} = -j4,53 \text{ Ом};$$

– комплексы третьих гармоник токов ветвей:

$$\dot{I}_1^{(3)} = \frac{\dot{E}^{(3)}}{\underline{Z}_{\text{вх}}^{(3)}} = \frac{50e^{-j60^\circ}}{11,59e^{-j23^\circ}} = 4,31e^{-j37^\circ} = 3,44 - j2,59 \text{ А};$$

$$\dot{I}_2^{(3)} = \dot{I}_1^{(3)} \cdot \frac{\underline{Z}_3^{(3)}}{\underline{Z}_2^{(3)} + \underline{Z}_3^{(3)}} = 4,31e^{-j37^\circ} \cdot \frac{6,25e^{-j50,2^\circ}}{j18,9 + 4 - j4,8} = 1,84e^{-j161,4^\circ} = -1,74 - j0,59 \text{ А};$$

$$\dot{I}_3^{(3)} = \dot{I}_1^{(3)} \cdot \frac{\underline{Z}_2^{(3)}}{\underline{Z}_2^{(3)} + \underline{Z}_3^{(3)}} = 4,31e^{-j37^\circ} \cdot \frac{18,9e^{j90^\circ}}{j18,9 + 4 - j4,8} = 5,56e^{-j21,2^\circ} = 5,18 - j2,01 \text{ А};$$

– проверка по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_2^{(3)} + \dot{I}_3^{(3)} = -1,74 - j0,59 + 5,18 - j2,01 = 3,44 - j2,60 \approx 3,44 - j2,59 = \dot{I}_1^{(3)}$$

верно;

– действующие и мгновенные значения третьих гармоник токов ветвей:

$$I_1^{(3)} = 4,31 \text{ А}, \quad i_1^{(3)} = 4,31\sqrt{2} \sin(3\omega t - 37^\circ), \text{ А};$$

$$I_2^{(3)} = 1,84 \text{ А}, \quad i_2^{(3)} = 1,84\sqrt{2} \sin(3\omega t - 161,4^\circ), \text{ А};$$

$$I_3^{(3)} = 5,56 \text{ А}, \quad i_3^{(3)} = 5,56\sqrt{2} \sin(3\omega t - 21,2^\circ), \text{ А};$$

2. Действующие и мгновенные значения токов ветвей:

$$I_1 = \sqrt{(I_1^{(0)})^2 + (I_1^{(1)})^2 + (I_1^{(3)})^2} = \sqrt{5^2 + 8,47^2 + 4,31^2} = 10,74 \text{ А},$$

$$i_1 = I_1^{(0)} + i_1^{(1)} + i_1^{(3)} = 5 + 8,47\sqrt{2} \sin(\omega t - 30^\circ) + 4,31\sqrt{2} \sin(3\omega t - 37^\circ), \text{ А};$$

$$I_2 = \sqrt{(I_2^{(0)})^2 + (I_2^{(1)})^2 + (I_2^{(3)})^2} = \sqrt{5^2 + 13,97^2 + 1,84^2} = 14,95 \text{ А},$$

$$i_2 = I_2^{(0)} + i_2^{(1)} + i_2^{(3)} = 5 + 13,97\sqrt{2} \sin(\omega t - 40,6^\circ) + 1,84\sqrt{2} \sin(3\omega t - 161,4^\circ), \text{ А};$$

$$I_3 = \sqrt{(I_3^{(1)})^2 + (I_3^{(3)})^2} = \sqrt{5,85^2 + 5,56^2} = 8,07 \text{ А},$$

$$i_3 = i_3^{(1)} + i_3^{(3)} = 5,85\sqrt{2} \sin(\omega t + 124^\circ) + 5,56\sqrt{2} \sin(3\omega t - 21,2^\circ), \text{ А};$$

3. Действующее значение ЭДС:

$$E = \sqrt{E_0^2 + \left(\frac{E_m^{(1)}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{E_m^{(3)}}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{20^2 + 100^2 + 50^2} = 113,58 \text{ В};$$

4. Мощности и коэффициент мощности несинусоидальной цепи, коэффициент мощности для первой гармоники:

– активная мощность несинусоидальной цепи равна сумме активных мощностей всех гармоник:

$$P = P_0 + P^{(1)} + P^{(3)} = I_0^2 R + (I_1^{(1)})^2 R_{\text{ex}}^{(1)} + (I_1^{(3)})^2 R_{\text{ex}}^{(3)},$$
$$P = 5^2 \cdot 4 + 8,47^2 \cdot 5,91 + 4,31 \cdot 10,67 = 722,2 \approx 722 \text{ Вт};$$

– реактивная мощность несинусоидальной цепи равна алгебраической сумме реактивных мощностей всех гармоник (кроме, разумеется, нулевой), при этом знак реактивной мощности для каждой гармоники определяется знаком ее реактивного сопротивления:

$$Q = Q^{(1)} + Q^{(3)} = (I_1^{(1)})^2 X_{\text{ex}}^{(1)} + (I_1^{(3)})^2 X_{\text{ex}}^{(3)},$$
$$Q = 8,47^2 \cdot 10,21 + 4,31^2 \cdot (-4,53) = 648,3 \approx 648 \text{ ВАр};$$

– полная мощность источника несинусоидальной ЭДС равна произведению действующих значений ЭДС и входного тока:

$$S = EI_1 = 113,58 \cdot 10,74 = 1219,85 \approx 1220 \text{ ВА},$$

при этом  $S \neq \sqrt{P^2 + Q^2}$  из-за мощности искажения, которая равна нулю только при чисто активной нагрузке;

– мощность искажения

$$T = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} = \sqrt{1219,85^2 - (722,2^2 + 648,3^2)} = 739 \text{ ВА};$$

– коэффициент мощности цепи несинусоидального тока – это коэффициент мощности  $\cos \varphi_{\text{экв}}$  такой синусоидальной цепи, у которой действующие значения напряжения (ЭДС) и тока такие же, как в рассматриваемой несинусоидальной цепи, и в которой выделяется такая же мощность; однако, угол  $\varphi_{\text{экв}}$  – фиктивная величина, поэтому обычно коэффициент мощности несинусоидальной цепи обозначают, например, греческой буквой  $\chi$  (или какой-либо другой буквой), и вычисляют по формуле:

$$\chi = \frac{P}{S}, \quad \chi = \frac{722}{1220} = 0,59;$$

– коэффициент мощности для первой гармоники определяем из треугольника сопротивлений на входе цепи:

$$\cos \varphi^{(1)} = \frac{R_{\text{ex}}^{(1)}}{Z_{\text{ex}}^{(1)}} = \frac{5,91}{11,80} = 0,50.$$

Таким образом, за счет компенсации реактивной мощности на высших гармониках коэффициент мощности цепи несинусоидального тока оказался выше коэффициента мощности для первой гармоники.

### Пример решения задачи 2

Дано:

$$E = 18 \text{ В}; R = 1 \text{ Ом}; L = 101 \text{ мГн}.$$

Найти закон изменения во времени тока и напряжения на индуктивности после замыкания ключа  $K$ .

Определить продолжительность переходного процесса.

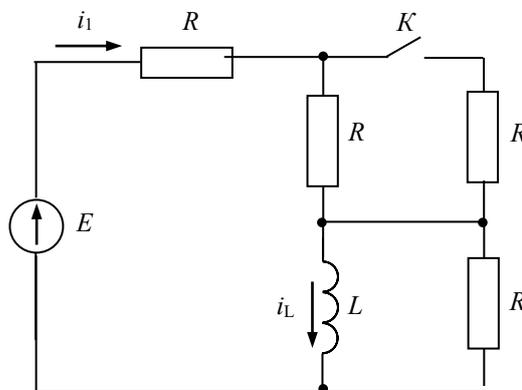


Рис. 3.3. Схема до коммутации.

### Решение

1. Найдем ток в индуктивности до коммутации по закону Ома в заданной схеме (рис. 3.3):

$$i_L(0-) = i_1(0-) = \frac{E}{2R}. \quad (3.1)$$

2. По I закону коммутации записываем основное начальное условие:

$$i_L(0) = i_L(0-) = \frac{E}{2R}. \quad (3.2)$$

3. Для тока в индуктивности решение ищем в виде:

$$i_L = i_{L,np} + i_{L,св}, \quad (3.3)$$

где  $i_{L,np}$  – принужденная составляющая переходного тока;

$i_{L,св}$  – свободная составляющая переходного тока.

Так как после окончания переходного процесса новый установившийся режим будет режимом цепи постоянного тока, для которого индуктивное сопротивление равно нулю, то сопротивление  $R$  в послекоммутационной схеме (рис. 3.4) будет закорочено, и по закону Ома

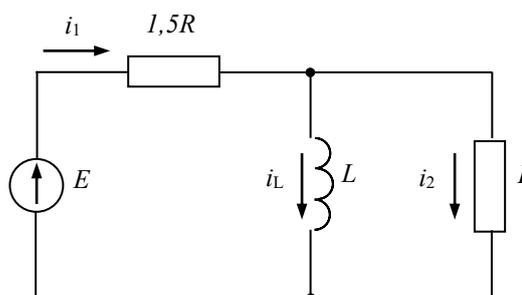


Рис. 3.4. Схема после коммутации

$$i_{L,np} = \frac{E}{1,5R} = \frac{2E}{3R}. \quad (3.4)$$

Свободная составляющая переходного тока от источника не зависит, а зависит только от схемы соединения и параметров электрической цепи:

$$i_{L,св} = Ae^{p_1 t}, \quad (3.5)$$

где  $A$  – постоянная интегрирования;

$p_1$  – корень характеристического уравнения.

Для получения характеристического уравнения записываем входное сопротивление послекоммутационной схемы (рис. 3.4) в комплексной форме, а затем заменяем  $j\omega$  на  $p$ :

$$\underline{Z}_{ex}(j\omega) = \frac{3R}{2} + \frac{j\omega L \cdot R}{j\omega L + R}, \Rightarrow \underline{Z}_{ex}(p) = \frac{3R}{2} + \frac{pL \cdot R}{pL + R}.$$

Приведя правую часть последнего уравнения к общему знаменателю и приравняв числитель нулю, получим характеристическое уравнение:

$$5pL + 3R = 0, \quad (3.6)$$

корень которого 
$$p_1 = -\frac{3R}{5L}. \quad (3.7)$$

Подставив значения из (4.4), (4.5), (4.7) в уравнение (3.3), получим:

$$i_L = \frac{2E}{3R} + Ae^{-\frac{3R}{5L}t}. \quad (3.8)$$

Для определения постоянной интегрирования  $A$  запишем последнее уравнение при  $t=0$  с подстановкой основного начального условия из формулы (3.2):

$$i_L(0) = i_L(0-) = \frac{E}{2R},$$

т.е. при  $t=0$  уравнение (3.8) принимает вид (3.8\*):

$$\frac{E}{2R} = \frac{2E}{3R} + A, \quad (3.8^*)$$

откуда  $A = -\frac{E}{6R}$ . Подставляя это значение  $A$  в (3.8), получим:

$$i_L = \frac{2E}{3R} - \frac{E}{6R} e^{-\frac{3R}{5L}t},$$

или:

$$i_L = \frac{E}{3R} \left( 2 - \frac{1}{2} e^{-\frac{3R}{5L}t} \right). \quad (3.9)$$

Правильность решения проверяем, записав уравнение (3.9) при  $t=0$  и при  $t \rightarrow \infty$ :

$$i_L(0) = \frac{E}{3R} \left( 2 - \frac{1}{2} \right) = \frac{E}{2R}, \text{ что совпадает с ОНУ;}$$

$$i_L(\infty) = \frac{2E}{3R}, \text{ что совпадает с принужденным значением тока.}$$

Следовательно, решение найдено верно.

4. Находим закон изменения напряжения на индуктивности

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = \frac{E}{10} e^{-\frac{3R}{5L}t}. \quad (3.10)$$

5. Записываем формулы (3.7), (3.9) и (3.10) в числовом выражении:

$$p_1 = -\frac{3 \cdot 1}{5 \cdot 101 \cdot 10^{-3}} = -5,94 c^{-1} \approx -6 c^{-1};$$

$$i_L = \frac{18}{6 \cdot 1} (4 - e^{-6t}) = 3(4 - e^{-6t}) A;$$

$$u_L = \frac{18}{10} e^{-6t} = 1,8 e^{-6t} B.$$

6. Продолжительность  $t_{III}$  переходного процесса для цепи с одним накопителем энергии (индуктивностью или емкостью) приближенно определяется по формуле:

$$t_{III} \approx (3 \div 4) \tau, \quad (3.11)$$

где  $\tau = \frac{1}{|p_1|}$  – постоянная времени, с.

Приняв  $t_{III} = 3 \tau$ , вычислим:

$$t_{III} = \frac{3}{|-6|} = 0,5 \text{ с} .$$

Таким образом, через время, равное 0,5 с, переходный процесс практически закончится.

### Содержание

Раздел 1. Общие методические указания по изучению дисциплины.....	3
Раздел 2. Содержание учебных модулей дисциплины и методические указания по их изучению.....	5
Раздел 3. Задания для контрольной работы и методические указания по ее выполнению.....	10