

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

### **сборник учебно-методических материалов**

для направления подготовки 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и про-  
изводств

Благовещенск, 2017

Печатается по решению  
Редакционно-издательского совета  
Энергетического факультета  
Амурского государственного университета

*Составитель: Русинов В.Л.*

Электротехника и электроника: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017.

©Амурский государственный университет, 2017  
©Кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники, 2017  
©Русинов В.Л, составитель

## Содержание

### Введение

1. Краткое содержание теоретического материала
2. Методические рекомендации к практическим занятиям
3. Методические рекомендации для самостоятельной работы
4. Библиографический список

## ВВЕДЕНИЕ

Целью изучения дисциплины «Электротехника и электроника» является формирование у студентов системы взглядов на теорию электромагнитных процессов, а также создание основы электротехнического образования и базы для восприятия и изучения совокупности средств, способов и методов человеческой деятельности, направленных на исследование, разработку и применение электротехнических и электронных устройств, технических систем и технологий сбора, обработки, хранения и передачи информации.

Задачами изучения дисциплины являются:

- активизация самостоятельной познавательной деятельности студентов с использованием разнообразных источников информации;
- усвоение основных законов линейных и нелинейных электрических цепей и методов расчета их;
- усвоение элементной базы основных электронных устройств, а также принципа их действия, используемых при создании электронно-вычислительных и автоматизированных систем;
- формирование у студентов научного мышления, правильного понимания границ используемых методов анализа электротехнических и электронных устройств и методов оценки степени достоверности результатов, полученных с помощью экспериментальных и математических методов исследования.

В результате освоения дисциплины «Электротехника и электроника» студент должен продемонстрировать следующие результаты образования:

1) Знать: физическую сторону электромагнитных явлений в электрических цепях и в электронных устройствах; основные законы электрических цепей; методы анализа электрических цепей и простейших электронных устройств с различными видами сигналов; основные направления развития современной электроники.

2) Уметь: проводить расчеты простых и сложных электрических цепей в установившихся и в неустановившихся (переходных) режимах работы; экспериментально определять параметры и характеристики типовых электротехнических, электронных элементов и устройств; критически анализировать полученные экспериментально результаты, сравнивая их с результатами теоретических расчетов; описывать и объяснять представление сигналов в различных областях и пространствах и их преобразования при прохождении через простейшие электрические цепи; использовать правила безопасности при работе на электрических установках.

3) Владеть: навыками создания физических моделей электротехнических и электронных устройств и их экспериментального исследования; навыками составления структурных топологических (схем замещения) для электрических и магнитных цепей электромагнитных систем, а также электронных устройств; навыками обработки результатов эксперимента; навыками работы с вычислительной техникой для решения рассматриваемого круга задач.

В процессе освоения данной дисциплины студент формирует и демонстрирует следующие компетенции: ОПК-3 способностью использовать современные информационные технологии, технику, прикладные программные средства при решении задач профессиональной деятельности; ПК-7 способностью участвовать в разработке проектов по автоматизации производственных и технологических процессов, технических средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний.

# 1. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

## **Введение. Электрические цепи постоянного тока**

### **Электрические цепи**

Электротехника - это область науки и техники, изучающая электрические и магнитные явления и их использование в практических целях получения, преобразования, передачи и потребления электрической энергии.

Электрическая цепь - это совокупность устройств, предназначенных для производства, передачи, преобразования и использования электрического тока.

Все электротехнические устройства по назначению, принципу действия и конструктивному оформлению можно разделить на три большие группы.

Источники энергии, т.е. устройства, вырабатывающие электрический ток (генераторы, термоэлементы, фотоэлементы, химические элементы).

Электродвижущая сила - электрическая разность потенциалов, создаваемая источником электрической энергии (электрохимическим элементом, механическим генератором, термоэлементом, фотоэлементом и пр.).

Приемники, или нагрузка, т.е. устройства, потребляющие электрический ток (электродвигатели, электролампы, электрические механизмы и т.д.).

Проводники, а также различная коммутационная аппаратура (выключатели, реле, контакторы и т.д.).

Направленное движение электрических зарядов называют электрическим током. Электрический ток может возникать в замкнутой электрической цепи. Электрический ток, направление и величина которого неизменны, называют постоянным током и обозначают прописной буквой  $I$ .

Электрический ток, величина и направление которого не остаются постоянными, называется переменным током. Значение переменного тока в рассматриваемый момент времени называют мгновенным и обозначают строчной буквой  $i$ .

Для работы электрической цепи необходимо наличие источников энергии. В любом источнике за счет сторонних сил неэлектрического происхождения создается электродвижущая сила. На зажимах источника возникает разность потенциалов или напряжение, под воздействием которого во внешней, присоединенной к источнику части цепи, возникает электрический ток. Различают активные и пассивные цепи, участки и элементы цепей. Активными называют электрические цепи, содержащие источники энергии, пассивными - электрические цепи, не содержащие источников энергии.

Линейная электрическая цепь - это такая цепь, в которой ни один параметр цепи не зависит от величины или направления тока, или напряжения.

Нелинейная электрическая цепь - это такая электрическая цепь, которая содержит хотя бы один нелинейный элемент. Параметры нелинейных элементов зависят от величины или направления тока, или напряжения.

Электрическая схема - это графическое изображение электрической цепи, включающее в себя условные обозначения устройств и показывающее соединение этих устройств.

Для облегчения анализа электрическую цепь заменяют схемой замещения.

Схема замещения - это графическое изображение электрической цепи с помощью идеальных элементов, параметрами которых являются параметры замещаемых элементов.

### **Линейные электрические цепи постоянного тока**

Источники электрической энергии относятся к группе активных элементов электротехнических устройств. Если  $R_0 = 0$  и электродвижущая сила (ЭДС)  $E = const$ , то источник называется идеальным. Внутреннее сопротивление источника тока  $R_{вн}$  во много раз больше сопротивления нагрузки. Аккумуляторная батарея по своим параметрам близка к идеальному источнику ЭДС. К группе пассивных элементов относятся: активное сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$ , и емкость  $C$ .

В электротехнических устройствах одновременно протекают три энергетических процесса: в активном сопротивлении в соответствии с законом Джоуля - Ленца происходит преобразование электрической энергии в тепло:  $p = u \cdot i = i^2 R = u^2 g$ . Здесь  $p$ ,  $i$ ,  $u$  - мгновенные значения активной мощности, тока и напряжения в цепи,  $R$ ,  $g$  - активное сопротивление и проводимость.

Мощность на активном сопротивлении всегда положительна.

1. Термин «сопротивление» применяется для условного обозначения элемента электрической цепи и для количественной оценки величины  $R$ . Сопротивление измеряется в Омах (Ом). Величина, обратная сопротивлению  $g$ , называется проводимостью и измеряется в Сименсах (См).

Величина  $R$  любого приемника, не остается постоянной при протекании по нему тока, а зависит от температуры окружающей среды, однако для практических расчетов величину  $R$  можно принимать постоянной. В этом случае зависимость напряжения на сопротивлении  $R$  от силы тока в нем (вольтамперная характеристика) будет линейной. Электрические цепи, в которые включены постоянные сопротивления, называют линейными.

2. Индуктивный элемент - это элемент, в котором электромагнитная энергия преобразуется в энергию магнитного поля.

3. Потокосцепление самоиндукции катушки это произведение магнитного потока, пронизывающего виток на число витков катушки. В СИ потокосцепление измеряется в веберах, индуктивность в генри. Зависимость потокосцепления от тока может быть линейной ( $L_K$  зависит от тока).

4. Мощность на индуктивности может быть как положительной, так и отрицательной.

5. Конденсатор. Накопление энергии в электрическом поле конденсатора  $q = C \cdot u$ , где  $q$  - заряд;  $u$  - напряжение;  $C$  - емкость конденсатора. Заряд измеряется в кулонах, емкость в фарадах.

Сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$  и емкость  $C$  зависят от свойств самого элемента электрической цепи и свойства окружающей среды.

Соединения элементов  $R$ ,  $L$ ,  $C$  и источников электромагнитной энергии, образующие замкнутые пути для электрического тока называют электрической цепью, а их графическое представление - схемой электрической цепи.

В электрической цепи принято различать ветви, узлы и контуры. Участок электрической цепи, по которому проходит один ток называется ветвью. Замкнутый путь, образованный одной или несколькими ветвями, называется контуром, а любая замкнутая поверхность, охватывающая ветви электрической цепи называется узлом. На схеме узел изображается точкой.

Электрические цепи классифицируют: по роду тока (постоянный, переменный); по характеру элементов (линейные и нелинейные); по сложности (простые, сложные). Схемы электрических цепей бывают: монтажные, принципиальные, замещения и др.

*Законы электрических цепей*

1. Закон Ома:  $U = IR$  или  $I = U/R$ . Определяет связь между током и напряжением на участке цепи с сопротивлением  $R$ .

2. Первый закон Кирхгофа - закон баланс токов в узле. Алгебраическая сумма токов  $i_k$  в узле электрической цепи равна нулю.

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

Токи выходящие из узла считаются положительными, а входящие в узел - отрицательными.

3. Второй закон Кирхгофа - в любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжения.

$$\sum_{i=1}^n E_i = \sum_{k=1}^k i_k R_k$$

#### 4. Закон Джоуля-

Лен-

ца. Энергия, выделяемая на сопротивление  $R$  при протекании по нему тока  $i$ , пропорциональна времени  $t$  и произведению квадрата силы тока на величину сопротивления:  $W = i^2 R t$ .

##### *Режимы работы электрических цепей*

Электрические цепи и их элементы могут работать в различных режимах, наиболее характерными из которых являются номинальный, согласованный, холостого хода (х.х.) и короткого замыкания (к.з.).

Номинальным режимом работы элемента электрической цепи называют режим, при котором она работает с номинальными параметрами, указанными в его паспортных данных.

Согласованным называют режим, при котором мощность, отдаваемая источником или потребляемая приемником, имеет максимальное значение. Такое значение получается при определенном соотношении (согласовании) параметров электрической цепи.

Под режимом х.х. понимается режим, при котором источник или приемник находятся под номинальным напряжением, но ток нагрузки не протекает. Для двигателя это будет режим без механической нагрузки на валу.

Режимом к.з. называют режим, возникающий при соединении между собой металлической перемычкой нагрузочных зажимов источника или приемника.

В практической деятельности в основном применяются два рода тока – постоянный и переменный. Под постоянным понимают электрический ток, не меняющий своего направления.

##### *Электрические цепи постоянного тока*

Постоянный ток используется в процессе электролиза (гальванопластика – получение легкоотделяющихся точных металлических копий, гальваностегия – нанесение металлических покрытий из одних металлов на изделия из других металлов), на электротранспорте (электropоезда, трамваи, троллейбусы, локомотивы), в осветительных приборах, в устройствах автоматизации и вычислительной техники.

Следовательно, в установленном режиме, в цепи постоянного тока остаются только источники ЭДС (активные элементы) и приемники – резисторы (пассивные элементы).

Простыми цепями постоянного тока называются цепи с одним источником ЭДС. Простые цепи могут содержать последовательное, параллельное и смешанное соединения приемников.

При параллельном соединении приемников напряжения на всех приемниках одинаково.

Смешанное соединение – комбинация первых двух соединений.

Сложной электрической цепью называется цепь, содержащая несколько источников ЭДС.

Расчет таких цепей ведется на основании уравнений составленных по первому и второму законам Кирхгофа.

#### **Электрические цепи однофазного тока**

##### *Электрические цепи переменного тока*

Переменный-

ток, по сравнению с током постоянным получил гораздо большее распространение, как в промышленности, так и в быту. Это объясняется рядом причин:

- упрощается конструкция электродвигателей;
- асинхронные генераторы могут быть выполнены на значительно большей мощности и более высокие напряжения, чем генераторы постоянного тока;
- переменный ток позволяет легко изменять величину напряжения с помощью трансформаторов, что необходимо при передаче электроэнергии на большие расстояния.

Переменным называется ток, периодически меняющийся по величине и направлению и характеризующийся амплитудой, периодом, частотой и фазой.

Свободные процессы исследуются целью определения устойчивости системы. В устойчивой системе процессы должны затухать. Принужденный и свободный режимы в сумме определяют процессы, которые называются переходными, т.е. осуществляется переход от одного установившегося режима к другому. При установившемся режиме ток и напряжение сохраняют в течение длительного времени амплитудные значения. В цепях постоянного тока ток и напряжение остаются неизменными, а в цепях переменного тока остаются неизменными кривые изменения тока и напряжений.

В электрических цепях переменного тока наиболее часто используют синусоидальную форму, характеризующуюся тем, что все токи и напряжения являются синусоидальными функциями времени. В генераторах переменного тока получают ЭДС, изменяющуюся во времени по закону синуса, и тем самым обеспечивают наиболее выгодный эксплуатационный режим работы электрических установок. Кроме того, синусоидальная форма тока и напряжения позволяет производить точный расчет электрических цепей с использованием метода комплексных чисел и приближенный расчет на основе метода векторных диаграмм. При этом для расчета используются законы Ома и Кирхгофа, но записанные в векторной или комплексной форме.

В современной технике широко используют разнообразные по форме переменные токи и напряжения: синусоидальные, прямоугольные, треугольные и др. Значение тока, напряжения, ЭДС в любой момент времени  $t$  называется мгновенным значением и обозначается малыми строчными буквами, соответственно

$$i = i(t); u = u(t); e = e(t)$$

Токи, напряжения и ЭДС, мгновенные значения которых повторяются через равные промежутки времени, называют периодическими, а наименьший промежуток времени, через который эти повторения происходят, называют периодом  $T$ .

Если кривая изменения периодического тока описывается синусоидой, то ток называют синусоидальным. Если кривая отличается от синусоиды, то ток несинусоидальный.

В промышленных масштабах электрическая энергия производится, передается и расходуется потребителями в виде синусоидальных токов, напряжений и ЭДС,

При расчете и анализе электрических цепей применяют несколько способов представления синусоидальных электрических величин.

#### *Аналитический способ*

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

для напряжения  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$

для ЭДС  $e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi_e),$

$I_m, U_m, E_m$  – амплитуды тока, напряжения, ЭДС;

значение в скобках – фаза (полная фаза);

$\psi_i, \psi_u, \psi_e$  – начальная фаза тока, напряжения, ЭДС;

$\omega$  – циклическая частота,  $\omega = 2\pi f$ ;

$f$  – частота,  $f = 1/T$ ;  $T$  – период.

#### *Временная диаграмма*

Временная диаграмма представляет графическое изображение синусоидальной величины в заданном масштабе в зависимости от времени.

#### *Графоаналитический способ*

Графически синусоидальные величины изображаются в виде вращающегося вектора. Предполагается вращение против часовой стрелки с частотой вращения  $\omega$ . Величина вектора в заданном масштабе представляет амплитудное значение. Проекция на вертикальную ось есть мгновенное значение величины.

Совокупность векторов, изображающих синусоидальные величины (ток, напряжение, ЭДС) одной и той же частоты называют векторной диаграммой.

Векторные величины отмечаются точкой над соответствующими переменными.

Использование векторных диаграмм позволяет существенно упростить анализ цепей переменного тока, сделать его простым и наглядным.

В основе графоаналитического способа анализа цепей переменного тока лежит построение векторных диаграмм.

*Аналитический метод с использованием комплексных чисел*

Синусоидальный ток  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi)$  можно представить комплексным числом  $\dot{I}_m$  на комплексной плоскости

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi},$$

где амплитуда тока  $I_m$  – модуль, а угол  $\psi$ , являющийся начальной фазой.

Использование комплексной формы представления позволяет заменить геометрические операции над векторами алгебраическими операциями над комплексными числами. В результате этого к анализу цепей переменного тока могут быть применены все методы анализа цепей постоянного тока.

Для сравнения действий постоянного и переменного токов вводят понятие действующее значение переменного тока.

Действующее значение переменного тока численно равно такому постоянному току, при котором за время равное одному периоду в проводнике с сопротивлением  $R$  выделяется такое же количество тепловой энергии, как и при переменном токе.

*Индуктивность*

Вокруг всякого проводника с током образуется магнитное поле, которое характеризуется вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  и магнитным потоком  $\Phi$ :

$$\Phi = \int_S \vec{B} \times d\vec{S}$$

Если поле образуют несколько ( $w$ ) проводников с одинаковым током, то используют понятие потокосцепления  $\psi$

$$\psi = w \Phi.$$

Отношение потокосцепления к току, который его создает называют индуктивностью катушки

$$L = \psi / i.$$

При изменении во времени потокосцепления согласно закону Фарадея возникает ЭДС самоиндукции

$$e_L = - d\psi / dt.$$

Эта ЭДС всегда препятствует изменению тока (закон Ленца). Поэтому, чтобы через проводники все время тек ток, необходимо к проводникам прикладывать компенсирующее напряжение

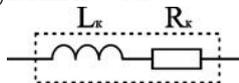
$$u_L = -e_L.$$

Условное обозначение индуктивности



Катушка с проводом кроме свойства создавать магнитное поле обладает активным сопротивлением  $R$ .

Условное обозначение реальной индуктивности.



Единицей измерения индуктивности является Генри (Гн). Часто используют дробные единицы

$$1 \text{ мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн}; 1 \text{ нГн} = 10^{-9} \text{ Гн}.$$

*Емкость*

Все проводники с электрическим зарядом создают электрическое поле. Характеристикой этого поля является разность потенциалов (напряжение). Электрическую емкость определяют отношением заряда проводника к напряжению

$$C = Q / U_C.$$

С учетом соотношения

$$i = dQ / dt$$

получаем формулу связи тока с напряжением

$$i = C \cdot du_C / dt.$$

Для удобства ее интегрируют и получают

$$u_C = 1 / C \cdot \int i dt.$$

Это соотношение является аналогом закона Ома для емкости.

Конструктивно емкость выполняется в виде двух проводников разделенных слоем диэлектрика. Форма проводников может быть плоской, трубчатой, шарообразной и др.

Единицей измерения емкости является фарада:

$$1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ В} = 1 \text{ Кулон} / 1 \text{ Вольт}.$$

Условным обозначением емкости является символ



*Сопротивления в цепи переменного тока*

В цепях переменного тока выделяют следующие виды сопротивлений.

**Активное.** Активным называют сопротивление резистора. Условное обозначение



Единицей измерения сопротивления является Ом. Сопротивление резистора не зависит от частоты.

**Реактивное.** В разделе реактивные выделяют три вида сопротивлений: индуктивное  $X_L$  и емкостное  $X_C$  и собственно реактивное. Для индуктивного сопротивления выше была получена формула  $X_L = \omega L$ . Единицей измерения индуктивного сопротивления также является Ом. Величина  $X_L$  линейно зависит от частоты.

Для емкостного сопротивления выше была получена формула  $X_C = 1 / \omega C$ . Единицей измерения емкостного сопротивления является Ом. Величина  $X_C$  зависит от частоты по обратно-пропорциональному закону. Просто реактивным сопротивлением цепи называют величину  $X = X_L - X_C$ .

**Полное сопротивление.** Полным сопротивлением цепи называют величину

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Из этого соотношения следует, что сопротивления  $Z$ ,  $R$  и  $X$  образуют треугольник:  $Z$  – гипотенуза,  $R$  и  $X$  – катеты. Для удобства в этом треугольнике рассматривают угол  $\varphi$ , который определяют уравнением

$$\varphi = \arctg((X_L - X_C) / R),$$

и называют углом сдвига фаз. С учетом него можно дать дополнительные связи

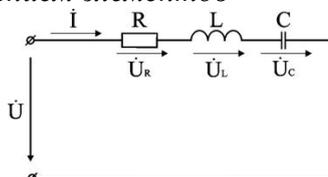
$$R = Z \cos \varphi,$$

$$X = Z \sin \varphi.$$

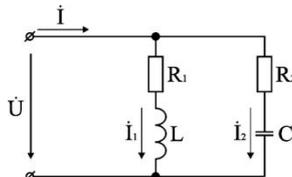
*Мощности в цепях переменного тока*

По аналогии с мощностью в цепях постоянного тока  $P = U I$ , в цепях переменного тока рассматривают мгновенную мощность  $p = u i$ .

*Цепь с последовательным соединением элементов*



*Цепь с параллельным соединением элементов*



*Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме*

Достоинство комплексного метода: при его применении в анализе цепей переменного тока можно применять все известные методы анализа постоянного тока.

### Закон Ома

Под законом Ома в комплексной форме понимают:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{U} / Z \\ \begin{cases} \dot{I} = I e^{j\varphi} \\ \dot{U} = U e^{j\varphi} \end{cases} &\Rightarrow Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I} e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = z e^{\pm j\varphi} = z \cos\varphi \pm jz \sin\varphi = r \pm jx. \end{aligned}$$

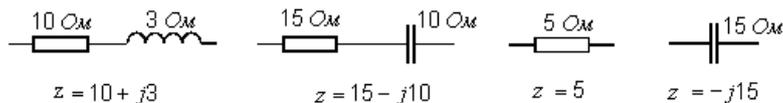
Комплексное сопротивление участка цепи представляет собой комплексное число, вещественная часть которого соответствует величине активного сопротивления, а коэффициент при мнимой части – реактивному сопротивлению.

По виду записи комплексного сопротивления можно судить о характере участка цепи:

$R + jX$  — активно-индуктивное сопротивление;

$R - jX$  — активно-емкостное.

Примеры.



### Первый закон Кирхгофа в комплексной форме

Алгебраическая сумма комплексных действующих значений токов в узле равна нулю.

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0.$$

### Второй закон Кирхгофа в комплексной форме

В замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма комплексных действующих значений ЭДС равна алгебраической сумме комплексных падений напряжений в нём.

$$\sum_{k=1}^n \dot{E}_k = \sum_{k=1}^n \dot{I}_k z_k.$$

При использовании символического метода можно пользоваться понятиями мощностей. Но в комплексной форме можно записать только полную мощность:

$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot \dot{I} = U \cdot I \cdot e^{j(\varphi_u + \varphi_i)} = U \cdot I \cdot e^{\pm j\varphi} = S \cdot e^{\pm j\varphi},$$

где  $\dot{I}$  — комплексно-сопряженный ток

$$S \cos\varphi \pm j S \sin\varphi = P \pm j Q.$$

Полная мощность в комплексной форме представляет собой комплексное число, вещественная часть которого соответствует активной мощности рассматриваемого участка, а коэффициент при мнимой части – реактивной мощности участка. Значение знака перед мнимой частью: “+” означает, что напряжение опережает ток, нагрузка – активно-индуктивная; “-” означает, что нагрузка – активно-емкостная.

## Электрические цепи трехфазного тока

Трехфазная цепь является частным случаем многофазных систем электрических цепей, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, отличающиеся по фазе одна от другой и создаваемые общим источником энергии.

Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, принято называть фазой. Таким образом, понятие «фаза» имеет в электротехнике два значения: первое – аргумент синусоидально изменяющейся величины, второе – часть многофазной системы электрических цепей. Цепи в зависимости от количества фаз называют двухфазными, трехфазными, шестифазными и т.п.

Трехфазные цепи – наиболее распространенные в современной электроэнергетике. Это объясняется рядом их преимуществ по сравнению как с однофазными, так и с другими многофазными цепями:

- экономичность производства и передачи энергии по сравнению с однофазными цепями;
- возможность сравнительно простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для трехфазного асинхронного двигателя;

• возможность получения в одной установке двух эксплуатационных напряжений – фазного и линейного.

Трехфазная цепь состоит из трех основных элементов: трехфазного генератора, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую с трехфазной системой ЭДС; линии передачи со всем необходимым оборудованием; приемников (потребителей), которые могут быть как трехфазными (например, трехфазные асинхронные двигатели), так и однофазными (например, лампы накаливания).

Трехфазный генератор представляет собой синхронную машину двух типов: турбогенератор и гидрогенератор.

За условное положительное направление ЭДС в каждой фазе принимают направление от конца к началу. Обычно индуцированные в обмотках статора ЭДС имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе относительно друг друга на один и тот же угол  $120^\circ$ . Такая система ЭДС называется симметричной.

Трехфазная симметричная система ЭДС может изображаться графиками, тригонометрическими функциями, векторами и функциями комплексного переменного.

Комплексные действующие ЭДС будут иметь выражения:

$$\begin{aligned}\dot{E}_A &= E_m e^{j0^\circ} = E_m (1 + j0), \\ \dot{E}_B &= E_m e^{-j120^\circ} = E_m (-1/2 - j\sqrt{3}/2), \\ \dot{E}_C &= E_m e^{+j120^\circ} = E_m (-1/2 + j\sqrt{3}/2).\end{aligned}$$

Для симметричной трехфазной системы геометрическая сумма векторов ЭДС всех фаз равна нулю:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Систему ЭДС, в которой ЭДС фазы  $B$  отстает по фазе от ЭДС фазы  $A$ , а ЭДС фазы  $C$  по фазе – от ЭДС фазы  $B$ , называют системой прямой последовательности. Если изменить направление вращения ротора генератора, то последовательность фаз изменится и будет называться обратной.

Последовательность фаз определяет направление вращения трехфазных двигателей. Для определения последовательности фаз имеются специальные приборы – фазоуказатели.

Более совершенными и экономичными являются связанные цепи, в которых фазы обмотки электрически соединены между собой. Существуют различные способы соединения фаз трехфазных источников питания и трехфазных потребителей электроэнергии. Наиболее распространенными являются соединения «звезда» и «треугольник». При этом способ соединения фаз источников и фаз потребителей в трехфазных системах могут быть различными. Фазы источника обычно соединены «звездой», фазы потребителей соединяются либо «звездой», либо «треугольником».

В трехфазных цепях различают фазные и линейные напряжения. Фазное напряжение  $U_\phi$  – напряжение между началом и концом фазы или между линейным проводом и нейтралью ( $U_A, U_B, U_C$  у источника;  $U_a, U_b, U_c$  у приемника). Если сопротивлением проводов можно пренебречь, то фазное напряжение в приемнике считают таким же, как и в источнике. ( $U_A = U_a, U_B = U_b, U_C = U_c$ ). За условно положительные направления фазных напряжений принимают направления от начала к концу фаз.

Линейное напряжение ( $U_L$ ) – напряжение между линейными проводами или между одноименными выводами разных фаз ( $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ ). Условно положительные направления линейных напряжений приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам соответствующим второму индексу (рис. 3.6).

По аналогии с фазными и линейными напряжениями различают также фазные и линейные токи:

- Фазные ( $I_\phi$ ) – это токи в фазах генератора и приемников.
- Линейные ( $I_L$ ) – токи в линейных проводах.

*Классификация приемников в трехфазной цепи*

Приемники, включаемые в трехфазную цепь, могут быть либо однофазными, либо трехфазными. К однофазным приемникам относятся электрические лампы накаливания и другие освети-

тельные приборы, различные бытовые приборы, однофазные двигатели и т.д. К трехфазным приемникам относятся трехфазные асинхронные двигатели и индукционные печи. Обычно комплексные сопротивления фаз трехфазных приемников равны между собой:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Z e^{j\varphi}.$$

Такие приемники называют симметричными. Если это условие не выполняется, то приемники называют несимметричными. При этом, если  $Z_a = Z_b = Z_c$ , то трехфазный приемник называют равномерным, если  $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$ , то однородным.

#### *Четырехпроводная цепь*

Для расчета трехфазной цепи применимы все методы, используемые для расчета линейных цепей. Обычно сопротивления проводов и внутреннее сопротивление генератора меньше сопротивлений приемников, поэтому для упрощения расчетов таких цепей (если не требуется большая точность) сопротивления проводов можно не учитывать ( $Z_L = 0$ ,  $Z_N = 0$ ). Тогда фазные напряжения приемника  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$  будут равны соответственно фазным напряжениям источника электрической энергии (генератора или вторичной обмотки трансформатора), т.е.  $U_a = U_A$ ;  $U_b = U_B$ ;  $U_c = U_C$ . Если полные комплексные сопротивления фаз приемника равны  $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$ , то токи в каждой фазе можно определить по формулам

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a; \dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b; \dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c.$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа ток в нейтральном проводе

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

#### *Симметричная нагрузка приемника*

При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке, когда  $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$ , т.е. когда  $R_a = R_b = R_c = R_\phi$  и  $X_a = X_b = X_c = X_\phi$ , фазные токи равны по значению и углы сдвига фаз одинаковы

$$I_a = I_b = I_c = I_\phi = U_\phi / Z_\phi, \\ \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi = \arctg(X_\phi / R_\phi).$$

Построив векторную диаграмму токов для симметричного приемника, легко установить, что геометрическая сумма трех векторов тока равна нулю:  $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$ . Следовательно, в случае симметричной нагрузки ток в нейтральном проводе  $I_N = 0$ , поэтому необходимость в нейтральном проводе отпадает.

#### *Несимметричная нагрузка приемника*

При симметричной системе напряжений и несимметричной нагрузке, когда  $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$  и  $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$  токи в фазах потребителя различны и определяются по закону Ома

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a; \dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b; \dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c.$$

Ток в нейтральном проводе  $\dot{I}_N$  равен геометрической сумме фазных токов

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$$

Напряжения будут  $U_a = U_A$ ;  $U_b = U_B$ ;  $U_c = U_C$ ,  $U_\phi = U_L / \sqrt{3}$ , благодаря нейтральному проводу при  $Z_N = 0$ .

Следовательно, нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке.

Поэтому в четырехпроводную сеть включают однофазные несимметричные нагрузки, например, электрические лампы накаливания. Режим работы каждой фазы нагрузки, находящейся под неизменным фазным напряжением генератора, не будет зависеть от режима работы других фаз.

При расчете трехфазных цепей исходят из предположения, что генератор дает симметричную систему напряжений. На практике несимметрия нагрузки практически не влияет на систему напряжений генератора в том случае, если мощность нагрузки мала по сравнению с мощностью генератора или сети электроснабжения.

Схема соединения обмоток трехфазного генератора не предопределяет схему соединения нагрузки. Так, при соединении фаз генератора в звезду нагрузка может быть соединена в звезду с нейтральным проводом, в звезду без нейтрального провода или, наконец, в треугольник.

### *Измерение активной мощности в трехфазных цепях*

Измерение активной мощности в трехфазных цепях производят с помощью трех, двух или одного ваттметров, используя различные схемы их включения. Схема включения ваттметров для измерения активной мощности определяется схемой сети (трех- или четырехпроводная), схемой соединения фаз приемника (звезда или треугольник), характером нагрузки (симметричная или несимметричная), доступностью нейтральной точки.

При несимметричной нагрузке в четырехпроводной цепи активную мощность измеряют тремя ваттметрами, каждый из которых измеряет мощность одной фазы – фазную мощность.

Активная мощность приемника определяют по сумме показаний трех ваттметров

$$P = P_1 + P_2 + P_3,$$

где  $P_1 = U_A I_A \cos\varphi_A$ ;  $P_2 = U_B I_B \cos\varphi_B$ ;  $P_3 = U_C I_C \cos\varphi_C$ .

Измерение мощности тремя ваттметрами возможно при любых условиях.

### *Измерение активной мощности двумя ваттметрами*

В трехпроводных трехфазных цепях при симметричной и несимметричной нагрузках и любом способе соединения приемников широко распространена схема измерения активной мощности приемника двумя ваттметрами. Показания двух ваттметров при определенной схеме их включения позволяют определить активную мощность трехфазного приемника, включенного в цепь с симметричным напряжением источника питания.

Для измерения активной мощности в трехфазных цепях промышленных установок широкое применение находят двухэлементные трехфазные электродинамические и ферродинамические ваттметры, которые содержат в одном корпусе два измерительных механизма и общую подвижную часть. Катушки обоих механизмов соединены между собой по схемам, соответствующим рассмотренному методу двух ваттметров. Показание двухэлементного ваттметра равно активной мощности трехфазного приемника.

### *Вращающееся магнитное поле трехфазных систем*

В основе работы асинхронных двигателей лежит вращающееся магнитное поле, создаваемое МДС обмоток статора.

Принцип получения вращающегося магнитного поля с помощью неподвижной системы проводников заключается в том, что если по системе неподвижных проводников, распределенных в пространстве по окружности, протекают токи, сдвинутые по фазе, то в пространстве создается вращающееся поле. Если система проводников симметрична, а угол сдвига фаз между токами соседних проводников одинаков, то амплитуда индукции вращающегося магнитного поля и скорость постоянны. Если окружность с проводниками развернуть на плоскость, то с помощью подобной системы можно получить «бегущее» поле.

### **Цепи несинусоидального тока**

#### *Причины возникновения периодических несинусоидальных ЭДС, токов и напряжений.*

При генерировании, трансформации, распределении и потреблении электроэнергии возникают искажения формы синусоидальных ЭДС, напряжений и токов.

Несинусоидальные токи в цепях возникают при синусоидальных ЭДС и напряжениях источников электрической энергии, если цепи содержат нелинейные элементы. Так, в катушке с ферромагнитным магнитопроводом, которая является нелинейным элементом, при синусоидальном напряжении сети ток несинусоидальный. Подобное явление наблюдается в промышленных городских сетях, когда в качестве осветительных приборов используются люминесцентные лампы, имеющие нелинейные вольт - амперные характеристики.

Нелинейные элементы широко используются в электрических цепях автоматики, управления, релейной защиты и т. д. Эти нелинейные элементы (стабилизаторы напряжения, умножители и делители частоты, магнитные усилители и т.п.) приводят к искажению формы кривых напряжения или тока.

В настоящее время широкое распространение получила импульсная техника, т. е. отрасль радиоэлектроники, в которой для решения определенных задач используют импульсные устройства. Формы импульсов напряжений в импульсной технике весьма разнообразны.

Основное распространение получили импульсы треугольной, прямоугольной, трапециевидальной формы и др.

Появление в электрических цепях несинусоидальных напряжений и токов может привести к весьма нежелательным последствиям. Несинусоидальные токи вызывают дополнительные потери мощности, ухудшают характеристики двигателей, создают большие помехи в линиях связи, каналах телемеханики и т. д. Заметим, что допустимое содержание гармоник оценивается коэффициентом гармоник  $K_{\Gamma}$ . Для промышленных сетей  $K_{\Gamma} \leq 5\%$ , т. е. в этом случае кривая напряжения на экране осциллографа визуально не отличается от синусоиды и это напряжение длительно допустимо на выводах любого приемника электрической энергии.

*Способы представления периодических несинусоидальных величин.* Периодические несинусоидальные величины могут быть представлены временными диаграммами, тригонометрическим рядом Фурье, а также эквивалентными синусоидами. Наиболее наглядными, дающими полное представление о несинусоидальной величине являются временные диаграммы, т. е. графики зависимости мгновенных значений от времени.

Несинусоидальные ЭДС, токи и напряжения, с которыми приходится встречаться в электротехнике и промышленной электронике, являются периодическими функциями, удовлетворяющими условиям Дирихле и, следовательно, могут быть представлены тригонометрическим рядом Фурье:

$$f(\alpha t) = A_0 + A_{1m} \sin(\alpha t + \psi_1) + A_{2m} \sin(2\alpha t + \psi_2) \dots A_{km} \sin(k\alpha t + \psi_k)$$

Тригонометрический ряд может быть представлен как в виде суммы синусов (синусный ряд), так и суммы косинусов (косинусный ряд) гармонических составляющих.

В зависимости от характера реальной кривой  $f(\omega t)$  тригонометрический ряд может не содержать постоянной составляющей, четных или нечетных высших гармоник, а также начальных фаз.

В практических расчетах цепей с несинусоидальными ЭДС, токами и напряжениями их мгновенные значения приближенно отображают конечным рядом Фурье (3-7 членов ряда). Число членов ряда определяется необходимой точностью расчета.

Характеристика несинусоидальных величин, представленных рядом Фурье, может быть осуществлена графически с помощью диаграмм амплитудно-частотного, фазо-частотного спектров. Данные диаграммы характеризуют форму несинусоидальных кривых, причем первая диаграмма показывает спектральный состав по амплитудам, т. е. представляет зависимость амплитуд гармоник в относительных единицах от частоты, вторая диаграмма выражает зависимость начальных фаз гармоник от частоты.

Периодические несинусоидальные ЭДС, напряжения и токи могут быть представлены так же эквивалентными синусоидами.

*Основные соотношения для несинусоидальных величин.*

Максимальные значения несинусоидальных величин. Под максимальными значениями несинусоидальных ЭДС, токов или напряжений подразумевается их наибольшее мгновенное значение. Действующие значения несинусоидальных величин. Под действующими значениями несинусоидальных ЭДС, токов и напряжений, как и для синусоидального тока, понимается их среднеквадратичное значение за период. Действующее значение несинусоидального тока практически определяется как корень квадратный из суммы квадратов постоянной составляющей и действующих значений всех последующих гармоник. Аналогично действующие значения ЭДС и напряжений. Действующие значения несинусоидальных напряжений и токов измеряются приборами электродинамической, электромагнитной и электростатической систем.

Средние значения несинусоидальных напряжений и токов измеряются магнитоэлектрическими приборами без выпрямителя, средние значения по модулю - магнитоэлектрическими приборами, с выпрямителем.

Коэффициенты, характеризующие несинусоидальные величины.

Формы периодических несинусоидальных кривых могут характеризовать следующие коэффициенты (в скобках приведены значения коэффициентов для синусоидальных токов).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Коэффициент амплитуды: } k_a = I_m/I \quad k_a = 1.41 \\ \text{Коэффициент формы: } k_f = I/I_{\text{ср.мод}} \quad k_f = 1.11 \\ \text{Коэффициент гармоник: } k_r = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}/I_1 \quad k_r = 0 \\ \text{Коэффициент среднего значения формы: } k_{\text{ср}} = I_{\text{ср}}/I_m \quad k_{\text{ср}} = 0 \\ \text{Коэффициент искажения формы: } k_{\text{и}} = I_1/\sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots} \quad k_{\text{и}} = 1 \\ \text{Коэффициент пульсации: } k_{\text{п}} = I_m/I_0 \end{array} \right.$$

Коэффициенты  $k_a$  и  $k_f$  характеризуют форму периодических кривых, т. е. их отличие от синусоиды, и используются в силовой электротехнике, радиотехнике и т. д.

Коэффициенты  $k_r$  и  $k_{\text{и}}$  являются показателями качества электрической энергии энергосистем.

В энергетической электронике при оценке результатов преобразования переменного синусоидального тока в постоянный используются коэффициенты  $k_{\text{ср}}$  и  $k_{\text{п}}$ .

*Понятие о расчете активной и полной мощности линейных электрических цепей при несинусоидальных напряжениях и токах.* Для электрических цепей при несинусоидальных напряжениях и токах мгновенная мощность определяется как:  $p(t)=u(t)\times i(t)$ . Активная мощность, как и для синусоидального тока, есть среднее значение мгновенной мощности за период. Активная мощность при несинусоидальных напряжениях и токах равна сумме активной мощности постоянных составляющих и активных мощностей всех гармонических составляющих тока и напряжения.

Полная мощность:  $S=UI$ , где  $U$  и  $I$  - действующие значения несинусоидальных напряжения и тока.

*Анализ линейных электрических цепей при несинусоидальном напряжении источника питания.* К линейным электрическим цепям применим метод наложения. В соответствии с этим запись периодического несинусоидального напряжения источника энергии рядом Фурье дает возможность представить его несколькими последовательно соединенными и одновременно действующими источниками ЭДС или напряжений и осуществлять анализ электрического состояний цепей на основе метода наложения.

В ряде случаев при проведении практических расчетов периодические несинусоидальные ЭДС и напряжения представляют эквивалентными синусоидами. Подобная замена осуществляется так, чтобы действующее значение эквивалентной синусоиды ЭДС или напряжения равнялось действующему значению несинусоидальной величины.

*Влияние резистивного, индуктивного и емкостного элементов цепи на форму кривой тока. Резонансные явления.* При резистивной нагрузке токи всех гармоник совпадают по фазе с соответствующими гармониками напряжений и форма кривой несинусоидального тока аналогична форме кривой напряжения.

В цепи с индуктивным элементом амплитуда тока основной гармоники определяется как

$$I_{km} = I_{km} = U_{km}/k\omega L$$

Так как сопротивление индуктивного элемента увеличивается с переходом к высшим гармоникам, то амплитуда каждой гармоники тока будет уменьшаться обратно пропорционально порядку гармоники, и высшие гармоники тока будут проявляться в меньшей степени в общей кривой тока. Таким образом, кривая тока меньше отличается от синусоиды, чем кривая напряжения. Аналогично в цепи с емкостным элементом амплитуды токов основной и высших гармоник определяются как:

$$I_{1m} = \frac{U_{1m}}{1/\omega C} \quad I_{km} = \frac{U_{km}}{1/k\omega C}$$

Так как сопротивление емкостного элемента уменьшается с переходом к высшим гармоникам, то амплитуды гармоник тока будут увеличиваться пропорционально порядку гармоники, форма кривой тока будет искажаться еще больше в сравнении с кривой напряжения.

Поскольку с ростом частоты сопротивление индуктивного элемента увеличивается, а емкостного уменьшается, в электрической цепи может возникнуть резонанс напряжений либо для пер-

вой, либо для одной из высших гармоник. Условие возникновения резонанса напряжений для некоторой  $k$ -гармоники:

$$k\omega L = 1/k\omega C$$

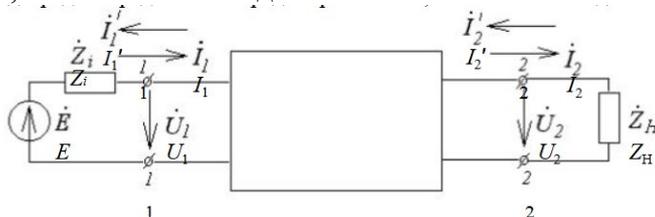
При этом амплитуда тока резонансной гармоники может значительно превысить амплитуды тока всех остальных гармоник, а на участках электрической цепи как с индуктивным, так и с емкостным элементом могут возникнуть перенапряжения.

В электрических цепях несинусоидального тока при параллельном соединении катушки и конденсатора возможно возникновение резонанса тока либо для первой, либо для одной из высших гармоник с присущими данному резонансу явлениями.

### Основы теории четырехполюсников

#### Определение четырехполюсника.

Для передачи информации с помощью электромагнитной энергии (волн, сигналов в электрических схемах) применяются различные устройства, имеющие два входных (первичных) зажима и два выходных (вторичных). К входным зажимам подключается источник электрической энергии, к выходным присоединяется нагрузка. Такие устройства называются четырехполюсниками. Четырехполюсниками являются фильтры, трансформаторы, усилители, каскады радиопередатчиков и радиоприемников, линии связи и т. д.



#### Классификация четырехполюсников.

Четырехполюсники бывают активные и пассивные. В активном четырехполюснике есть источники энергии, в пассивном – источников энергии нет. Примерами активных четырехполюсников являются усилители, каскады радиопередатчиков и радиоприемников и др. Примером пассивного четырехполюсника может служить кабельная или воздушная линия связи, электрический фильтр и др.

Четырехполюсники делятся на линейные и нелинейные. Четырехполюсник является линейным, если напряжение и ток на его выходных зажимах линейно зависят от напряжения и тока на входных зажимах. Примерами линейных четырехполюсников являются линии связи, фильтры, примерами нелинейного – выпрямитель, детектор, преобразователь частоты в радиоприемнике.

Четырехполюсники могут быть симметричными и несимметричными. Четырехполюсник симметричен, если перемена местами входных и выходных зажимов не изменяет токов и напряжений в цепи, с которой четырехполюсник соединен. В противном случае четырехполюсник несимметричен.

Четырехполюсники бывают автономными и неавтономными. На зажимах автономного четырехполюсника остается напряжение, обусловленное наличием внутренних источников, т. е. такой четырехполюсник обязательно является активным. В противном случае четырехполюсник пассивен. Различают также обратимые и необратимые четырехполюсники. В обратимых четырехполюсниках отношение напряжения на входе к току на выходе (передаточное сопротивление) не зависит от того, какая пара зажимов является входной, а какая выходной. В противном случае четырехполюсник необратим.

#### Системы уравнений четырехполюсника.

Основной задачей теории четырехполюсников является установление соотношений между напряжениями на входе и выходе и токами, протекающими через входные и выходные зажимы. Вариант с токами  $I_1, I_2$  называют прямой передачей,  $aI_1', I_2'$  – обратной. Очевидно, что

$$I_1 = -I_1', I_2 = -I_2'.$$

Две из четырех величин, определяющих режим четырехполюсника, можно рассматривать как заданные воздействия, две оставшиеся – как отклики на эти воздействия. Таким образом, со-

отношения между токами и напряжениями на входе и выходе четырехполюсника могут быть записаны в виде шести систем уравнений.

Токи на входе и выходе выражаются в зависимости от напряжений на входных и выходных зажимах:

$$I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2,$$

$$I_2' = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2.$$

Коэффициенты  $Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22}$  называются  $Y$ -параметрами и являются комплексными проводимостями.

### **Переходные процессы в электрических цепях**

Под переходным (динамическим, нестационарным) процессом или режимом в электрических цепях понимается процесс перехода цепи из одного установившегося состояния (режима) в другое. При установившихся, или стационарных, режимах в цепях постоянного тока напряжения и токи неизменны во времени, а в цепях переменного тока они представляют собой периодические функции времени. Установившиеся режимы при заданных и неизменных параметрах цепи полностью определяются только источником энергии. Следовательно, источники постоянного напряжения (или тока) создают в цепи постоянный ток, а источники переменного напряжения (или тока) – переменный ток той же частоты, что и частота источника энергии.

Переходные процессы возникают при любых изменениях режима электрической цепи: при подключении и отключении цепи, при изменении нагрузки, при возникновении аварийных режимов (короткое замыкание, обрыв провода и т.д.). Изменения в электрической цепи можно представить в виде тех или иных переключений, называемых в общем случае коммутацией. Физически переходные процессы представляют собой процессы перехода от энергетического состояния, соответствующего до коммутационному режиму, к энергетическому состоянию, соответствующему после коммутационному режиму.

Переходные процессы обычно быстро протекающие: длительность их составляет десятые, сотые, а иногда и миллиардные доли секунды. Сравнительно редко длительность переходных процессов достигает секунд и десятков секунд. Тем не менее, изучение переходных процессов весьма важно, так как позволяет установить, как деформируется по форме и амплитуде сигнал, выявить превышения напряжения на отдельных участках цепи, которые могут оказаться опасными для изоляции установки, увеличения амплитуд токов, которые могут в десятки раз превышать амплитуду тока установившегося периодического процесса, а также определять продолжительность переходного процесса. С другой стороны, работа многих электротехнических устройств, особенно устройств промышленной электроники, основана на переходных процессах.

#### *Причины возникновения переходных процессов. Законы коммутации*

В общем случае в электрической цепи переходные процессы могут возникать, если в цепи имеются индуктивные и емкостные элементы, обладающие способностью накапливать или отдавать энергию магнитного или электрического поля. В момент коммутации, когда начинается переходный процесс, происходит перераспределение энергии между индуктивными, емкостными элементами цепи и внешними источниками энергии, подключенными к цепи. При этом часть энергии безвозвратно преобразуется в другие виды энергий (например, в тепловую на активном сопротивлении).

После окончания переходного процесса устанавливается новый установившийся режим, который определяется только внешними источниками энергии. При отключении внешних источников энергии переходный процесс может возникать за счет энергии электромагнитного поля, накопленной до начала переходного режима в индуктивных и емкостных элементах цепи.

Изменения энергии магнитного и электрического полей не могут происходить мгновенно, и, следовательно, не могут мгновенно протекать процессы в момент коммутации. В самом деле, скачкообразное (мгновенное) изменение энергии в индуктивном и емкостном элементе приводит к необходимости иметь бесконечно большие мощности  $p = dW/dt$ , что практически невозможно, ибо в реальных электрических цепях бесконечно большой мощности не существует.

Таким образом, переходные процессы не могут протекать мгновенно, так как невозможно в принципе мгновенно изменять энергию, накопленную в электромагнитном поле цепи. Теоретически переходные процессы заканчиваются за время  $t \rightarrow \infty$ . Практически же переходные процессы являются быстротекущими, и их длительность обычно составляет доли секунды.

Первый закон коммутации состоит в том, что ток в ветви с индуктивным элементом в начальный момент времени после коммутации имеет то же значение, какое он имел непосредственно перед коммутацией, а затем с этого значения он начинает плавно изменяться. Сказанное обычно записывают в виде  $i_L(0_-) = i_L(0_+)$ , считая, что коммутация происходит мгновенно в момент  $t = 0$ .

Второй закон коммутации состоит в том, что напряжение на емкостном элементе в начальный момент после коммутации имеет то же значение, какое оно имело непосредственно перед коммутацией, а затем с этого значения оно начинает плавно изменяться:  $U_C(0_-) = U_C(0_+)$ .

Следовательно, наличие ветви, содержащей индуктивность, в цепи, включаемой под напряжение, равносильно разрыву цепи в этом месте в момент коммутации, так как  $i_L(0_-) = i_L(0_+)$ . Наличие в цепи, включаемой под напряжение, ветви, содержащей разряженный конденсатор, равносильно короткому замыканию в этом месте в момент коммутации, так как  $U_C(0_-) = U_C(0_+)$ .

Однако в электрической цепи возможны скачки напряжений на индуктивностях и токов на емкостях.

В электрических цепях с резистивными элементами энергия электромагнитного поля не запасается, вследствие чего в них переходные процессы не возникают, т.е. в таких цепях стационарные режимы устанавливаются мгновенно, скачком.

В действительности любой элемент цепи обладает каким-то сопротивлением  $r$ , индуктивностью  $L$  и емкостью  $C$ , т.е. в реальных электротехнических устройствах существуют тепловые потери, обусловленные прохождением тока и наличием сопротивления  $r$ , а также магнитные и электрические поля.

Переходные процессы в реальных электротехнических устройствах можно ускорять или замедлять путем подбора соответствующих параметров элементов цепей, а также за счет применения специальных устройств.

Анализ переходных процессов производят путем решения дифференциальных уравнений, составленных для исследуемой электрической цепи на основе законов Кирхгофа или метода контурных токов.

Классический метод анализа переходных процессов заключается в непосредственном интегрировании дифференциальных уравнений. Решение находят в виде суммы экспонент:

$$i_{cb} = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t},$$

где число слагаемых равно порядку дифференциального уравнения.

После подстановки экспонент  $A_k \cdot e^{p_k t}$  в исходное уравнение и дифференцирования можно получить характеристическое уравнение, из которого определяют корни  $p_1, p_2$ . Если встречаются кратные корни (например,  $p_1 = p_2 = P$ ), решение имеет вид  $A_1 \cdot e^{Pt} + A_2 \cdot t \cdot e^{Pt}$ .

Постоянные интегрирования  $A_1, A_2$  находят из начальных условий, которые определяют с помощью законов коммутации. Различают независимые и зависимые (после коммутационные) начальные условия. К первым относят значения токов через индуктивности и значения напряжений на емкостях, известные из докоммутационного режима работы цепи.

Значения остальных токов и напряжений при  $t = 0$  в послекоммутационной схеме, определяемые по независимым начальным значениям из законов Кирхгофа для схемы после коммутации, называют зависимыми начальными значениями.

Классический метод анализа применяют обычно для анализа процессов в несложных электрических цепях.

*Алгоритм расчета переходного процесса классическим методом*

Для анализа переходного процесса предварительно следует привести схему к минимальному числу накопителей энергии, исключив параллельные и последовательные соединения однотипных реактивных элементов (индуктивностей или емкостей). Система интегродифференциальных уравнений, составленных в соответствии с законами Кирхгофа или методом контурных токов,

может быть сведена путем подстановки к одному дифференциальному уравнению, которое используется для составления характеристического уравнения.

Порядок дифференциального, следовательно, и характеристического уравнения зависит от числа реактивных элементов приведенной схемы. Главная трудность в решении задачи классическим методом для уравнений высоких порядков состоит в отыскании корней характеристического уравнения и постоянных интегрирования. Поэтому для решения уравнений порядка выше второго применяют другие методы, в частности операторный метод, основанный на применении преобразования Лапласа и исключаящий трудоемкую процедуру отыскания постоянных интегрирования.

Для практических целей при анализе переходных процессов в любой схеме классическим методом может быть рекомендован следующий алгоритм.

1. Рассчитать принужденный (установившийся) режим при  $t \rightarrow \infty$ . Определить принужденные токи и напряжения.
2. Рассчитать режим до коммутации. Определить токи в ветвях с индуктивностью и напряжения на конденсаторах. Значения этих величин в момент коммутации является независимыми начальными условиями.
3. Составить дифференциальные уравнения для свободного процесса ( $E = 0$ ) в схеме после коммутации по законам Кирхгофа или по методу контурных токов. Алгебраизировать данные уравнения, получить характеристическое уравнение и найти его корни. Существуют приемы, упрощающие операцию отыскания корней характеристического уравнения, например, приравнивание нулю входного операторного сопротивления цепи, которое получается путем замены в выражении комплексного сопротивления цепи множителя " $j\omega$ " на оператор " $p$ ".
4. Записать общие выражения для искомых напряжений и токов в соответствии с видом корней характеристического уравнения.
5. Переписать величины, полученные в п. 4, и производные от них при  $t = 0$ .
6. Определить необходимые зависимые начальные условия, используя независимые начальные условия.
7. Подставив начальные условия в уравнения п. 5, найти постоянные интегрирования.
8. Записать законы изменения искомых токов и напряжений.

### Нелинейные резистивные электрические цепи

Нелинейными называются цепи, в состав которых входит хотя бы один нелинейный элемент.

Нелинейными называются элементы, параметры которых зависят от величины и (или) направления связанных с этими элементами переменных (напряжения, тока, магнитного потока, заряда, температуры, светового потока и др.). Нелинейные элементы описываются нелинейными характеристиками, которые не имеют строгого аналитического выражения, определяются экспериментально и задаются таблично или графиками.

Нелинейные элементы можно разделить на *двух- и многополюсные*. Последние содержат три (различные полупроводниковые и электронные триоды) и более (магнитные усилители, многообмоточные трансформаторы, тетроды, пентоды и др.) полюсов, с помощью которых они подсоединяются к электрической цепи. Характерной особенностью многополюсных элементов является то, что в общем случае их свойства определяются семейством характеристик, представляющих зависимости выходных характеристик от входных переменных и наоборот: входные характеристики строят для ряда фиксированных значений одного из выходных параметров, выходные — для ряда фиксированных значений одного из входных.

По другому признаку классификации нелинейные элементы можно разделить на *инерционные и безынерционные*. Инерционными называются элементы, характеристики которых зависят от скорости изменения переменных. Для таких элементов *статические характеристики*, определяющие зависимость между действующими значениями переменных, отличаются от динамических характеристик, устанавливающих взаимосвязь между мгновенными значениями переменных. Безынерционными называются элементы, характеристики которых не зависят от

скорости изменения переменных. Для таких элементов статические и динамические характеристики совпадают.

Понятия инерционных и безынерционных элементов относительно: элемент может рассматриваться как безынерционный в допустимом (ограниченном сверху) диапазоне частот, при выходе за пределы которого он переходит в разряд инерционных.

В зависимости от вида характеристик различают нелинейные элементы с *симметричными и несимметричными* характеристиками. Симметричной называется характеристика, не зависящая от направления определяющих ее величин, т.е. имеющая симметрию относительно начала системы координат:  $f(x) = -f(-x)$ . Для несимметричной характеристики это условие не выполняется, т.е.  $f(x) \neq -f(-x)$ . Наличие у нелинейного элемента симметричной характеристики позволяет в целом ряде случаев упростить анализ схемы, осуществляя его в пределах одного квадранта.

По типу характеристики можно также разделить все нелинейные элементы на элементы с *однозначной и неоднозначной характеристиками*. Однозначной называется характеристика  $y = f(x)$ , у которой каждому значению  $x$  соответствует единственное значение  $y$  и наоборот. В случае неоднозначной характеристики каким-то значениям  $x$  может соответствовать два или более значения  $y$  или наоборот. У нелинейных резисторов неоднозначность характеристики обычно связана с наличием падающего участка, для которого  $du/di < 0$ , а у нелинейных индуктивных и емкостных элементов – с гистерезисом.

Наконец, все нелинейные элементы можно разделить на *управляемые и неуправляемые*. В отличие от неуправляемых управляемые нелинейные элементы (обычно трех- и многополюсники) содержат управляющие каналы, изменяя напряжение, ток, световой поток и др. в которых, изменяют их основные характеристики: вольт-амперную, вебер-амперную или кулон-вольтную.

#### *Нелинейные электрические цепи постоянного тока*

Нелинейные свойства таких цепей определяет наличие в них нелинейных резисторов.

В связи с отсутствием у нелинейных резисторов прямой пропорциональности между напряжением и током их нельзя охарактеризовать одним параметром (одним значением  $R$ ). Соотношение между этими величинами в общем случае зависит не только от их мгновенных значений, но и от производных и интегралов по времени.

#### *Параметры нелинейных резисторов*

В зависимости от условий работы нелинейного резистора и характера задачи различают статическое, дифференциальное и динамическое сопротивления.

Если нелинейный элемент является безынерционным, то он характеризуется первыми двумя из перечисленных параметров.

*Статическое сопротивление* равно отношению напряжения на резистивном элементе к протекающему через него току.

Под *дифференциальным сопротивлением* понимается отношение бесконечно малого приращения напряжения к соответствующему приращению тока.

В случае инерционного нелинейного резистора вводится понятие динамического сопротивления, определяемого по динамической ВАХ. В зависимости от скорости изменения переменной, например тока, может меняться не только величина, но и знак.

#### *Методы расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока*

Электрическое состояние нелинейных цепей описывается на основании законов Кирхгофа, которые имеют общий характер. При этом следует помнить, что для нелинейных цепей принцип наложения не применим. В этой связи методы расчета, разработанные для линейных схем на основе законов Кирхгофа и принципа наложения, в общем случае не распространяются на нелинейные цепи.

Общих методов расчета нелинейных цепей не существует. Известные приемы и способы имеют различные возможности и области применения. В общем случае при анализе нелинейной цепи описывающая ее система нелинейных уравнений может быть решена следующими методами:

- графическими;
- аналитическими;

- графо-аналитическими;
- итерационными.

*Графические методы расчета.* При использовании этих методов задача решается путем графических построений на плоскости. При этом характеристики всех ветвей цепи следует записать в функции одного общего аргумента. Благодаря этому система уравнений сводится к одному нелинейному уравнению с одним неизвестным. Формально при расчете различают цепи с последовательным, параллельным и смешанным соединениями.

а) Цепи с последовательным соединением резистивных элементов.

При последовательном соединении нелинейных резисторов в качестве общего аргумента принимается ток, протекающий через последовательно соединенные элементы. Расчет проводится в следующей последовательности. По заданным ВАХ  $U_i(I)$  отдельных резисторов в системе декартовых координат  $U-I$  строится результирующая зависимость  $U(I) = \sum U_i(I)$ . Затем на оси напряжений откладывается точка, соответствующая в выбранном масштабе заданной величине напряжения на входе цепи, из которой восстанавливается перпендикуляр до пересечения с зависимостью  $U(I)$ . Из точки пересечения перпендикуляра с кривой  $U(I)$  опускается ортогональ на ось токов – полученная точка соответствует искомому току в цепи, по найденному значению которого с использованием зависимостей  $U_i(I)$  определяются напряжения  $U_i$  на отдельных резистивных элементах.

Графическое решение для последовательной нелинейной цепи с двумя резистивными элементами может быть проведено и другим методом – *методом пересечений*. В этом случае один из нелинейных резисторов, например, с ВАХ  $U_1(I)$ , считается внутренним сопротивлением источника с ЭДС  $E$ , а другой – нагрузкой. Тогда на основании соотношения  $E - U_1(I) = U_2(I)$  точка пересечения кривых  $I(E - U_1)$  и  $U_2(I)$  определяет режим работы цепи. Кривая  $I(E - U_1)$  строится путем вычитания абсцисс ВАХ  $U_1(I)$  из ЭДС  $E$  для различных значений тока.

Использование данного метода наиболее рационально при последовательном соединении линейного и нелинейного резисторов. В этом случае линейный резистор принимается за внутреннее сопротивление источника, и линейная ВАХ последнего строится по двум точкам.

б) Цепи с параллельным соединением резистивных элементов.

При параллельном соединении нелинейных резисторов в качестве общего аргумента принимается напряжение, приложенное к параллельно соединенным элементам. Расчет проводится в следующей последовательности. По заданным ВАХ  $I_i(U)$  отдельных резисторов в системе декартовых координат  $U-I$  строится результирующая зависимость  $I(U) = \sum I_i(U)$ . Затем на оси токов откладывается точка, соответствующая в выбранном масштабе заданной величине тока источника на входе цепи (при наличии на входе цепи источника напряжения задача решается сразу путем восстановления перпендикуляра из точки, соответствующей заданному напряжению источника, до пересечения с ВАХ  $I_i(U)$ ), из которой восстанавливается перпендикуляр до пересечения с зависимостью  $I(U)$ . Из точки пересечения перпендикуляра с кривой  $I(U)$  опускается ортогональ на ось напряжений – полученная точка соответствует напряжению на нелинейных резисторах, по найденному значению которого с использованием зависимостей  $I_i(U)$  определяются токи  $I_i$  в ветвях с отдельными резистивными элементами.

в) Цепи с последовательно-параллельным (смешанным) соединением резистивных элементов.

1. Расчет таких цепей производится в следующей последовательности:

Исходная схема сводится к цепи с последовательным соединением резисторов, для чего строится результирующая ВАХ параллельно соединенных элементов, как это показано в пункте б).

2. Проводится расчет полученной схемы с последовательным соединением резистивных элементов (см. пункт а), на основании которого затем определяются токи в исходных параллельных ветвях.

*Метод двух узлов.* Для цепей, содержащих два узла или сводящихся к таковым, можно применять метод двух узлов. При полностью графическом способе реализации метода он заключается в следующем:

Строятся графики зависимостей  $I_i(U_{mn})$  токов во всех  $i$ -х ветвях в функции общей величины – напряжения  $U_{mn}$  между узлами  $m$  и  $n$ , для чего каждая из исходных кривых  $I_i(U_i)$  смещается вдоль оси напряжений параллельно самой себе, чтобы ее начало находилось в точке, соответствующей ЭДС  $\mathcal{E}_i$  в  $i$ -й ветви, а затем зеркально отражается относительно перпендикуляра, восстановленного в этой точке.

Определяется, в какой точке графически реализуется первый закон Кирхгофа  $\sum I_i(U_{mn}) = 0$ . Соответствующие данной точке токи являются решением задачи.

Метод двух узлов может быть реализован и в другом варианте, отличающемся от изложенного выше меньшим числом графических построений.

### **Нелинейные магнитные цепи при постоянных потоках**

#### *Магнитное поле и его параметры*

Направление магнитных линий и направление создающего их тока связаны между собой известным правилом правоходового винта (буравчика).

Основной величиной, характеризующей интенсивность и направление магнитного поля является – вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , которая измеряется в Теслах [Тл].

#### *Магнитные цепи*

Всякий электромагнит состоит из стального сердечника – магнитопровода и намотанной на него катушки с витками изолированной проволоки, по которой проходит электрический ток.

Совокупность нескольких участков: ферромагнитных (сталь) и неферромагнитных (воздух), по которым замыкаются линии магнитного потока, составляют магнитную цепь.

#### *Закон полного тока*

В основе расчета магнитных цепей лежит закон полного тока: ток  $I_k$ , пронизывающий контур  $L$  считается положительным, если принятое направление обхода контура и направление этого тока связаны правилом правоходового винта (буравчика).

#### *Закон Ома для магнитной цепи. Линейные и нелинейные магнитные сопротивления*

В кольцевом магнитопроводе с равномерной обмоткой все поле концентрируется внутри кольца.

Магнитный поток  $\Phi$  зависит от произведения  $IW = F$ , которое получило название магнитодвижущей силы (МДС).

Величину  $L / (\mu_a S) = R_m$  – принято назвать магнитным сопротивлением магнитопровода (по аналогии с электрическим сопротивлением  $r = L / \gamma S$ ).

Магнитное сопротивление воздуха (зазоров) линейное, т.к.  $\mu_a = \mu_0 = \text{const}$ . Магнитное сопротивление сердечника нелинейно –  $\mu_a$  зависит от  $B$ .

Если намагничивающую силу  $F$ , уподобить действию ЭДС, будет получено соотношение, похожее на выражение закона Ома для цепи постоянного тока. В связи с этим формулу

$$\Phi = \mu_a S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{\frac{L}{\mu_a S}} = \frac{F}{R_m}$$

принято назвать законом Ома для магнитной цепи. Следует оговориться, что эта аналогия – формальная, а физическая сущность процессов в электрических и магнитных цепях различна.

#### *Расчет неразветвленной магнитной цепи*

Формула, выражающая закон полного тока магнитной цепи, была получена для кольцевого магнитопровода постоянного поперечного сечения и с равномерно распределенной обмоткой. Эту формулу распространяют и на магнитные цепи, где намагничивающая обмотка сосредоточена на ограниченном участке магнитопровода, а отдельные участки цепи выполнены из различных ферромагнитных и неферромагнитных материалов и имеют различное поперечное сечение.

В приближенных расчетах магнитных цепей принимают, что магнитный поток на всех участках цепи остается одним и тем же, хотя на самом деле в магнитной цепи образуются также потоки рассеяния  $\Phi_p$ , которые замыкаются по воздуху, а не следуют по пути магнитопровода.

В расчетах магнитных цепей различают прямую и обратную задачи.

#### Прямая задача

Задано: 1) геометрические размеры магнитной цепи; 2) характеристика  $B = f(H)$  (кривая намагничивания) ферромагнитных материалов, из которых выполнена магнитная цепь; 3) магнитный поток  $\Phi$ , который надо создать в магнитной цепи. Требуется найти намагничивающую силу обмотки  $F = IW$ .

1. Магнитная цепь разбивается на ряд участков с одинаковым поперечным сечением  $S$ , выполненном из однородного материала.

2. Намечается путь прохождения средней магнитной линии.

3. Т.к. магнитный поток на всех участках цепи остается постоянным, то магнитная индукция  $B = \Phi / S$  на каждом из участков и напряженность магнитного поля  $H$  неизменны. Это позволяет сравнительно просто определить значение  $\int H_{dl}$  для контура, образованного средней магнитной линией, а следовательно, найти искомую величину намагничивающей силы, поскольку  $F = \int H_{dl}$ .

Запишем интеграл  $\int H_{dl}$  в виде суммы интегралов с границами интегрирования, совпадающими с началом и концом каждого участка цепи. Тогда

$$\int H_{dl} = \int_a^b H_1 dl + \int_b^c H_2 dl + \int_c^a H_3 dl = H_1 L_1 + H_2 L_2 + H_{\text{воз}} \delta = IW$$

где:  $L_1$  и  $L_2$  – длины ферромагнитных участков цепи [м].  
 $\delta$  – ширина воздушного зазора, [м].

4. Значения  $H_1$  и  $H_2$  определяют по известным величинам магнитной индукции  $B$  с помощью кривых намагничивания, соответствующих ферромагнитных материалов.

А для воздушного зазора

$$H_{\text{воз}} = \frac{B_{\text{воз}}}{\mu_0} = \frac{B_{\text{воз}}}{4\pi \times 10^{-7}} = 8 \times 10^5 B_{\text{воз}} \text{ А/м.}$$

#### Обратная задача

Задано:

1. Геометрические размеры магнитной цепи;
2. Характеристики ферромагнитных материалов;
3. Намагничивающая сила обмотки  $F$ .

Требуется определить магнитный поток  $\Phi$ .

$$\Phi = \mu_0 S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{\frac{L}{\mu_0 S}} = \frac{F}{R_m}$$

Непосредственное использование формулы для определения магнитного потока  $\Phi$  оказывается невозможным, поскольку магнитное сопротивление цепи переменное и само зависит от величины магнитного потока. Такие задачи решаются методом последовательного приближения в следующем порядке. Задаются рядом произвольных значений магнитного потока в цепи и для каждого из этих значений определяют необходимую намагничивающую силу обмотки так, как это делается при решении прямой задачи.

По полученным данным строят кривую  $\Phi(F)$  – вебер-амперную характеристику. Имея эту зависимость, нетрудно для заданного значения намагничивающей силы найти величину магнитного потока.

Для оценки необходимого значения  $\Phi$  можно пренебречь сопротивлением ферромагнитного участка и посчитать поток, который получится под действием намагничивающей силы  $F$  при сопротивлении воздушного участка. Это значение  $\Phi$  заведомо больше расчетного.

#### Полупроводниковые приборы

Электроника – это область науки, техники и производства, охватывающая исследование, разработку и изготовление электронных приборов и устройств, а также принципов их использования. В электронных приборах (электронных лампах, транзисторах и т.д.) и устройствах на их основе происходит взаимодействие электронов с электромагнитными полями. Эффекты этого взаимодействия выражающиеся, в частности, в изменениях электрических токов и напряжений, используются для генерации и преобразования электрических сигналов.

В настоящее время создано большое количество самых разнообразных электронных приборов и устройств. При практическом использовании они соединяются между собой с помощью электрических цепей. В простейших случаях цепи состоят из проводов, металлических дорожек на печатных платах, кабелей и пассивных компонентов: резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности. Совокупность электронных приборов, соединенных между собой электрическими цепями, будем называть электронной цепью или устройством, а ее условное графическое изображение на рисунке – электронной схемой.

Действие полупроводниковых приборов основано на использовании свойств полупроводников. Полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. К полупроводникам относятся элементы IV группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева, которые на внешней оболочке имеют четыре валентных электрона. Типичные полупроводники -Ge (германий) и Si (кремний).

Чистые полупроводники кристаллизуются в виде решетки. Каждая валентная связь содержит два электрона, оболочка атома имеет восемь электронов, и атом находится в состоянии равновесия. Чтобы «вырвать» электрон в зону проводимости, необходимо затратить большую энергию.

Основное значение для работы полупроводниковых приборов имеет электронно-дырочный переход, который называют р–n-переходом – область, на границе двух полупроводников, один из которых имеет дырочную, а другой - электронную электропроводность).

На практике р-n-переход получают введением в полупроводник дополнительной легирующей примеси. Например, при введении донорной примеси в определенную часть полупроводника р-типа в нем образуется область полупроводника n-типа, граничащая с полупроводником р-типа.

Полупроводниковым диодом называют двухэлектродный полупроводниковый прибор, содержащий один электронно-дырочный р-n переход.

По конструктивному исполнению полупроводниковые диоды разделяются на плоскостные и точечные. Плоскостные диоды представляют собой р-n-переход с двумя металлическими контактами, присоединенными к р- и n- областям. В точечном диоде вместо плоской используется конструкция, состоящая из пластины полупроводника и металлического проводника в виде острия. При сплавлении острия с пластиной образуется микропереход. По сравнению с плоскостным диодом падение напряжения на точечном в прямом направлении очень мало, ток в обратном направлении значительно меняется в зависимости от напряжения. Точечные диоды обладают малой межэлектродной емкостью.

Выпрямительный полупроводниковый диод используется для выпрямления переменного тока.

Полупроводниковый стабилитрон - полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя слабо зависит от тока.

Туннельный диод - это полупроводниковый диод, в котором благодаря использованию высокой концентрации примесей возникает очень узкий барьер и наблюдается туннельный механизм переноса зарядов через р-n-переход.

Характеристика туннельного диода имеет область отрицательного сопротивления, т. е. область, в которой положительному приращению напряжения соответствует отрицательное приращение тока.

Варикап - полупроводниковый диод, в котором используется зависимость емкости р-n-перехода от обратного напряжения, который предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью.

Фотодиод -полупроводниковый диод, в котором в результате освещения р-n-перехода повышается обратный ток.

Светодиод - полупроводниковый диод, в котором в режиме прямого тока в зоне р-n-перехода возникает видимое или инфракрасное излучение.

Фотодиоды используются в солнечных батареях, применяемых на космических кораблях и в южных районах земного шара. Светодиоды находят применение для индикации в измерительных приборах, в наручных часах, микрокалькуляторах и других приборах.

Резистор - один из наиболее распространённых компонентов в электронике. Его назначение - простое: сопротивляться течению тока, преобразовывая его часть в тепло. Основной характеристикой резистора является сопротивление. Единица измерения сопротивления - Ом. Чем больше сопротивление, тем большая часть тока рассеивается в тепло. В схемах, питаемых небольшим напряжением (5 – 12 В), наиболее распространены резисторы номиналом от 100 Ом до 100 кОм.

Тиристорами называют переключаемые полупроводниковые компоненты, имеющие четыре и более слоя и три и более чередующихся электронно-дырочных перехода. В качестве полупроводника обычно применяют кремний. К группе тиристорov относят динисторы, тринисторы, запираемые тиристоры, симисторы. У всех тиристорov на вольтамперной характеристике присутствует участок отрицательного дифференциального сопротивления. Тиристоры в основном производят по технологии диффузии.

Как правило, тиристор имеет три вывода, один из которых управляющий, а два других образуют путь для протекания тока. Как мы знаем, транзистор открывается пропорционально величине управляющего тока. Чем он больше, тем больше открывается транзистор, и наоборот. А у тиристора все устроено иначе. Он открывается полностью, скачкообразно. И что самое интересное, не закрывается даже при отсутствии управляющего сигнала.

#### *Биполярные транзисторы*

Транзистором называют трехэлектродный полупроводниковый прибор, служащий для усиления мощности электрических сигналов. Кроме усиления транзисторы используют для генерирования сигналов, их различных преобразований и решения других задач электронной техники.

Различают два типа транзисторov: биполярные и полевые (униполярные). Название биполярного транзистора объясняется тем, что ток в нем определяется движением носителей зарядов двух знаков - отрицательных и положительных (электронов и дырок). Термин же транзистор происходит от английских слов *transfer*- переносить и *resistor* - сопротивление, т.е. в них происходит изменение сопротивления под действием управляющего сигнала.

Биполярный транзистор состоит из трех слоев полупроводников типа «р» и «п», между которыми образуются два *p-n* перехода. В соответствии с чередованием слоев с разной электропроводностью биполярные транзисторы подразделяют на два типа: *p-n-p* и *n-p-n*. У транзистора имеются три вывода (электрода): эмиттер (э), коллектор (к) и база (б). Эмиттер и коллектор соединяют с крайними областями (слоями), имеющими один и тот же тип проводимости, база соединяется со средней областью. Напряжение питания подают на переход «эмиттер - база» в прямом направлении, а на переход «база - коллектор» - в обратном направлении.

По диапазонам используемых частот транзисторы делятся на низкочастотные (до 3МГц), среднечастотные (от 3 до 30 МГц), высокочастотные (от 30 до 300 МГц) и сверхвысокочастотные (свыше 300 МГц). По мощности транзисторы делятся на малой мощности (до 0,3Вт), средней мощности (от 0,3Вт до 1,5Вт), большой мощности (свыше 1,5Вт).

#### *Полевые транзисторы*

Полевым называют транзистор, управляемый электрическим полем, или транзистор с управляемым каналом для тока. В отличие от биполярных полевые транзисторы имеют высокое входное сопротивление и поэтому требуют очень малых мощностей для управления.

Ток в полевом транзисторе создается носителями заряда только одного знака (электронами или дырками), вследствие чего эти транзисторы часто называют униполярными.

Носители заряда в полевом транзисторе являются основными для активной области и его параметры не зависят от времени жизни неосновных носителей (как у биполярных транзисторov). Это и определяет высокие частотные свойства и меньшую зависимость от температуры.

Изготавливают полевые транзисторы из кремния. В зависимости от электропроводности исходного материала различают транзисторы с *p*-и *n*-каналом.

Каналом считают центральную область транзистора. Электрод, из которого в канал поступают основные носители заряда, называют истоком *U*, а электрод, через который основные носители уходят из канала - стоком *C*. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, называют затвором *З*.

Полевые транзисторы подразделяются на два основных типа: с затвором в виде р-п-перехода и с изолированным затвором. Полевой транзистор представляет собой пластину, например, n-типа, на верхней и нижней гранях которой создаются области с проводимостью противоположного типа, например, р-типа. Эти области электрически связаны, образуя единый электрод-затвор. Область с проводимостью, расположенная между областями, образует токовый канал. На торцевые поверхности пластины наносят контакты, образующие два других электрода  $U$  и  $C$ , к которым подключается источник питания  $U_c$  и при необходимости сопротивление нагрузки. Между каналом и затвором создаются два р-п-перехода. Ток протекает от истока к стоку по каналу, сечение которого зависит от затвора.

При увеличении отрицательного потенциала на затворе р-п-переходы запираются и расширяются практически за счет канала, сечение канала, а следовательно, и его проводимость, уменьшаются, ток через канал падает.

Принцип действия МОП-транзисторов зависит от изменения в полупроводнике электрического поля, происходит поляризация изолированного затвора. Такое действие вызвало название элемента, как «металлоокисный полупроводник». Он представляет собой прибор, в котором для изготовления затвора использовалась двуокись кремния  $SiO_2$ , для современных МОП-транзисторов в качестве материала для затвора применяют поликристаллический кремний. Существует два типа МОП-транзисторов. Первые имеют дырочную проводимость – р-канальные. Транзисторы с электронной проводимостью называются n-канальными. Канал в этих полупроводниковых приборах может быть обедненным или наоборот обогащенным носителями.

#### *Интегральные микросхемы*

Усложнение электронных устройств и систем, в которых количество дискретных элементов достигло десятков и сотен тысяч, вызвало снижение эксплуатационной надежности при одновременном увеличении габаритов и массы, росте потребления электрической энергии, стоимости. Эти недостатки устраняются с внедрением изделий микроэлектроники.

Микроэлектроника – это область науки и техники, занимающаяся физическими и техническими проблемами создания интегральных схем. Интегральная технология является наиболее важным технологическим приемом микроэлектроники и позволяет на одной пластине создавать группы элементов, схемно соединенных между собой. Функциональные узлы, выполненные по интегральной технологии, называют интегральными микросхемами.

Интегральная микросхема – это микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования, имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных компонентов (транзисторов, резисторов и др.), изготовленных в едином технологическом цикле на общей подложке.

Наиболее распространенными пассивными элементами в полупроводниковых микросхемах являются резисторы. Слой полупроводника, изолированный от других элементов, может служить резистором интегральной микросхемы. Однако, ввиду низкого удельного сопротивления слоя полупроводника, резисторы занимают большую часть площади всей микросхемы. В связи с этим микросхемы проектируют с минимальным числом резисторов, а величина их сопротивления должна быть небольшой, менее 10 кОм. Так, к примеру, цифровые интегральные микросхемы содержат меньше резисторов, чем аналоговые схемы. А цифровые микросхемы на полевых транзисторах практически не имеют резисторов, их функции выполняют дополнительные транзисторы, работающие на крутом восходящем участке вольт-амперной характеристики.

Наряду с резисторами в гибридных интегральных микросхемах распространенными пассивными элементами являются пленочные конденсаторы. При этом пассивные элементы во многом определяют схемотехнические и эксплуатационные характеристики интегральных микросхем (ИМС). В низкочастотных микросхемах используются дискретные миниатюрные конденсаторы и катушки индуктивности, а в аналоговых высокочастотных микросхемах – пленочные конденсаторы емкостью менее 100 пФ. Пленочные конденсаторы бывают как тонко-, так и толстопленочные и занимают большую площадь ИМС. В связи с этим в полупроводниковых интегральных микросхемах роль конденсаторов выполняют обратносмещенные р–п переходы и структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-конденсаторы).

Несмотря на ограничения на геометрические размеры и номиналы или допуски абсолютных значений, пассивные элементы в интегральных схемах обладают некоторыми преимуществами монолитных структур, такими, как хорошая воспроизводимость по номинальной величине и температурной зависимости.

В зависимости от формы обрабатываемых электрических сигналов микросхемы бывают аналоговыми или цифровыми.

Параметром, определяющим уровень сложности микросхем, является степень интеграции, под которой понимается округленный до ближайшего целого числа коэффициент  $K$ , являющийся показателем десятичного логарифма от числа  $N$  содержащихся в микросхеме элементов и компонентов.

По уровню сложности цифровые микросхемы подразделяются на малые (МИС,  $K \leq 1 \dots 2$ ), средние (СИС,  $2 \leq K \leq 3 \dots 4$ ), большие (БИС,  $3 \dots 4 \leq K \leq 5$ ) и сверхбольшие (СБИС,  $K > 5$ ).

Основные типы микросхем – пленочные и полупроводниковые. В пленочных микросхемах элементы и соединения выполнены в виде различных пленок (проводящие, резистивные и диэлектрические) на подложке из диэлектрика. В полупроводниковых микросхемах пассивные и активные элементы вместе с изолирующими и проводящими областями создаются на одной подложке кремния или другого полупроводника. Применяются еще и так называемые гибридные микросхемы, в которых органически сочетаются в одном корпусе пленочные конструкции из пассивных элементов с дискретными миниатюрными активными компонентами.

К пассивным компонентам ИС относятся резисторы, конденсаторы, индуктивности и внутрисхемные соединения.

В ИМС применяются пленочные, диффузионные резисторы и резисторы на основе МДП-структур.

*Пленочные конденсаторы* позволяют получить большую емкость и представляют собой многослойную структуру. На подложку наносится слой металла, служащий обкладкой конденсатора, на поверхности которого наносится слой диэлектрика. Диэлектрик покрывается металлическим слоем, служащим второй обкладкой конденсатора. В качестве диэлектрика используется оксид тантала или монооксид кремния. Температурный коэффициент емкости таких конденсаторов порядка  $0,02 \dots 0,04 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ , а добротность на высоких частотах определяется сопротивлением обкладок. В связи с этим чаще используются алюминиевые обкладки. Сопротивление пленки тантала велико, поэтому танталовые конденсаторы являются низкочастотными.

Основным и наиболее универсальным элементом интегральных микросхем является *биполярный транзистор*. В большинстве случаев используется транзистор  $n-p-n$  типа, ибо подвижность электронов больше подвижности дырок, и они обладают лучшими частотными свойствами, чем транзисторы  $p-n-p$  типа.

Главное отличие структур биполярных транзисторов в микросхемах от дискретных транзисторов состоит в том, что интегральные транзисторы имеют дополнительные области, которые изолируют транзисторы от общей полупроводниковой подложки. Все выводы интегральных транзисторов располагаются на одной плоскости, что позволяет легко проводить межэлементные соединения всей микросхемы.

*Диоды в полупроводниковых ИМС* можно получить на основе одинаковых транзисторных структур, выбирая соответствующую схему коммутации выводов транзистора.

Существует пять вариантов коммутации выводов транзистора для создания диода:

1. Переход база–эмиттер с разомкнутой цепью коллектора.
2. Переход база–эмиттер с коллектором, закороченным на базу.
3. Переход база–коллектор с разомкнутым эмиттером.
4. Переход база–коллектор с эмиттером, закороченным на базу.
5. Включены в параллель переходы база–эмиттер и база–коллектор.

*Полупроводниковые приборы с зарядовой связью* - это полупроводниковый прибор, в котором происходит накопление неосновных носителей под электродами МОП-структур и перемещение этих носителей от одного электрода к другому.

Электрический сигнал в приборах с зарядовой связью (ПЗС) представлен не напряжением или током, как в обычных аналоговых или цифровых схемах, а зарядом неосновных носителей – зарядовым пакетом.

## Аналоговые электронные устройства

### Выпрямители

Источники вторичного электропитания (ИВЭП) предназначены для получения напряжения, необходимого для питания различных электронных устройств. Действующее значение напряжения сети переменного тока составляет 220 В. В то же время для работы электронных приборов необходимо постоянное напряжение, величина которого обычно не превышает нескольких вольт. Вторичные источники получают энергию от первичных источников: сети переменного тока, аккумуляторов и т.д.

Выпрямители служат для преобразования переменного напряжения питающей сети в постоянное. Основными компонентами выпрямителей служат вентили – элементы с явно выраженной нелинейной вольт-амперной характеристикой. В качестве таких элементов используют кремниевые диоды.

*Однополупериодный выпрямитель.* Простейшим является однополупериодный выпрямитель. Выходное напряжение меньше входного на величину падения напряжения на открытом диоде.

*Двухполупериодные выпрямители.* Меньший уровень пульсаций выпрямленного напряжения можно получить в двухполупериодных выпрямителях.

*Сглаживающие фильтры.* Схемы выпрямителей имеют относительно большие значения коэффициента пульсаций. Между тем для питания электронной аппаратуры часто требуется выпрямленное напряжение с коэффициентом пульсаций, не превышающим нескольких процентов. Для уменьшения пульсаций используют специальные устройства – сглаживающие фильтры.

Простейшим является емкостный фильтр (С-фильтр).

Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения и тока происходит за счет периодической зарядки конденсатора С (когда напряжение на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение на нагрузке) и последующей его разрядки на сопротивление нагрузки.

*Стабилизаторы напряжения.* В процессе работы ИВЭП напряжение на выходе сглаживающего фильтра может изменяться из-за колебаний сопротивления нагрузки, напряжения первичного источника и других факторов. Если отклонения напряжения превышают допустимую величину, в схему ИВЭП вводят стабилизаторы – устройства, обеспечивающее малые изменения выходного напряжения.

Существуют два типа стабилизаторов: *параметрические* и *компенсационные*. В параметрических стабилизаторах напряжения используют нелинейные элементы, имеющие участок ВАХ, на котором напряжение остается неизменным при изменении тока. Такой участок имеет обратная ветвь ВАХ стабилизатора.

*Управляемые выпрямители однофазного и трехфазного тока.* В большинстве практических случаев выпрямители средней и большой мощности применяются не только для выпрямления переменного тока в постоянный, но должны позволять плавно регулировать среднее значение выпрямленного напряжения. Это обусловливается необходимостью стабилизации напряжения на нагрузке при изменении напряжения питающей сети или тока нагрузки, а также для регулирования напряжения для управления частотой вращения двигателей постоянного тока, при зарядке аккумуляторных батарей и т.п.

При использовании в выпрямителях неуправляемых вентилей среднее значение выпрямленного напряжения, пропорционально напряжению  $U_2$ . Регулирование величины в этом случае сводится к изменению напряжения  $U_2$  на вторичной стороне трансформатора с помощью отпаек, что не всегда удобно и сложно. Более широкое применение для регулирования напряжения на нагрузке получил способ, основанный на управлении во времени моментом отпирания вентилей выпрямителя за интервал проводимости. Он базируется на использовании в схеме выпрямителя управляемых вентилей - тиристоров, в связи с чем такой выпрямитель называют управляемым. Однофазные управляемые выпрямители выполняются по схеме и нулевым выводом трансформатора и мостовой схеме.

## Электронные усилители

При решении многих инженерных задач возникает необходимость в усилении электрических сигналов. Для этой цели служат усилители, т.е. устройства, предназначенные для усиления напряжения, тока и мощности. В усилителях обычно используют биполярные и полевые транзисторы и интегральные микросхемы.

Простейшим усилителем является усилительный каскад.

Состав простейшего усилительного каскада:

- УЭ – нелинейный управляемый элемент (биполярный или полевой транзистор);
- R – резистор;
- E – источник электрической энергии.

Усиление основано на преобразовании электрической энергии источника постоянной э.д.с. E в энергию выходного сигнала за счет изменения сопротивления УЭ по закону, задаваемому входным сигналом.

Основные параметры усилительного каскада:

- Коэффициент усиления по напряжению
- Коэффициент усиления по току
- Коэффициент усиления по мощности.

В зависимости от диапазона усиливаемых частот входных сигналов усилители подразделяют:

- УПТ (усилители постоянного тока) - для усиления медленно изменяющихся сигналов;
- УНЧ (усилители низкой частоты) - для усиления сигналов в диапазоне звуковых частот (20-20000 Гц);
- УВЧ (усилители высокой частоты) - для усиления сигналов в диапазоне частот от десятков килогерц до десятков и сотен мегагерц;
- Импульсные/широкополосные - для усиления импульсных сигналов, имеющих спектр частот от десятков герц до сотен мегагерц;
- Узкополосные/избирательные - для усиления сигналов в узком диапазоне частот.

По способу включения усилительного элемента разделяют:

В случае применения биполярного транзистора в качестве усилительного элемента:

- С общей базой
- С общим эмиттером
- С общим коллектором

В случае использования полевого транзистора:

- С общим истоком
- С общим стоком
- С общей базой

*Усилительный каскад на полевом транзисторе*

Усилительные каскады на полевых транзисторах обладают большим входным сопротивлением.

В этом каскаде резистор  $R_c$ , с помощью которого осуществляется усиление, включен в цепь стока. В цепь истока включен резистор  $R_n$ , создающий необходимое падение напряжения в режиме покоя  $U_{30}$ , являющееся напряжением смещения между затвором и истоком.

Резистор в цепи затвора  $R_3$  обеспечивает в режиме покоя равенство потенциалов затвора и общей точки усилительного каскада. Следовательно, потенциал затвора ниже потенциала истока на величину падения напряжения на резисторе  $R_n$  от постоянной составляющей тока  $I_{n0}$ . Таким образом, потенциал затвора является отрицательным относительно потенциала истока.

Входное напряжение подается на резистор  $R_3$  через разделительный конденсатор  $C$ . При подаче переменного входного напряжения в канале полевого транзистора появляются переменные составляющие тока истока  $i_{ni}$  и тока стока  $i_{nc}$ , причем  $i_{ni} = i_{nc}$ . За счет падения напряжения на резисторе  $R_n$  от переменной составляющей тока  $i_{ni}$ , переменная составляющая напряжения между затвором

и истоком, усиливается полевым транзистором, может быть значительно меньше входного напряжения:  $u_3 = u_{вх} - R_{и} i_{и}$

Это явление, называемое отрицательной обратной связью, приводит к уменьшению коэффициента усиления усилительного каскада. Для его устранения параллельно резистору  $R_{и}$  включают конденсатор  $C_{и}$ , сопротивление которого на самой низкой частоте усиливаемого напряжения должно быть во много раз меньше сопротивления резистора  $R_{и}$ . При этом условие падения напряжения от тока истока  $i_{и}$  на цепочке  $R_{и}-C_{и}$ , называемой звеном автоматического смещения, очень небольшое, так что по переменной составляющей тока исток можно считать соединенным с общей точкой усилительного каскада.

Выходное напряжение снимается через конденсатор связи  $C_c$  между стоком и общей точкой каскада, т.е. оно равно переменной составляющей напряжения между стоком и истоком.

### Электронные генераторы

Электронные генераторы - это устройства, преобразующие электрическую энергию источника постоянного тока (источника питания) в энергию электрических колебаний заданной формы и частоты.

Форма электрических колебаний может быть различной. Генераторы, формирующие синусоидальные колебания, называются *генераторами синусоидальных*, или *гармонических* колебаний.

Если форма колебаний отличается от синусоидальной (прямоугольные, треугольные, пилообразные и т.д.), то такие генераторы называются *импульсными*, или *релаксационными*.

По принципу управления генераторы разделяются на две группы – генераторы с *самовозбуждением* (*автогенераторы*) и генераторы с *внешним (независимым) возбуждением*. Последние, по существу, являются усилителями мощности высокой частоты, работающими на резонансную нагрузку и здесь рассматриваться не будут.

Схема автогенератора обычно содержит усилитель, охваченный обратной связью. Для построения автогенератора синусоидальных колебаний элементы схем либо усилителя, либо ОС должны обладать явно выраженными частотными свойствами. Наиболее часто используются два типа усилительных схем – с резонансными (колебательными) контурами и с резистивно-емкостными цепями. Автогенераторы, выполненные на основе схемы резонансного усилителя, часто называют автогенераторами типа **LC**, а автогенераторы, построенные на основе схемы усилителя на **RC** цепях, – автогенераторами типа **RC** или **RC** генераторы. Генерирование колебаний с частотами меньше 15 – 20 кГц на резонансных **LC** контурах затруднено и неудобно из-за их громоздкости. В низкочастотном диапазоне широко используются генераторы типа **RC**. Они могут генерировать весьма стабильные синусоидальные колебания в сравнительно широком диапазоне частот от долей герца до сотен килогерц. Кроме того, они имеют малые габариты и массу. Конечно, наиболее полно преимущества генераторов типа **RC** проявляются в области низких частот.

Генераторы гармонических колебаний представляют собой электронные устройства, формирующие на своем выходе периодические гармонические колебания при отсутствии входного сигнала. Генерирование выходного сигнала осуществляется за счет энергии источника питания. Со структурной точки зрения генераторы представляют собой усилители электрических сигналов, охваченные ПОС.

Генераторы импульсных сигналов, или генераторы импульсов, предназначены для получения от источника питания постоянного напряжения электрических колебаний резко несинусоидальной формы, называемых релаксационными. Для таких колебаний характерно наличие участков сравнительно медленного изменения напряжения и участков, на которых напряжение изменяется скачкообразно. В этом случае закон изменения напряжения (тока) приближенно описывается функцией с разрывом первого рода.

Для импульсных генераторов характерно наличие внешней или внутренней положительной обратной связи, обуславливающей возможность их самовозбуждения и скоротечный (лавинообразный, регенеративный) процесс перехода активных элементов генератора из одного крайнего (закрытого, открытого) в другое (открытое, закрытое) состояние. Во время такого лавинообразно-

го процесса происходит быстрое (скачкообразное) изменение напряжения (тока) на некоторых элементах генератора.

Импульсные генераторы делятся на генераторы прямоугольных, трапецеидальных, треугольных, пилообразных импульсов и импульсов некоторых других форм. В импульсной технике вычислительных устройств и устройств автоматики чаще всего используются генераторы прямоугольных и пилообразных импульсов, а также их разновидности, с разными соотношениями длительности импульсов и их фронтов - трапецеидальные и треугольные.

Импульсные генераторы могут работать в трех основных режимах: автоколебательном, ждущем и в режиме синхронизации.

Автоколебательные генераторы импульсов после самовозбуждения генерируют последовательность импульсов, параметры которых (амплитуда, частота повторения, длительность, скважность) определяются только параметрами элементов схемы генератора.

Ждущие (заторможенные) генераторы генерируют импульсы, период повторения которых определяется периодом повторения запускающих импульсов, а параметры каждого импульса (амплитуда, длительность, форма) зависят только от параметров схемы генератора.

В режиме синхронизации генератор вырабатывает импульсы, частота которых равна или кратна частоте синхронизирующего сигнала. Поэтому такие генераторы часто используются в качестве делителей частоты. Наряду с генераторами импульсов, вырабатывающими одну или две последовательности импульсов, находящихся в противофазе, применяются генераторы, предназначенные для получения нескольких импульсных последовательностей, сдвинутых по фазе друг относительно друга на некоторую произвольную величину, в общем случае не равную  $180^\circ$ . Такие генераторы называются генераторами многофазных импульсов или просто многофазными.

Принцип построения генераторов импульсов основан на использовании усилителей-четырёхполюсников с положительной обратной связью или двухполюсников, вольт-амперная характеристика которых имеет падающий участок, обуславливающий отрицательное дифференциальное сопротивление двухполюсника. При этом быстропротекающие (лавинообразные, регенеративные) процессы формирования фронта и среза импульсов определяются параметрами активного четырёхполюсника или двухполюсника, а сравнительно медленные процессы, связанные с формированием длительности импульсов и паузы между импульсами (для автоколебательных генераторов импульсов), определяются в основном параметрами специально используемых времязадающих (хронирующих) цепей. В четырёхполюсниках эти цепи служат одновременно элементами внешней положительной обратной связи и включаются между входами и выходами активных элементов, составляющих эти четырёхполюсники. В качестве времязадающих можно использовать ёмкостно-резисторные или индуктивно-резисторные линейные формирующие цепи, линии задержки и колебательные контуры. В большинстве генераторов импульсов в качестве времязадающих используются **RC** - цепи, что объясняется их простотой и технологичностью изготовления. Индуктивно-резисторные цепи и колебательные **LC**-контуры используются существенно реже и в основном в генераторах импульсов на активных двухполюсниках, что объясняется плохой технологичностью катушек индуктивности.

Кроме времязадающих цепей, структура генераторов импульсов, как правило, содержит источник постоянного напряжения, пороговые элементы и ключи.

В однофазных генераторах (генераторах с одним выходом) времязадающая цепь используется для формирования, как импульса, так и паузы. В парафазных генераторах (генераторах с двумя взаимноинверсными выходами, импульсные последовательности на которых сдвинуты друг относительно друга на  $180^\circ$ ) применяются две времязадающие цепи, одна из которых используется для формирования импульса на одном выходе и соответственно паузы на втором выходе, а вторая, наоборот, для формирования импульса на втором выходе и соответственно паузы на первом выходе.

Различные типы генераторов отличаются друг от друга видами времязадающих цепей, пороговых и ключевых элементов, а также видами медленных переходных процессов во времязадающих цепях, от которых зависит длительность импульсов или их период следования.

Генераторы линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) представляют собой электронные устройства, напряжение на выходе которых в течение некоторого времени изменяется по линейному закону. Часто такое напряжение меняется периодически.

Если напряжение изменяется от меньшего значения к большему (по абсолютному значению), то его называют *линейно нарастающим*, если от большего значения к меньшему, то - *линейно падающим*. Периодически изменяющееся напряжение называют пилообразным. Подобные генераторы широко применяются в аппаратуре связи, телевидении, радиолокации. Наиболее часто их используют для создания временной развертки луча в электронно-лучевых трубках осциллографов, телевизоров и т. п.

### Операционные усилители

Интегральный усилитель широкого применения с большим коэффициентом усиления в широкой полосе частот, начиная с нулевой частоты, называется операционным усилителем (ОУ). ОУ используются в реальных системах управления для усиления слабых сигналов, в корректирующих устройствах, для практической реализации и моделирования элементов и систем автоматики. Его условное графическое изображение приведено на рис.1. Два вывода ОУ используются в качестве входных, один вывод является выходным. С учетом фазовых соотношений входного и выходного сигналов один из входных выводов (верхний на рис.6.24) называется *неинвертирующим (прямым) входом*, а другой (нижний, с кружочком) – *инвертирующим (инверсным) входом*. Входы работают следующим образом: выходной сигнал изменяется в положительном направлении, когда потенциал на прямом входе становится более положительным, чем потенциал на инверсном входе, и наоборот. На схемах часто не показывают подключение источников питания к ОУ и вывод, предназначенный для заземления. При подключении к ОУ сопротивления нагрузки  $R_n$  возникает выходной ток  $I_{вых} = U_{вых} / R_n$ .

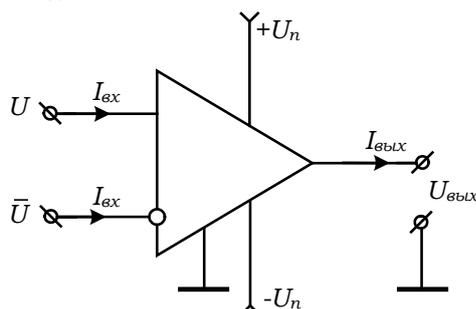


Рис.1..

Операционный усилитель – это аналоговое устройство усиления разности напряжений

$$\Delta U = U - \bar{U}$$

на его прямом ( $U$ ) и инверсном ( $\bar{U}$ ) входах:

$$U_{вых} = K_y \cdot \Delta U,$$

где  $K_y$  – коэффициент усиления.

Операционный усилитель имеет очень большой коэффициент усиления по напряжению и никогда (за редким исключением) не используются без обратной связи. В практических расчетах ОУ можно рассматривать как идеальный усилитель и пользоваться двумя важнейшими правилами, являющимися ключевыми условиями анализа и синтеза схем на операционных усилителях.

1. Выходное напряжение ОУ стремится к тому, чтобы разность напряжений между его входами была равна нулю.

2. Входные цепи ОУ токов не потребляют.

Первое правило вытекает из того, что ОУ имеет такой большой коэффициент усиления, что изменение напряжения между его входами на несколько долей милливольт вызывает изменение

выходного напряжения в пределах его полного диапазона. Можно считать, что разность входных напряжений равна нулю

$$\Delta U = 0$$

при любом выходном напряжении и переносить известное напряжение с одного выхода на другой. Наличие второго правила объясняется чрезвычайно большим значением входного сопротивления ОУ.

Свойства идеального ОУ позволяют использовать его для *токовой развязки* каскадов друг от друга.

Обратные связи широко используются в схемах на операционных усилителях (ОУ). Более того, ОУ были созданы для того, чтобы совместно с цепями обратной связи (ОС) применять их для выполнения операций над сигналами.

Рассмотрим схему (рис.2), которая инвертирует входное напряжение, если сопротивления во входной цепи и цепи обратной связи являются резисторами. Мы будем рассматривать операторную схему с ОУ.

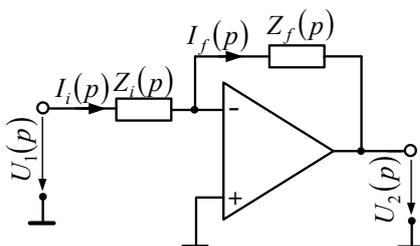


Рис.2. Схема инвертирующего каскада

Составим уравнение для левого контура с учетом второго правила:

$$U_1(p) = Z_i(p)I_i(p).$$

Из уравнения получаем:

$$I_i(p) = \frac{U_1(p)}{Z_i(p)}.$$

Учитывая первое правило, запишем:

$$I_f(p) = I_i(p) = \frac{U_1(p)}{Z_i(p)}.$$

Уравнение для правого контура имеет вид:

$$U_2(p) + Z_f(p)I_f(p) = 0 \quad \text{или} \quad U_2(p) = -Z_f(p)I_f(p) = -Z_f(p)\frac{U_1(p)}{Z_i(p)}.$$

Операторный коэффициент передачи по напряжению каскада:

$$K_U(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} \quad \text{или} \quad K_U(p) = -\frac{Z_f(p)}{Z_i(p)}.$$

Рассмотрим схему (рис. 3), в цепь обратной связи которой включена параллельная *RC*-цепочка, а на входе схемы – резистор. На низких частотах емкость представляет собой большое сопротивление, и при условии  $R_i = R_f$  получим инвертирующий повторитель. При высоких частотах емкостное сопротивление мало, и напряжение на выходе намного меньше входного. Это означает, что данная схема может представлять собой ФНЧ.

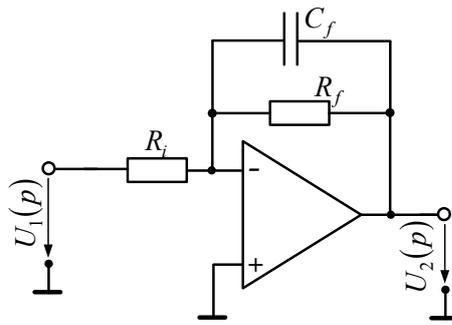


Рис.3. Схема ФНЧ на ОУ

Выведем формулу для операторного коэффициента передачи по напряжению, а затем получим комплексную передаточную частотную характеристику:

$$Z_i(p) = R_i; \quad Z_f(p) = \frac{R_f \cdot \frac{1}{pC_f}}{R_f + \frac{1}{pC_f}} = \frac{R_f}{pR_fC_f + 1};$$

$$K_U(p) = -\frac{Z_f(p)}{Z_i(p)} = -\frac{R_f}{R_i} \cdot \frac{R_f}{pR_fC_f + 1}.$$

Выполняя подстановку  $p = j\omega$  и принимая  $R_f = R_i$ , получим комплексную частотную характеристику для ФНЧ:

$$K_U(j\omega) = -\frac{R_f}{1 + j\omega R_f C_f}.$$

Модуль КЧХ:

$$K_U = \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega R_f C_f)^2}}.$$

Полосой пропускания ФНЧ называется диапазон частот от 0 до частоты среза. На частоте среза модуль коэффициента передачи равен  $K_U = \frac{1}{\sqrt{2}}$ . Это приводит к условию:

$$\omega_c R_f C_f = 1.$$

Задавая частоту среза и выбирая произвольно резистивное сопротивление, получим формулу для емкости:

$$C_f = \frac{1}{\omega_c R_f} = \frac{1}{2\pi f_c R_f} = \frac{0,159}{f_c R_f}.$$

Если в этой формуле частоту брать в кГц, а сопротивление – в кОм, то емкость получится в мкФ.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Задачей практических занятий является изучение методов расчета типовых задач, а также практическое осмысление основных теоретических положений курса. При решении задач обращается внимание на логику решения, на физическую сущность используемых величин, их размерность. Далее проводится анализ полученного решения, результат сопоставляется с реальными объектами, что вырабатывает у студентов инженерную интуицию.

Цель практических занятий – научить динамическому и математическому моделированию статических и динамических процессов, происходящих в электротехнических системах, на примере решения типовых задач.

Перед практическим занятием необходимо изучить материал, изложенный на лекции и выполнить самостоятельную работу, предусмотренную рабочей программой. Для этого используются: конспект лекций, соответствующие разделы печатных и электронных учебников, ответы на вопросы для самоконтроля знаний. После практического занятия самостоятельно решить рекомендованные задачи.

### Анализ и расчет простых цепей постоянного тока

Рассмотрим электрическую цепь, схема которой изображена на рис. 1. Пусть известны значения сопротивления резисторов  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ , э. д. с.  $E$  и ее внутреннее сопротивление  $R_0$ . Требуется определить токи во всех участках цепи и напряжение, которое покажет вольтметр (сопротивление его бесконечно велико), включенный между точками схемы  $a$  и  $d$ .

Такие задачи решаются методом свертывания схемы, по которому отдельные участки схемы упрощают и постепенным преобразованием приводят схему к одному эквивалентному (входному) сопротивлению относительно зажимов источников питания. Схема упрощается с помощью замены группы последовательно или параллельно соединенных резисторов одним эквивалентным по сопротивлению. Так, резисторы  $R_4$  и  $R_5$ , соединены последовательно, а резистор  $R_6$  - с ними параллельно, поэтому их эквивалентное сопротивление

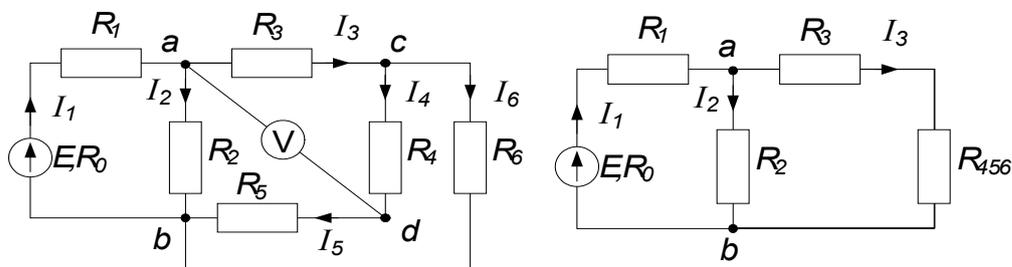


Рис. 1

Рис. 2

$$\text{где } R_{456} = R_4 + R_5 \quad R_{456} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}$$

После произведенных преобразований схема принимает вид, показанный на рис. 2, а эквивалентное сопротивление всей цепи найдем из уравнения

$$R_{\Sigma} = R_0 + R_1 + \frac{R_2(R_3 + R_{456})}{R_2 + R_3 + R_{456}}$$

Ток  $I_1$  в неразветвленной части схемы определим по закону Ома:  $I_1 = E/R_{\Sigma}$

Воспользовавшись схемой (рис. 2), найдем токи  $I_2$  и  $I_3$ .

$$I_2 = I_1 \frac{R_3 + R_{456}}{R_2 + R_3 + R_{456}} \quad I_3 = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_{456}}$$

Переходя к рис. 1, определим токи  $I_4, I_5$  и  $I_6$  по аналогичным уравнениям:

$$I_4 = I_5 = I_3 \frac{R_6}{R_4 + R_5 + R_6} \qquad I_6 = I_3 \frac{R_4 + R_5}{R_4 + R_5 + R_6}$$

Зная ток  $I_1$ , можно найти ток  $I_2$  по-другому. Согласно второму закону Кирхгофа:

$$U_{ab} = E - (R_0 + R_1)I_1, \text{ тогда } I_2 = U_{ab}/R_2.$$

Показания вольтметра можно определить, составив уравнение по второму закону Кирхгофа, например, для контура  $acda$ :  $R_3I_3 + R_4I_4 = U_{ad}$ .

Для проверки решения можно воспользоваться первым законом Кирхгофа и уравнением баланса мощностей, которые для схемы, изображенной на рис. 1, примут вид

$$I_1 = I_2 + I_3; \quad I_3 = I_4 + I_6;$$

$$EI_1 = (R_0 + R_1)I_1^2 + R_2I_2^2 + R_3I_3^2 + (R_4 + R_5)I_4^2 + R_6I_6^2.$$

Электрические цепи с одним источником можно рассчитывать методом подобия (метод пропорциональных величин), который применим только для расчета линейных цепей, т.е. цепей неизменными значениями сопротивлений. Воспользуемся свойствами линейных цепей для определения токов схемы, изображенной на рис. 1, в такой последовательности: задаемся произвольным значением тока  $I_6'$  в резисторе  $R_6$ , наиболее удаленном от источника питания. По заданному току  $I_6'$  и сопротивлению резистора  $R_6$  определяем напряжение

$$U_{cb}' = R_6I_6'.$$

Далее определяем

$$I_4' = I_5' = U_{cb}' / (R_4 + R_5); \quad I_3' = I_4' + I_6';$$

$$U_{ac}' = R_3I_3'; \quad U_{ab}' = U_{ac}' + U_{cb}';$$

$$I_2' = U_{ab}' / R_2; \quad I_1' = I_2' + I_3'.$$

Наконец, находим

$$\text{значение э.д.с. } E': \quad E' = (R_0 + R_1)I_1' + R_2I_2'.$$

Однако найденное значение э. д. с.  $E'$  в общем случае отличается от заданной величины э. д. с.  $E$ . Поэтому для определения действительных значений токов и напряжений вычисляем так называемый коэффициент подобия  $K = E/E'$ . Умножив на него полученные при расчете значения токов и напряжения, находим действительные значения токов цепи. Метод пропорциональных величин особенно эффективен при расчете разветвленных линейных электрических цепей с одним источником.

Рассмотрим электрическую цепь, схема которой изображена на рис. 3.

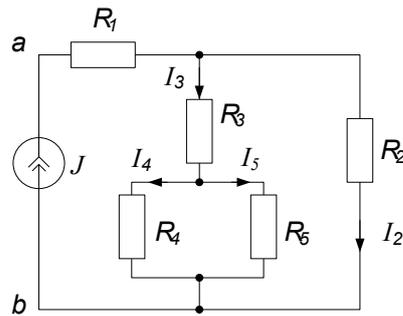


Рис. 3

К источнику тока  $J=0,1$  А подключены резисторы с сопротивлениями  $R_1=12$  Ом;  $R_2=10$  Ом;  $R_3=16$  Ом;  $R_4=40$  Ом;  $R_5=60$  Ом. Определить напряжение  $U_{ab}$  источника тока и все токи. Составить баланс мощностей. Задача решается методом свертывания схемы. Находим входное сопротивление  $R_{ab}$  схемы относительно зажимов источника тока:

$$R_{ab} = R_1 + \frac{R_2 \left( R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \right)}{R_2 + R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}} = 12 + \frac{10 \left( 16 + \frac{40 \cdot 60}{40 + 60} \right)}{10 + 16 + \frac{40 \cdot 60}{40 + 60}} = 20 \text{ Ом}$$

Находим напряжение на зажимах источника  $U_{ab}$ :

$$U_{ab} = R_{ab}J = 20 \cdot 0,1 = 2 \text{ В.}$$

По закону Ома находим ток  $I_2$ :

$$I_2 = \frac{U_{ab} - R_1 J}{R_2} = \frac{2 - 0,1 \cdot 12}{10} = 0,08 \text{ А.}$$

Ток  $I_3$  определяем из уравнения закона Кирхгофа:

$$I_3 = J - I_2 = 0,1 - 0,08 = 0,02 \text{ А.}$$

Этот ток распределяется обратно пропорционально сопротивлениям  $R_4$  и  $R_5$ :

$$I_4 = I_3 \frac{R_5}{R_4 + R_5} = 0,012 \text{ А;} \quad I_5 = I_3 \frac{R_4}{R_4 + R_5} = 0,008 \text{ А.}$$

Уравнение баланса мощностей отражает равенство мощностей, отдаваемой источником и расходуемой приемниками, т. е.

$$U_{ab}J = R_1 I_2^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 =$$

$$= 2 \cdot 0,1 = 12 \cdot 0,12^2 + 10 \cdot 0,082^2 + 16 \cdot 0,02^2 + 40 \cdot 0,012^2 + 60 \cdot 0,0082^2 = 0,2 \text{ Вт,}$$

следовательно,

$$P_{ист} = P_{пот} = 0,2 \text{ Вт.}$$

### Анализ и расчет сложных цепей постоянного тока

#### а) Метод уравнений Киргофа

Важным вопросом этого раздела является расчет распределения токов в сложных линейных цепях с несколькими источниками. Классическим методом расчета таких цепей является непосредственное применение законов Кирхгофа. Все остальные методы расчета исходят из этих фундаментальных законов электротехники.

Рассмотрим сложную электрическую цепь (рис. 4), которая содержит шесть ветвей. Если будут заданы значения всех э. д. с. и сопротивлений резисторов, а по условию задачи требуется определить токи в ветвях, то имеем задачу с шестью неизвестными.

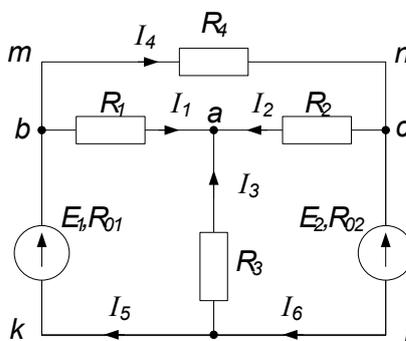


Рис. 4

Такие задачи решаются с помощью законов Кирхгофа. В этом случае должно быть составлено столько уравнений, сколько неизвестных токов. Порядок расчета следующий.

1. Если цепь содержит последовательные и параллельные соединения, то ее упрощают, заменяя эти соединения эквивалентными.

2. Произвольно указывают направления токов во всех ветвях. Если принятое направление тока не совпадает с действительным, то при расчете такие токи получаются со знаками минус.

3. Составляют  $(n-1)$  уравнений по первому закону Кирхгофа ( $n$  — число узлов).

4. Недостающие уравнения в количестве  $m-(n-1)$ , где  $m$  — число ветвей, составляют по второму закону Кирхгофа, при этом обход контура можно производить как по часовой стрелке, так и против нее. За положительные э. д. с. и токи принимаются такие, направление которых совпадает с направлением обхода контура. Направление действия э. д. с. внутри источника всегда принимают от минуса к плюсу (см. рис. 4).

5. Полученную систему уравнений решают относительно неизвестных токов.

Составим расчетные уравнения для электрической цепи, изображенной на рис. 4. Выбрав произвольно направление токов в ветвях цепи, составляем уравнение по первому закону Кирхгофа для  $a, b, c$ :

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 &= 0, \\ I_5 - I_1 - I_4 &= 0, \\ I_4 - I_2 - I_6 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Приняв направление обхода контуров по часовой стрелке, составляем уравнения по второму закону Кирхгофа для трех произвольно выбранных контуров:

для контура  $aadkba$   $E_1 = R_1 I_1 - R_3 I_3 + R_{01} I_5$ ; (2)

для контура  $abacldkb$   $E_1 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_{01} I_5 + R_{02} I_6$ ; (3)

для контура  $abmncab$   $0 = R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_4 I_4$ . (4)

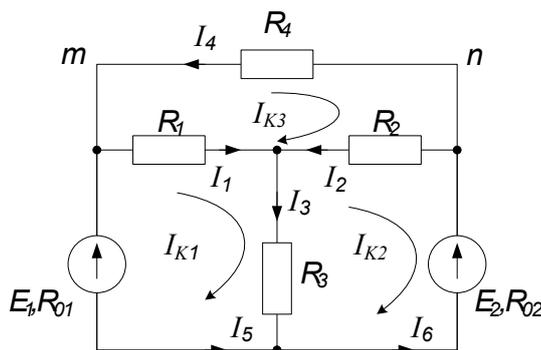
Решая совместно уравнения (1), (2), (3) и (4), определяем токи в ветвях электрической цепи.

*б) Метод контурных токов*

Легко заметить, что решение полученной системы из шести уравнений является весьма трудоемкой операцией. Поэтому при анализе электрических цепей с несколькими источниками целесообразно применять метод контурных токов, позволяющий уменьшить число совместно решаемых уравнений, составляемых по двум законам Кирхгофа, на число уравнений, записанных по первому закону Кирхгофа. Следовательно, число уравнений, составляемых по методу контурных токов, равно  $m-n+1$ . При решении этим методом количество уравнений определяется числом независимых контуров. В данном случае таких контуров три:  $badkb, aclda, mncabm$ .

Расчет сложных электрических цепей методом контурных токов ведется следующим образом:

1. Вводя понятие произвольно задаёмся направлениями. Удобнее все токи выбрать, например по часовой



«контурный ток», произведением этих токов в контуре указать в одном направлении по часовой стрелке (рис. 5).

Рис.5

2. Составляем для каждого контура уравнение по второму закону Кирхгофа. Обход контуров производим по часовой стрелке:

первый контур  $E_1 = (R_{01} + R_1 + R_3)I_{K1} - R_3 I_{K2} - R_1 I_{K3}$ ; (5)

второй контур  $-E_2 = -R_3 I_{K1} + (R_{02} + R_2 + R_3)I_{K2} - R_2 I_{K3}$ ; (6)

третий контур  $0 = -R_1 I_{K1} - R_2 I_{K2} + (R_{01} + R_1 + R_3)I_{K3}$ ; (7)

3. Решая совместно уравнение (5), (6), (7), определяем контурные токи. В том случае, когда контурный ток получается со знаком минус, это означает, что его направление противоположно выбранному на схеме.

4. Токи во внутренних ветвях схемы определяются как сумма или разность соответствующих контурных токов. В том случае, когда контурные токи в ветви совпадают, берут сумму, а когда направлены навстречу — из большего тока вычитают меньший.

5. Токи во внешних ветвях схемы по значению равны соответствующим контурным токам.

На практическом занятии необходимо решить разноуровневые задачи по пройденному лекционному материалу. Примерный перечень задач приведен ниже. Рекомендуемая литература и

дополнительный теоретический материал представлены в рабочей программе дисциплины «Электротехника и электроника».

**Задача 1.** Найти токи в цепи, схема которой изображена на рис. 5. Дано:  $E_1 = 100$  В,  $E_2 = 120$  В,  $R_{01} = R_{02} = 0,5$  Ом,  $R_1 = 5$  Ом,  $R_2 = 10$  Ом,  $R_3 = 2$  Ом,  $R_4 = 10$  Ом. Определить токи в ветвях цепи.

**Задача 2.** Определить токи и составить баланс мощностей для схемы, изображенной на рис. 6. Дано:  $J = 50$  мА;  $E_1 = 60$  В;  $R_1 = 5$  кОм;  $R_2 = 4$  кОм;  $R_3 = 16$  кОм;  $R_4 = 2$  кОм;  $R_5 = 8$  кОм.

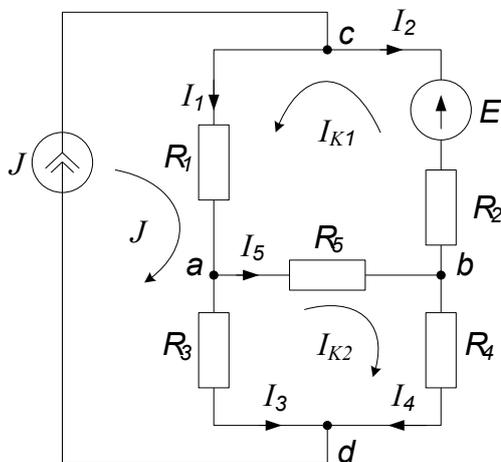


Рис. 6

в) Метод узловых потенциалов

В промышленной электронике, автоматике часто используют цепи, схема которых изображена на рис. 7. Такие схемы удобно анализировать с помощью метода узлового напряжения (напряжения между двумя узлами).

**Задача 3.** Найти токи и показание вольтметра в цепи, схема которой приведена на рис. 7, если  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10$  Ом.

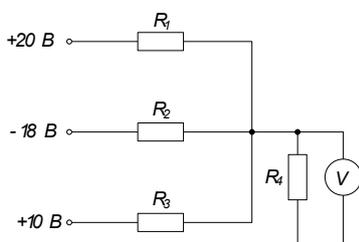


Рис. 7

### Анализ и расчет простых цепей переменного синусоидального тока

Изучая явления резонанса, необходимо усвоить следующее. При резонансе напряжение и ток на зажимах цепи всегда совпадают по фазе. Настройка же цепи на резонанс зависит от схемы соединения индуктивности и емкости. Для последовательной цепи условием резонанса является равенство индуктивного и емкостного сопротивлений:  $X_L = X_C$ . Для цепи, содержащей параллельный контур, в одной из ветвей которого находится индуктивная катушка, а в другой - конденсатор, условием резонанса является равенство реактивных проводимостей ветвей:  $\omega L = \omega C$ .

При расчете цепей синусоидального тока приходится совершать различные математические операции, которые удобно производить над действующими значениями токов и напряжений, рассматривая их как векторы. Значения векторов при этом равны действующим токам и напряжениям, а начальная фаза определяет положение вектора относительно положительной горизонтальной оси координат. При положительной (опережающей) начальной фазе вектор повернут на соответствующий угол против движения часовой стрелки, а при отрицательной (отстающей) - по направ-

лению движения часовой стрелки. Векторной диаграммой называют совокупность векторов, изображающих синусоидальные э. д. с, напряжения и токи одной частоты, выходящих из общей точки.

Для цепей синусоидального тока обычно строят потенциальную (топографическую) диаграмму, каждая точка которой соответствует определенной точке электрической цепи. Чтобы осуществить это соответствие точек диаграммы и цепи, построение потенциальной диаграммы ведут в той же последовательности, в какой обходят метрическую цепь. Обычно направление обхода выбирают противоположным принятому направлению тока в цепи. Для наглядности в некоторых случаях векторные и потенциальные диаграммы объединяют в одну. Необходимо обратить особое внимание на направление векторов на потенциальных диаграммах. Векторы напряжений направлены относительно точек потенциальной диаграммы противоположно положительным направлениям напряжений относительно соответствующих точек цепи. Ценность потенциальной диаграммы состоит в том, что она позволяет определять напряжения между любыми точками цепи. Для этого следует соединить соответствующие точки потенциальной диаграммы отрезком прямой и придать этому отрезку соответствующее направление.

С помощью потенциальной диаграммы удобно производить сложение напряжений, возникающих на отдельных участках последовательной цепи (второй закон Кирхгофа), и сложение токов, протекающих в ветвях параллельной цепи (первый закон Кирхгофа).

При построении векторных диаграмм один из векторов принимают за основной (опорный), располагая его обычно по положительному направлению горизонтальной оси. В этом случае начальная фаза тока или напряжения в зависимости от того, что данный вектор изображает, равна нулю. Для последовательной цепи за основной вектор принимают вектор тока, а для параллельной - вектор напряжения.

На рис. 9 показаны последовательная цепь (рис. 9, а) и ее векторная (рис. 9, б) и потенциальная (рис. 9, в) диаграммы. На рис. 10, а в той же последовательности, что и на рис. 9, показаны параллельная цепь и ее векторная и потенциальная диаграммы.

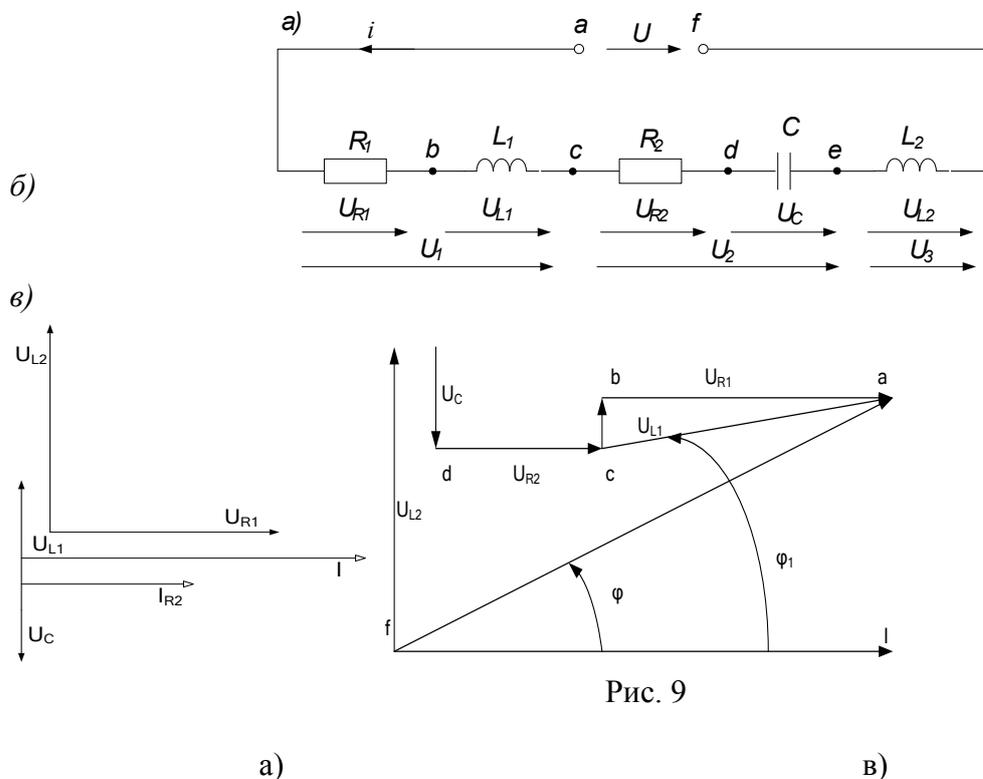


Рис. 9

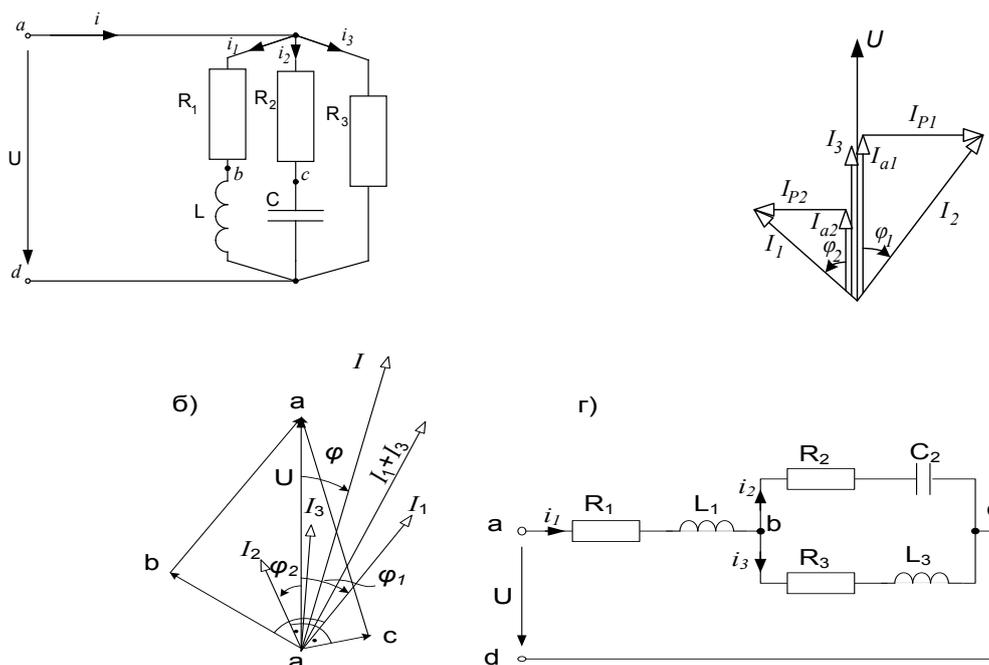


Рис.10

В том случае, когда сложение или вычитание вектора требуется производить не графически, а математически (например, при расчете электрической цепи), векторы раскладывают на две составляющие, одна из которых называется активной, а вторая – реактивной. Активная составляющая напряжения совпадает по фазе с током, а реактивная - опережает ток или отстает от него по фазе на  $90^\circ$ . Активная составляющая тока совпадает по фазе с напряжением, а реактивная - опережает напряжение или отстает от него по фазе на  $90^\circ$ . Зная сдвиг между током и напряжением и значения векторов тока и напряжения, легко определить соответствующие составляющие этих векторов.

Например, если нам задан синусоидально изменяющийся ток уравнением вида  $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ , то его активная и реактивная составляющие для действующего значения соответственно равны:  $I_a = I \cos \varphi$ ;  $I_p = I \sin \varphi$ , где  $I = I_m / \sqrt{2}$ .

Аналогично для напряжений:  $U_a = U \cos \varphi$ ;  $U_p = U \sin \varphi$ .

На диаграмме, изображенной на рис. 10, б, показаны активные и реактивные составляющие токов.

В том случае, когда необходимо произвести сложение двух или более векторов, выражающих собой токи или напряжения, определяют их активные и реактивные составляющие и модуль результирующего вектора:

$$I = \sqrt{(\sum I_a)^2 + (\sum I_L - \sum I_C)^2};$$

$$U = \sqrt{(\sum U_a)^2 + (\sum U_L - \sum U_C)^2},$$

где индексы  $L$  и  $C$  указывают на характер реактивной составляющей (индуктивность или емкость). Начальная фаза результирующего вектора определяется через  $\operatorname{tg} \varphi$ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sum I_L - \sum I_C}{\sum I_a} = \frac{\sum U_L - \sum U_C}{\sum U_a}.$$

Для практических расчетов удобнее выражать векторы тока и напряжения, а также сопротивления и проводимости комплексными числами, в которых активные составляющие являются действительными значениями, а реактивные - мнимыми. Причем знак у мнимого значения зависит от характера реактивной составляющей. При расчете электрических цепей переменного тока с помощью комплексных чисел могут быть использованы методы расчета, применяемые для цепей по-

стоянного тока. Уравнения Кирхгофа в этом случае записываются как составляющие геометрические суммы.

При выполнении расчетов по методу комплексных чисел следует иметь в виду, что действительная и мнимая части комплексных сопротивлений, комплексной проводимости и комплексной мощности всегда представляют собой соответственно активную и реактивную составляющие этих величин; что же касается комплексного напряжения и комплексного тока, то такое положение имеет место лишь в частных случаях. Вещественная и мнимая части комплексных напряжения и тока определяются начальными фазами значений, иначе говоря, зависят от расположения соответствующих векторов относительно осей комплексной плоскости, тогда как их активная и реактивная составляющие определяются углом сдвига по фазе  $\varphi$  между этими двумя векторами.

При анализе магнитосвязанных электрических цепей необходимо иметь в виду, что при составлении уравнения по второму закону Кирхгофа, при учете напряжения от взаимной индукции сравнивается направление обхода рассматриваемой катушки и направление тока во влияющей на нее катушке относительно одноименных зажимов катушек. Если эти направления совпадают, то напряжение взаимной индукции учитывается в уравнении с плюсом, в противном случае - с минусом.

На практическом занятии необходимо решить разноуровневые задачи по пройденному лекционному материалу. Примерный перечень задач приведен ниже. Рекомендуемая литература и дополнительный теоретический материал представлены в рабочей программе дисциплины «Электротехника и электроника».

**Задача 1.** Рассчитать электрическую цепь синусоидального тока со смешанным соединением приемников, схема которой изображена на рис. 10, з. Дано:  $U=120$  В,  $R_1 = 10\text{Ом}$ ,  $R_2 = 24\text{Ом}$ ,  $R_3=15\text{Ом}$ ,  $L_1 = 19,1$  мГ,  $C_2 = 455$  мкФ;  $L_3 = 63,5$  мГ,  $f = 50$  Гц. Определить токи в ветвях цепи, напряжения на участках цепи активную, реактивную и полную мощности и построить векторную диаграмму на комплексной плоскости.

**Задача 2.** Определить эквивалентное комплексное сопротивление цепи (рис. 11, а), ток и напряжение между точками  $a$  и  $b$ ,  $c$  и  $d$ , если  $U=130$  В,  $R_1=2$  Ом,  $R_2=3$  Ом,  $\omega L_1 = 3$  Ом,  $\omega L_2=7$  Ом,  $\omega M = 1$  Ом.

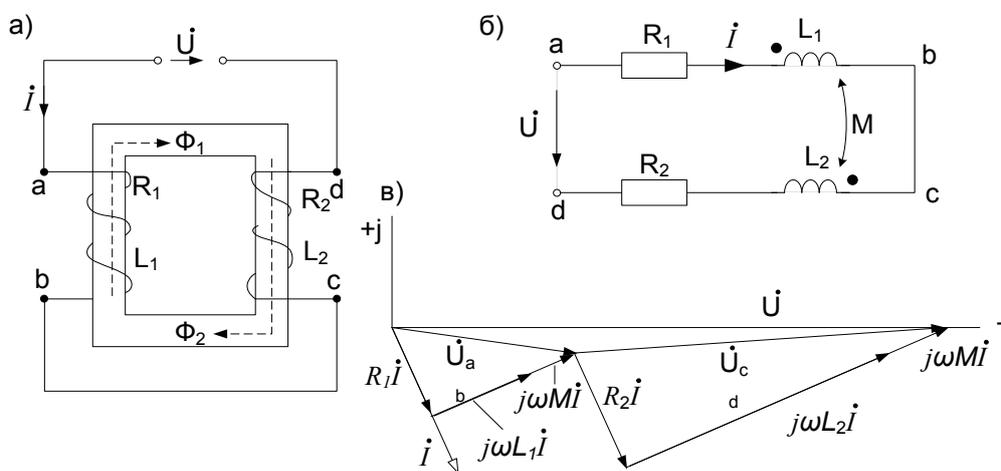


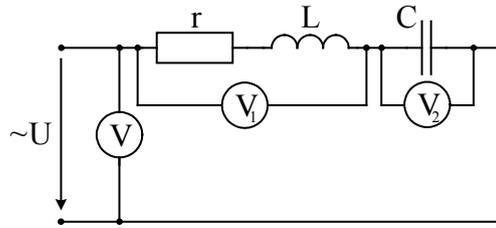
Рис.11

### Анализ и расчет сложных цепей переменного синусоидального тока

На практическом занятии необходимо решить разноуровневые задачи по пройденному лекционному материалу. Примерный перечень задач приведен ниже. Рекомендуемая литература и дополнительный теоретический материал представлены в рабочей программе дисциплины «Электротехника и электроника».

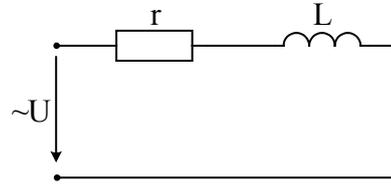
Ом.

**Задача 1.** Определить  $U_{V1}$ ,  $U_{V2}$ ,  $U_V$ , если:  
 $i = 2 \sin \omega t$ ,  $r = 10$  Ом,  $x_L = 20$  Ом,  $x_C = 10$



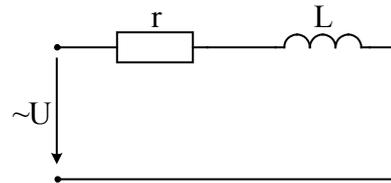
**Задача 2.** Определить  $P, Q, S$ , коэффициент мощности, если:

$U = 14 \sin \omega t$ ,  $x_L = 10$  Ом,  $r = 10$  Ом.



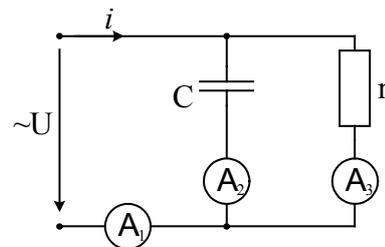
**Задача 3.** Определить  $U(t)$ , если:

$r = 5$  Ом,  $L = 40$  мГ,  
 $U_L = 240 \sin(1000t + 150)$ .



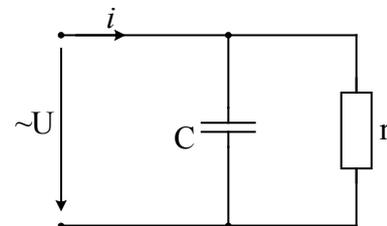
**Задача 4.** Определить  $I_2$ , если:

$I_1 = 2$  А,  $I_3 = 1.6$  А.



**Задача 5.** Определить  $x_C$  и коэффициент мощности схемы, если:

$U = 40$  В,  $I = 8$  А,  $r = 10$  Ом.



### Анализ и расчет трехфазных цепей

При изучении этого раздела особое внимание необходимо обратить на преимущества, которые дает трехфазная система по сравнению с однофазной. Рассматривая схемы соединения обмоток генераторов, надо уяснить связь между фазными и линейными напряжениями в схеме соединения звездой, а также связь между фазными и линейными токами в схеме соединения треугольником.

Необходимо четко представить, что в трехфазной цепи могут быть два режима: симметричный и несимметричный. Расчет трехфазной цепи в симметричном режиме сводится к расчету для одной фазы и производится аналогично расчету однофазной цепи с одним источником. Трехфазная цепь может рассматриваться как разветвленная цепь с тремя источниками питания, и для ее расчета применяются методы, используемые при расчете электрических цепей с несколькими источниками. Например, если несимметричный приемник соединен без нейтрального провода, то для расчета трехфазной цепи можно применить метод узлового напряжения в комплексной форме.

После изучения настоящего раздела студенты должны:

1) знать основные элементы трехфазных цепей, способы соединения фаз обмотки генератора и включения в трехфазную цепь приемников; способы изображения трехфазной симметричной системы э.д.с;

2) понимать роль нейтрального провода; принципы построения топографических диаграмм; влияние рода и схемы включения нагрузки на величину тока в нейтральном проводе, схемы электроснабжения предприятий;

3) уметь анализировать различные режимы симметричных и несимметричных цепей; читать схемы соединения трехфазных и однофазных приемников; предвидеть последствия коммутационных изменений в цепи на ее электрическое состояние.

На практическом занятии необходимо решить разноуровневые задачи по пройденному лекционному материалу. Примерный перечень задач приведен ниже. Рекомендуемая литература и дополнительный теоретический материал представлены в рабочей программе дисциплины «Электротехника и электроника».

**Задача 1.** В трехфазную сеть с линейным напряжением  $U_{\text{л}} = 220$  В включен приемник, соединенный треугольником, сопротивление каждой фазы которого  $\underline{Z} = (10 + j10)$  Ом (рис. 12). Найти токи в каждой фазе нагрузки и линии и показания каждого ваттметра. Построить векторную диаграмму. Найти те же величины при обрыве цепи в точке  $d$ .

**Решение.** Расчет токов в трехфазных цепях производится комплексным методом. Примем, что вектор линейного напряжения направлен по действительной оси, тогда

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab} = 220 \text{ В}; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc} = 220e^{-j120^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca} = 220e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Определяем фазные токи:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / \underline{Z} = 220 / (10 + j10) = 15,6e^{j-45^\circ} = 11 - j11 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{cb} = \dot{U}_{bc} / \underline{Z} = 220e^{-j120^\circ} / (10 + j10) = 15,6e^{j-165^\circ} = -15 - j4,03 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / \underline{Z} = 220e^{j120^\circ} / (10 + j10) = 15,6e^{j75^\circ} = 4,03 - j15 \text{ А}.$$

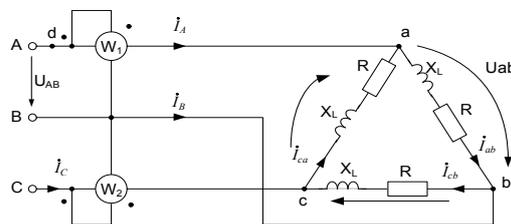


Рис.12

Находим линейные токи:

$$\dot{I}_{AB} = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 6,97 - j26 = 26,9e^{-j75^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{BC} = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = -26 + j6,97 = 26,9e^{-j165^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{CA} = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 19 + j19 = 26,9e^{j45^\circ} \text{ А}.$$

Определяем показания ваттметров:

$$P_1 = \text{Re}[\dot{U}_{AB} \dot{I}_A] = \text{Re}[220 \cdot 26,9e^{j75^\circ}] = 220 \cdot 26,9 \cos 75^\circ = 1530 \text{ Вт};$$

$$P_2 = \text{Re}[\dot{U}_{CB} \dot{I}_C] = \text{Re}[-220e^{-j120^\circ} \cdot 26,9e^{-j45^\circ}] = \text{Re}[-220e^{j60^\circ} \cdot 26,9e^{-j45^\circ}] = 220 \cdot 26,9 \cos 15^\circ = 5730 \text{ Вт}.$$

Активную мощность цепи (алгебраическая сумма показаний ваттметров)

$$P = P_1 + P_2 = 1530 + 5730 = 7260 \text{ Вт}.$$

или

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 26,9 \cos 45^\circ = 3RI_{\phi}^2 = 7260 \text{ Вт}.$$

На рис. 13 приводится векторная диаграмма напряжений и токов. При обрыве в точке  $d$  токи в фазах нагрузки будут:

$$\dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / \underline{Z} = 220e^{-j120^\circ} / (10 + j10) = -15 - j4,03 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{ab} = \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{cb} / 2\underline{Z} = -220e^{-j120^\circ} / 2(10 + j10) = 7,5 + j2,02 \text{ А}$$

Вычислим линейные токи:

$$\dot{I}_A = 0; \dot{I}_C = -\dot{I}_B = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 22,5 + j6,05 = 23,3e^{j15^\circ} \text{ A.}$$

Находим показания ваттметров:

$$P_1 = 0; P_2 = \text{Re}[\dot{U}_{cb} \dot{I}_C^*] = \text{Re}[220e^{j60^\circ} \cdot 23,3e^{-j15^\circ}] = 220 \cdot 23,3 \cos 45^\circ = 3630 \text{ Вт.}$$

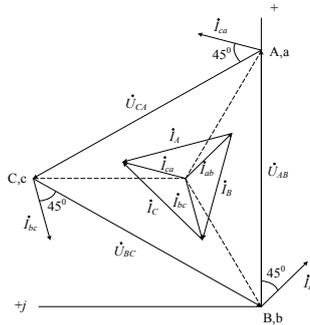


Рис.13

**Задача 2.** В четырехпроводную трехфазную сеть с линейным напряжением  $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$  включен звездой приемник, активные и индуктивные сопротивления фаз которого соответственно равны:  $R_a=3 \text{ Ом}$ ,  $X_a = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_b=3 \text{ Ом}$ ,  $X_b = 5,2 \text{ Ом}$ ,  $R_c=4 \text{ Ом}$ ,  $X_c = 3 \text{ Ом}$  (рис. 14). Определить токи в линейных и нейтральном проводах и построить векторную диаграмму (рис. 15).

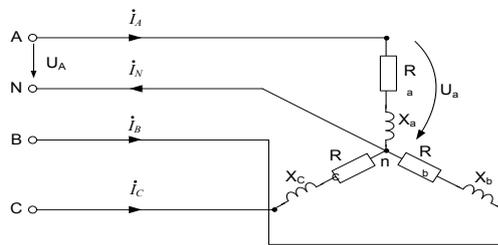


Рис.14

**Задача 3.** В трехфазную сеть с линейным напряжением  $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$  включен звездой приемник, активное, индуктивное и емкостное сопротивления фаз которого равны:  $R_a = |X_L| = |X_C| = 22 \text{ Ом}$  (рис. 16). Определить токи и построить векторную диаграмму.

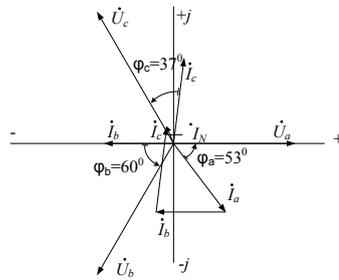


Рис. 15

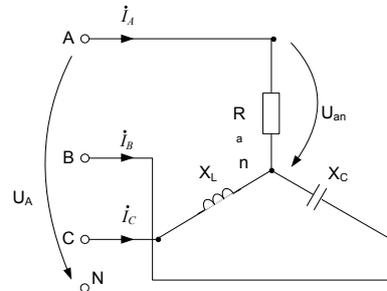
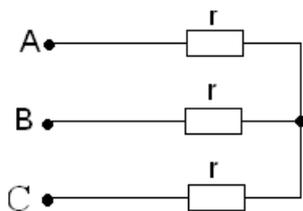
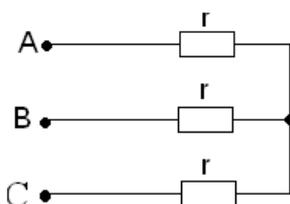


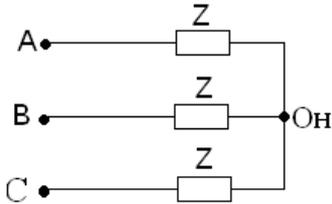
Рис. 16



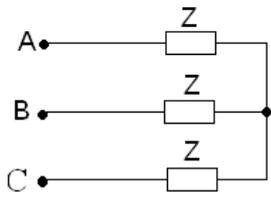
1. Определить токи при обрыве линии А, если:  
 $U_{\text{лин}} = 380 \text{ В}$ ,  $r = 220 \text{ Ом}$ .



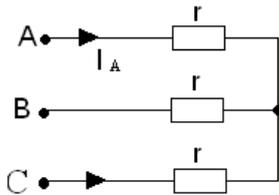
2. Определить токи при к. з. ф. А, если:  
 $U_{\text{лин}} = 380 \text{ В}$ ,  $r = 180 \text{ Ом}$ .



3. Определить  $I_B$  при к. з. ф. А, если:  
 $U_{\text{лин}}=380 \text{ В}$ ,  $Z=190+j190(\text{Ом})$ .



4. Определить  $P, Q, S$ , если:  
 $U_{\text{лин}}=220 \text{ В}$ ,  $Z=127+j127 (\text{Ом})$ .



5. Определить  $I_C$  при к. з. ф. А, если:  
 $U_{\text{лин}}=380 \text{ В}$ ,  $r=110 \text{ Ом}$ .

### Резонанс напряжений и токов в электрических цепях синусоидального тока

**Задача 1.** В сеть синусоидального тока с частотой  $f=50 \text{ Гц}$  включены последовательно реостат с сопротивлением  $R=5 \text{ Ом}$ , индуктивность  $L$  и емкость  $C$ . Вычислить индуктивность  $L$  и емкость  $C$ , если напряжения на  $R, L$  и  $C$  одинаковы.

Дано:  $f=50 \text{ Гц}$

$R=5 \text{ Ом}$

$U_L=U_C=U_R$

-----  
 Определить:  $L, C$ ;

Решение задачи

Так как в неразветвленной цепи ток на всех участках (сопротивлениях) имеет одинаковое значение, то и падение напряжения на всех участках цепи имеет одинаковое значение при одинаковых сопротивлениях участков.

$R=5 \text{ Ом}$ ,  $X_L=5 \text{ Ом}$ ,  $X_C=5 \text{ Ом}$ .

$X_L = 2\pi fL$  -индуктивное сопротивление;

$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$  - емкостное сопротивление;

$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{5}{2\pi \cdot 50} = 0.0159 \text{ Гн} = 15,9 \text{ мГн}$

$C = \frac{1}{2\pi fX_C} = \frac{10^6}{2\pi \cdot 50 \cdot 5} = 636,9 \text{ мкФ}$ ,

В цепи имеет место резонанс напряжений, так как равенство напряжений на реактивных элементах возможно только при наличии резонанса.

### Задача 2.

Параллельная резонансная цепь подключена к источнику переменного напряжения  $U=42 \text{ В}$ . Параметры цепи выбраны следующие:  $R=50 \text{ Ом}$ ,  $L=10 \text{ мГн}$ ;  $C=1 \text{ мкФ}$ ,  $R_L=32 \text{ Ом}$ ,  $R_C=50 \text{ Ом}$ . Рассчитать полную мощность, проводимость и ток в цепи.

Дано:  $U=42 \text{ В}$

$R=50 \text{ Ом}$

$L=10\text{мГн}$   
 $C=1\text{мкФ}$   
 $R_L=32\text{Ом}$   
 $R_C=50\text{Ом}$

-----  
 Определить:  $S$ ,  $y$ ,  $I$

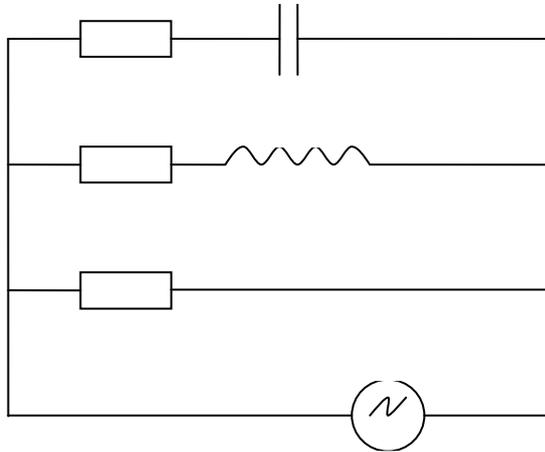


Рисунок 2

### Решение задачи

Определим частоту резонанса:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_L^2}{\frac{L}{C} - R_C^2}};$$

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10^{-2} * 10^{-6}}} \sqrt{\frac{10^{-2} - 32^2}{10^{-2} - 50^2}} = 1736 \text{Гц};$$

Определим сопротивления индуктивной и емкостной ветвей:

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + (2\pi L f_{\text{рез}})^2};$$

$$Z_L = \sqrt{32^2 + (6,28 * 10^{-2} * 1736)^2} = 113,6 \text{Ом};$$

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + \left(\frac{1}{2\pi C f_{\text{рез}}}\right)^2};$$

$$Z_C = \sqrt{50^2 + \left(\frac{1}{2\pi * 10^{-6} * 1736}\right)^2} = 104,5 \text{Ом};$$

Определить проводимость цепи:

$$y = y_R + y_L + y_C$$

$$y = 0,02 + 0,0025 + 0,0046 = 0,0271 \text{См};$$

$$y_R = 1/R;$$

$$y_R = 1/50 = 0,02 \text{См};$$

$$y_L = R_L/Z_L^2 + jX_L/Z_L^2;$$

$$y_L = 32/113^2 + j109/113^2 = 0,0025 + j0,0085 \text{См};$$

$$y_C = R_C/Z_C^2 - jX_C/Z_C^2;$$

$$y_c = 50/104,5^2 - j91,71/104,5^2 = 0,0046 - j0,0085 \text{ См};$$

Найдем ток в цепи:

$$I = U * y;$$

$$I = 42 * 0,0271 = 1,14 \text{ А};$$

$$S = U * I;$$

$$S = 42 * 1,14 = 48 \text{ Вт}.$$

### Расчет электрических цепей с взаимно-индуктивными связями

**Задача 1.** Рассчитать методом контурных токов распределение токов в цепи (рис. 1) с индуктивно связанными элементами при числовых данных:  $E = 10 \text{ В}$ ,  $R_1 = \omega L_2 = \omega L_3 = \omega L_5 = 2 \text{ Ом}$ ,  $\omega M_{35} = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $1/\omega C_5 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 1 \text{ Ом}$ .

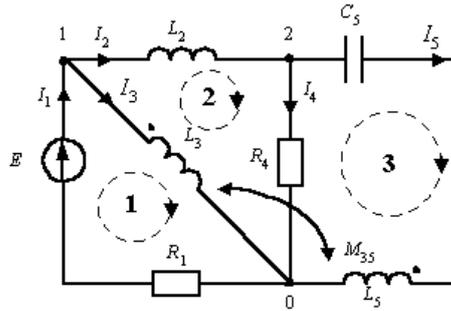


Рис. 1

#### Решение.

Выберем независимые контуры — их три — и укажем направления контурных токов в них (рис. 1). Система трех контурных уравнений имеет общий вид:

$$Z_{11} \dot{I}_{к1} + Z_{12} \dot{I}_{к2} + Z_{13} \dot{I}_{к3} = \dot{E}_{к1},$$

$$Z_{21} \dot{I}_{к1} + Z_{22} \dot{I}_{к2} + Z_{23} \dot{I}_{к3} = \dot{E}_{к2},$$

$$Z_{31} \dot{I}_{к1} + Z_{32} \dot{I}_{к2} + Z_{33} \dot{I}_{к3} = \dot{E}_{к3}.$$

Наличие индуктивной связи между катушками  $L_3$  и  $L_5$  учитывается в собственных и общих сопротивлениях контуров следующим образом: в сопротивление  $Z_{22}$  войдет составляющая  $j2\omega M_{35}$ , поскольку обе индуктивно связанные катушки  $L_3$ ,  $L_5$  входят во второй контур. Составляющая  $j2\omega M_{35}$  войдет в  $Z_{22}$  со знаком “минус”, так как ток  $\dot{I}_{к2}$  ориентирован относительно маркированных зажимов катушек  $L_3$  и  $L_5$  по-разному. В общие сопротивления  $Z_{12} = Z_{21}$ ,  $Z_{13} = Z_{31}$ ,  $Z_{23} = Z_{32}$  составляющая  $j\omega M_{35}$  входит, поскольку контур из любой их пары (1 – 2, 1 – 3, 2 – 3) содержит катушку, индуктивно связанную с катушкой, принадлежащей другому контуру этой пары.

Обратите внимание, что, хотя 1-й и 3-й контуры не имеют общих ветвей, но  $Z_{13} \neq 0$  за счет составляющей  $j\omega M_{35}$ . Знак составляющей  $j\omega M_{35}$  определяется так: если оба контурных тока в соответствующих катушках ориентированы одинаково относительно маркированных зажимов,  $j\omega M_{35}$  входит со знаком “плюс” (в  $Z_{12}$  и  $Z_{13}$ ), в противном случае со знаком “минус”.

С учетом сказанного контурные сопротивления имеют вид:

$$Z_{11} = R_1 + j\omega L_3 = 2 + j2 \text{ (Ом)},$$

$$Z_{22} = j\omega L_2 + j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_5} + j\omega L_5 - 2j\omega M_{35} = 0,$$

$$Z_{33} = j\omega L_5 + \frac{1}{j\omega C_5} + R_4 = 1 - j3 \text{ (Ом)},$$

$$Z_{12} = Z_{21} = -j\omega L_3 + j\omega M_{35} = -j1,5 \text{ (Ом)},$$

$$Z_{13} = Z_{31} = j\omega M_{35} = j0,5 \text{ (Ом)},$$

$$Z_{23} = Z_{32} = j\omega L_5 + \frac{1}{j\omega C_5} - j\omega M_{35} = -j3,5 \text{ (Ом)}.$$

Контурные ЭДС равны:  $\dot{E}_{к1} = 10 \text{ В}$ ,  $\dot{E}_{к2} = 0$ ,  $\dot{E}_{к3} = 0$ .

После подстановки числовых значений система уравнений принимает форму:

$$(2 + j2)\dot{I}_{к1} - j1,5\dot{I}_{к2} + j0,5\dot{I}_{к3} = 10,$$

$$-j1,5\dot{I}_{к1} - j3,5\dot{I}_{к3} = 0,$$

$$j0,5\dot{I}_{к1} - j3,5\dot{I}_{к2} + j(1 - j3)\dot{I}_{к3} = 0.$$

Решение этой системы дает:  $\dot{I}_{к1} = 3,76 - j1,76$ ,  $\dot{I}_{к2} = 2,13 - j0,44$ ,  $\dot{I}_{к3} = -1,61 + j0,75$ . Токи в ветвях находятся по рассчитанным контурным токам. Для указанных на рис. П9.1 направлений токов в ветвях имеем:

$$I_1 = I_{к1} = 3,76 - j1,76 \text{ А} = 4,15e^{-j25^\circ},$$

$$I_2 = I_{к2} = 2,13 - j0,44 = 2,18e^{-j11^\circ} \text{ А},$$

$$I_4 = -I_{к3} = 1,61 - j0,75 = 1,79e^{-j25^\circ} \text{ А},$$

$$I_5 = I_{к2} + I_{к3} = 0,52 + j0,32 = 0,61e^{j31^\circ} \text{ А}.$$

Напряжения на индуктивно связанных катушках равны

$$\dot{U}_3 = jaL_3 I_3 + jaM_{35} I_5 = 2,48 + j3,51 = 4,30e^{j55^\circ} \text{ В}$$

и 
$$\dot{U}_5 = jaL_5 I_5 + jaM_{35} I_3 = -0,03 + j1,85 = 1,86e^{j89^\circ} \text{ В}.$$

Их сдвиг по фазе относительно соответствующих токов отличается от  $90^\circ$  вследствие индуктивного влияния катушек друг на друга: для  $L_3$  он составляет  $94^\circ$ , а для  $L_5$  — лишь  $57^\circ$ .

**Задача 2.** Определить эквивалентные параметры цепи с индуктивно связанными катушками, изображенной на рис. 2.

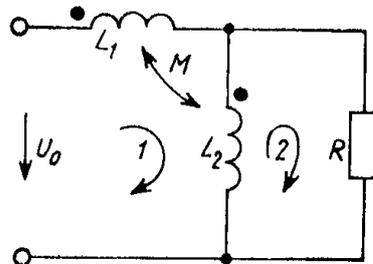


Рис. 2.

**Решение.**

Контурные уравнения в комплексной форме имеют общий вид:

$$\begin{aligned} Z_{11}\dot{I}_{1к} + Z_{12}\dot{I}_{2к} &= \dot{E}_{1к}; \\ Z_{21}\dot{I}_{1к} + Z_{22}\dot{I}_{2к} &= \dot{E}_{2к}. \end{aligned}$$

Выбор независимых контуров указан стрелками на схеме.

При записи собственных и общих сопротивлений запишем по уже известным правилам сначала члены, не связанные с взаимной индуктивностью. Далее учтем члены, отражающие индуктивные связи. В собственных сопротивлениях контуров слагаемые  $+j2\omega M$  появляются, если обе индуктивно связанные катушки входят в данный контур и их маркировка соответствует согласному включению в этом контуре. Если при обходе контура, включающего две связанные катушки, одна из катушек обтекается контурным током в положительном, а другая – в отрицательном направлении, то член в соответствующем собственном сопротивлении будет иметь знак “минус”, т. е.  $-j2\omega M$ .

При записи общего сопротивления двух контуров учитывается их взаимное индуктивное влияние друг на друга. Здесь член  $j\omega M$  имеет знак “плюс”, если положительные направления обоих контурных токов ориентированы одинаково относительно маркированных зажимов катушек, и оба тока протекают по ним либо в положительном, либо в отрицательном направлении. Если же один из влияющих друг на друга токов протекает в положительном, а другой – в отрицательном направлении, в общем сопротивлении контуров учитывают член  $-j\omega M$ . С учетом сформулированных правил получим для контурных сопротивлений цепи (рис. 2):

$$\begin{aligned} Z_{11} &= j\omega L_1 + j\omega L_2 + 2j\omega M; & Z_{22} &= j\omega L_2 + R; \\ Z_{12} &= Z_{21} = -j\omega L_2 - j\omega M. \end{aligned}$$

Используя выражения контурных сопротивлений цепи, и учитывая, что контурные ЭДС равны:  $\dot{E}_{1к} = U_0$ ;  $\dot{E}_{2к} = 0$ , запишем систему контурных уравнений цепи в развернутой форме:

$$\begin{aligned} (j\omega L_1 + j\omega L_2 + 2j\omega M)\dot{I}_{1к} - (j\omega L_2 + j\omega M)\dot{I}_{2к} &= \dot{U}_0, \\ -(j\omega L_2 + j\omega M)\dot{I}_{1к} + (j\omega L_2 + R)\dot{I}_{2к} &= 0. \end{aligned}$$

Эквивалентное входное сопротивление цепи определяется как отношение входного напряжения  $\dot{U}_0$  к входному току  $\dot{I}_{1к}$ :

$$Z_{вх} = \dot{U}_0 / \dot{I}_{1к} = \frac{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}^2}{Z_{22}}.$$

Подстановка указанных значений контурных сопротивлений после преобразований приводит к окончательному результату:

$$Z_{вх} = \frac{R\omega^2(L_2 + M)^2 + j\omega[R^2(L_1 + L_2 + 2M) + \omega^2 L_2(L_1 L_2 - M^2)]}{R^2 + (\omega L_2)^2}.$$

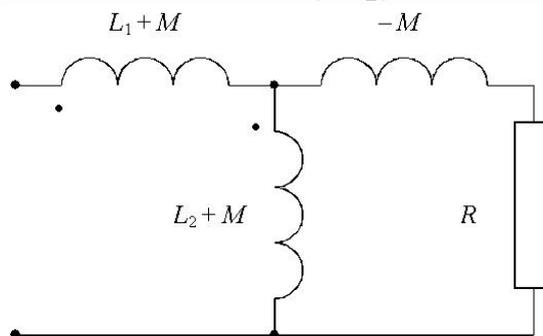


Рис. 3.

Другой способ решения задачи основан на замене индуктивно связанных катушек  $T$ -образной схемой замещения, не содержащей индуктивных связей. Однако поскольку в данном случае общим является один маркированный а другой — немаркированный зажимы катушек, зна-

ки у взаимных индуктивностей в ветвях эквивалентной схемы следует заменить на противоположные. В результате приходим к схеме, показанной на рис. 3. Применяя к ней обычные правила сложения последовательных и параллельных ветвей, получим выражение для ее входного сопротивления:

$$Z_{\text{вх}} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3},$$

где  $Z_1 = j\omega(L_1 + M)$ ,  $Z_2 = j\omega(L_2 + M)$ ,  $Z_3 = R - j\omega M$ . Разделяя во втором слагаемом этого выражения вещественную и мнимую части, придем к результату:

$$Z_{\text{вх}} = R \frac{\omega^2 (L_2 + M)^2}{R^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega(L_2 + M) \frac{R^2 - \omega^2 L_2 M}{R^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega(L_1 + M),$$

что, как нетрудно проверить, тождественно полученному выше методом контурных токов.

### Расчет линейных цепей при несинусоидальном воздействии

При изучении настоящего раздела необходимо усвоить, что источников с абсолютно постоянной или синусоидальном э. д. с. не существует. Различные источники энергии в силу ряда причин создают пульсирующие, медленно меняющиеся или незначительно отличающиеся от синусоидальной формы напряжения.

При расчете цепей, находящихся под воздействием периодических несинусоидальных значений, необходимо знать способы их представления: 1) графики зависимости мгновенных несинусоидальных токов и напряжений от времени; 2) аналитический способ разложения периодических функций в ряд Фурье, из которого для практических целей берут ограниченное число первых членов ряда. В разложении в ряд Фурье в общем случае представлены постоянная составляющая, основная (первая) гармоническая составляющая, имеющая период, равный периоду данного несинусоидального воздействия, высшие гармонические составляющие и их начальные фазы. Основную и высшие гармонические составляющие обычно называют просто гармониками. Амплитуды и начальные фазы гармоник определяют спектральный состав несинусоидальной кривой, который может быть представлен в виде диаграмм амплитудно-частотного спектров.

При анализе электрических цепей с несинусоидальными напряжениями и токами имеют дело с действующими значениями:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2};$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}.$$

Таким образом, действующее значение несинусоидального напряжения или тока равно корню, квадратному из суммы квадратов постоянной составляющей и действующих значений всех гармоник несинусоидального напряжения или тока.

Действующее значение каждой гармоники:  $U_k = U_{km} / \sqrt{2}$ .

Среднее значение мощности при несинусоидальных напряжениях и токах равно сумме средних значений мощностей от постоянной составляющей и каждой гармоники тока и напряжения:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n.$$

Форму периодических несинусоидальных кривых принято характеризовать некоторыми коэффициентами: амплитуды  $K_a$ , формы  $K_f$ , искажения  $K_H$  и др. Разложение в ряд Фурье позволяет заменить (на основании принципа суперпозиции) реальный источник несинусоидального напряжения совокупностью последовательно включенных источников. Таким образом, мгновенные искомые токи и напряжения определяют путем суммирования найденных в результате расчета постоянных и гармонических составляющих тока или напряжения. При расчете цепей следует учитывать, что сопротивления емкостного и индуктивного элементов зависят от частоты: сопротивление индуктивного элемента возрастает с увеличением номера гармоники, т. е.  $X_{L(k)} = k\omega L$ , а сопротивление емкостного элемента уменьшается с увеличением порядкового номера гармоники, т. е.

е.  $X_{C(k)} = 1/k\omega C$ . В тех случаях, когда требуется по условиям работы электрических цепей изменить форму кривой тока или напряжения, применяются специальные устройства, содержащие индуктивные катушки и конденсаторы. Эти устройства называют электрическими фильтрами.

На практическом занятии необходимо решить разноуровневые задачи по пройденному лекционному материалу. Примерный перечень задач приведен ниже. Рекомендуемая литература и дополнительный теоретический материал представлены в рабочей программе дисциплины «Электротехника и электроника».

**Задача 1.** Для кривой напряжения однополупериодного выпрямления  $u(\omega t) = U_m \sin \omega t$ . Найти действующее напряжение путем непосредственного интегрирования. Сравнить найденный результат с расчетом по гармоникам ряда Фурье, учитывая только: а) первый член ряда, б) первые три члена ряда. Оценить погрешность  $\delta$  в процентах. Определить коэффициенты  $K_a$ ,  $K_\phi$ ,  $K_H$ .

Разложение в ряд Фурье данной кривой:

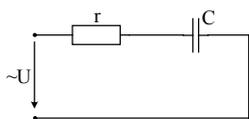
$$u(\omega t) = \frac{2U_{\max}}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t + \dots \right)$$

**Задача 2.** Определить емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , при которых фильтр не будет пропускать в нагрузочное устройство (приемник) пятую гармонику тока и не будет оказывать сопротивления третьей гармонике, если частота основной гармоники  $f = 1$  кГц.

Дано:  $L_1 = L_2 = 1$  мГн.

**Задача 3.** Найти показания приборов электромагнитной системы и записать выражение для мгновенного тока  $i_2$ . Дано:  $R = 5$  Ом,  $X_{L1(l)} = 1$  Ом,  $X_{L2(l)} = 8$  Ом,  $X_{C1(l)} = 9$  Ом,  $u(t) = 20 + 10 \sin \omega t + 50 \sqrt{2} \sin(3\omega t + 30^\circ)$  В.

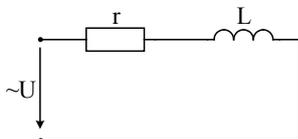
**Задача 4.**



Дано:  $U = 100 + 100 \sin \omega t + 50 \sin(3\omega t + 68)$ ,  
 $r = 2$  Ом,  $c = 10,5$  мкФ,  $f = 50$  гц.

Определить: мгновенное значение тока в цепи и его действующее значение.

**Задача 5.**



Дано:  $i = 10 + 5 \sin 1000t + 2 \sin 2000t$ ,  
 $r = 5$  Ом,  $L = 3$  мГн.

Определить: мгновенное значение напряжения U.

### Четырехполосники. Параметры и схемы замещения

**Задача 1.** Определить A-параметры четырехполосника, схема которого представлена на рис. 1.

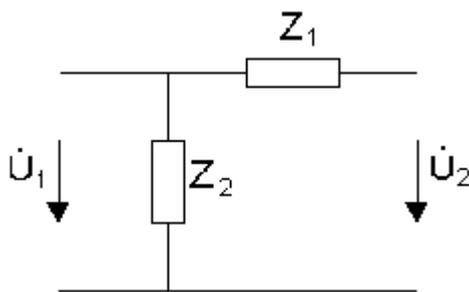


Рис. 1.

При холостом ходе на выходе четырехполосника  $I_2 = 0$ , и из общей системы уравнений четырехполосника через A-параметры

$$\begin{aligned} U_1 &= A_{11}U_2 + A_{12}I_2 \\ I_1 &= A_{21}U_2 + A_{22}I_2 \end{aligned}$$

найдем  $\dot{U}_1 = A_{11}\dot{U}_2, \dot{I}_1 = A_{21}\dot{U}_2$ . Из анализа схемы непосредственно следует, что в этом режиме  $\dot{U}_1 = \dot{U}_2$ , откуда  $A_{11} = 1$ , а  $\dot{I}_1 = \dot{U}_2 / Z_1$ , т.е.  $A_{21} = 1/Z_1$ .

Аналогично, при коротком замыкании на выходе четырехполюсника  $\dot{U}_2 = 0$ , и из системы имеем  $\dot{U}_1 = A_{12}\dot{I}_2, \dot{I}_1 = A_{22}\dot{I}_2$ . Теперь анализ схемы дает  $\dot{U}_1 = Z_2\dot{I}_2, \dot{I}_1 = \dot{I}_2(1 + Z_2/Z_1)$ , следовательно,  $A_{12} = Z_2$ , а  $A_{22} = 1 + Z_2/Z_1$ .

Запишем результат в матричной форме

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & Z_2 \\ 1/Z_1 & 1 + Z_2/Z_1 \end{bmatrix}$$

Нетрудно убедиться, что найденные параметры удовлетворяют соотношению  $A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1$ , справедливому для обратимых четырехполюсников.

**Задача 2.** Определить  $Z$ -параметры составного четырехполюсника (рис. 2, а), рассматривая их как последовательное, параллельное или каскадное соединение простейших одноэлементных четырехполюсников.

Перекрытый Т-образный четырехполюсник (рис. 2, а) может быть представлен в виде последовательного соединения П-образного четырехполюсника  $Z'$  ( $Z_1, Z_3, Z_1$ ) и одноэлементного —  $Z_2$  (рис. 2, б).

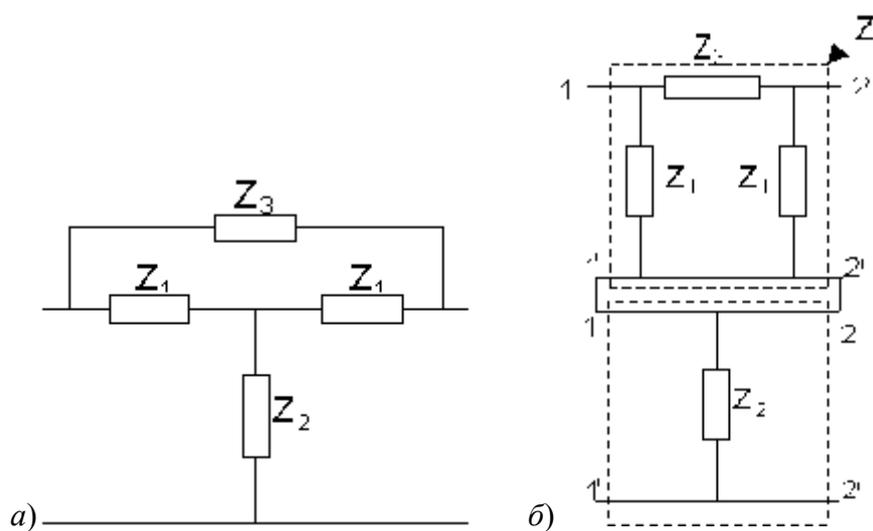


Рис. 2

Четырехполюсник  $Z'$  — это каскадное соединение одноэлементных четырехполюсников — параллельного  $Z_1$ , последовательного  $Z_3$  и параллельного  $Z_1$ .  $\mathbf{A}$ -матрицы этих четырехполюсников можно получить из результата предыдущей задачи, полагая в нем  $Z_2 = 0$  для параллельного четырехполюсника и  $Z_1 = \infty$  для последовательного и соответственно изменяя обозначения. Перемножение  $\mathbf{A}$ -матриц дает:

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_3}{Z_1} & Z_3 \\ \frac{2}{Z_1} + \frac{Z_3}{Z_1^2} & 1 + \frac{Z_3}{Z_1} \end{bmatrix}$$

Поскольку далее будет рассматриваться последовательное соединение, перейдем к  $Z$ -параметрам. Для этого воспользуемся связями между различными системами параметров.

Имеем:

$$\mathbf{Z}' = \begin{bmatrix} \frac{A_{11}}{A_{21}} & \frac{\Delta_A}{A_{21}} \\ 1 & \frac{A_{22}}{A_{21}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_1(Z_1 + Z_3)}{2Z_1 + Z_3} & \frac{Z_1^2}{2Z_1 + Z_3} \\ \frac{Z_1^2}{2Z_1 + Z_3} & \frac{Z_1(Z_1 + Z_3)}{2Z_1 + Z_3} \end{bmatrix}$$

Z-параметры одноэлементного четырехполюсника  $Z_2$ , описываемого матрицей

$$\mathbf{Z}'' = \begin{bmatrix} Z_2 & Z_2 \\ Z_2 & Z_2 \end{bmatrix},$$

можно получить тем же путем перехода от его A-параметров к Z-параметрам.

Z-параметры последовательно соединенных четырехполюсников суммируются  $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}' + \mathbf{Z}''$ .

Поэтому окончательно получим для Z-параметров перекрытого T-образного четырехполюсника:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \frac{Z_1(Z_1 + Z_3)}{2Z_1 + Z_3} + Z_2 & \frac{Z_1^2}{2Z_1 + Z_3} + Z_2 \\ \frac{Z_1^2}{2Z_1 + Z_3} + Z_2 & \frac{Z_1(Z_1 + Z_3)}{2Z_1 + Z_3} + Z_2 \end{bmatrix}.$$

Для характеристических сопротивлений справедливы следующие выражения через A-параметры

$$Z_{c1} = \sqrt{\frac{A_{11}A_{12}}{A_{21}A_{22}}}, Z_{c2} = \sqrt{\frac{A_{22}A_{12}}{A_{21}A_{11}}}.$$

Подстановка полученных в задаче 1. выражений A-параметров с учетом характера элемен-

тов дает

$$Z_{c1} = \sqrt{\frac{Z_1 Z_2}{1 + Z_2 / Z_1}} = \sqrt{\frac{L}{C(1 - \omega^2 LC)}}, Z_{c2} = \sqrt{\frac{L(1 - \omega^2 LC)}{C}}.$$

Для меры передачи четырехполюсника имеем

$$g = \ln(\sqrt{A_{11}A_{22}} + \sqrt{A_{21}A_{12}}) = \ln(\sqrt{1 - \omega^2 LC} + j\omega\sqrt{LC}).$$

Из полученных выражений следует, что при  $\omega\sqrt{LC} < 1$  оба характеристических сопротивления вещественны, а мера передачи — чисто мнимая величина  $g = j\beta$ . При  $\omega\sqrt{LC} > 1$ , наоборот, характеристические сопротивления — мнимые, а мера передачи имеет ненулевую вещественную часть.

**Задача 3.** Определить характеристические параметры четырехполюсника, рассмотренного в задаче 1, принимая в качестве элементов схемы  $Z_1 = 1/j\omega C$ ,  $Z_2 = j\omega L$ .

**Задача 4.** Рассчитать коэффициенты передачи по напряжению и току однородной цепной LC-схемы, состоящей из четырех звеньев, при соотношении между ее параметрами  $\omega\sqrt{LC} = \sqrt{2}$  в режимах согласованной нагрузки, холостого хода и короткого замыкания, рис. 3.

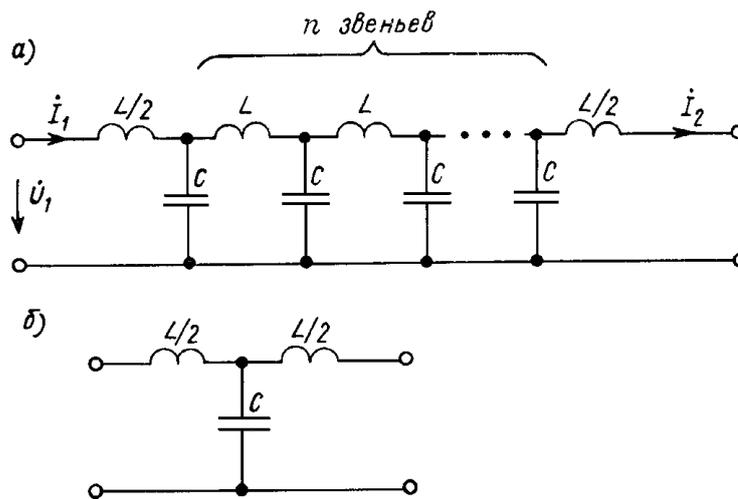


Рис. 3

однородную цепную LC-схему (а), можно представить как каскадное соединение  $n$  симметричных Т-образных звеньев (б).

При  $\alpha\sqrt{LC} = \sqrt{2}$  для характеристических параметров одного звена имеем:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C} \left( 1 - \frac{\omega^2 LC}{4} \right)} = \sqrt{\frac{L}{2C}};$$

$$g = 2 \ln \left[ \sqrt{1 - \frac{\omega^2 LC}{4}} + j \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \right] = 2 \ln \frac{1+j}{\sqrt{2}} = j \frac{\pi}{2}.$$

Поэтому в режиме согласования — при нагрузке цепной схемы на резистор с сопротивлением  $\sqrt{\frac{L}{2C}}$  ее каждое звено дает фазовый сдвиг напряжения и тока на  $\pi/2$ , а их действующие значения остаются неизменными, поскольку коэффициент затухания  $\alpha = 0$ . Четыре звена схемы дают фазовый сдвиг на  $2\pi$ , т.е. в режиме согласования входные и выходные токи и напряжения четырехзвенной схемы равны друг другу.

Для определения связей между токами и напряжениями при холостом ходе и коротком замыкании определим А-параметры схемы  $A_{11}$  и  $A_{22}$ . Поскольку четырехполюсник симметричный, то оба эти параметра равны друг другу и выражаются как  $A_{11} = A_{22} = \text{ch}(4g) = \text{ch}(4j\pi/2) = \cos(2\pi) = 1$ . Поскольку эти параметры выражают отношение входного и выходного напряжений при холостом ходе и токов при коротком замыкании, то и эти отношения будут равны единице — при холостом ходе входное и выходное напряжения четырехзвенной схемы равны друг другу, также как и токи при коротком замыкании.

### Классический метод анализа переходных процессов в электрических цепях первого порядка

**Задача.** Определить закон изменения тока в схеме и напряжения на индуктивности в последовательной RL-цепи (Рис. , а) с источником постоянной ЭДС. Исходные данные:  $E_0 = 150 \text{ В}$ ,  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 5 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,1 \text{ Гн}$ .

**Решение.**

В схеме до коммутации (Рис. , б) было два сопротивления и источник постоянной ЭДС, т.е. протекал постоянный ток. Так как индуктивность не оказывает сопротивления постоянному току, то напряжение на индуктивности в схеме до коммутации равно нулю, а ток определяется только активными сопротивлениями:

$$u_L(0_-) = 0; \quad i(0_-) = \frac{E_0}{R_1 + R_2} = \frac{150}{10 + 5} = 10 \text{ A}.$$

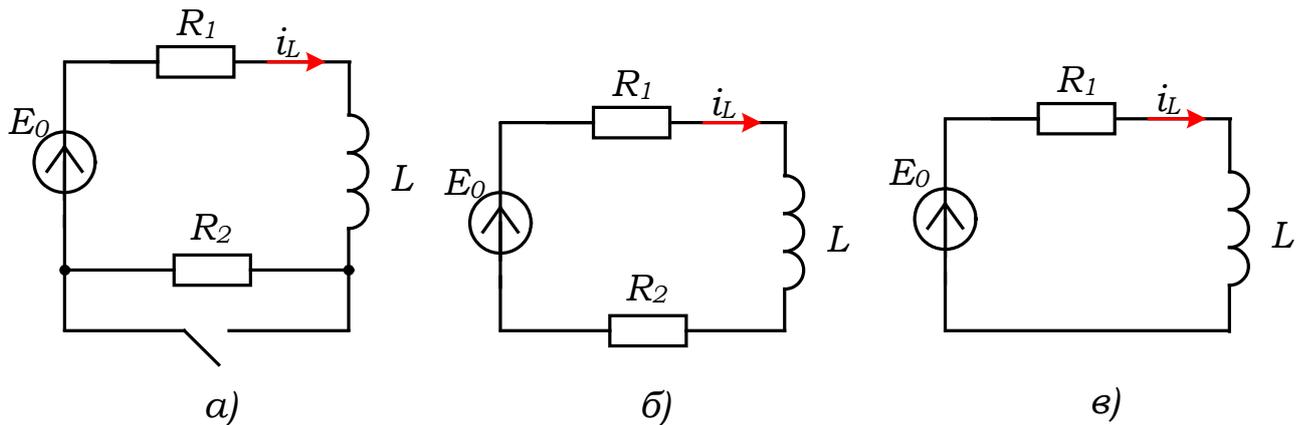


Рис. 1. Схемы для расчета переходного процесса

В схеме после коммутации (Рис. ,в) имеется индуктивность, ток скачком измениться не может, поэтому для момента коммутации ( $t=0$ ) можно записать  $i(0) = 10 \text{ A}$ .

Напряжение на индуктивности в момент коммутации относится к зависимым начальным условиям и должно быть определено, как указывалось выше, по второму закону Кирхгофа в схеме после коммутации (Рис. , в) с использованием независимого начального условия.

Запишем уравнение для мгновенных значений:

$$E_0 = R_1 i(t) + u_L(t).$$

Уравнение справедливо для любого момента времени  $t \geq 0$ , поэтому из него можно найти напряжение на индуктивности в момент коммутации:

$$u_L(0) = E_0 - R_1 i(0) = 150 - 10 \cdot 10 = 50 \text{ B}.$$

В общем случае напряжение на индуктивности в момент коммутации изменяется скачком. Это положение относится и к токам в ветвях, в которых нет индуктивностей.

В установившемся режиме в схеме после коммутации протекает постоянный ток, принужденная составляющая напряжения на индуктивности равна нулю, а ток определяется по закону Ома:

$$u_{Lnp}(t) = 0; \quad i_{np}(t) = \frac{E_0}{R_1} = \frac{150}{10} = 15 \text{ A} = \text{const}.$$

Постоянная времени и коэффициент затухания цепи имеют значения:

$$\tau = \frac{L}{R_1} = \frac{0,1}{10} = 0,01 \text{ c}; \quad \alpha = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{0,01} = 100 \text{ c}^{-1}.$$

Теперь можно записать выражение для тока переходного процесса в виде суммы свободной и принужденной составляющих, подставить начальное условие, найти постоянную интегрирования и записать выражение для тока переходного процесса:

$$i(t) = B e^{-\frac{t}{\tau}} + i_{np}(t); \quad i(0) = B + i_{np}(0); \quad B = i(0) - i_{np}(0) = 10 - 15 = -5 \text{ A}.$$

Ток переходного процесса:

$$i(t) = -5 e^{-\frac{t}{0,01}} + 15 = -5 e^{-100t} + 15 \text{ A}.$$

Прделаем те же операции для напряжения на индуктивности:

$$u_L(t) = B e^{-\frac{t}{\tau}} + u_{Lnp}(t); \quad u_L(0) = B + u_{Lnp}(0);$$

$$B = u_L(0) - u_{L_{np}}(0) = 50 - 0 = 50 \text{ В.}$$

Напряжение переходного процесса:

$$u_L(t) = 50e^{-\frac{t}{0,01}} = 50e^{-100t} \text{ В.}$$

Временная диаграмма переходного тока (Рис. 1) построена с помощью программы MathCad.

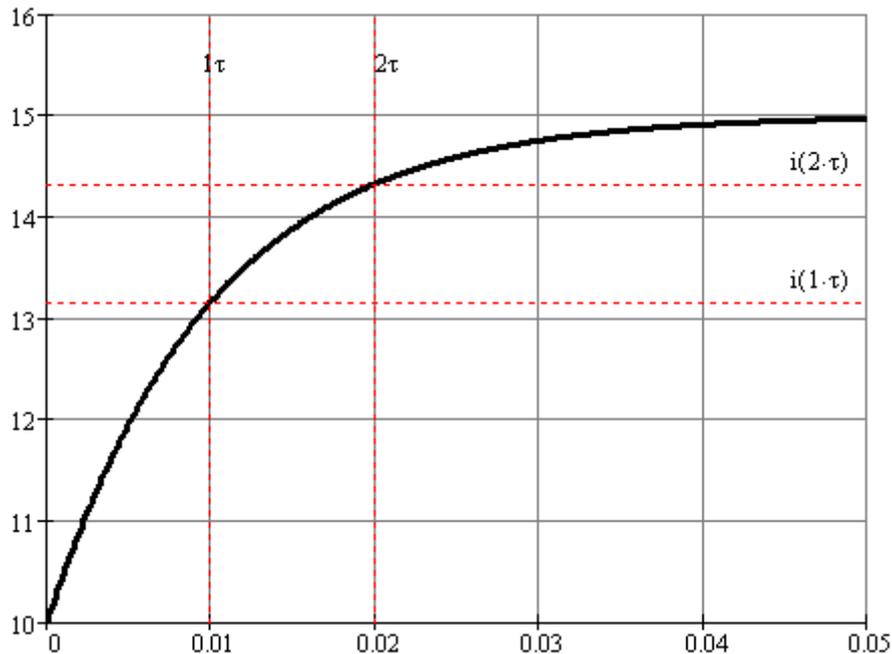


Рис. 1. Временная диаграмма переходного тока

**Задача 2.** Определить закон изменения тока и напряжения на емкости в последовательной RC-цепи (Рис., а) с источником синусоидальной ЭДС. Исходные данные:  $e(t) = 120 \sin(314t + 25^\circ)$  В,  $R_1=50$  Ом,  $R_2=25$  Ом,  $C=60 \cdot 10^{-6}$  Ф.

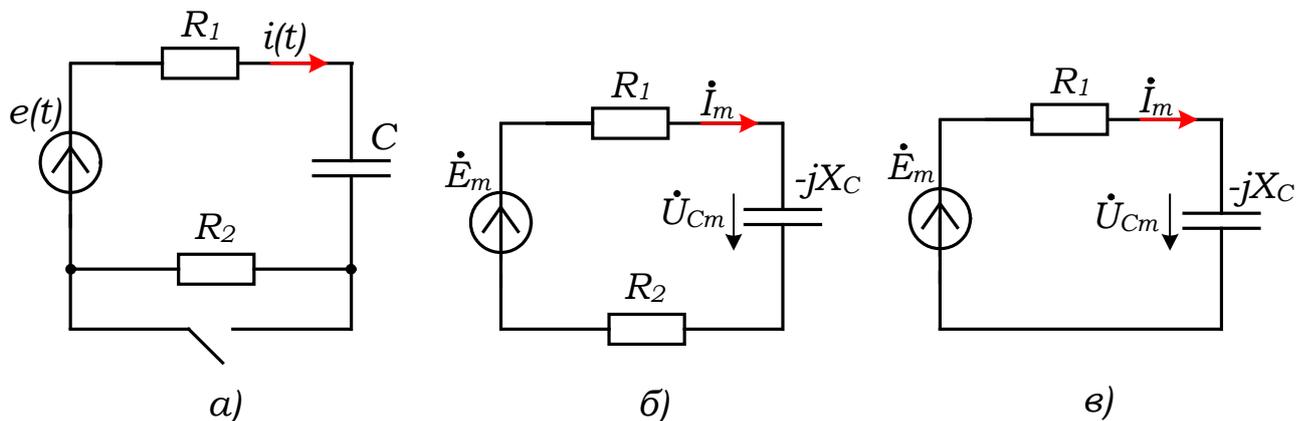


Рис. 3. Схема для мгновенных значений (а) и комплексные схемы замещения

**Решение.** Для определения мгновенного значения напряжения на емкости в схеме до коммутации (с целью применения второго закона коммутации) воспользуемся методом комплексных амплитуд (Рис., б).

Комплексная амплитуда ЭДС и емкостное сопротивление емкости:

$$\dot{E}_m = 120e^{j25^\circ} \text{ В, } X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 53,08 \text{ Ом.}$$

Комплексное сопротивление схемы до коммутации:

$$\underline{Z} = R_1 + R_2 - jX_C = 50 + 25 - j53,08 = 91,88e^{-j35,29^\circ} \text{ Ом.}$$

Комплексные амплитуды тока и напряжения на емкости:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{E}_m}{\underline{Z}} = \frac{120e^{j25^0}}{91,88e^{-j35,29^0}} = 1,306e^{j60,29^0} \text{ А};$$

$$\dot{U}_{Cm} = X_C e^{-j90^0} \cdot \dot{I}_m = 53,08e^{-j90^0} \cdot 1,306e^{j60,29^0} = 69,32e^{-j29,71^0} \text{ В.}$$

Мгновенное значение напряжения на емкости:

$$u_C(t) = 69,32 \sin(314t - 29,71^0) \text{ В.}$$

Так как напряжение на емкости скачком измениться не может, то для получения его значения в момент коммутации нужно в выражение для мгновенного значения подставить ноль вместо  $t$ :

$$u_C(0) = u_{C0} = 69,32 \sin(314 \cdot 0 - 29,71^0) = 69,32 \sin(-29,71^0) = -34,36 \text{ В.}$$

Это значение можно найти и без записи мгновенного напряжения. Для этого можно воспользоваться комплексной амплитудой напряжения, записав ее с помощью теоремы Эйлера в тригонометрической форме:

$$\dot{U}_{Cm} = 69,32e^{-j29,71^0} = 69,32 \cos(-29,71^0) + j69,32 \sin(-29,71^0) \text{ В.}$$

Из этого выражения следует, что значение напряжения в момент коммутации находится под знаком мнимой части его комплексной амплитуды:

$$u_C(0) = \text{Im}[\dot{U}_{Cm}] = \text{Im}[69,32e^{-j29,71^0}] = \text{Im}[60,21 - j34,36] = -34,36 \text{ В.}$$

Найденное значение напряжения в момент коммутации относится к независимым начальным условиям, а ток в схеме, в данном случае ток в ветви с емкостью, является зависимым начальным условием и должен быть определен в схеме после коммутации с помощью второго закона Кирхгофа, которое для данного примера имеет вид:

$$R_1 i(t) + u_C(t) = e(t).$$

Это уравнение справедливо для любого момента времени, в том числе и для момента коммутации. Т.к. коммутация происходит при  $t=0$ , то ток в момент коммутации определяется выражением:

$$i(0) = \frac{e(0) - u_C(0)}{R_1} = \frac{120 \sin 25^0 - (-34,36)}{50} = 1,701 \text{ А.}$$

Принужденные составляющие переходных величин найдем также методом комплексных амплитуд в схеме после коммутации (Рис., в). В этой схеме отсутствует сопротивление  $R_2$ , т.к. оно зашунтировано ключом, поэтому комплексное сопротивление изменится и станет равным

$$\underline{Z} = R_1 - jX_C = 50 - j53,08 = 72,92e^{-j46,71^0} \text{ Ом.}$$

Вначале найдем комплексные амплитуды принужденных величин:

$$\dot{I}_{mnp} = \frac{\dot{E}_m}{\underline{Z}} = \frac{120e^{j25^0}}{72,92e^{-j46,71^0}} = 1,646e^{j71,71^0} \text{ А};$$

$$\dot{U}_{Cmnp} = X_C e^{-j90^0} \cdot \dot{I}_{mnp} = 53,08e^{-j90^0} \cdot 1,646e^{j71,71^0} = 87,35e^{-j18,29^0} \text{ В.}$$

А затем запишем их мгновенные значения:

$$i_{np}(t) = 1,646 \sin(\omega t + 71,71^0) \text{ А}; \quad u_{Cnp}(t) = 87,35 \sin(\omega t - 18,29^0) \text{ В.}$$

В момент коммутации эти составляющие имеют значения:

$$i_{np}(0) = 1,646 \sin(71,71^0) = 1,563 \text{ А}; \quad u_{Cnp}(0) = 87,35 \sin(-18,29^0) = -27,41 \text{ В.}$$

Они представляют собой мнимые части комплексных амплитуд соответственно тока и напряжения на емкости, как было указано выше.

Запишем выражение для тока переходного процесса в виде суммы свободной и принужденной составляющих:

$$i(t) = i_{св}(t) + i_{пр}(t) = C_1 e^{-\alpha t} + i_{пр}(t).$$

Используя в этом выражении начальное условие

$$i(0) = i_{св}(0) + i_{пр}(0) = C_1 + i_{пр}(0),$$

определим постоянную интегрирования:

$$C_1 = i(0) - i_{пр}(0) = 1,701 - 1,563 = 0,138 \text{ В.}$$

Аналогично находим постоянную интегрирования для напряжения на емкости, обозначив ее  $C_2$ :

$$C_2 = u_C(0) - u_{Cпр}(0) = -34,36 - (-27,41) = -6,95 \text{ В.}$$

Коэффициент затухания  $RC$ -цепи определяется по известной формуле и составляет:

$$\alpha = \frac{1}{R_1 C} = \frac{1}{50 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 333 \text{ с}^{-1}.$$

И, наконец, записываем выражения для переходных величин:

$$i(t) = 0,138 e^{-333t} + 1,646 \sin(\omega t + 71,71^\circ) \text{ А};$$

$$u_C(t) = -6,95 e^{-333t} + 87,35 \sin(\omega t - 18,29^\circ) \text{ В.}$$

Проверка заключается в определении значений напряжения и тока в момент коммутации:

$$i(0) = 0,138 + 1,646 \sin(71,71^\circ) = 1,701 \text{ А};$$

$$u_C(0) = -6,95 + 87,35 \sin(-18,29^\circ) = -34,36 \text{ В.}$$

## Переходные процессы в электрических цепях второго порядка

**Задача 1.** Электрическая цепь второго порядка включается под постоянное напряжение (Рис. 1). Определить законы изменения напряжения на емкости, тока в индуктивности и выходного напряжения схемы. Исходные данные:  $R_1=15 \text{ Ом}$ ;  $R_2=25 \text{ Ом}$ ;  $R_3=10 \text{ Ом}$ ;  $R_4=10 \text{ Ом}$ ;  $R_5=10 \text{ Ом}$ ;  $R_H=40 \text{ Ом}$ ;  $C=10 \text{ мкФ}$ ;  $L=0,1 \text{ Гн}$ ;  $u_{вх}=U_0=100 \text{ В}=\text{const}$ .

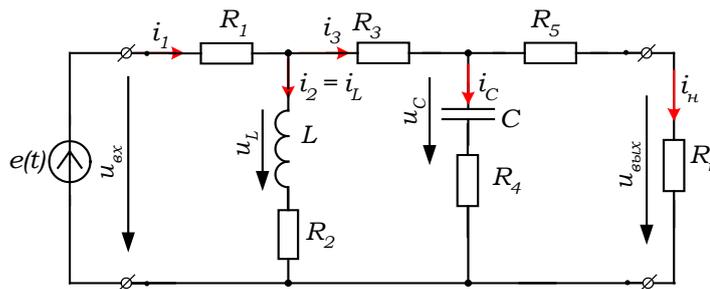


Рис. 1. Схема второго порядка для расчета переходного процесса

**Решение.** Для данной схемы составить дифференциальное уравнение 2-го порядка не просто, поэтому расчет начнем с определения начальных условий.

1. Определение начальных условий для переменных состояния (для  $u_C$  и  $i_L$ ).

Рассматриваемая схема является схемой включения и поэтому имеет нулевые независимые начальные условия:

$$u_C(0)=0; \quad i_L(0)=0.$$

Индуктивность в момент коммутации представляет собой разрыв, емкость – короткозамкнутый участок. С учетом этого схема для момента времени  $t=0$  является резистивной схемой и имеет вид, как на Рис..

Найдем токи в этой схеме – токи в момент коммутации:

$$R = R_1 + R_3 + \frac{R_4(R_5 + R_H)}{R_4 + R_5 + R_H} = 15 + 10 + \frac{10(10 + 40)}{10 + 10 + 40} = \frac{100}{3} \text{ Ом};$$

$$i_1(0) = i_3(0) = \frac{U_0}{R} = \frac{100 \cdot 3}{100} = 3 \text{ А}; \quad i_C(0) = i_1(0) \frac{R_5 + R_H}{R_4 + R_5 + R_H} = 3 \frac{50}{60} = 2,5 \text{ А}.$$

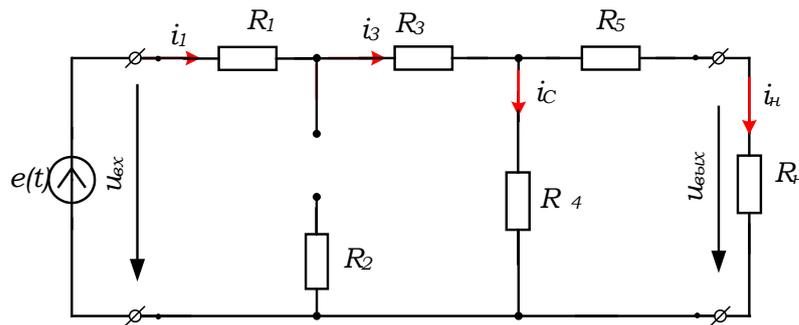


Рис. 2. Схема включения для момента коммутации

Так как ток в емкости пропорционален скорости изменения напряжения на ней, т.е.

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt},$$

то производная напряжения на емкости всегда находится по формуле:

$$\left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=0} = \frac{i_{C0}}{C} = \frac{2,5}{10 \cdot 10^{-6}} = 0,25 \cdot 10^6 \text{ В/с}.$$

Далее в исходной схеме (Рис. 1) выбираем контур, в который входит индуктивность, и записываем уравнение по 2-му закону Кирхгофа

$$R_1 i_1 + L \frac{di_L}{dt} + R_2 i_L = U_0,$$

а из него находим значение производной тока в индуктивности в момент коммутации:

$$\left. \frac{di_L}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U_0 - R_1 i_1(0) - R_2 i_L(0)}{L} = \frac{100 - 15 \cdot 3 - 25 \cdot 0}{0,1} = 0,55 \cdot 10^3 \text{ А/с}.$$

Итак, для расчета переходного процесса найдены начальные условия:

$$u_C(0)=0; \quad \left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=0} = 0,25 \cdot 10^6 \text{ В/с};$$

$$i_L(0)=0; \quad \left. \frac{di_L}{dt} \right|_{t=0} = 0,55 \cdot 10^3 \text{ А/с}.$$

2. Составление характеристического уравнения, нахождение его корней и запись свободных составляющих.

Воспользуемся методом входного комплексного сопротивления. Составим комплексную схему замещения (Рис. 3).

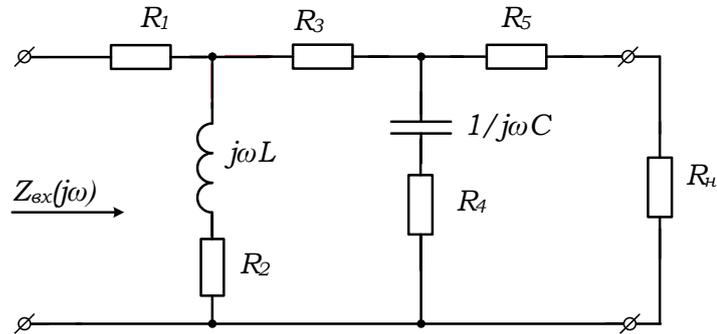


Рис. 3. Комплексная схема замещения

Для этой схемы нужно составить выражение для входного комплексного сопротивления, затем в нем заменить  $j\omega$  на  $p$ . Для упрощения выкладок такую замену можно произвести непосредственно на схеме. В дальнейшем, при изучении операторного метода, такую схему будем называть операторной схемой замещения при нулевых начальных условиях, Рис. 4.

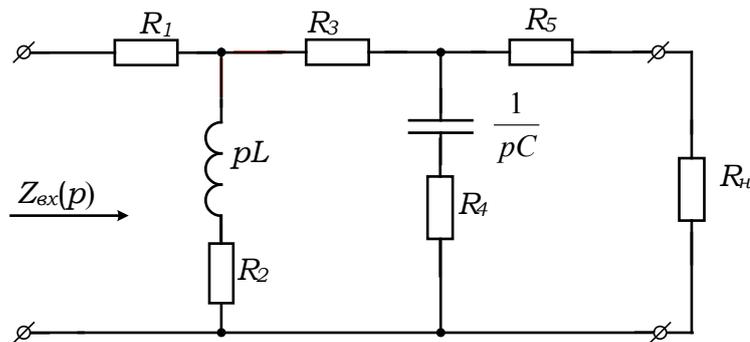


Рис. 4. Операторная схема замещения

Схема представляет собой смешанное соединение элементов, т.е. сочетание последовательного и параллельного соединений. Применяя известные формулы, найдем последовательно сопротивления участков, а затем входное сопротивление:

$$\begin{aligned}
 Z_a(p) &= \frac{(R_5 + R_H) \cdot \left( R_4 + \frac{1}{pC} \right)}{R_5 + R_H + \left( R_4 + \frac{1}{pC} \right)} = \frac{(R_5 + R_H) \cdot (pCR_4 + 1)}{pC(R_5 + R_H + R_4) + 1} = \\
 &= \frac{(10 + 40)(p \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 10 + 1)}{p \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 60 + 1} = \frac{p \cdot 5 \cdot 10^{-3} + 50}{p \cdot 6 \cdot 10^{-4} + 1}; \\
 Z_b(p) &= R_3 + Z_a(p) = 10 + \frac{p \cdot 5 \cdot 10^{-3} + 50}{p \cdot 6 \cdot 10^{-4} + 1} = \frac{11 \cdot 10^{-3} p + 60}{6 \cdot 10^{-4} p + 1};
 \end{aligned}$$

$$Z_c(p) = \frac{(R_2 + pL) \cdot Z_b(p)}{R_2 + pL + Z_a(b)} = \frac{(25 + 0,1p) \cdot \frac{11 \cdot 10^{-3} p + 60}{6 \cdot 10^{-4} p + 1}}{25 + 0,1p + \frac{11 \cdot 10^{-3} p + 60}{6 \cdot 10^{-4} p + 1}} =$$

$$= \frac{1,1 \cdot 10^{-3} p^2 + 6,275 p + 1500}{6 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,126 p + 85};$$

$$Z_{ex}(p) = R_1 + Z_c(p) = 15 + \frac{1,1 \cdot 10^{-3} p^2 + 6,275 p + 1500}{6 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,126 p + 85} = \frac{2 \cdot 10^{-3} p^2 + 8,165 p + 2775}{6 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,126 p + 85}.$$

В числителе находится так называемый характеристический полином. Приравнивая его к нулю, получим характеристическое уравнение:

$$2 \cdot 10^{-3} p^2 + 8,165 p + 2775 = 0 \quad \text{или} \quad p^2 + 4082,5 p + 1,3875 \cdot 10^6 = 0.$$

Корни характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = -\frac{4082,5}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{4082,5}{2}\right)^2 - 1,3875 \cdot 10^6} = -2041,25 \pm 1667,1;$$

$$p_1 = -374,2 \text{ с}^{-1}; \quad p_2 = -3708 \text{ с}^{-1}.$$

Корни характеристического уравнения – вещественные и разные, поэтому свободная составляющая любой переходной величины записывается в виде суммы двух экспонент, каждая из которых затухает со своей постоянной времени:

$$x_{cb}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} = A_1 e^{-\alpha_1 t} + A_2 e^{-\alpha_2 t}.$$

### 3. Определение принужденных составляющих.

В схеме после коммутации действует источник постоянной ЭДС, т.е. напряжение на зажимах схемы постоянно. Это означает, что в установившемся режиме в ветвях схемы протекают постоянные токи. Емкости же такие токи не пропускают, а индуктивности не оказывают им сопротивления. С учетом этого схема становится чисто резистивной (Рис. 2).

Входное сопротивление схемы:

$$R = R_1 + \frac{R_2 \cdot (R_3 + R_5 + R_H)}{R_2 + R_3 + R_5 + R_H} = 15 + \frac{25 \cdot 60}{85} = 32,65 \text{ Ом}.$$

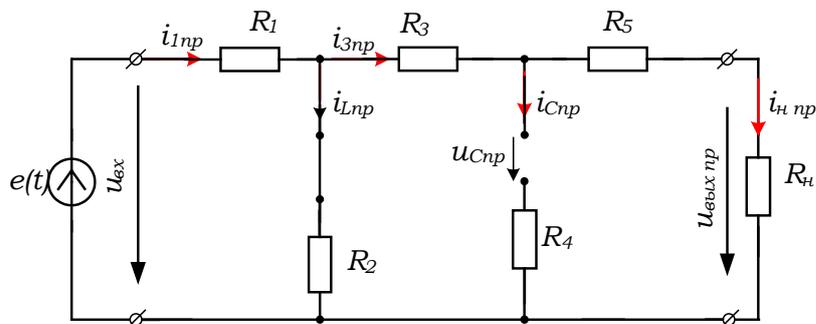


Рис. 2. Схема для расчета принужденных составляющих

Принужденные составляющие токов и напряжения на емкости:

$$i_{1np} = \frac{U_0}{R} = \frac{100}{32,65} = 3,063 \text{ A}; \quad i_{Lnp} = i_{1np} \cdot \frac{R_3 + R_5 + R_H}{R_2 + R_3 + R_5 + R_H} = 3,063 \cdot \frac{60}{85} = 2,162 \text{ A};$$

$$i_{3np} = i_{1np} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_5 + R_H} = 3,063 \cdot \frac{25}{85} = 0,901 \text{ A};$$

$$u_{cnp} = i_{3np} \cdot (R_5 + R_H) = 0,901 \cdot 50 = 45,05 \text{ B}.$$

4. Определение постоянных интегрирования и запись переходных величин.

Найдем последовательно постоянные интегрирования для напряжения на емкости и тока в индуктивности.

а). Напряжение на емкости.

Запишем напряжение в виде суммы свободной и принужденной составляющих:

$$u_C(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + 45,05.$$

Так как это выражение содержит две постоянные интегрирования, то для их определения нужно иметь еще одно уравнение. Его получим путем дифференцирования выражения для  $u_C(t)$ :

$$\frac{du_C(t)}{dt} = p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}.$$

В два последних выражения подставим начальные условия:

$$0 = A_1 + A_2 + 45,05;$$

$$0,25 \cdot 10^6 = p_1 A_1 + p_2 A_2$$

или

$$A_1 + A_2 = -45,05;$$

$$p_1 A_1 + p_2 A_2 = 0,25 \cdot 10^6.$$

Главный и вспомогательные определители:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ p_1 & p_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -374,2 & -3708 \end{vmatrix} = -3333,8;$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -45,05 & 1 \\ 0,25 \cdot 10^6 & p_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -45,05 & 1 \\ 0,25 \cdot 10^6 & -3708 \end{vmatrix} = -0,8295 \cdot 10^5;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & -45,05 \\ p_1 & 0,25 \cdot 10^6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -45,05 \\ -374,2 & 0,25 \cdot 10^6 \end{vmatrix} = 2,331 \cdot 10^5.$$

Постоянные интегрирования:

$$A_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-0,8295 \cdot 10^5}{-3333,8} = 24,9 \text{ B}; \quad A_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{2,331 \cdot 10^5}{-3333,8} = -69,9 \text{ B}.$$

Окончательное выражение для переходного напряжения на емкости:

$$u_C(t) = 24,9 e^{-374,2t} - 69,9 e^{-3708t} + 45,05 \text{ B}.$$

б). Ток в индуктивности.

Запишем выражение для тока переходного процесса и его первой производной:

$$i_L(t) = B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} + 2,162;$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = p_1 B_1 e^{p_1 t} + p_2 B_2 e^{p_2 t}.$$

В эти выражения подставим начальные условия:

$$0 = B_1 + B_2 + 2,162;$$

$$0,55 \cdot 10^3 = p_1 B_1 + p_2 B_2$$

или

$$B_1 + B_2 = -2,162;$$

$$p_1 B_1 + p_2 B_2 = 0,55 \cdot 10^3.$$

Главный и вспомогательные определители:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ p_1 & p_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -374,2 & -3708 \end{vmatrix} = -3333,8;$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -2,162 & 1 \\ 0,55 \cdot 10^3 & p_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -2,162 & 1 \\ 0,55 \cdot 10^3 & -3708 \end{vmatrix} = 7467;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & -2,162 \\ p_1 & 0,55 \cdot 10^3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -2,162 \\ -374,2 & 0,55 \cdot 10^3 \end{vmatrix} = -259.$$

Постоянные интегрирования:

$$B_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{7467}{-3333,8} = -2,24 \text{ А}; \quad B_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-259}{-3333,8} = 0,078 \text{ А}.$$

Окончательное выражение для переходного тока в индуктивности:

$$i_L(t) = -2,24 e^{-374,2t} + 0,078 e^{-3708t} + 2,162 \text{ А}.$$

5. Построение графиков переходных величин.

Найдем постоянные времени экспонент:

$$\tau_1 = \frac{1}{|p_1|} = \frac{1}{374,2} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad \tau_2 = \frac{1}{|p_2|} = \frac{1}{3708} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Время переходного процесса практически составляет три-четыре значения самой большой постоянной времени, т.е.

$$t_{mn} = 3\tau_1 = 3 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

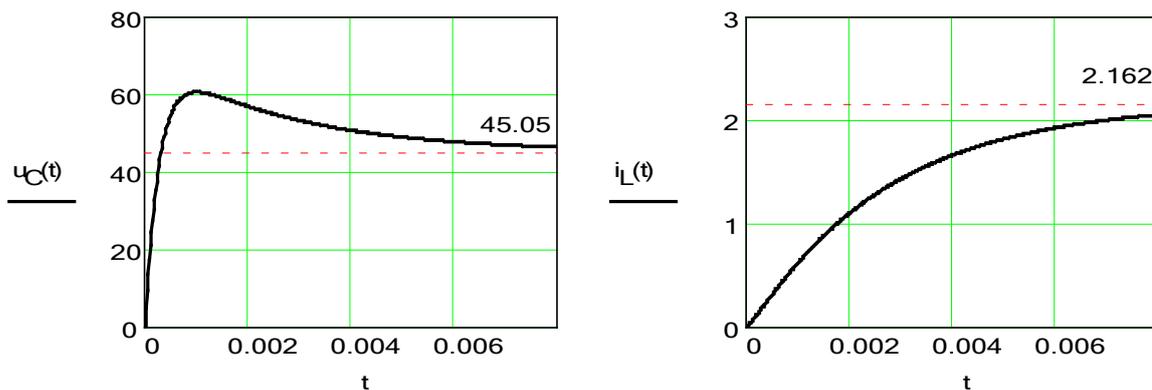


Рис. 6. Графики переходных величин

Предложенный алгоритм расчета ПП применим и к цепям более высоких порядков (третьего и выше) с источниками постоянных и гармонических ЭДС. Рассмотрим пример расчета ПП классическим методом цепи третьего порядка.

### Расчет переходных процессов операторным методом

Задача 1. В схеме на Рис. 1 найти изображение напряжения на емкости после коммутации. В схеме действует источник постоянной ЭДС.

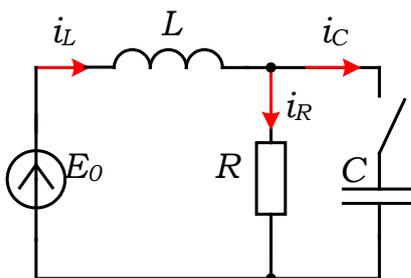


Рис. 1. Схема

Дифференциальное уравнение для напряжения на емкости известно и при  $e(t) = E_0$  имеет вид:

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{du_C}{dt} + u_C = E_0.$$

Естественно, для перехода к операторному уравнению нужно знать начальные условия, т.е. значение напряжения и его первой производной в момент коммутации. Найдем начальные условия.

В схеме до коммутации напряжение на емкости равно нулю,  $u_C(0_-) = 0$ , ток в индуктивности определяется только активным сопротивлением:  $i_L(0_-) = \frac{E_0}{R}$ . Согласно законам коммутации, эти величины скачком измениться не могут, поэтому для  $t = 0$  имеем:

$$u_C(0) = 0, \quad i_L(0) = \frac{E_0}{R}.$$

Т.к.  $u_C(0) = 0$ , то в момент коммутации емкость представляет собой короткозамкнутый участок, тока в сопротивлении  $R$  нет, и ток в ветви с емкостью определяется выражением:

$$i_C(0) = i_L(0) = \frac{E_0}{R}.$$

Из компонентного уравнения емкости  $i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$  находим значение производной в момент коммутации:

$$\left. \frac{du_C(t)}{dt} \right|_{t=0} = \dot{u}_C(0) = \frac{i_C(0)}{C} = \frac{E_0}{RC}.$$

Теперь можно записать в операторной форме

$$LC[p^2 U_C(p) - pu_C(0) - \dot{u}_C(0)] + \frac{L}{R}[pU_C(p) - u_C(0)] + U_C(p) = \frac{E_0}{p}$$

и решить относительно изображения искомой величины с учетом  $u_C(0)=0$ :

$$U_C(p) = \frac{\left(p \frac{L}{R} + 1\right) E_0}{p \left( LCp^2 + \frac{L}{R} p + 1 \right)}.$$

### Нелинейные резистивные элементы, их характеристики и параметры

Простые нелинейные электрические цепи постоянного тока рассчитывают графическим способом. При этом считаются известными вольт-амперные характеристики (ВАХ) нелинейных элементов, входящих в нелинейную цепь постоянного тока.

Нелинейный элемент, ВАХ которого в рабочем диапазоне приближенно можно изобразить прямолинейным участком, заменяют последовательным соединением линейного резистивного элемента с источником ЭДС. При этом сопротивление линейного элемента принимается равным дифференциальному сопротивлению нелинейного элемента в рабочей точке его ВАХ.

Нелинейный элемент в области рабочей точки характеристики можно также заменить параллельным соединением источника тока с линейным элементом, проводимость которого равна дифференциальной проводимости нелинейного элемента в этой точке.

Разветвленная нелинейная электрическая цепь постоянного тока с одним нелинейным элементом может быть рассчитана методом эквивалентного генератора. При этом заменяют линейную часть нелинейной цепи постоянного тока по отношению к нелинейному элементу эквивалентным источником. Полученную цепь последовательного соединения источника, линейного и нелинейного элементов рассчитывают графически.

На практическом занятии необходимо решить разноуровневые задачи по пройденному лекционному материалу. Примерный перечень задач приведен ниже. Рекомендуемая литература и дополнительный теоретический материал представлены в рабочей программе дисциплины «Электротехника и электроника».

Рассмотрим применение метода эквивалентного генератора на примере схемы, изображенной на рис. 17.

**Задача.** Определить ток в ветви  $bc$ , если  $E_2 = E_3 = E_4 = 20$  В,  $E_5 = 30$  В,  $E_6 = 60$  В,  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 2$  Ом,  $R_5 = 3$  Ом,  $R_6 = 6$  Ом.

Решение задачи состоит из двух этапов.

1. Определение напряжения холостого хода  $U_{Xbc}$  на зажимах разомкнутой ветви  $bc$ . Схема в этом случае имеет вид, показанный на рис. 18. Для нахождения  $U_{Xbc}$  следует найти ток  $I_1$  и напряжение  $U_{ac}$ :

$$I_1 = E_2 / (R_1 + R_2) = 20 / (2 + 2) = 5 \text{ A},$$

Напряжение  $U_{ac}$  находим по формуле узлового напряжения;

$$U_{ac} = \frac{G_5 E_5 - G_4 E_4 - G_6 E_6}{G_4 + G_5 + G_6} = \frac{\frac{1}{3} \cdot 30 - \frac{1}{2} \cdot 20 - \frac{1}{6} \cdot 60}{\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6}} = -10 \text{ В}$$

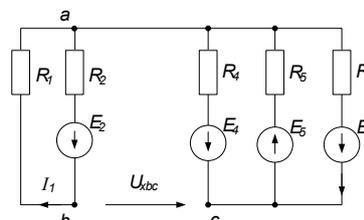
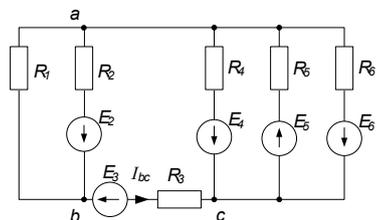


Рис. 17 Рис.18

Напряжение найдем по второму закону Кирхгофа, обходя контур  $bacb$ :

$$U_{Xbc} = R_3 I_1 + U_{ac} = 2 \cdot 5 - 10 = 0.$$

2. Определение эквивалентного сопротивления  $R_{Экbc}$ . Схема в этом случае имеет вид, показанный на рис. 19:

$$R_{Экbc} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{1}{1/R_4 + 1/R_5 + 1/R_6} = \frac{2 \cdot 2}{2 + 2} + \frac{1}{1/2 + 1/3 + 1/6} = 2 \text{ Ом}.$$

Подставляя найденные, значения, получаем

$$I_{bc} = (0 - 20) / (2 + 2) = -5 \text{ A},$$

т.е. истинный ток в. схеме имеет направление, противоположное выбранному.

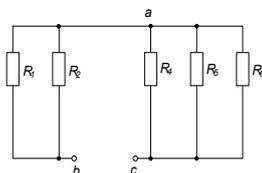


Рис. 19

Метод эквивалентного генератора применяется при расчете нелинейных цепей постоянного тока с одним нелинейным элементом. Например, широко распространены мостовые схемы измерения неэлектрических величин электрическими методами, в которых с помощью нелинейного элемента (преобразователя), включенного в одно из плеч или диагональ мостовой схемы, происходит преобразование неэлектрического воздействия в электрический сигнал (ток или напряжение), который фиксируется измерительным прибором.

При расчете нелинейных цепей постоянного тока также используется метод свертывания, который сводится к графическому определению результирующей вольт-амперной характеристики нескольких нелинейных элементов, и метод пересечения характеристик, который особенно удобен, когда к источнику напряжения подключены линейный и нелинейный элементы. Последний метод широко используется в электронной технике для анализа работы управляемых нелинейных элементов (транзисторов, ламп и др.).

Решение нелинейных уравнений, описывающих нелинейную электрическую цепь постоянного тока с двумя узлами, также проводят графически. При этом все уравнения необходимо строить в одинаковом масштабе, на одном графике в функции узлового напряжения.

На практическом занятии необходимо решить разноуровневые задачи разными методами по пройденному лекционному материалу. Примерный перечень задач приведен ниже. Рекомендуемая литература и дополнительный теоретический материал представлены в рабочей программе дисциплины «Электротехника и электроника».

*Графический метод расчета* (для двух узлов) нелинейной цепи постоянного тока

Определить графическим методом значение токов в нелинейной цепи постоянного тока, показанной на рис. 20, если  $E_1 = E_3 = 100$  В и  $R_3 = 500$  Ом.

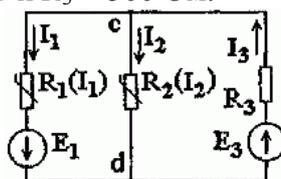


Рис. 20

Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов симметричны относительно начала координат и показаны на рис. 21 ( $I_1(U_1)$  – кривая 1;  $I_2(U_2)$  – кривая 2).

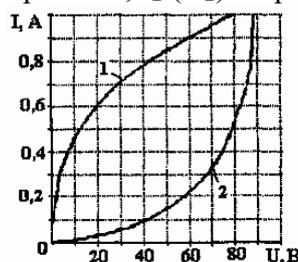


Рис. 21

Решение. Для всех трех ветвей цепи напряжение  $U_{cd}$  одинаково (см. рис. 21).

Построим вольт-амперные характеристики ветвей  $I_1(U_{cd})$ ;  $I_2(U_{cd})$ ;  $I_3(U_{cd})$  (рис. 22).

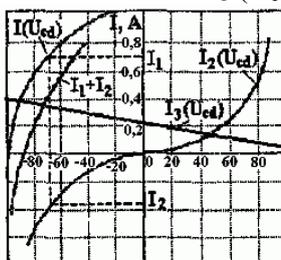


Рис. 22

Характеристика второй ветви  $I_2(U_{cd})$  построена для нелинейного элемента 2.

Для первой ветви  $U_{cd} = U_1 - E_1$ . Из соответствующих значений  $U_1$  вольт-амперной характеристики 1 вычитаем  $E_1$ . Результаты расчета характеристики  $I_1(U_{cd})$  приведены в таблице.

$U_1$ , В	100	80	60	40	30	20	10	5	0
$U_{cd} = U_1 - E_1$	0	-20	-40	-60	-70	-80	-90	-95	-100
$I_1$ , А	1,1	1,0	0,9	0,8	0,72	0,6	0,45	0,3	0
$U_1$ , В	-5	-10	-20	-30	-40	-60	-80	-100	
$U_{cd} = U_1 - E_1$	-105	-110	-120	-130	-140	-160	-180	-200	
$I_1$ , А	-0,3	-0,4	-0,6	-0,72	-0,8	-0,9	-1,0	-1,1	

По данным таблицы строим вольт-амперную характеристику первой ветви  $I_1(U_{cd})$ .

Третья ветвь является линейной, ее вольт-амперная характеристика  $U_{cd}(I_3) = E_3 - R_3 \cdot I_3$ .

Для построения ВАХ по точкам пересечения прямой и осей координат находим

$$U_{cd}=0; I_3=E_3/R_3=100/500=0,2 \text{ А}; I_3=0; U_{cd}=E_3=100 \text{ В. } U_{cd}=0; I_3=E_3/R_3=100/500=0,2 \text{ А}; I_3=0; U_{cd}=E_3=100 \text{ В.}$$

По первому закону Кирхгофа  $I_1 + I_2 = I_3$  построим зависимость  $I_1 + I_2 = f(U_{cd})$ , т. е. эквивалентную вольт-амперную характеристику первых двух ветвей. Эту характеристику получаем, складывая ординаты характеристик  $I_1(U_{cd})$  и  $I_2(U_{cd})$ . В точке пересечения зависимостей  $I_1 + I_2 = f(U_{cd})$  и  $I_3(U_{cd})$  выполняется равенство  $I_1 + I_2 = I_3$ , т. е. точка пересечения дает значения токов. Таким образом,

$$U_{cd} = -72 \text{ В}; I_1 = 0,68 \text{ А}; I_2 = -0,32 \text{ А}; I_3 = 0,36 \text{ А.}$$

Приведение нелинейной цепи постоянного тока к графическому методу расчета для двух узлов.

Определить значения токов во всех ветвях нелинейной цепи постоянного тока рис. 23.

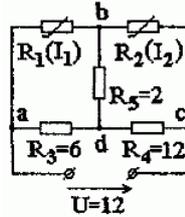


Рис. 23

Величины сопротивлений и входного напряжения указаны на рис. 24.

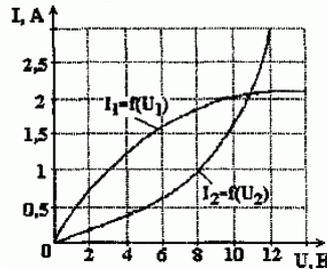


Рис. 24

Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов показаны на рис. 24 в виде кривых  $I_1 = f(U_1)$ ;  $I_2 = f(U_2)$ .

Решение. Для определения токов  $I_1$  и  $I_2$  в ветвях с нелинейными элементами разомкнем эти ветви и найдем напряжения  $U_{1x}$  и  $U_{2x}$  из схемы рис. 25.

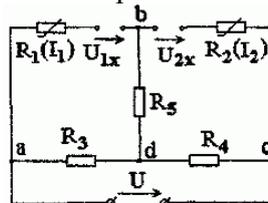


Рис. 25

$$U_{1x} = U \frac{R_3 R_3 + R_4}{R_3 + R_4} = 12 \cdot \frac{6 \cdot 6 + 12}{6 + 12} = 4 \text{ В}; U_{2x} = U \frac{R_4 R_3 + R_4}{R_3 + R_4} = 12 \cdot \frac{12 \cdot 6 + 12}{6 + 12} = 8 \text{ В}.$$

$$U_{1x} = U \frac{R_3 R_3 + R_4}{R_3 + R_4} = 12 \cdot \frac{6 \cdot 6 + 12}{6 + 12} = 4 \text{ В}; U_{2x} = U \frac{R_4 R_3 + R_4}{R_3 + R_4} = 12 \cdot \frac{12 \cdot 6 + 12}{6 + 12} = 8 \text{ В}.$$

2. Включим в соответствующие ветви с нелинейными элементами ЭДС  $E_{1x} = U_{1x}$  и  $E_{2x} = U_{2x}$  и замкнем накоротко зажимы  $a$  и  $c$ , к которым присоединен внешний источник напряжения (рис. 26).

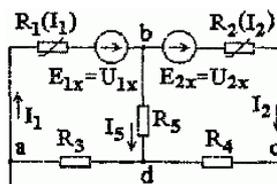


Рис. 26

Токи  $I_1$  и  $I_2$  в этой схеме будут равны действительным токам в соответствующих ветвях заданной схемы. После замены двух параллельных ветвей с сопротивлением  $R_3$  и одной эквивалентной ветвью получаем схему с двумя узлами (рис. 27), где

$$R_5 = 2 \text{ Ом}; R_{34} = R_3 \cdot R_4 / (R_3 + R_4) = 4 \text{ Ом}.$$

$$R_5 = 2 \text{ Ом}; R_{34} = R_3 \cdot R_4 / (R_3 + R_4) = 4 \text{ Ом}.$$

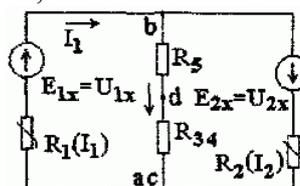


Рис. 27

Пользуясь схемой рис. 27, можно токи  $I_1$  и  $I_2$  определить графически.

**Задача 1.** Нелинейный элемент имеет вольт-амперную характеристику, уравнение которой

$$I = a \cdot U + b \cdot U^3 \quad \left( a = 8 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{Ом}}, b = 5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{В}^2} \right)$$

Построить вольт-амперную характеристику элемента. Определить статическое и динамическое сопротивления элемента. Подсчитать значения величин этих сопротивлений для напряжения  $U_a = 4 \text{ В}$ .

Построить кривую зависимости отношения  $\frac{r_{ст}}{r_d}$  в функции  $U$ .

**Задача 2.** Дан нелинейный элемент, характеристика которого

$$I = a \cdot U^2 + 2ab \cdot U \quad \left( a = 2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{В}}, b = 0,5 \text{ В} \right)$$

Построить характеристику элемента. Найти выражения для  $r_{ст}$  и  $r_d$ . Найти значения этих величин для напряжения  $U = 5 \text{ В}$ . Построить кривую  $\frac{r_{ст}}{r_d} = F(U)$ .

**Задача 3.** Ток кенотрона (в пределах от нуля до тока насыщения) в зависимости от анодного напряжения (при постоянстве напряжения накала) выражается уравнением, получившим название «закона степени трех вторых»,  $I_a = g \cdot U_a^{3/2}$ , где коэффициент  $g$  зависит от формы и размеров электродов и для данной лампы является постоянной величиной.

Начертить вольт-амперную характеристику. Вычислить крутизну характеристики  $S$  в точке, соответствующей анодному напряжению  $200 \text{ В}$ . Чему равно внутреннее сопротивление лампы постоянному и переменному токам при том же напряжении, т.е. статическое и динамическое сопро-

тивления лампы. Коэффициент  $g$  принять равным  $0,07 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{В}^{3/2}}$

**Задача 4.** Даны нелинейное сопротивление  $r_1$  ( $I_1$ ) вольт-амперная характеристика которого

$$I_1 = a \cdot U_1^2 \quad \left( a = 0,02 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{В}} \right)$$

и линейное сопротивление  $r_2 = 12 \text{ Ом}$ .

Определить ток, протекающий в цепи, и напряжение на каждом сопротивлении при их последовательном соединении и включении на постоянное напряжение  $U = 4 \text{ В}$ .

Задачу решить аналитически и графически.

**Задача 5.** Вольт-амперная характеристика тиритового диска выражается уравнением  $I = 2,13 \cdot 10^{-10} \cdot U^{3,5}$  ( $I$  – в амперах,  $U$  – в вольтах).

Подобрать линейное сопротивление  $r$ , подключаемое параллельно к тиритовому диску так, чтобы при напряжении  $U = 550 \text{ В}$  ток в неразветвленной части цепи равнялся  $I = 1 \text{ А}$ .

## Нелинейные магнитные цепи при постоянных потоках

Основанием к расчету магнитных цепей служат: первый закон Кирхгофа для магнитных цепей и закон полного тока – второй закон Кирхгофа для магнитных цепей.

**Первый закон Кирхгофа для магнитных цепей** гласит: алгебраическая сумма магнитных потоков в узле магнитной цепи равна нулю.

**Закон полного тока** применяется к замкнутому контуру, образованному средними магнитными линиями магнитной цепи и имеет вид:

$$\int \vec{H} \rightarrow \cdot d\vec{l} \rightarrow = \sum I \cdot w,$$

где

$$\int \vec{H} \rightarrow \cdot d\vec{l} \rightarrow = \sum H \cdot l$$

– падение магнитного напряжения  $U_M = H \cdot l$  в контуре;

$$F = \sum I \cdot w$$

– магнитодвижущая сила контура (м. д. с.).

**Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей** сформулируем следующим образом: алгебраическая сумма магнитных напряжений  $U_M = H \cdot l$  в замкнутом контуре магнитной цепи ( $\sum U_M = \sum H \cdot l$ )

равна алгебраической сумме магнитодвижущих сил  $F = I \cdot w$  в том же контуре ( $\sum F = \sum I \cdot w$ )

$$\sum U_M = \sum F$$

или

$$\sum H \cdot l = \sum I \cdot w.$$

Задачи на расчет магнитной цепи могут быть двух видов: *прямая задача на расчет магнитной цепи* – когда задан поток и требуется рассчитать магнитодвижущую силу (м. д. с.) и *обратная задача на расчет магнитной цепи* – когда по заданной м. д. с. требуется рассчитать магнитный поток.

В обоих случаях должны быть известны геометрические размеры магнитной цепи и заданы кривые намагничивания ее материалов.

#### **Алгоритм прямой задачи расчета неразветвленной магнитной цепи**

Дана конфигурация и геометрические размеры неразветвленной магнитной цепи, кривая (или кривые) намагничивания магнитного материала и магнитный поток или индукция магнитного поля в каком-либо сечении. Требуется найти магнитодвижущую силу, ток или число витков намагничивающей обмотки.

Расчет проводим в соответствии с алгоритмом:

1. Разбиваем магнитную цепь на **однородные** (из одного магнитного материала) **участки постоянного сечения** и определяем длины  $l_k$  и площади поперечного сечения  $S_k$  участков. Длины участков (в метрах) берем по средней силовой линии.

2. Исходя из постоянства потока вдоль всей неразветвленной магнитной цепи, по заданному магнитному потоку  $\Phi$  и сечениям  $S_k$  участков находим магнитные индукции на каждом участке:

$$B_k = \Phi S_k.$$

Если задана магнитная индукция на каком-либо участке магнитной цепи, то магнитный поток вдоль всей неразветвленной цепи

$$\Phi = B_k \cdot S_k.$$

3. По найденным магнитным индукциям  $B_k$  участков цепи и кривой намагничивания материала  $k$ -го участка цепи (например, рис. 2.1, табл. 2.1) определяем напряженности поля  $H_k$  на каждом участке магнитной цепи.

Напряженность поля в воздушном зазоре находим по формуле

$$H_{возд} = B_{возд} \mu_0 = B_{возд} 4\pi \cdot 10^{-7}.$$

4. Подсчитаем сумму падений магнитных напряжений  $U_{Mk} = H_k \cdot l_k$  вдоль всей магнитной цепи

$$\sum U_{Mk} = \sum H_k \cdot l_k$$

и на основании *второго закона Кирхгофа для магнитной цепи* приравняем сумме магнитодвижущих сил  $F_k = I_k \cdot w_k$  вдоль всей магнитной цепи:

$$\sum H_k \cdot l_k = \sum I_k \cdot w_k.$$

Основным допущением при расчете является то, что магнитный поток вдоль всей неразветвленной магнитной цепи полагаем неизменным. В действительности не большая часть потока всегда замыкается, минуя основной путь. Этот поток называют потоком рассеяния.

#### **Единицы измерения магнитных величин**

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

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

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

$F = I \cdot w$  – магнитодвижущая сила (м. д. с.), А (Ампер);

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

### Константы

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

Гн/м – магнитная постоянная.

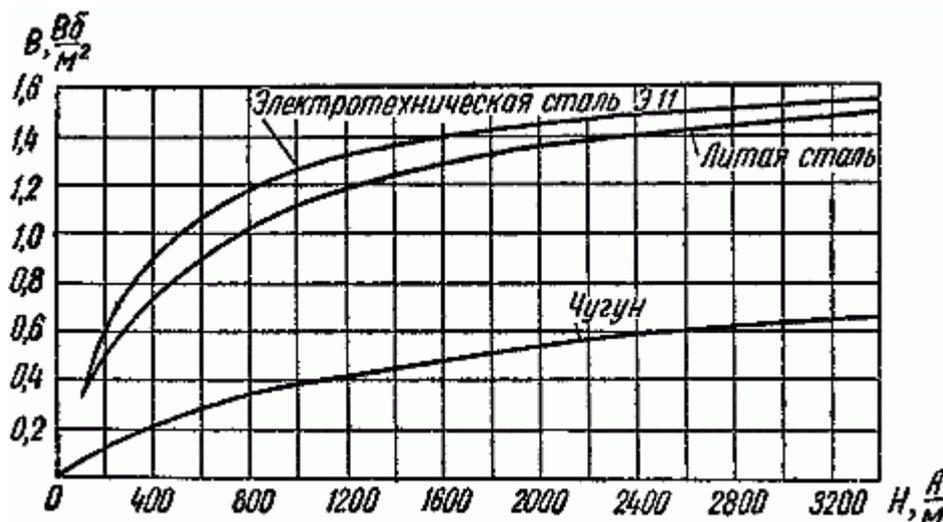


Рис. 2.1 Кривые намагничивания стали и чугуна

Таблица 2.1 – Данные основной кривой намагничивания листовой электротехнической стали Э11

B, Вб/м <sup>2</sup>	H, А/м									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	167
0,5	171	175	179	183	187	191	195	199	203	207
0,6	211	216	221	226	231	236	241	246	251	256
0,7	261	266	271	276	281	287	293	299	306	312
0,8	<b>318</b>	324	330	337	344	<b>352</b>	360	369	378	387
0,9	397	407	417	427	437	447	458	469	480	491
1,0	502	514	527	541	555	570	585	600	615	631
1,1	647	664	682	<b>701</b>	720	739	759	779	800	821
1,2	843	866	891	918	946	976	1010	1040	1070	1100
1,3	1140	1180	1220	1260	1300	1340	1380	1430	1480	1530
1,4	1580	1640	1710	1780	1860	1950	2050	2150	2260	2380
1,5	2500	2640	2790	2950	3110	3280	3460	3660	3880	4120
1,6	4370	4630	4910	5220	5530	5880	6230	6600	6980	7370
1,7	7780	8200	8630	9070	9630	10100	10600	11100	11600	12200
1,8	12800	13400	14000	14600	15200	15900	16600	17300	18000	18800
1,9	19700	20600	21600	22 600	23600	24600	25600	26800	28200	29600
2,0	31000	32500	34300	36500	39000	42000	45500	49500	54500	59500

Примеры пользования таблицей:

1) При  $B = 0,80$  Вб/м<sup>2</sup>:  $H = 318$  А/м; при  $B = 0,85$  Вб/м<sup>2</sup>:  $H = 352$  А/м.

2) При  $B = 1,13$  Вб/м<sup>2</sup>:  $H = 701$  А/м.

**Задача 1.** На рис. 2.2 изображен разрез трех катушек, по которым проходят токи  $I_1 = 8$  А,  $I_2 = 10$  А и  $I_3 = 5$  А.

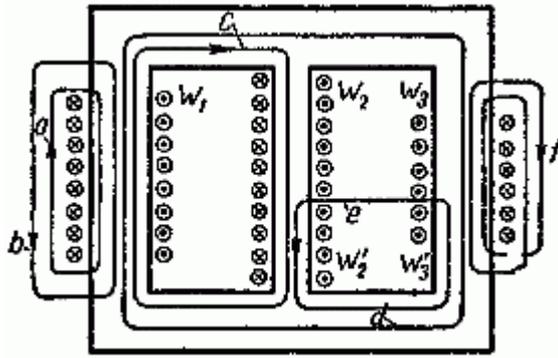


Рис. 2.2

Катушки размещены на стальном сердечнике. Первая катушка (левая)  $w_1$  имеет 8 витков, вторая (средняя)  $w_2$  – 10 витков и третья (правая)  $w_3$  – 6 витков. Определить полную магнитодвижущую силу (м. д. с.) по замкнутым контурам  $a, b, c, d, e, f$ , показанным на рис. 2.2. Контур  $e$  охватывает катушки  $w'_2$  с 4 витками и  $w'_3$  с 2 витками.

Изменится ли результат решения задачи, если при тех же данных катушки разместить на сердечнике из другого магнитного материала?

### Решение

Воспользуемся *законом полного тока*. Линейный интеграл вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру равен алгебраической сумме токов, проходящих сквозь поверхность, ограниченную контуром интегрирования,

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \rightarrow \sum I \cdot w.$$

Пользуясь *законом полного тока*, найдем:

$$\int_a \vec{H} \cdot d\vec{l} = w_1 \cdot I_1 = 8 \cdot 8 = 64 \text{ A};$$

$$\int_b \vec{H} \cdot d\vec{l} = -w_1 \cdot I_1 = -8 \cdot 8 = -64 \text{ A};$$

$$\int_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = w_2 \cdot I_2 - w_1 \cdot I_1 = 10 \cdot 10 - 8 \cdot 8 = 36 \text{ A};$$

$$\int_d \vec{H} \cdot d\vec{l} = w_1 \cdot I_1 - w_2 \cdot I_2 + w_2 \cdot I_2 + w_3 \cdot I_3 = 8 \cdot 8 + 6 \cdot 5 = 94 \text{ A};$$

$$\int_e \vec{H} \cdot d\vec{l} = w'_2 \cdot I_2 - w'_3 \cdot I_3 = 4 \cdot 10 + 2 \cdot 5 = 50 \text{ A};$$

$$\int_f \vec{H} \cdot d\vec{l} = 2w_3 \cdot I_3 = 2 \cdot 6 \cdot 5 = 60 \text{ A}.$$

В правой части последнего выражения коэффициент 2 учитывает то обстоятельство, что витки  $w_3$  охватываются контуром интегрирования (циркуляции) дважды.

Следует заметить, что при пользовании правилом винта необходимо всегда сопоставлять направление обхода по контуру циркуляции с направлениями токов, пронизывающих поверхность, ограниченную контуром циркуляции.

Результаты решения задачи не изменятся, если катушки разместить на сердечнике из другого магнитного материала, так как м. д. с. определяется только величиной полного тока и не зависит от магнитных свойств вещества.

1. Магнитная индукция в сердечнике при напряженности  $H=200$  А/м составляет  $B=1,0$  Тл. Определить относительную магнитную проницаемость.

Ответ:  $\mu = 3979$ .

2. Определить магнитное сопротивление участка цепи длиной  $\ell = 10 \text{ см}$  и сечением  $S = 10 \text{ см}^2$ , если  $\mu = 5 \cdot 10^3$ .

Ответ:  $R_M = 15915 \text{ Гн}^{-1}$ .

3. В условиях предыдущей задачи определить падение магнитного напряжения на участке, если индукция  $B = 0,8 \text{ Тл}$ .

Ответ:  $U_M = 127 \text{ А}$ .

## ВАХ и параметры полупроводниковых приборов. Расчет параметров биполярных и полевых транзисторов

### Задача 1.

Построить схему двухполупериодного мостового выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром и определить коэффициент сглаживания при условии, что амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора  $U_{2m} = 250 \text{ В}$ , выпрямленный ток, проходящий через каждый диод,  $I_0 = 50 \text{ мА}$ , частота сети  $f_c = 400 \text{ Гц}$ , емкость конденсатора фильтра  $C_\phi = 10 \text{ мкФ}$ .

### Задача 2.

Определить частоту пульсации первой гармоники напряжения на нагрузке двухполупериодного выпрямителя, если напряжение первичной обмотки трансформатора имеет частоту  $f_c = 400 \text{ Гц}$ ?

### Задача 3.

В схему однополупериодного выпрямителя включен емкостный сглаживающий фильтр. Определить емкость конденсатора фильтра, если сопротивление нагрузки  $R_H = 820 \text{ Ом}$ , частота сети  $f_c = 50 \text{ Гц}$ , коэффициент сглаживания  $q = 10$ .

### Задача 4 (Варианты 1-10)

Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, используя входную и выходные характеристики, определить коэффициент усиления  $h_{21Э}$ , значение напряжения на коллекторе  $U_k$ , мощность на коллекторе  $P_k$ , если дано напряжение на базе  $U_b$  (В), значение сопротивления нагрузки  $R_k$  (кОм) и напряжение источника питания  $E_k$  (В). Данные для своего варианта взять из таблицы.

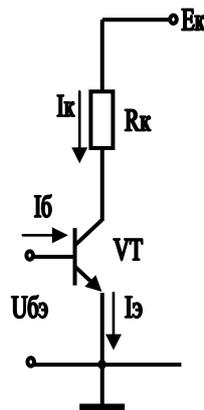
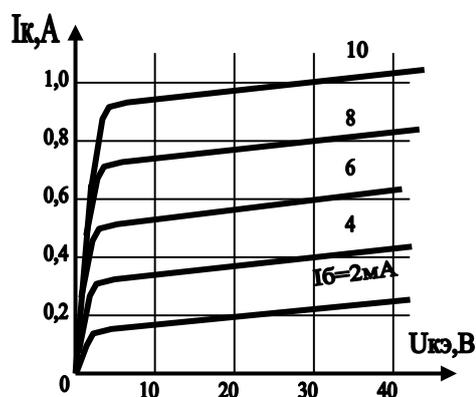
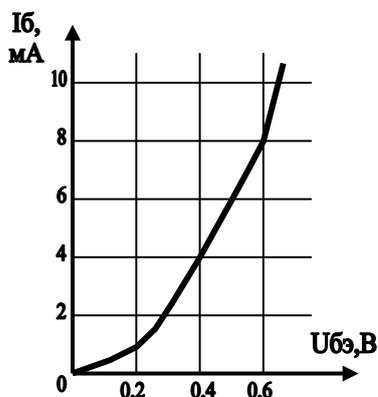


Рис. Схема включения транзистора по схеме с ОЭ.

Но- мер вариан- та	$U_{бэ}$ , В	$R_k$ , кОм	$E_k$ , В
1	0,4	0,05	40
2	0,15	0,2	40
3	0,15	0,1	40
4	0,1	0,05	40
5	0,15	1	40

6	0,25	10	20
7	0,3	0,1	20
8	0,3	5	40
9	0,25	1	40
10	0,2	1	20



### Задача 5.

Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления  $h_{21\sigma}$  по его входной характеристике и выходным характеристикам, если  $U_{\sigma\epsilon} = 0,4\text{В}$ ;  $U_{\kappa\epsilon} = 2,5\text{В}$ . подсчитать также коэффициент передачи по току  $h_{21\sigma}$  и мощность  $P_k$  на коллекторе.

*Решение.* 1. По входной характеристике определяем при  $U_{\sigma\epsilon} = 0,4\text{В}$  ток базы:  $I_{\sigma} = 500\text{ мкА}$ .

2. По выходным характеристикам для  $U_{\sigma\epsilon} = 2,5\text{В}$  и  $I_{\sigma} = 500\text{ мкА}$  определяем ток коллектора:  $I_{\kappa} = 36\text{ мА}$ .

3. На выходных характеристиках строим отрезок  $AB$ , из которого находим:

$$\Delta I_{\kappa} = A = I_{\kappa 1} - I_{\kappa 2} = 3 - 2 = 1\text{ мА};$$

$$\Delta I_{\sigma} = A = I_{\sigma 1} - I_{\sigma 2} = 5 - 4 = 1\text{ мкА} = 0,1\text{ мА}.$$

4. Определяем коэффициент усиления:

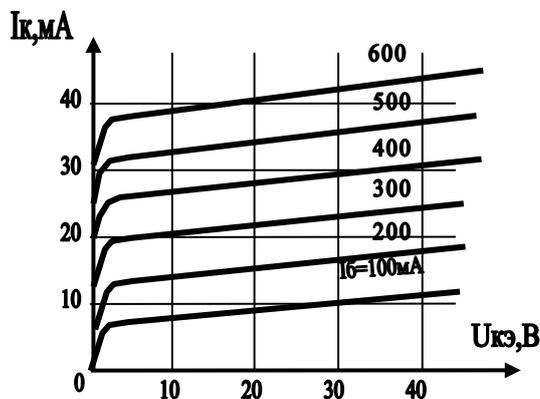
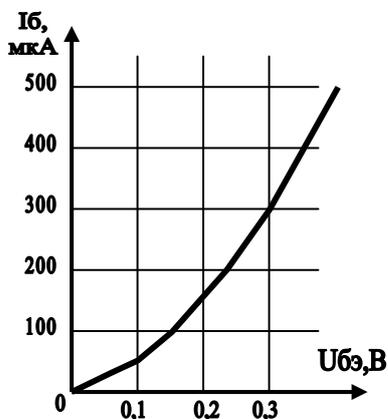
$$h_{21\sigma} = \Delta I_{\kappa} / \Delta I_{\sigma} = 1 / 0,1 = 10.$$

5. Определяем коэффициент передачи по току

$$h_{21\sigma} = h_{21\sigma} / (h_{21\sigma} + 1) = 10 / (10 + 1) = 0,91.$$

6. Определяем мощность на коллекторе

$$P_k = U_{\kappa} I_{\kappa} = 2,5 \cdot 36 = 90\text{ мВт} = 0,09\text{ Вт}.$$



## Расчет электрических цепей с усилителями на биполярных транзисторах

Задача. Расчёт каскада транзисторного усилителя для схемы с общим эмиттером.

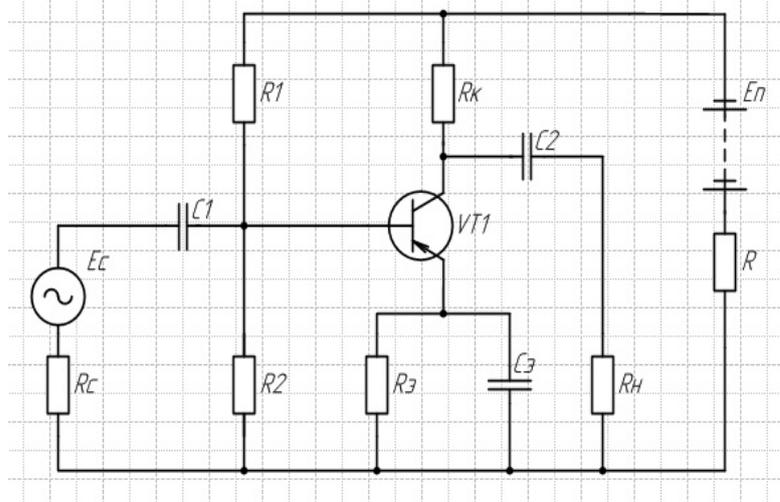


Рисунок 1 – Общая схема транзисторного усилителя с общим эмиттером.

Выбор типа транзистора

Тип транзистора: 2N3486A; p-n-р-типа.

Параметры:

- максимальное допустимое напряжение между коллектором и эмиттером  $U_{кэм} = 60$  В;
- максимальный допустимый ток на коллекторе  $I_{кмакс} = 0,6$  А;
- максимальный допустимый ток на базе  $I_{бмакс} = 6$  мА;
- коэффициент передачи по току  $h_{21} = 100$ .

Наибольшее допустимое напряжение между коллектором и эмиттером – должно составлять условно одну целую две десятых от напряжения источника питания. Отсюда следует, что напряжения источника питания можно рассчитать по формуле:

$$E_{пит} = \frac{U_{кэм}}{1,2}$$

где  $U_{кэм}$  – максимальное допустимое напряжение между коллектором и эмиттером, В;  
 $E_{пит}$  – напряжения источника питания, В.

$$E_{пит} = \frac{60}{1,2} = 50 \text{ В.}$$

Напряжение на выходе каскада вычислим по формуле:

$$U_{вых} = \frac{E_{пит}}{2}$$

где  $U_{вых}$  – напряжение на выходе каскада, В;  
 $E_{пит}$  – напряжения источника питания, В.

$$U_{вых} = \frac{50}{2} = 25 \text{ В.}$$

Наибольший допустимый ток коллектора, должен быть больше чем наибольшая возможная амплитуда тока в нагрузке, которая находится по формуле:

$$I_{нм} = \frac{U_{вых}}{R_{н}} \quad (2.1)$$

где  $U_{вых}$  – напряжение на выходе каскада, В;  
 $I_{нм}$  – наибольшая возможная амплитуда тока в нагрузке, А;  
 $R_{н}$  – сопротивление нагрузки, Ом.

$$I_{нм} = \frac{25}{100} = 0,25 \text{ А.}$$

Определение режим работы транзистора

Определяем режим работы транзистора по нагрузочной прямой для постоянного тока, построенной на семействе выходных статических характеристик транзистора.

Нагрузочную прямую строим по двум точкам:

Точка 1 ( $I_k = 0$ ;  $U_{кэ} = E_{пит} = 50 \text{ В.}$ );

Точка П ( $I_{кп}$ ;  $U_{кэп}$ ).

где  $U_{кэ}$  – напряжение коллектор-эмиттер;

$E_{пит}$  – напряжения источника питания;

$I_k$  – ток коллектора;

$I_{кп}$  – ток коллектора покоя;

$U_{кэп}$  – напряжение коллектор-эмиттер покоя.

Ток коллектора покоя и напряжение коллектор-эмиттер покоя вычислим по формулам:

$$I_{кп} = 1,15 \cdot I_{нм}$$

$$U_{кэп} = U_{нас} + U_{вых}$$

где  $I_{кп}$  – ток коллектора покоя, А;

$I_{нм}$  – наибольшая возможная амплитуда тока в нагрузке, А;

$U_{кэп}$  – напряжение коллектор-эмиттер покоя, В.

$U_{вых}$  – напряжение на выходе каскада, В;

$U_{нас}$  – напряжение насыщения транзистора, в нашем случае 0,8 вольт, В.

$$I_{кп} = 1,15 \cdot 0,25 = 0,29 \text{ А;}$$

$$U_{кэп} = 0,8 + 25 = 25,8 \text{ В.}$$

На рисункеб представлено семейство выходных статических характеристик нашего транзистора с нагрузочной прямой для постоянного тока и линией нагрузки по переменному току.

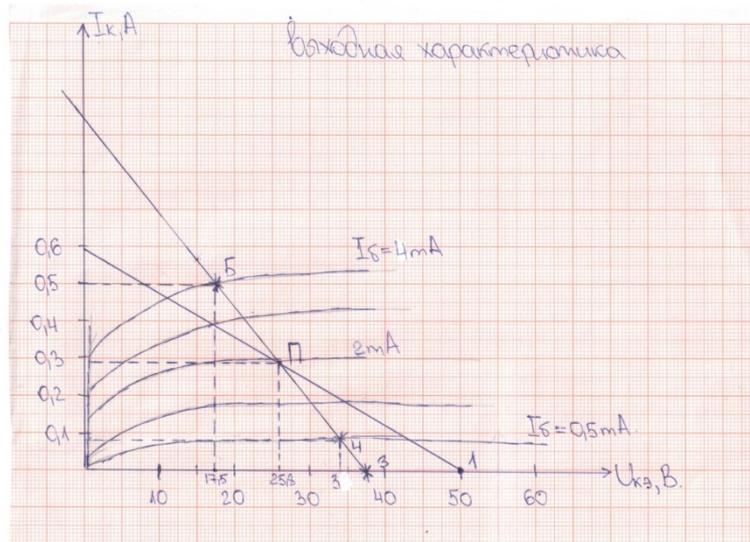


Рисунок 2– Семейство выходных статических характеристик транзистора.

По рисунку 2 определяем значение тока коллектора в точки 2:

$$I_{кп2} = 0,6 \text{ А.}$$

где  $I_{кп}$  – ток коллектора в точки 2, А.

Далее определим сопротивления в цепи эмиттера и коллектора по формулам:

$$R_{общ} = \frac{E_{пит}}{I_{кп2}}$$

$$R_k = \frac{R_{общ}}{1,2}$$

$$R_э = R_{общ} - R_k$$

где  $R_k$  – сопротивление в цепи коллектора, Ом;  
 $R_э$  – сопротивление в цепи эмиттера, Ом;  
 $R_{общ}$  – общей сопротивление цепи, Ом.

$$R_{общ} = \frac{50}{0,6} = 83,34 \text{ Ом};$$

$$R_k = \frac{83,34}{1,2} = 69,45 \text{ Ом};$$

$$R_э = 83,34 - 69,45 = 13,89 \text{ Ом}.$$

Определяем наибольшее значение параметров входного сигнала. На выходной характеристике строим динамическую линию нагрузки по точкам П и З.

Координаты точки З ( $I_k = 0$ ;  $U_{кэ} = U_{кэП} + I_{кп} R_{кн}$ ).

Сопротивление коллектор-нагрузка найдем по формуле:

$$R_{кн} = \frac{R_k \cdot R_n}{R_k + R_n}$$

где  $R_{кн}$  – сопротивление коллектор-нагрузка, Ом;  
 $R_k$  – сопротивление в цепи коллектора, Ом;  
 $R_n$  – сопротивление нагрузки, Ом.

$$R_{кн} = \frac{69,45 \cdot 100}{69,45 + 100} = 40,99 \text{ Ом}.$$

Тогда напряжение коллектор-эмиттер вычислим по формуле:

$$U_{кэ} = U_{кэП} + I_{кп} \cdot R_{кн}$$

где  $R_{кн}$  – сопротивление коллектор-нагрузка, Ом;  
 $I_{кп}$  – ток коллектора покоя, А;  
 $U_{кэП}$  – напряжение коллектор-эмиттер покоя, В;  
 $U_{кэ}$  – напряжение коллектор-эмиттер, В.

$$U_{кэ} = 28,5 + 0,2875 \cdot 40,99 = 37,58 \text{ В}.$$

На рисунке 2 на линии нагрузки по переменному току находим точки 4 и 5, соответствующие максимальному переменному напряжению на коллекторе точка 4 ( $I_{кмин}$ ;  $U_{кэмакс}$ ) и минимальному точка 5 ( $I_{кмакс}$ ;  $U_{кэмин}$ ).

Точка 4 – ( $I_{кмин} = 0,085 \text{ А}$ ;  $U_{кэмакс} = 33 \text{ В}$ );

Точка 5 – ( $I_{кмакс} = 0,5 \text{ А}$ ;  $U_{кэмин} = 17,5 \text{ В}$ ).

где  $I_{кмин}$  – минимальный ток коллектора;  
 $U_{кэмакс}$  – максимальное напряжение коллектор-эмиттер;  
 $I_{кмакс}$  – максимальный ток коллектора;  
 $U_{кэмин}$  – минимальное напряжение коллектор-эмиттер.

Этим точкам соответствуют значения минимального и максимального тока базы:

Точка 4 – ( $I_{бмин} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ );

Точка 5 – ( $I_{бмакс} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ ).

где  $I_{бмин}$  – минимальный ток базы, А;  
 $I_{бмакс}$  – максимальный ток базы, А.

Амплитудное значение тока входного сигнала вычислим по формуле:

$$I_{вхм} = \frac{I_{бмакс} - I_{бмин}}{2}$$

где  $I_{вхм}$  – амплитудное значение тока входного сигнала, А;

$I_{\text{бмин}}$  – минимальный ток базы, А;  
 $I_{\text{бмакс}}$  – максимальный ток базы, А.  

$$I_{\text{вхм}} = \frac{0,004 - 0,0005}{2} = 0,00175 \text{ А.}$$

На рисунке бпредставлена входная ВАХ транзистора для напряжения коллектор-эмиттер по-  
 коя.

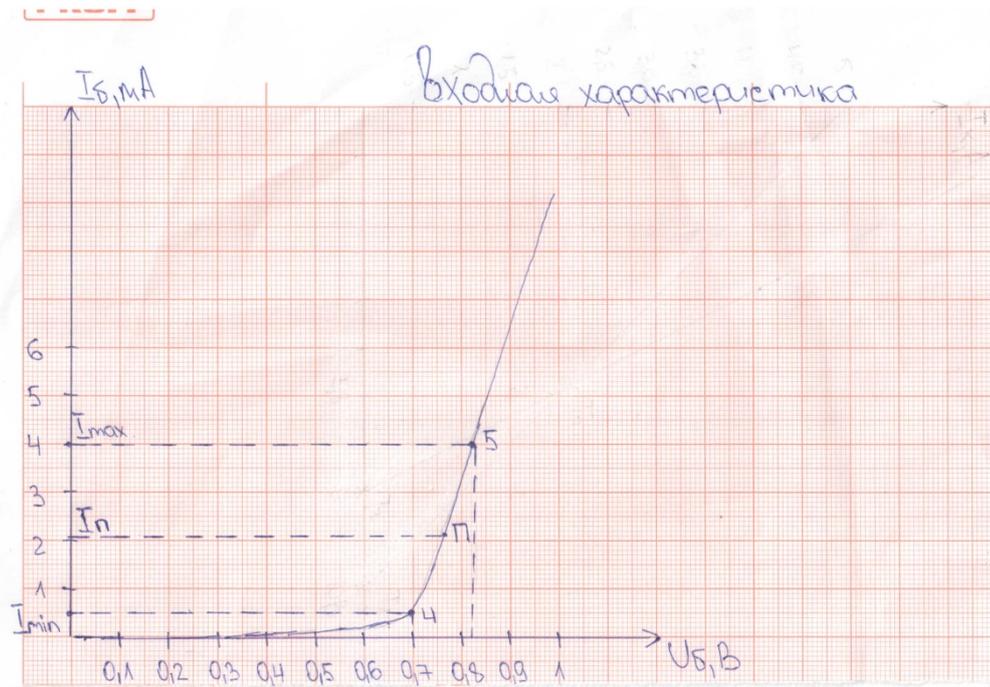


Рисунок 3 –Входная ВАХ транзистора

По рисунку графическим путем определяем амплитудное значение напряжения входного сигнала по формуле:

$$U_{\text{вхм}} = \frac{U_{\text{бмакс}} - U_{\text{бмин}}}{2}$$

где  $U_{\text{вхм}}$  – напряжения входного сигнала, В;  
 $U_{\text{бмакс}}$  – максимальное напряжение базы, в нашем случае 0,88, В;  
 $U_{\text{бмин}}$  – минимальное напряжение базы, в нашем случае 0,78, В.

$$U_{\text{вхм}} = \frac{0,82 - 0,7}{2} = 0,06 \text{ В.}$$

Определяем входное сопротивление каскада для переменной составляющей тока входного сигнала без учёта шунтирующего действия базового делителя напряжения по формуле:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вхм}}}{I_{\text{вхм}}}$$

где  $R_{\text{вх}}$  – входное сопротивление каскада, Ом;  
 $U_{\text{вхм}}$  – напряжения входного сигнала, В;  
 $I_{\text{вхм}}$  – амплитудное значение тока входного сигнала, А

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вхм}}}{I_{\text{вхм}}} = \frac{0,06}{0,00175} = 34,28 \text{ Ом.}$$

Рассчитываем сопротивления делителя базового напряжения. Для уменьшения шунтирующего действия делителя на входную цепь каскада по переменному току применяем:

$$R_{12} = 2 \cdot R_{\text{вх}}$$

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

где  $R_{12}$  – общее сопротивления делителя базового напряжения, Ом;  
 $R_1$  – первое сопротивления делителя базового напряжения, Ом;  
 $R_2$  – второе сопротивления делителя базового напряжения, Ом.  
 Первое сопротивления делителя базового напряжения найдем по формуле:

$$R_1 = \frac{E_{пит} \cdot R_{12}}{R_3 \cdot I_{кп}}$$

где  $R_{12}$  – общее сопротивления делителя базового напряжения, Ом;  
 $R_1$  – первое сопротивления делителя базового напряжения, Ом;  
 $I_{кп}$  – ток коллектора покоя, А;  
 $E_{пит}$  – напряжения источника питания, В;  
 $R_3$  – сопротивление в цепи эмиттера, Ом.

$$R_1 = \frac{50 \cdot 68,56}{13,89 \cdot 0,2875} = 856 \text{ Ом.}$$

Из формулы выразим второе сопротивления делителя базового напряжения:

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

где  $R_{12}$  – общее сопротивления делителя базового напряжения, Ом;  
 $R_1$  – первое сопротивления делителя базового напряжения, Ом;  
 $R_2$  – второе сопротивления делителя базового напряжения, Ом.

$$R_2 = \frac{856 \cdot 68,56}{856 + 68,56} = 63,5 \text{ Ом.}$$

Определяем коэффициент нестабильности работы каскада по формуле:

$$S = \frac{R_3 \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2}{R_3 \cdot (R_1 + R_2) + \frac{R_1 \cdot R_2}{1 + h_{21}}}$$

где  $R_2$  – второе сопротивления делителя базового напряжения, Ом;  
 $R_1$  – первое сопротивления делителя базового напряжения, Ом;  
 $h_{21}$  – коэффициент передачи по току;  
 $S$  – коэффициент нестабильности работы каскада;  
 $R_3$  – сопротивление в цепи эмиттера, Ом.

$$S = \frac{13,89 \cdot (856 + 63,5) + 856 \cdot 63,5}{13,89 \cdot (856 + 63,5) + \frac{856 \cdot 63,5}{1 + 100}} = 5.$$

Находим емкость разделительного конденсатора по формуле:

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (R_n + R_k) \cdot \sqrt{M_n^2 - 1}}$$

где  $C_2$  – емкость разделительного конденсатора, Ф;  
 $f_n$  – нижняя граничная частота, Гн;  
 $M_n$  – коэффициент нелинейных искажений;  
 $R_n$  – сопротивления нагрузки, Ом;  
 $R_k$  – сопротивления в цепи коллектора, Ом.

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (100 + 69,45) \cdot \sqrt{1,4 \cdot 1,4 - 1}} = 3,83 \text{ мкФ.}$$

Находим ёмкость блокирующего конденсатора в цепи эмиттера по формуле:

$$C_3 = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot R_3}$$

где  $C_3$  – ёмкость блокирующего конденсатора в цепи эмиттера, Ф;  
 $f_n$  – нижняя граничная частота, Гн;  
 $R_3$  – сопротивление в цепи эмиттера, Ом.

$$C_3 = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 250 \cdot 13,89} = 458,33 \text{ мкФ.}$$

## Аналоговые фильтры на ОУ

### Фильтр нижних частот

Так как индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте ( $X_L = \omega L$ ), а емкостное сопротивление – обратно пропорционально частоте ( $X_C = 1/\omega C$ ), то в продольной ветви схемы должна находиться индуктивность, а в поперечной – емкость. С учетом этого и учитывая обозначения на (рис.1), Т- и П-образную схемы ФНЧ нужно представить в следующем виде (рис.2,а и б):

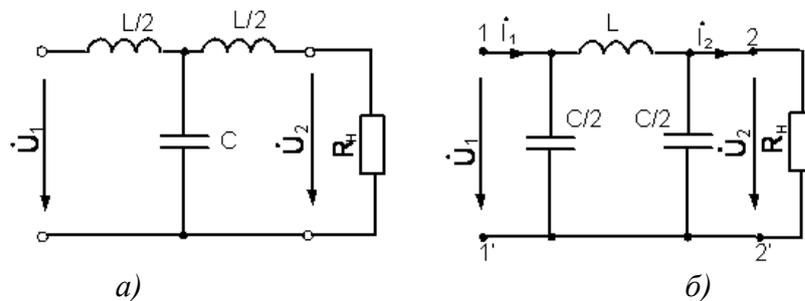


Рис.1. Схемы замещения фильтров НЧ типа  $k$

У этих схем  $\underline{Z}_1 = j\omega L$  и  $\underline{Z}_2 = -j \frac{1}{\omega C}$ . Сопротивление  $\underline{Z}_1$  равно нулю при нулевой частоте. Из второго условия получаем:

$$\underline{Z}_1 = -4\underline{Z}_2; \quad j\omega L = j \frac{4}{\omega C}; \quad \omega_c = \frac{2}{\sqrt{LC}}; \quad f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}; \quad f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}.$$

Итак, фильтр пропускает сигнал в полосе частот  $f_{\text{пр}} = 0 \div \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$  и называется низкочастотным. В этой полосе частот коэффициент затухания  $A = 0$ , а в полосе задерживания определяется выражением:

$$ch \frac{A}{2} = \frac{f}{f_c}.$$

Напомним, что коэффициент затухания определяется при согласованной нагрузке. Для ФНЧ и ФВЧ характеристическое сопротивление равно  $\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{L}{C}}$ , так что при согласованной нагрузке сопротивление нагрузки равно характеристическому сопротивлению и является чисто активным:  $\underline{Z}_l = \underline{Z}_C = \sqrt{\frac{L}{C}}$ . Эта величина обозначается как  $k$ , определяется по формуле

$$k = \sqrt{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2} \text{ и для данного типа фильтров (фильтры типа } k) \text{ не зависит от частоты: } k = \sqrt{\frac{L}{C}}. \text{ Та-}$$

ким образом, при согласованной нагрузке имеем:  $\underline{Z}_i = R_i = k = \sqrt{\frac{L}{C}}$ . И так как фильтр невоз-

можно согласовать во всем диапазоне частот ПП, то реальная зависимость  $A(f)$  будет несколько иной. То же нужно сказать и о комплексном коэффициенте передачи по напряжению. Поэтому будем использовать программу Multisim для исследования частотных фильтров, определяя параметры их схем по формулам, найденным при согласованной нагрузке. Полосой пропускания будем считать диапазон частот, на котором модуль коэффициента передачи составляет не менее значения  $K_U = 1/\sqrt{2} = 0,707$ .

Если задана частота среза  $f_c$  и параметр  $k = \sqrt{\frac{L}{C}}$ , то индуктивность и емкость ФНЧ определяются по формулам:

$$L = \frac{k}{\pi f_c} \quad \text{и} \quad C = \frac{1}{\pi f_c k}.$$

**Задача 1.** Найти индуктивность и емкость низкочастотного Т-образного фильтра, у которого  $f_c = 1,6$  кГц и  $k = 20$  Ом.

**Решение.** Подсчитаем индуктивность и емкость по приведенным выше формулам:

$$L = \frac{k}{\pi f_c} = \frac{20}{\pi \cdot 1,6 \cdot 10^3} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$C = \frac{1}{\pi f_c k} = \frac{1}{\pi \cdot 1,6 \cdot 10^3 \cdot 20} \approx 10 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Таким образом, в продольные плечи Т-образной схемы нужно включить индуктивности  $L_1 = L_2 = \frac{L}{2} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 2 \text{ мГн}$ , а в поперечную ветвь – емкость

$C = 10 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 10 \text{ мкФ}$ . Сопротивление нагрузки равно  $k$ .

### Фильтр верхних частот

Так как индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте ( $X_L = \omega L$ ), а емкостное – обратно пропорционально частоте ( $X_C = 1/\omega C$ ), то в продольной ветви схемы должна находиться емкость, а в поперечной – индуктивность. С учетом этого и учитывая обозначения на рис.2, Т- и П-образную схемы ФНЧ нужно представить в следующем виде (рис.3, а и б):

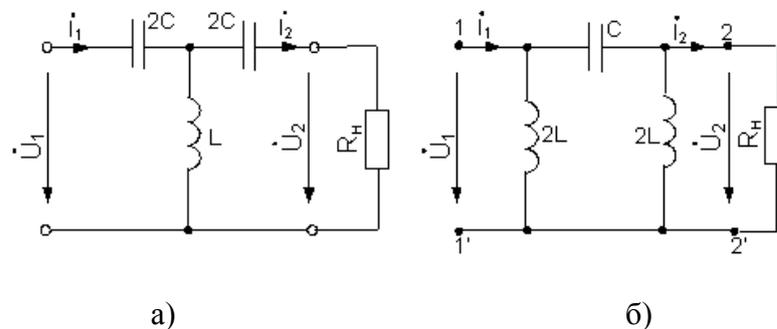


Рис.3. Схемы замещения фильтров ВЧ типа  $k$

У этих схем  $\underline{Z}_1 = -j \frac{1}{\omega C}$  и  $\underline{Z}_2 = j\omega L$ . Сопротивление  $\underline{Z}_1$  равно нулю при бесконечно большой частоте. Из второго условия получаем:

$$\underline{Z}_1 = -4\underline{Z}_2; \quad \frac{1}{\omega C} = 4\omega L; \quad \omega_c = \frac{1}{2\sqrt{LC}}; \quad f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}; \quad f_c = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}.$$

Итак, фильтр пропускает сигнал в полосе частот  $f_{\text{пр}} = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}} \div \infty$  и называется высокочастотным. В этой полосе частот коэффициент затухания  $A = 0$ , а в полосе задерживания определяется выражением:

$$ch \frac{A}{2} = \frac{f_c}{f}.$$

Если заданы частота среза  $f_c$  и параметр  $k = \sqrt{\frac{L}{C}}$ , то индуктивность и емкость ФВЧ определяются по формулам:

$$L = \frac{k}{4\pi f_c} \quad \text{и} \quad C = \frac{1}{4\pi f_c k}.$$

**Задача 2.** Найти индуктивность и емкость схемы высокочастотного Т-образного фильтра, у которого  $f_c = 1,6$  кГц и  $k = 20$  Ом.

**Решение.** Подсчитаем индуктивность и емкость по приведенным выше формулам:

$$L = \frac{k}{4\pi f_c} = \frac{20}{4\pi \cdot 1,6 \cdot 10^3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$C = \frac{1}{4\pi f_c k} = \frac{1}{\pi \cdot 1,6 \cdot 10^3 \cdot 20} \approx 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Таким образом, в продольные плечи Т-образной схемы нужно включить емкости  $C_1 = C_2 = 2C = 2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 5 \text{ мкФ}$ , а в поперечную ветвь – индуктивности  $L = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 1 \text{ мГн}$ . При этом сопротивление нагрузки равно  $k = 20$  Ом.

## Автономные инверторы

### Расчет инвертора напряжения

1. Полная мощность нагрузки по первой гармонике  $S_{(1)н} = 2500 \text{ В} \cdot \text{А}$ .
2. Действующее значение напряжения первой гармоники на нагрузке  $U_{(1)н} = 50 \text{ В}$  (инвертор используется для электродуговой сварки листового железа).
3. Коэффициент мощности нагрузки по первой гармонике  $\cos \varphi_1 = 0,75$ .
4. Частота первой гармоники выходного напряжения инвертора  $f_1 = 400 \text{ Гц}$ .
5. Источником питания служит сетевой выпрямитель, выполненный по мостовой схеме с накопительным конденсатором на выходе. С учётом падения напряжения на элементах выпрямителя  $U_d = 300 \text{ В}$ .

Расчёт инвертора необходимо выполнять после изучения принципиальной схемы (рис. 1) в следующем порядке:

1. Полное сопротивление нагрузки на частоте основной гармоники

$$Z_n = \frac{U_{(1)н}^2}{S_{(1)н}} = \frac{50^2}{2500} = 1,0 \text{ Ом}. \quad (2.4)$$

2. Активная составляющая сопротивления нагрузки

$$R_H = Z_H \cdot \cos\varphi_{(1)} = 1,0 \cdot 0,75 = 0,75 \text{ Ом.} \quad (2.5)$$

3. Индуктивное сопротивление нагрузки на основной частоте

$$X_H = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_H = Z_H \cdot \sin\varphi_{(1)} = 1,0 \cdot 0,562 = 0,562 \text{ Ом.} \quad (2.6)$$

4. Действующее значение напряжения, приложенного к первичной обмотке выходного трансформатора,

$$U_{(1)} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_d}{\pi} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 300}{3,14} = 270,3 \text{ В.} \quad (2.7)$$

5. Коэффициент трансформации выходного трансформатора

$$n = \frac{W_2}{W_1' + 2W_1''} = \frac{U_{(1)H}}{U_{(1)}} = \frac{50}{270,3} = 0,18. \quad (2.8)$$

6. Активное сопротивление нагрузки, приведённое к первичной обмотке трансформатора,

$$R_H' = \frac{R_H}{n^2} = \frac{0,75}{0,18^2} = 23 \text{ Ом.} \quad (2.9)$$

7. Индуктивное сопротивление нагрузки, приведённое к первичной обмотке трансформатора,

$$X_H' = \frac{X_H}{n^2} = \frac{0,562}{0,18^2} = 17 \text{ Ом.} \quad (2.10)$$

8. Параметр нагрузки

$$k = \frac{R_H'}{X_H'} = \frac{R_H}{X_H} = \frac{0,75}{0,562} = 1,34. \quad (2.11)$$

9. Базисный ток

$$I_0 = \frac{U_d}{R_H'} = \frac{300}{23} = 13 \text{ А.} \quad (2.12)$$

10. Максимальное значение тока нагрузки, приведённое к первичной обмотке трансформатора,

$$I_{H \max}' = I_{H0}' = I_0 \frac{1 - a^3}{1 + a^3} = 13 \frac{1 - 0,02842}{1 + 0,02842} = 12,282 \text{ А.} \quad (2.13)$$

11. Среднее значение тока, потребляемое от источника питания,

$$I_d = I_0 \left( 1 + \frac{2(a^3 - 1)}{k\pi(a^3 + 1)} \right) = 13 \left( 1 + \frac{2 \cdot (0,02842 - 1)}{1,34 \cdot 3,14 \cdot (0,02842 + 1)} \right) = 8,69 \text{ А.} \quad (2.14)$$

Полученное значение  $I_d$ , а также величина  $U_d$  используются при расчёте выпрямителя, питающего инвертор.

12. Угол и время проводимости обратного диода

$$\sigma = 2\pi f t_d = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{2}{a^3 + 1} = \frac{1}{1,34} \cdot \ln \frac{2}{1,02842} = 0,4963; \quad (2.15)$$

$$t_d = \frac{\sigma}{2\pi f} = \frac{0,4963}{2 \cdot 3,14 \cdot 400} = 197,5 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 197,5 \text{ мкс.} \quad (2.16)$$

13. Среднее значение тока через тиристор

$$I_{0T} = \frac{I_0}{2\pi} \left( \pi - \sigma \frac{1 - a^3}{k(a^3 + 1)} \right) = \frac{13}{2 \cdot 3,14} \left( 3,14 - 0,4963 \frac{1 - 0,02842}{1,34 \cdot 1,02842} \right) = 4,0 \text{ А.} \quad (2.17)$$

14. Среднее значение тока через обратный диод

$$I_{0d} = \frac{I_0}{2\pi} \left( \frac{1 - a^3}{k(a^3 + 1)} - \sigma \right) = \frac{13}{2 \cdot 3,14} \left( \frac{1 - 0,02842}{1,34 \cdot 1,02842} - 0,4963 \right) = 0,432 \text{ А.} \quad (2.18)$$

15. Эффективное значение тока через тиристор

$$I_{\text{ЭФ.Т}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\sigma}^{\pi} i_1^2(v) dv} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\sigma}^{\pi} I_0^2 \left(1 - \frac{2e^{-kv}}{1+a^3}\right)^2 dv} =$$

$$= \frac{I_0}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{2(a^3-1)}{k\pi(a^3+1)} - \frac{\sigma}{\pi} - \frac{4(e^{-k\sigma}-1)}{k\pi(a^3+1)} + \frac{2(e^{-2k\sigma}-1)}{k\pi(a^3+1)}} = \frac{13}{\sqrt{2}} \cdot$$

$$\sqrt{1 + \frac{2(0,02842-1)}{1,34 \cdot 3,14 \cdot 1,02842} - \frac{0,4963}{3,14} - \frac{4(e^{-1,34 \cdot 0,4963}-1)}{1,34 \cdot 3,14 \cdot 1,02842} + \frac{2(e^{-2 \cdot 1,34 \cdot 0,4963}-1)}{1,34 \cdot 3,14 \cdot (1+0,02842)^2}} = 4,59 \text{ А.}$$

16. Эффективное значение тока через обратный диод

$$I_{\text{ЭФ.д}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\sigma} i_1^2(v) dv} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\sigma} I_0^2 \left(1 - \frac{2 \cdot e^{-kv}}{1+a^3}\right)^2 dv} =$$

$$= \frac{I_0}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\pi} + \frac{4(e^{-k\sigma}-1)}{k\pi(1+a^3)} - \frac{2(e^{-2k\sigma}-1)}{k\pi(1+a^3)^2}} =$$

$$= \frac{13}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{0,4963}{3,14} + \frac{4(e^{-1,34 \cdot 0,4963}-1)}{1,34 \cdot 3,14 \cdot 1,02842} - \frac{2(e^{-2 \cdot 1,34 \cdot 0,4963}-1)}{1,34 \cdot 3,14 \cdot (1,02842)^2}} = 1,83 \text{ А.}$$

17. Максимальное обратное напряжение на тиристорах и диодах

$$U_{\text{обр. max}} = U_d = 300 \text{ В.}$$

На основании данных расчёта из справочника выбираем:

а) тиристор типа ТН-10-10 со следующими параметрами:

допустимый средний ток  $I_{a \text{ доп}} = 10 \text{ А}$ ,

допустимое обратное напряжение  $U_{\text{обр. доп}} = 1000 \text{ В}$ ,

отпирающий ток управления  $I_y = 0,8 \text{ А}$ ,

отпирающее напряжение управления  $U_y = 2 \text{ В}$ ,

критическая скорость нарастания прямого тока  $\frac{dI_a}{dt} = 100 \frac{\text{А}}{\text{с}}$ ,

критическая скорость нарастания прямого напряжения:  $U_{\text{доп}} = 100 \frac{\text{В}}{\text{мкс}}$ ,

время выключения  $t_e = 20 \text{ мкс}$ ;

допустимая частота выпрямителя  $f_{\text{max}} = 1,2 \text{ кГц}$ .

б) диоды обратного выпрямителя типа КД 202 Л со следующими параметрами:

$I_{a \text{ доп}} = 10 \text{ А}$ ,

$U_{\text{обр. доп}} = 1000 \text{ В}$ ,

допустимая частота выпрямителя  $f_{\text{max}} = 1,2 \text{ кГц}$ .

18. Коэффициент формы тока через тиристор

$$K_{\text{ФТ}} = \frac{I_{\text{ЭФ.Т}}}{I_{0\text{T}}} = \frac{4,59}{4} = 1,14. \quad (2.21)$$

19. Мощность статических потерь

$$P_{\text{T}} = U_0 I_{0\text{T}} + K_{\text{ФТ}}^2 I_{0\text{T}}^2 R_{\text{д}} = 2,33 \cdot 4,0 + 1,14^2 \cdot 4,0^2 \cdot 0,0157 = 37,6 \text{ Вт}, \quad (2.22)$$

где  $U_0$  – пороговое напряжение,  $U_0 = 2,33 \text{ В}$ ;  $R_{\text{д}}$  – динамическое сопротивление тиристора в открытом состоянии, определяемое по его статической вольтамперной характеристике.

Для выбранного тиристора по характеристике находим  $U_0 = 2,33 \text{ В}$ ,  $R_{\text{д}} = 0,0157 \text{ Ом}$ .

20. Коэффициент формы тока через обратный диод

$$K_{\text{Фд}} = \frac{I_{\text{ЭФ.д}}}{I_{0\text{д}}} = \frac{1,83}{0,432} = 4,23. \quad (2.23)$$

21. Мощность статических потерь в диоде

$$P_{\text{д}} = U_0 I_{0\text{д}} + K_{\text{Фд}}^2 I_{0\text{д}}^2 R_{\text{д}} = 2,33 \cdot 0,432 + 4,23^2 \cdot 0,432^2 \cdot 0,043 = 1,15 \text{ Вт}. \quad (2.24)$$

Для выбранного диода  $U_0 = 0,78$  В, динамическое сопротивление диода  $R_d = 0,043$  Ом. Значение мощности потерь в тиристоре и диоде используются для расчёта площади теплоотводящего радиатора.

22. Действующее значение напряжения на первичной обмотке выходного трансформатора

$$U_1 = U_d = 270 \text{ В.}$$

23. Действующее значение напряжения на нагрузке

$$U_n = U_{1n} = 270 \cdot 0,18 = 48,65 \text{ В.} \quad (2.25)$$

24. Действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора

$$I_1 = I_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{2}{k\pi} + \frac{a^3 - 1}{a^3 + 1}} = 13 \cdot \sqrt{1 + \frac{2}{1,34 \cdot 3,14} \cdot \frac{0,02842 - 1}{1,02842}} = 8,86 \text{ А.} \quad (2.26)$$

25. Действующее значение тока в нагрузке

$$I_2 = \frac{I_1}{n} = \frac{8,86}{0,18} = 49,242 \text{ А.} \quad (2.27)$$

26. Расчётная мощность первичной обмотки трансформатора

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = 270 \cdot 8,86 = 2594 \text{ В} \cdot \text{А.} \quad (2.28)$$

27. Расчётная мощность вторичной обмотки трансформатора

$$S_2 = U_{(1)n} \cdot I_2 = 50 \cdot 49,2 = 2460 \text{ В} \cdot \text{А.} \quad (2.29)$$

28. Типовая мощность трансформатора

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = 2526 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

29. Определяем параметры коммутирующих элементов исходя из условия минимума энергии, накопленной в контуре коммутации:

$$C_2 = 2,55 \frac{I'_{н0} t_c}{U_d} = \frac{2,55 \cdot 12,282 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{300} = 2,6 \text{ мкФ;} \quad (2.30)$$

$$L_1 = L_2 = 0,64 \frac{U_d t_c}{I'_{н0}} = \frac{0,64 \cdot 300 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{12,282} = 390 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 390 \text{ мкГн,} \quad (2.31)$$

где  $t_c = (1,2 \dots 2) \cdot t_B$ . Принимаем  $t_c = 25$  мкс.

30. Максимальное напряжение на коммутирующем конденсаторе в интервале возврата энергии из контура коммутации

$$U_{C_2 \max} = U_d \cdot (1 + K_{вз}) = 300 \cdot (1 + 0,1) = 330 \text{ В,} \quad (2.32)$$

где  $K_{вз}$  – возвратный коэффициент.

В соответствии с рекомендациями,  $K_{вз}$  выбирают в пределах 0,1 ... 0,2. Примем  $K_{вз} = 0,1$ .

31. Амплитуда первой гармоники напряжения на конденсаторе

$$U_{(1)C_1 \max} = \frac{4U_d}{\pi} = \frac{4 \cdot 300}{3,14} = 382 \text{ В.} \quad (2.33)$$

В качестве коммутирующего конденсатора используем конденсаторы типа МБГИ, для которых в соответствии с ТУ допустимая амплитуда переменной составляющей на частоте 1000 Гц составляет 20 % от рабочего напряжения. Следовательно, рабочее напряжение конденсатора должно быть

$$U_{C_1 \text{ раб}} = \frac{U_{(1)C_1 \max} \cdot 100 \%}{20 \%} = 382 \cdot 5 = 1910 \text{ В.} \quad (2.34)$$

Для получения нужной емкости и рабочего напряжения конденсаторы выбранного типа можно включить параллельно и последовательно. Включаем последовательно 3 конденсатора по 10 мкФ на рабочее напряжение  $U_{\text{раб}} = 750$  В.

32. Постоянная составляющая токов в дросселях  $L_1$  и  $L_2$

$$I_{L_0} \cong 2I_{0T} \cong 2 \cdot 4,0 = 8,0 \text{ А.}$$

33. Скорость нарастания прямого напряжения на тиристоре

$$\frac{dU_T}{dt} = 1,2 \frac{U_d}{t_c} = 1,2 \frac{300}{25 \cdot 10^{-6}} = 14,4 \frac{\text{В}}{\text{мкс}}. \quad (2.35)$$

34. Скорость нарастания прямого тока при отпирании тиристора

$$\frac{dI_T}{dt_{t=0}} = \frac{U_d}{2L_1} = \frac{300}{2 \cdot 390 \cdot 10^{-6}} = 0,384 \frac{\text{А}}{\text{мкс}}. \quad (2.36)$$

Полученные значения не должны превышать величины, приводимые в паспорте на выбранный тиристор.

35. Постоянная времени цепи нагрузки

$$T_n = \frac{L_n}{R_n} = \frac{X_n}{2\pi f R_n} = \frac{0,562}{2 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3}} = 0,22 \cdot 10^{-3} \text{ с}. \quad (2.37)$$

36. Напряжение на конденсаторе

$$U_{C_1} = U_d = 300 \text{ В}.$$

37. Частота основной гармоники пульсаций на конденсаторе, обусловленных работой инвертора

$$f_{C_1} = 2f = 2 \cdot 400 = 800 \text{ Гц}.$$

В качестве накопительного конденсатора выбираем конденсатор типа К50-3Б с рабочим напряжением 450 В. В соответствии с ТУ на данный конденсатор допустимая амплитуда переменной составляющей на частоте 800 Гц составляет 1,5 % от рабочего напряжения

$$U_{\text{п.доп}} = 0,015 \cdot 450 = 6,75 \text{ В}.$$

38. Емкость накопительного конденсатора

$$\begin{aligned} C_1 &= I_0 \cdot \frac{T_n}{U_{\text{п.доп}}} \left( \frac{1-a^3}{1+a^3} - \ln \frac{2}{1+a^3} \right) = \\ &= 13 \cdot \frac{0,22 \cdot 10^{-3}}{6,75} \left( \frac{1-0,02842}{1,02842} - \ln \frac{2}{1,02842} \right) = 0,12 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Принимаем емкость конденсатора  $C_1 = 120 \text{ мкФ}$ .

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ

Задачей преподавателя при проведении лабораторных работ является грамотное и доступное разъяснение принципов и правил проведения работ, побуждение студентов к самостоятельной работе, определения места изучаемой дисциплины в дальнейшей профессиональной работе будущего специалиста.

Цель лабораторной работы – научить студентов самостоятельно производить необходимые действия для достижения желаемого результата.

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, студенту необходимо ознакомиться с теоретическим материалом, соответствующим данной теме.

Выполнение лабораторной работы целесообразно разделить на несколько этапов:

- формулировка и обоснование цели работы;
- определение теоретического аппарата, применительно к данной теме;
- выполнение заданий;
- анализ результата;
- выводы.

Индивидуальные задания для лабораторных работ представлены конкретно-практическими и творческими задачами.

На первой ступени изучения темы выполняются конкретно-практические задачи, при решении которых формируется минимальный набор умений. Преподаватель опосредованно руководит познавательной деятельностью студентов, консультирует и подробно разбирает со студентами возникшие затруднения в ходе решения задачи, обращает внимание группы на возможные ошибки.

Вторая ступень изучения темы дифференцируется в зависимости от степени усвоения его обязательного уровня. Студенты, усвоив содержание типовых методов и приемов решения задач, приступают к решению творческих задач. Если уровень знаний и умений, демонстрируемых студентом при контрольном обследовании, не соответствует установленным требованиям, студент вновь возвращается к стандартным упражнениям, но под более пристальным наблюдением преподавателя.

После изучения отдельной темы курса дисциплины, каждый студент получает оценку по результатам выполнения лабораторных работ.

Начиная подготовку к лабораторному занятию, необходимо, прежде всего, указать студентам страницы в конспекте лекций, разделы учебников и учебных пособий, чтобы они получили общее представление о месте и значении темы в изучаемом курсе. Затем следует рекомендовать им поработать с дополнительной литературой, сделать записи по рекомендованным источникам.

Успешное выполнение лабораторных работ может быть достигнуто в том случае, если студент отчетливо представляет себе цель эксперимента и ожидаемые результаты, поэтому важным условием обстоятельности проводимых исследований является тщательная подготовка к каждой лабораторной работе.

На вводном занятии группа делится преподавателем на бригады (в составе двух–трех человек). За каждой бригадой закрепляется постоянное место на весь период работы в лаборатории. Состав бригад на следующих занятиях в течение семестра остаётся неизменным.

#### ***Подготовка к выполнению лабораторной работы***

Подготовка к лабораторной работе осуществляется студентом до аудиторных занятий в часы, отведенные на самостоятельную работу.

При подготовке к лабораторной работе студент должен:

- 1) внимательно ознакомиться с описанием соответствующей лабораторной работы и установить, в чём состоит цель и задача работы;
- 2) по лекционному курсу и рекомендованным литературным источникам изучить теоретическую часть, относящуюся к данной лабораторной работе;
- 3) ознакомиться с порядком выполнения работы;
- 4) выполнить предварительный теоретический расчет;

5) приготовить в рабочей тетради заготовку отчета лабораторной работы, которая должна содержать:

- титульный лист;
- название работы и её цель;
- план проведения опытов;
- электрические схемы изучаемых цепей (монтажные и принципиальные);
- таблицы для записи результатов наблюдений и расчетов;
- расчётные формулы, необходимые для промежуточных вычислений в процессе работы;
- выполненный предварительный теоретический расчет (если это предусмотрено данной лабораторной работой).

Студент обязан приходить на занятие подготовленным. Наличие заготовки к лабораторной работе является обязательным условием допуска студента к выполнению лабораторной работы. Студенты, не готовые к занятиям, к выполнению лабораторной работы не допускаются.

### ***Выполнение лабораторной работы***

Перед выполнением работы преподаватель проверяет степень подготовленности каждого студента. Критерием допуска к работе является: понимание студентом цели работы, знание метода и порядка выполнения экспериментов, а также представление об ожидаемых результатах.

За время, отведенное на выполнение лабораторной работы в лаборатории, студент должен:

– ознакомиться со стендом, измерительными приборами и дополнительным оборудованием, используемым в процессе выполнения работы. Выбрать приборы, необходимые для выполнения работы или подобрать пределы измерений на многопредельных приборах так, чтобы значения измеряемых величин находились в пределах 20-95% шкалы прибора.

– собрать цепь в соответствии со схемой. Сборку цепи удобнее производить в следующем порядке: начав сборку главной последовательной цепи с одного зажима источника, закончить ее на другом зажиме. К этой цепи в соответствующих схеме местах присоединяются остальные параллельные ветви.

– предъявить собранную цепь для проверки преподавателю. Только после его разрешения к цепи может быть подано напряжение.

– выполнить все измерения, и провести необходимые по ходу работы расчеты (остальные расчеты делаются позже при подготовке отчета по лабораторной работе).

– при выполнении работы следует соблюдать правила техники безопасности.

– обращаться с приборами и оборудованием следует бережно и аккуратно. Применять приборы только в соответствии с их назначением. Студенты несут материальную ответственность за повреждение приборов, произошедшее по их вине.

– в конце занятия (или по завершению измерений), не разбирая электрической цепи, предъявить преподавателю результаты измерений для проверки. Для этого строят черновик полученной экспериментальной кривой (или векторной диаграммы). Если результат опыта не верен, опыт повторяется вновь. Если результаты удовлетворительны, преподавателем делается отметка о выполнении студентом лабораторной работы (ставится подпись и дата в отчете студента). Отчеты без подписи преподавателя в дальнейшем к зачёту не принимаются.

– разобрать электрическую цепь (с разрешения преподавателя) и привести в порядок рабочее место после окончания работы.

### ***Оформление отчета и подготовка к защите лабораторной работы***

Оформление отчета и подготовка к защите лабораторной работы осуществляется студентом в часы, отведенные на самостоятельную работу. К следующему (после выполнения очередной лабораторной работы) занятию каждый студент должен предоставить отчет о выполненной лабораторной работе. Он составляется на основе записей в рабочей тетради и должен содержать:

- титульный лист;
- номер, название, цель работы и дату её выполнения;
- результаты измерений и вычислений в виде таблиц (или ином виде, согласно методическим рекомендациям к данной лабораторной работе);

– расчетные формулы, по которым производились вычисления с примером вычисления по каждой формуле;

– расчеты погрешностей измерений и записи результатов измерений с учетом погрешности (если это предусмотрено заданием на лабораторную работу);

– схемы, графики, диаграммы и т.п., в соответствии с заданием на лабораторную работу;

– основные выводы по результатам работы на основании сравнения полученных результатов с данными теоретических расчетов.

Графический материал к лабораторным работам (графики, диаграммы и т.п.) выполняется на миллиметровой бумаге карандашом с помощью чертежных принадлежностей.

Электрические схемы вычерчиваются в соответствии с принятым ГОСТом и обозначениями.

Графики должны иметь размер не менее половины тетрадной страницы (не менее 10×10 см), выполняться в прямоугольной системе координат с соблюдением масштаба по координатным осям. Масштаб графиков должен быть удобным для построения и использования. Для этого следует брать в 1 см число измерительных единиц кратное 10 или одному из чисел ряда 1; 2; 2,5; 5. Произвольный перенос начала координат не допускается. Если через полученные опытные точки нельзя провести плавную кривую и при соединении получается зигзагообразная линия, то все-таки следует провести плавную линию, захватывающую наибольшее количество точек или занимающую среднее положение между ними.

После оформления отчета студент готовится к защите лабораторной работы, изучая теоретическую базу данной темы, ориентируясь на контрольные вопросы.

Защита выполненных лабораторных работ проводится преподавателем в устной (или в письменной) форме в виде ответов на вопросы по теме лабораторной работы, после чего выставляется оценка за выполнение лабораторной работы.

Студент должен регулярно отчитываться по выполненным лабораторным работам согласно установленному графику занятий. Лабораторная работа, пропущенная студентом, выполняется по согласованию с деканатом и преподавателем по дополнительному расписанию.

Тетрадь с отчетами выполненных работ предъявляется экзаменатору. Выполнение лабораторных работ и отчет по ним в полном объеме является обязательным условием допуска к экзамену по данной дисциплине.

Перечень лабораторных работ и материалы к ним приведены в учебно пособии [5].

#### 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Самостоятельная работа представляет собой особую, высшую степень учебной деятельности. Она обусловлена индивидуальными психологическими различиями обучающегося и личностными особенностями и требует высокого уровня самосознания, рефлексивности. Самостоятельная работа может осуществляться как во внеаудиторное время (дома, в лаборатории), так и на аудиторных занятиях в письменной или устной форме.

Самостоятельная работа обучающихся является составной частью учебной работы и имеет целью закрепление и углубление полученных знаний и навыков, поиск и приобретение новых знаний, в том числе с использованием автоматизированных обучающих систем, а также выполнение учебных заданий, подготовку к предстоящим занятиям, зачетам и экзаменам. Организуется, обеспечивается и контролируется данный вид деятельности студентов соответствующими кафедрами.

Самостоятельная работа предназначена не только для овладения каждой дисциплиной, но и для формирования навыков самостоятельной работы вообще, в учебной, научной, профессиональной деятельности, способности принимать на себя ответственность, самостоятельно решить проблему, находить конструктивные решения, выход из кризисной ситуации и т. д. Значимость самостоятельной работы выходит далеко за рамки отдельного предмета, в связи с чем выпускающие кафедры должны разрабатывать стратегию формирования системы умений и навыков самостоятельной работы. При этом следует исходить из уровня самостоятельности абитуриентов и

требований к уровню самостоятельности выпускников, с тем чтобы за весь период обучения достаточный уровень был достигнут.

При проведении самостоятельной работы, связанной с проработкой теоретического материала, студентам предлагается законспектировать рассматриваемый вопрос, в случае необходимости задать возникшие вопросы на практическом занятии (лабораторной работе или на консультации).

При изучении дисциплины «Электротехника и электроника» практикуются следующие виды и формы самостоятельной работы студентов:

- выполнение лабораторных и практических работ;
- оформление отчетов;
- завершение практических работ;
- подготовка к устному опросу, к дискуссии
- подготовка к тестированию
- подготовка к письменной, контрольной работе, тестированию, контрольной точке;

Самостоятельная работа тесно связана с контролем (контроль также рассматривается как завершающий этап выполнения самостоятельной работы), при выборе вида и формы самостоятельной работы следует учитывать форму контроля.

Формы контроля при изучении дисциплины «Электротехника и электроника»:

- устный опрос;
- контрольная работа;
- контрольная точка;
- отчет;
- письменная работа;
- тестирование.

Самостоятельная работа проводится в виде подготовительных упражнений для усвоения нового, упражнений при изучении нового материала, упражнений в процессе закрепления и повторения, упражнений проверочных и контрольных работ, а также для самоконтроля.

Для организации самостоятельной работы необходимы следующие условия:

- готовность студентов к самостоятельному труду;
- наличие и доступность необходимого учебно-методического и справочного материала;
- консультационная помощь.

Самостоятельная работа может проходить в лекционном кабинете, лаборатории, компьютерном зале, библиотеке, дома. Самостоятельная работа тренирует волю, воспитывает работоспособность, внимание, дисциплину и т.д.

### **Рекомендации по организации аудиторной самостоятельной работы**

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Основными видами аудиторной самостоятельной работы являются:

- выполнение лабораторных и практических работ по инструкциям; работа с литературой и другими источниками информации, в том числе электронными;
- само- и взаимопроверка выполненных заданий;

Выполнение лабораторных и практических работ осуществляется на лабораторных и практических занятиях в соответствии с графиком учебного процесса. Для обеспечения самостоятельной работы преподавателями разрабатываются методические указания по выполнению лабораторной/практической работы.

Работа с литературой, другими источниками информации, в т.ч. электронными может реализовываться на лекционных и практических занятиях. Данные источники информации могут быть представлены на бумажном и/или электронном носителях, в том числе, в сети Internet. Преподаватель формулирует цель работы с данным источником информации, определяет время на проработку документа и форму отчетности.

Само и взаимопроверка выполненных заданий чаще используется на лекционном, практическом занятии и имеет своей целью приобретение таких навыков как наблюдение, анализ ответов сокурсников, сверка собственных результатов с эталонами.

### **Рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы**

Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия.

При предъявлении видов заданий на внеаудиторную самостоятельную работу рекомендуется использовать дифференцированный подход к уровню подготовленности обучающегося. Перед выполнением внеаудиторной самостоятельной работы преподаватель проводит консультацию с определением цели задания, его содержания, сроков выполнения, ориентировочного объема работы, основных требований к результатам работы, критериев оценки, форм контроля и перечня литературы. В процессе консультации преподаватель предупреждает о возможных типичных ошибках, встречающихся при выполнении задания.

Для методического обеспечения и руководства самостоятельной работой в образовательном учреждении разрабатываются учебные пособия, методические рекомендации по самостоятельной подготовке к различным видам занятий.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня подготовленности обучающихся.

Видами заданий для внеаудиторной самостоятельной работы могут быть:

– для овладения знаниями: чтение текста (учебника, первоисточника, дополнительной литературы); составление плана текста; графическое изображение структуры текста; конспектирование текста; выписки из текста; работа со словарями и справочниками; учебно-исследовательская работа; использование аудио- и видеозаписей, компьютерной техники и Интернет-ресурсов и др.;

– для закрепления и систематизации знаний: работа с конспектом лекции (обработка текста); повторная работа над учебным материалом (учебника, первоисточника, дополнительной литературы, аудио- и видеозаписей); составление плана и тезисов ответа; составление таблиц, глоссария для систематизации учебного материала; изучение словарей, справочников; ответы на контрольные вопросы; аналитическая обработка текста (аннотирование, рецензирование, реферирование, контент-анализ и др.); подготовка сообщений к выступлению на семинаре, конференции; подготовка рефератов, докладов; составление библиографии, заданий в тестовой форме и др.;

– для формирования умений: решение задач и упражнений по образцу; решение вариативных задач и упражнений; составление схем; проектирование и моделирование разных видов и компонентов профессиональной деятельности и др.

Для обеспечения внеаудиторной самостоятельной работы по дисциплине преподавателем разрабатывается перечень заданий для самостоятельной работы, который необходим для эффективного управления данным видом учебной деятельности обучающихся.

Преподаватель осуществляет управление самостоятельной работой, регулирует ее объем на одно учебное занятие и осуществляет контроль выполнения всеми обучающимися группы. Для удобства преподаватель может вести ведомость учета выполнения самостоятельной работы, что позволяет отслеживать выполнение минимума заданий, необходимых для допуска к итоговой аттестации по дисциплине.

В процессе самостоятельной работы студент приобретает навыки самоорганизации, самоконтроля, самоуправления и становится активным самостоятельным субъектом учебной деятельности.

Обучающийся самостоятельно определяет режим своей внеаудиторной работы и меру труда, затрачиваемого на овладение знаниями и умениями по каждой дисциплине, выполняет внеаудиторную работу по индивидуальному плану, в зависимости от собственной подготовки, бюджета времени и других условий.

Ежедневно обучающийся должен уделять выполнению внеаудиторной самостоятельной работы в среднем не менее 3 часов.

При выполнении внеаудиторной самостоятельной работы обучающийся имеет право обращаться к преподавателю за консультацией с целью уточнения задания, формы контроля выполненного задания.

Контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов может проводиться в письменной, устной или смешанной форме с представлением продукта деятельности обучающегося. В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы могут быть использованы зачеты, тестирование, самоотчеты, защита творческих работ и др.

### **Методические рекомендации по изучению теоретических основ дисциплин**

Изучение теоретической части дисциплин призвано не только углубить и закрепить знания, полученные на аудиторных занятиях, но и способствовать развитию у студентов творческих навыков, инициативы и организовать свое время.

Самостоятельная работа при изучении дисциплин включает:

- чтение студентами рекомендованной литературы и усвоение теоретического материала дисциплины;
- знакомство с Интернет-источниками;
- подготовку к различным формам контроля (тесты, практические задания);
- подготовку и написание отчетов;
- выполнение контрольных заданий;
- подготовку ответов на вопросы по различным темам дисциплины в той последовательности, в какой они представлены.

Планирование времени, необходимого на изучение дисциплин, студентам лучше всего осуществлять весь семестр, предусматривая при этом регулярное повторение материала.

Материал, законспектированный на лекциях, необходимо регулярно прорабатывать и дополнять сведениями из других источников литературы, представленных не только в программе дисциплины, но и в периодических изданиях.

При изучении дисциплины сначала необходимо по каждой теме прочитать рекомендованную литературу и составить краткий конспект основных положений, терминов, сведений, требующих запоминания и являющихся основополагающими в этой теме для освоения последующих тем курса. Для расширения знания по дисциплине рекомендуется использовать Интернет-ресурсы; проводить поиски в различных системах и использовать материалы сайтов, рекомендованных преподавателем.

При подготовке к контрольной работе необходимо прочитать соответствующие страницы основного учебника. Желательно также чтение дополнительной литературы. При написании контрольных заданий ответ следует иллюстрировать схемами.

При выполнении самостоятельной работы по написанию реферата студенту необходимо: прочитать теоретический материал в рекомендованной литературе, периодических изданиях, на Интернет-сайтах; творчески переработать изученный материал и представить его для отчета в форме реферата, проиллюстрировав схемами, диаграммами, фотографиями и рисунками.

Тексты контрольных заданий и тестов должны быть изложены внятно, простым и ясным языком.

При ответе на экзамене необходимо: продумать и четко изложить материал; дать определение основных понятий; дать краткое описание явлений; привести примеры. Ответ следует иллюстрировать схемами, рисунками и графиками.

### **Методические рекомендации к выполнению курсовой работы**

Курсовая работа является одной из составляющих учебной деятельности студента по овладению знаниями в области электротехники и электроники. К ее выполнению необходимо приступить только после изучения тем дисциплины.

Целью курсовой работы является определения качества усвоения лекционного материала и части дисциплины, предназначенной для самостоятельного изучения.

Задачи, стоящие перед студентом при подготовке и написании курсовой работы:

1. закрепление полученных ранее теоретических знаний;
2. выработка навыков самостоятельной работы;

3. выяснение подготовленности студента к будущей практической работе.

Курсовая работа выполняется студентами в аудитории и самостоятельно, под контролем преподавателя. Тема курсовой работы отражает изученный материал и проводится она по сравнительно недавно изученному материалу.

Преподаватель готовит задания либо по вариантам, либо индивидуально для каждого студента. По содержанию работа может включать теоретический материал, задачи, тесты, расчеты и т.п. выполнению курсовой работы предшествует инструктаж преподавателя.

Ключевым требованием при подготовке курсовой работы выступает творческий подход, умение обрабатывать и анализировать информацию, делать самостоятельные выводы, обосновывать целесообразность и эффективность предлагаемых рекомендаций и решений проблем, четко и логично излагать свои мысли. Подготовку курсовой работы следует начинать с повторения соответствующего раздела учебника, учебных пособий по данной теме и конспектов лекций.

Варианты тестов, контрольных заданий и критерии оценки приведены в ФОС по дисциплине «Электротехника и электроника» для направления подготовки 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белов Н. В. Электротехника и основы электроники [Электронный ресурс] : учебное пособие / Белов Н. В., Волков Ю. С. — Электрон.дан. — СПб. : Лань, 2012. — 431 с. — Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=3553](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=3553) — Загл. с экрана.

2. Иванов, И.И. Электротехника и основы электроники. [Электронный ресурс] : Учебники / И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.Я. Фролов. — Электрон.дан. — СПб. : Лань, 2016. — 736 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71749> — Загл. с экрана.

3. Бабичев, Ю.Е. Электротехника и электроника. Ч.1. Электрические, электронные и магнитные цепи. [Электронный ресурс] : Учебники — Электрон.дан. — М. : Горная книга, 2007. — 615 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/3300> — Загл. с экрана.

4. Новиков, Ю.Н. Электротехника и электроника: Теория цепей и сигналов, методы анализа: учеб. пособие: рек. Мин.обр.РФ/Ю.Н.Новиков.-СПб.:Питер,2005.- 383с.

5. Вилесова, Л.А. Электрические цепи : учеб. пособие / Л.А.Вилесова, О.В.Зотова. – 2-е изд. перераб. – Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. – 46с. – [http://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU\\_Edition/3104.pdf](http://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/3104.pdf)

6. Рекус, Г.Г. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники: учеб. пособие/Г.Г.Рекус, А.И.Белоусов.- 2-е изд. перераб.- М.:Высш.шк.,2001. – 416с.