

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

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

сборник учебно-методических материалов

для направления подготовки 18.03.01 – Химическая технология

Благовещенск, 2017

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

Составитель: Скрипко О.В.

Электротехника и промышленная электроника: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 18.03.01. – Химическая технология. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017.

Рассмотрен на заседании кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники 24.05.2017, протокол № 9.

© Амурский государственный университет, 2017
© Кафедра автоматизации производственных
процессов и электротехники, 2017
© Скрипко О.В., составитель

Содержание

Введение	4
1. Краткий курс лекций	5
2. Методические рекомендации к практическим занятиям	37
3. Методические рекомендации к лабораторным занятиям	47
4. Методические рекомендации для самостоятельной работы студентов	49
Библиографический список	54

ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины «Электротехника и промышленная электроника» является формирование у студентов системы взглядов на теорию электромагнитных процессов в электротехнических устройствах, 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 в промышленности, 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 электрических и магнитных цепей и методов их расчета.
- усвоение элементной базы основных электронных устройств промышленной электроники (усилителей, выпрямителей, инверторов, преобразователей частоты), а также принципа действия и областей применения этих устройств.
- формирование у студентов научного мышления, правильного понимания границ и 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 обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

Знать:

- основные разделы электротехники и промышленной электроники, роль и место дисциплины в развитии современной техники и технологий;
- способы применения законов электротехники и промышленной электроники;
- законы физики явлений в электрических и магнитных цепях;
- физические величины, используемые при математическом описании электротехнических и электронных устройств;

Уметь:

- использовать математический аппарат для решения линейных дифференциальных уравнений, описывающих физические процессы в электрических цепях и электронных устройствах;
- проводить экспериментальные исследования на моделях электрических и электронных цепей и проводить их анализ с целью сравнения теоретических расчетов и экспериментальных данных;
- пользоваться инженерными прикладными пакетами программ для ЭВМ;
- использовать правила безопасности при работе на электрических установках;
- ставить и решать схемотехнические задачи, связанные с выбором системы элементов при заданных требованиях к параметрам (временным, мощностным, габаритным, надежностным);

Владеть:

- методикой создания физических моделей электрических и электронных устройств и их экспериментального исследования;
- методикой составления структурных топологических моделей (схем замещения) для электрических и магнитных цепей электромагнитных систем, а так же устройств силовой электроники;
- методами выбора элементной базы для построения различных устройств промышленной электроники.

1. КРАТКИЙ КУРС ЛЕКЦИЙ

Тема 1. Линейные электрические цепи постоянного тока

Электрической цепью называется совокупность электротехнических устройств, образующих путь для прохождения электрического тока. К электротехническим устройствам относятся:

- источники электромагнитной энергии (генераторы) или источники электрических сигналов (гальванические элементы, аккумуляторы);
- приемники или потребители;
- устройства передачи и преобразования электрической энергии (кабеля, провода и трансформаторы).

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 ёмкость 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. Потокосцепление самоиндукции катушки это произведение магнитного потока, пронизывающего один 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).

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

3. 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 свойств 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 и тот же 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 классифицируются: 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 баланса 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 - Ленца. Энергия, выделяемая на сопротивлении 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 он 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 по ним 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 легко отделяющихся точных металлических копий, гальваностегия - нанесение металлических покрытий из одних металлов на изделия из других металлов), на электротранспорте (электропоезда, трамваи, троллейбусы, локомотивы), в осветительных приборах, в устройствах автоматики и вычислительной техники.

Следовательно, в установившемся 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 напряжение 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.

Тема 2. Электрические цепи однофазного синусоидального 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;
- а синхронные генераторы могут быть выполнены на значительно большие 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 с 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 токи и напряжения остаются неизменными, а в цепях переменного тока остаются неизменными кривые изменения токов 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);

ψ_i, ψ_u, ψ_e – начальная фаза тока, напряжения, ЭДС;

ω – 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 ω . 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 ψ , являющийся начальной фазой, – аргумент комплексного тока.

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 Φ :

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

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

$$\psi = w \Phi.$$

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

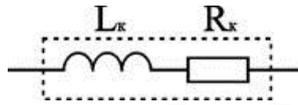
$$u_L = -e_L.$$

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

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

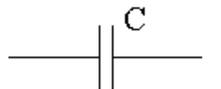
Это соотношение является аналогом закона Ома для емкости.

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 φ , который определяют уравнением

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

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

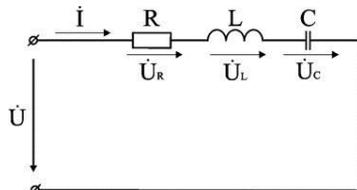
$$R = Z \cos \varphi,$$

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

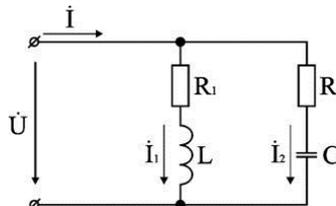
Мощности в цепях переменного тока

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:

$$\dot{I} = \dot{U} / \underline{Z}$$

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

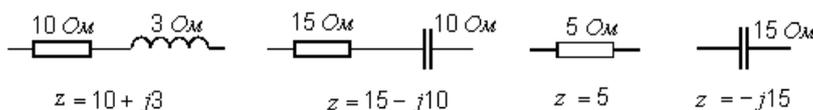
Комплексное сопротивление участка цепи представляет собой комплексное число, вещественная часть которого соответствует величине активного сопротивления, а коэффициент при мнимой части – реактивному сопротивлению.

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

$R + j X$ — активно-индуктивное сопротивление;

$R - j X$ — 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.

Тема 3. Электрические цепи синусоидального 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 индуктированные в обмотках статора ЭДС имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе относительно друг друга на один и тот же угол 120° . 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:

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

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 распространены являются соединения «звезда» и «треугольник». При этом способ соединения фаз источни-

ков 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_{ϕ} – 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_{ϕ}) – 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 осветительные 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

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.

Тема 4. Электрические 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, трапециoidalной 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_G . Для промышленных сетей $K_G \leq 5\%$, 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 также 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 представляются 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 соответ-

ствующими 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 первой, 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.

Тема 5. Переходные процессы в линейных 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 быстропротекающими, 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:

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

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 $A_1 \cdot e^{Pt} + A_2 \cdot t e^{Pt}$.

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 до коммутационного режима работы цепи.

Значения остальных токов и напряжений при $t = 0$ в после коммутационной 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 исключающий 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, приравнение 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 искоемых 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 искоемых токов и напряжений.

Тема 6. Нелинейные электрические и магнитные 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 относительны: 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.

Для построения многих функциональных узлов аппаратуры связи используется большой класс нелинейных двухполюсных полупроводниковых и электронных приборов, называемых диодами. Единственной электрической характеристикой диода является его вольт-амперная характеристика (ВАХ) - зависимость постоянного тока в диоде от постоянного напряжения на его зажимах $i = F(u)$ при согласном выборе положительных направлений напряжения и тока. Отличительные особенности вольт-амперных характеристик некоторых типов диодов различного назначения и их условные (схемные) обозначения приведены на рис. 10.1. Это характеристики полупроводниковых приборов: выпрямительного диода, стабилитрона, туннельного диода и динистора. Некоторые из нелинейных резисторов относятся к числу управляемых нелинейных элементов. Управляющей величиной может быть, например, внешняя температура, давление или освещенность. Свойства таких резисторов определяются не одной, а семейством ВАХ, каждая из которых соответствует различным значениям управляющей величины.

Транзисторы, электронные лампы, тиристоры и некоторые другие полупроводниковые и электронные приборы могут рассматриваться как нелинейные резистивные четырехполюсники.

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 неприменим. 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.

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.

Магнитное поле и его параметры

Направление магнитных линий и направление создающего их тока связаны между собой известным правилом правоходного 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 правоугового 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 Φ 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 – μ_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 Φ_r , 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 Φ , 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_{HdL} для контура, образованного средней магнитной линией, а следовательно, найти искомую величину намагничивающей силы, поскольку $F = \int_{HdL}$.

Запишем интеграл \int_{HdL} в виде суммы интегралов с границами интегрирования, совпадающими с началом и концом каждого участка цепи. Тогда

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

где: L_1 и L_2 – длины ферромагнитных участков цепи [м].
 δ – 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

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

Обратная задача

Задано:

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

Требуется определить магнитный поток Φ .

$$\Phi = \mu_0 S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{L} = \frac{F}{R_{\text{н}}}$$

Непосредственное использование формулы для определения магнитного потока Φ 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 Φ можно пренебречь сопротивлением ферромагнитного участка и посчитать поток, который получится под действием намагничивающей силы F при сопротивлении воздушного участка. Это значение Φ заведомо больше расчетного.

Остальные значения можно давать меньше.

$$\Phi = \frac{F}{R_{\text{воз}}} = \frac{F}{S \times 4\pi \times 10^{-7}}$$

Тема 7. Трансформаторы и электрические машины

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно-связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока. Трансформаторы широко используются в промышленности и быту для различных целей.

1. Для передачи и распределения электрической энергии.

Обычно на электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6-24 кВ, а передавать электроэнергию на дальние расстояния выгодно при значительно больших напряжениях (110, 220, 330, 400, 500, и 750 кВ). Поэтому на каждой электростанции устанавливают трансформаторы, осуществляющие повышение напряжения.

Распределение электрической энергии между промышленными предприятиями, населёнными пунктами, в городах и сельских местностях, а также внутри промышленных предприятий производится по воздушным и кабельным линиям, при напряжении 220, 110, 35, 20, 10 и 6 кВ. Следовательно, во всех распределительных узлах должны быть установлены трансформаторы, понижающие напряжение до величины 220, 380 и 660 В.

2. Для обеспечения нужной схемы включения вентилей в преобразовательных устройствах и согласования напряжения на выходе и входе преобразователя. Трансформаторы, применяемые для этих целей, называются преобразовательными.

3. Для различных технологических целей: сварки (сварочные трансформаторы), питания электроотермических установок (электропечные трансформаторы) и др.

4. Для питания различных цепей радиоаппаратуры, электронной аппаратуры, устройств связи и автоматики, электробытовых приборов, для разделения электрических цепей различных элементов указанных устройств, для согласования напряжения и пр.

5. Для включения электроизмерительных приборов и некоторых аппаратов (реле и др.) в электрические цепи высокого напряжения или же в цепи, по которым проходят большие токи, с целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопасности. Трансформаторы, применяемые для этих целей, называются измерительными.

Классификацию трансформаторов можно произвести по нескольким признакам:

1. По назначению трансформаторы разделяют на силовые общего и специального применения. Силовые трансформаторы общего применения используются в линиях передачи и распределения электроэнергии. Для режима их работы характерна частота переменного тока 50 Гц и очень малые отклонения первичного и вторичного напряжений от номинальных значений. К трансформаторам специального назначения относятся силовые специальные (печные, выпрямительные, сварочные, радиотрансформаторы), измерительные и испытательные трансформаторы, трансформаторы для преобразования числа фаз, формы кривой ЭДС, частоты и т.д.

2. По виду охлаждения – с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением.

3. По числу фаз на первичной стороне – однофазные и трёхфазные.

4. По форме магнитопровода – стержневые, броневые, тороидальные.

5. По числу обмоток на фазу – двухобмоточные, трёхобмоточные, многообмоточные (более трёх обмоток).

6. По конструкции обмоток – с концентрическими и чередующимися (дисковыми) обмотками.

Принцип действия трансформатора

Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток, размещённых на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала. Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет усилить электромагнитную связь между обмотками, т.е. уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток трансформатора. Первичную обмотку подключают к источнику переменного тока – электрической сети с напряжением сети u_1 . К вторичной обмотке присоединяют сопротивление нагрузки Z_n .

Обмотку более высокого напряжения называют обмоткой высшего напряжения (ВН), а низкого напряжения – обмоткой низшего напряжения (НН). Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами А и Х; обмотки НН – буквами а и х.

При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток i_1 , который создаёт переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток Φ индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС – e_1 и e_2 пропорциональные, согласно закону Максвелла, числам витков w_1 и w_2 соответствующей обмотки и скорости изменения потока $d\Phi/dt$.

Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке.

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Следовательно, отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяется выражением

$$E_1 / E_2 = e_1 / e_2 = w_1 / w_2.$$

Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают 3-5 % от номинальных значений U_1 и U_2 , и считать $E_1 \approx U_1$ и $E_2 \approx U_2$, то получим

$$U_1 / U_2 \approx w_1 / w_2.$$

Следовательно, подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, при заданном напряжении U_1 можно получить желаемое напряжение U_2 . Если необходимо повысить вторичное напряжение, то число витков w_2 берут больше числа w_1 ; такой трансформатор называют повыша-

ющим. Если требуется уменьшить напряжение U_2 , то число витков w_2 берут меньшим w_1 ; такой трансформатор называют понижающим.

Отношение ЭДС $E_{вн}$ обмотки высшего напряжения к ЭДС $E_{нн}$ обмотки низшего напряжения (или отношение их чисел витков) называют коэффициентом трансформации

$$n = \frac{E_{вн}}{E_{нн}} = \frac{w_{вн}}{w_{нн}}.$$

Коэффициент n всегда больше единицы.

В системах передачи и распределения энергии в ряде случаев применяют трёхобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиоэлектроники и автоматики – многообмоточные трансформаторы. В таких трансформаторах на магнитопроводе размещают три или большее число изолированных друг от друга обмоток, что даёт возможность при питании одной из обмоток получать два или большее число различных напряжений (U_2 , U_3 , U_4 и т.д.) для электроснабжения двух или большего числа групп потребителей. В трёхобмоточных силовых трансформаторах различают обмотки высшего, низшего и среднего (СН) напряжения.

В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность же остаётся приблизительно постоянной (она несколько уменьшается из-за внутренних потерь энергии в трансформаторе). Следовательно, полная мощность потребляемая из сети

$$S_1 = U_1 I_1,$$

практически полностью выделяется на нагрузке

$$S_1 = U_1 I_1 \approx S_2 = U_2 I_2.$$

Отсюда следуют соотношения между токами и напряжениями на первичной и вторичной обмотках трансформатора.

$$U_1 / U_2 = I_2 / I_1 = w_1 / w_2 = n.$$

При уменьшении вторичного напряжения в n раз по сравнению с первичным, ток i_2 во вторичной обмотке соответственно увеличится в n раз.

Трансформатор может работать только в цепях переменного тока. Если первичную обмотку трансформатора подключить к источнику постоянного тока, то в его магнитопроводе образуется магнитный поток, постоянный во времени по величине и направлению. Поэтому в первичной и вторичной обмотках в установившемся режиме не индуцируются ЭДС, а, следовательно, не передаётся электрическая энергия из первичной цепи во вторичную. Такой режим опасен для трансформатора, так как из-за отсутствия ЭДС E_1 в первичной обмотке ток $I_1 = U_1 / R_1$ весьма большой.

Важным свойством трансформатора, используемым в устройствах автоматики и радиоэлектроники, является способность его преобразовывать сопротивление нагрузки. Если к источнику переменного тока подключить нагрузку с сопротивлением R через трансформатор с коэффициентом трансформации n , то для цепи источника

$$R' = \frac{P_1}{I_1^2} \approx \frac{P_2}{I_1^2} \approx \frac{I_2^2 R}{I_1^2} \approx n^2 R,$$

где: P_1 – мощность, потребляемая трансформатором от источника переменного тока, Вт; $P_2 = I_2^2 R \approx P_1$ – мощность, потребляемая нагрузкой с сопротивлением R от трансформатора.

Таким образом, трансформатор изменяет значение сопротивления нагрузки R в n^2 раз. Это свойство широко используется при разработке электрических схем для согласования сопротивлений нагрузки с внутренним сопротивлением источников электрической энергии.

Комплексные уравнения и векторная диаграмма реального трансформатора

В реальном трансформаторе помимо основного магнитного потока Φ , замыкающегося по магнитопроводу и сцепленного со всеми обмотками трансформатора, имеются также потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, которые сцеплены только с одной из обмоток. Потоки рассеяния не участвуют в передаче энергии, но создают в каждой из обмоток соответствующие ЭДС самоиндукции $E_{\sigma 1} = 4,44 f w_1 \Phi_{\sigma 1m}$; $E_{\sigma 2} = 4,44 f w_2 \Phi_{\sigma 2m}$.

С учетом ЭДС самоиндукции и падений напряжения в активных сопротивлениях обмоток можно составить комплексные уравнения для первичной и вторичной обмоток трансформатора.

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} &= \dot{I}_1 R_1; \\ \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} &= \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 Z_{\kappa}; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} + (-\dot{I}_2 w_2 / w_1) \end{aligned} \right\}$$

где: Z_{κ} - сопротивление нагрузки, подключенной к трансформатору.

Поскольку потоки рассеяния полностью или частично замыкаются по воздуху, они пропорциональны МДС соответствующих обмоток или соответствующим токам:

$$E_{\sigma 1} = I_1 X_1; \quad E_{\sigma 2} = I_2 X_2.$$

Величины X_1 и X_2 называют индуктивными сопротивлениями обмоток трансформатора, обусловленными потоками рассеяния. Так как векторы ЭДС $E_{\sigma 1}$ и $E_{\sigma 2}$ отстают от соответствующих потоков и токов на 90° , то

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 X_1; \quad \dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 X_2.$$

При этом комплексные уравнения трансформатора примут вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 &= \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = \dot{I}_1 Z_1; \\ \dot{E}_2 &= \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2 + \dot{I}_2 Z_{\kappa} = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_2 Z_{\kappa}; \\ \dot{I}_1 - (-\dot{I}_2 w_2 / w_1) &= \dot{I}_{10}. \end{aligned}$$

Замена ЭДС $\dot{E}_{\sigma 1}$ и $\dot{E}_{\sigma 2}$ падениями напряжений $j \dot{I}_1 X_1$ и $j \dot{I}_2 X_2$ наглядно показывает роль потоков рассеяния: они создают индуктивные падения напряжения в обмотках, не участвуя в передаче энергии из одной обмотки в другую. Проще становится и построение векторной диаграммы, соответствующей системе уравнений, в которой целесообразно также заменить падение напряжения в нагрузке величиной $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_{\kappa}$, т.е. вторичным напряжением трансформатора, определяемым из:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2.$$

Векторную диаграмму вторичной обмотки трансформатора строят согласно уравнению. Характер диаграммы определяется током нагрузки \dot{I}_2 , который принимается заданным по величине и фазе. Иными словами, задаваясь векторами вторичного тока \dot{I}_2 и напряжения \dot{U}_2 , можно построить вектор ЭДС

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2,$$

если известны параметры трансформатора. Вектор $\dot{I}_2 R_2$ параллелен вектору тока \dot{I}_2 , а вектор $j \dot{I}_2 X_2$ опережает вектор тока \dot{I}_2 на угол 90° . На диаграмме изображен и вектор магнитного потока $\dot{\Phi}_m$, который опережает вектор ЭДС \dot{E}_2 на 90° . Векторную диаграмму первичной обмотки трансформатора строят в соответствии с уравнением

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1.$$

Построение диаграммы начинают с вектора потока $\dot{\Phi}_m$, который создается током холостого хода \dot{I}_{10} . Этот ток опережает вектор потока $\dot{\Phi}_m$ на угол $\delta = 5 + 10^\circ$. Вектор ЭДС \dot{E}_1 , как и \dot{E}_2 , отстает от потока $\dot{\Phi}_m$ на угол 90° .

Асинхронные машины

В настоящее время асинхронные машины используются в основном в режиме двигателя. Машины мощностью больше 0.5 кВт обычно выполняются трёхфазными, а при меньшей мощности – однофазными.

За прошедшие годы асинхронные двигатели нашли очень широкое применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Их используют в электроприводе металло-режущих станков, подъёмно-транспортных машин, транспортёров, насосов, вентиляторов. Мало-мощные двигатели используются в устройствах автоматики.

Широкое применение асинхронных двигателей объясняется их достоинствами по сравнению с другими двигателями: высокая надёжность, возможность работы непосредственно от сети переменного тока, простота обслуживания.

Устройство трёхфазной асинхронной машины

Неподвижная часть машины называется статор, подвижная – ротор. Сердечник статора набирается из листовой электротехнической стали и запрессовывается в станину. Обмотка статора состоит из трёх отдельных частей, называемых фазами. Начала фаз обозначаются буквами c_1, c_2, c_3 , концы – c_4, c_5, c_6 .

Начала и концы фаз выведены на клеммник, закреплённый на станине. Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда или треугольник. Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя. В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора. Основное назначение обмотки статора – создание в машине вращающего магнитного поля.

Сердечник ротора набирается из листов электротехнической стали, на внешней стороне которых имеются пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка ротора бывает двух видов: короткозамкнутая и фазная. Соответственно этому асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (с контактными кольцами).

Механическая характеристика асинхронного двигателя

Под механической характеристикой принято понимать зависимость частоты вращения ротора в функции от электромагнитного момента $n = f(M)$. Эту характеристику (рис. 2.15) можно получить, используя зависимость $M = f(S)$ и пересчитав частоту вращения ротора при разных значениях скольжения.

Механическую характеристику можно рассчитать и построить по паспортным данным.

Точка 1:

$$n_0 = (60f) / p,$$

где: p – число пар полюсов машины;

f – частота сети.

Точка 2 с координатами n_n и M_n . Номинальная частота вращения n_n задается в паспорте.

Номинальный момент рассчитывается по формуле:

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}} = \text{НМ} \right]$$

здесь: P_n – номинальная мощность (мощность на валу).

Точка 3 с координатами $M_{кр} n_{кр}$. Критический момент рассчитывается по формуле $M_{кр} = M_n \lambda$. Перегрузочная способность λ задается в паспорте двигателя $n_{кр} = n_0 (1 - S_{кр})$, $S_{кр} = S_n (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1})$, $S_n = (n_0 - n_n) / n_0$ – номинальное скольжение.

Точка 4 имеет координаты $n = 0$ и $M = M_{пуск}$. Пусковой момент вычисляют по формуле

$$M_{пуск} = M_n \lambda_{пуск},$$

где: $\lambda_{пуск}$ – кратность пускового момента задается в паспорте.

Асинхронные двигатели имеют жесткую механическую характеристику, т.к. частота вращения ротора мало зависит от нагрузки на валу. Это одно из достоинств этих двигателей.

Конструкция универсального коллекторного электродвигателя

Конструкция универсального коллекторного электродвигателя не имеет принципиальных отличий от конструкции коллекторного электродвигателя постоянного тока с обмотками возбуждения, за исключением того, что вся магнитная система (и статор, и ротор) выполняется шихтованной и обмотка возбуждения делается секционированной. Шихтованная конструкция и статора, и ротора обусловлена тем, что при работе на переменном токе их пронизывают переменные магнитные потоки, вызывая значительные магнитные потери.

Секционирование обмотки возбуждения вызвано необходимостью изменения числа витков обмотки возбуждения с целью сближения рабочих характеристик при работе электродвигателя от сетей постоянного и переменного ток Универсальный коллекторный электродвигатель может быть выполнен как с последовательным, так и с параллельным и независимым возбуждением.

Принцип работы универсального двигателя

Возможность работы универсального двигателя от сети переменного тока объясняется тем, что при изменении полярности подводимого напряжения изменяются направления токов в обмотке якоря и в обмотке возбуждения. При этом изменение полярности полюсов статора практически

совпадает с изменением направления тока в обмотке якоря. В итоге направление электромагнитного вращающего момента не изменяется

В качестве универсального используют двигатель последовательного возбуждения, у которого ток якоря является и током возбуждения, что обеспечивает почти одновременное изменение направления тока в обмотке якоря I_a и магнитного потока возбуждения Φ при переходе от положительного полупериода переменного напряжения сети к отрицательному.

Коэффициент полезного действия универсального двигателя при его работе от сети переменного тока более низкий, чем при его работе от сети постоянного тока. Другой недостаток универсального двигателя - тяжелые условия коммутации, вызывающие интенсивное искрение на коллекторе при включении двигателя в сеть переменного тока. Этот недостаток объясняется наличием трансформаторной связи между обмотками возбуждения и якоря, что ведет к наведению в коммутируемых секциях трансформаторной ЭДС, ухудшающей процесс коммутации в двигателе.

Наличие щеточно-коллекторного узла является причиной ряда недостатков универсальных коллекторных двигателей, особенно при их работе на переменном токе (искрение на коллекторе, радиопомехи, повышенный шум, невысокая надежность). Однако эти двигатели по сравнению с асинхронными и синхронными при частоте питающего напряжения $f = 50$ Гц позволяют получать частоту вращения до 10 000 об/мин и более (наибольшая синхронная частота вращения при $f = 50$ Гц равна 3000 об/мин).

Тема 8. Полупроводниковые приборы

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-п-переходом – область, на границе двух полупроводников, один из которых имеет дырочную, а другой - электронную электропроводность).

На практике р-п-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-п переход.

По конструктивному исполнению полупроводниковые диоды разделяются на плоскостные и точечные. Плоскостные диоды представляют собой р-п-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.

Рассмотрим некоторые группы полупроводниковых диодов.

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-п-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-п-перехода от обратного напряжения, который предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью.

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

Светодиод - полупроводниковый диод, в котором в режиме прямого тока в зоне р-п-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.

Тиристоры - это разновидность полупроводниковых приборов. Они предназначены для регулирования и коммутации больших токов. Тиристор позволяет коммутировать электрическую цепь при подаче на него управляющего сигнала. Это делает его похожим на транзистор.

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 транзисторов: 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).

При подключении эмиттера транзистора типа *p-n-p* к положительному зажиму источника питания возникает эмиттерный ток $I_э$. Дырки преодолевают переход и попадают в область базы, для которой дырки не являются основными носителями заряда. Дырки частично рекомбинируют с электронами базы. Так как напряжение питания коллектора во много раз (приблизительно в 20 раз) больше, чем напряжение питания базы, и конструктивно слой базы выполняется очень тонким, то электрическое сопротивление цепи базы получается высоким и ток, ответвляющийся в цепь базы $I_б$, оказывается незначительным. Большинство дырок достигают коллектор, образуя коллекторный ток. Ток коллектора превосходит ток базы от 20 до 200 раз. Это объясняет возможность усиления с помощью транзистора тока и, соответственно, мощности сигнала во много раз. Действительно, если подавать напряжение сигнала в цепь базы, то в соответствии с напряжением

сигнала будет изменяться сопротивление р-п-перехода между эмиттером и базой. Это изменяющееся сопротивление включено в коллекторную цепь, что приведет к соответствующему изменению тока коллектора, который во много раз больше тока базы.

Если в коллекторную цепь включить сопротивление нагрузки, в нем будет выделяться мощность, во много раз большая, чем мощность сигнала, подводимого в цепь базы. При этом следует иметь в виду, что мощность сигнала усиливается за счет энергии источников питания.

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 транзисторов). 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, *p*-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 – *p*-канальные. Транзисторы с электронной проводимостью называются *n*-канальными. Канал в этих полупроводниковых приборах может быть обедненным или наоборот обогащенным носителями.

Тема 9. Аналоговые электронные устройства

Аналоговые (АЭУ) – это устройства, предназначенные для усиления, преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции. Преимущества аналоговых устройств (сравнительная простота, надежность и быстродействие) обеспечили им самое широкое применение.

Цифровые устройства служат для обработки импульсных сигналов в двоичном или каком-либо другом коде.

АЭУ делятся на две большие группы:

1. Электронный усилитель электрических колебаний – это устройство для увеличения мощности сигнала за счет энергии источника постоянного напряжения. Является одним из основных узлов радиоаппаратуры и электронных систем.

2. Устройства на основе усилителей делятся на:

а) преобразователи электрических сигналов или устройства аналоговой обработки сигналов. Выполняются они на базе усилителей со специальными цепями обратной связи. К ним относятся сумматоры, интеграторы, дифференциаторы, активные фильтры, логарифмические усилители, детекторы, перемножители и делители, устройства сравнения (компараторы) и другие;

б) преобразователи сопротивлений. Строятся также на усилителях с обратной связью. Они преобразуют величину, знак и характер сопротивлений;

в) особый класс составляют всевозможные генераторы сигналов и связанные с ними устройства.

Электронные устройства делятся на два класса: аналоговые и цифровые. Аналоговые устройства работают с непрерывно изменяющимися сигналами, а цифровые устройства – с сигналами в цифровой форме, т.е. в форме дискретных импульсов, по сути, с информацией, представленной посредством двоичного кода.

Для аналоговых устройств характерно непрерывное изменение сигнала в соответствии с физическим процессом, который он описывает. По сути, такой сигнал является непрерывной функцией с неограниченным числом значений в различные моменты времени.

Например: температура воздуха меняется, и соответствующим образом меняется аналоговый сигнал в виде перепадов напряжения, или маятник меняет свое положение, совершая гармонические колебания, и снимаемый аналоговый сигнал будет иметь форму синусоиды. Здесь электрический сигнал несет полную информацию о процессе.

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 $K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$
- Коэффициент усиления по току $K_I = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$
- Коэффициент усиления по мощности $K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}}I_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}I_{\text{вх}}} = K_U K_I$
- Для многокаскадных усилителей $K_U = \frac{U_{\text{вых } n}}{U_{\text{вх } 1}}$

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 $U_{з0}$, 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 $I_{и0}$. 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 $i_{и}$ и тока стока i_c , причем $i_{и} \neq i_c$. За счет падения напряжения на резисторе R_n от переменной составляющей тока $i_{и}$, переменная составляющая напряжения между затвором и истоком, усиливаемая полевым транзистором, может быть значительно меньше входного напряжения: $u_z = u_{ex} - R_n i_{и}$

Это явление, называемое отрицательной обратной связью, приводит к уменьшению коэффициента усиления усилительного каскада. Для его устранения параллельно резистору R_n включают конденсатор C_n , сопротивление которого на самой низкой частоте усиливаемого напряжения должно быть во много раз меньше сопротивления резистора R_n . При этом условии падение напряжения от тока истока $i_{и}$ на цепочке R_n - C_n , 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.

Тема 10. Операционные усилители

Операционный усилитель - это электронный усилитель напряжения с высоким коэффициентом усиления, имеющий дифференциальный вход и обычно один выход. Напряжение на выходе может превышать разность напряжений на входах в сотни или даже тысячи раз.

Свое начало операционные усилители ведут от аналоговых компьютеров, где они применялись во многих линейных, нелинейных и частото-зависимых схемах. Параметры схем с операционными усилителями определяются только внешними компонентами, а так же небольшой температурной зависимостью или разбросом параметров при их производстве, что делает операционные усилители очень популярными элементами при конструировании электронных схем.

Операционные усилители являются наиболее востребованными приборами среди современных электронных компонент, они находят свое применение в потребительской электронике, применяются в промышленности и в научных приборах. Многие стандартные микросхемы операционных усилителей стоят всего несколько центов. Но некоторые модели гибридных или интегрированных операционных усилителей со специальными характеристиками, выпускаемые мелкими партиями, могут стоить более сотни долларов. Операционные усилители обычно выпускаются как отдельные компоненты, а так же они могут являться элементами более сложных электронных схем.

Линейные безынерционные и инерционные (частотно-зависимые), а также нелинейные безынерционные преобразователи аналоговых сигналов часто выполняют на основе операционных усилителей (ОУ), охваченных обратными связями. Преобразования выполняемые ОУ над аналоговыми сигналами многообразны: умножение и деление, суммирование, возведение в степень, логарифмирование и т.п. Операции производятся такими устройствами с заданной точностью в определенном диапазоне амплитуд входных сигналов и полосе частот.

Сумматор сигналов. Устройство содержит N -генераторов напряжения с разными ЭДС E_i и внутренними сопротивлениями R_i , которые включены параллельно. Блок таких генераторов подключен к инвертирующему входу операционного усилителя. Сопротивление обратной связи R_{OC} включено между выходом ОУ и его инвертирующим входом. Неинвертирующий вход ОУ и вторые клеммы генераторов напряжения подключены к общей шине устройства.

Интеграторы и дифференциаторы сигналов с частотной точки зрения являются фильтрами с неравномерной полосой пропускания.

Если выбрать номиналы конденсаторов и резисторов так, чтобы $\tau_T \gg \tau_{OC}$, то АЧХ устройства будет практически равномерной в области средних частот, а в области частот $\omega < 1/\tau_T, \omega > 1/\tau_{OC}$ наблюдается падение усиления пропорциональное первой степени частоты при очень малых и очень больших частотах.

Следовательно, устройство с комплексным коэффициентом передачи представляет собой простейший полосовой фильтр, а операционные усилители с коэффициентами передачи являются аналогами реальных дифференцирующих и интегрирующих цепей (реальных фильтров низких и высоких частот). Наконец, если выходы двух ОУ реализующих ФНЧ и ФВЧ подключить к сумматору, их входы объединить и выбрать постоянные так, чтобы $\tau_T \ll \tau_{OC}$, то на выходе устройства, будет происходить подавление сигналов в области средних частот.

Компаратор - название произошло от принципа его работы – сравнения. Так функционируют приборы, производящие измерения способом сравнения с эталоном: весы с одинаковыми плечами, электрические потенциометры. По своей принципиальной работе компараторы делятся на механические, электрические и оптические. Приборы с механической конструкцией применяются для проверки конечных мер длины.

Компаратор с двумя входами и одним выходом. Причем один из входов является прямым, а другой инверсным. На эти входы поступает напряжение, которые устройство сравнивает. В зависимости от этого сравнения на своем выходе устройство устанавливает либо логический ноль, когда напряжение на инверсном входе выше, чем на прямом, либо логическую 1, когда напряжение входа прямого выше, чем на инверсном.

Тема 11. Источники вторичного электропитания: выпрямители, фильтры, стабилизаторы

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 стабилитрона.

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 вентилях 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 вентилях выпрямителя за интервал проводимости. Он базируется на использовании в схеме выпрямителя управляемых вентилях - тиристоров, в связи с чем такой выпрямитель называют управляемым. Однофазные управляемые выпрямители выполняются по схеме и нулевым выводом трансформатора и мостовой схеме.

Тема 13. Автономные инверторы. Преобразователи частоты

Применение полностью управляемых ключей (транзисторов, запираемых тиристоров и др.) позволяет не только изменять параметры преобразователей, но и создавать новые типы электрических устройств. К последним относятся автономные инверторы, или инверторы с самокоммутацией, - преобразователи постоянного тока в переменный, в которых используются полностью управляемые ключи. Следует отметить, что автономные инверторы могут быть изготовлены на основе обычных тиристоров с принудительной коммутацией под воздействием напряжений, создаваемых устройствами принудительной коммутации, входящих в состав инвертора или его нагрузки. Такие инверторы кратко рассмотрены в этой главе, так как обычный тиристор с устройством принудительной коммутации функционально сходен с полностью управляемым прибором. Однако существует класс инверторов с коммутацией, обусловленной резонансными явлениями в выходных цепях, включающих в себя элементы инвертора и (или) нагрузки.

Эти виды инверторов имеют следующие определения:

- инвертор напряжения - инвертор, подключенный к источнику постоянного тока с преобладающими свойствами источника напряжения;
- инвертор тока - инвертор, подключенный к источнику постоянного тока с преобладающими свойствами источника тока.

Законы изменения токов в цепи нагрузки инвертора напряжения при определенных условиях подобны законам изменения узловых потенциалов на шинах нагрузки инвертора тока. Такое соответствие законов известно в электротехнике как принцип дуальности (двойственности) цепей.

В рассматриваемом случае дуальными элементами в схемах инверторов являются:

- источники напряжения;
- сопротивление и проводимость нагрузки;
- индуктивность и емкость на стороне нагрузки.

Используя принцип дуальности, можно результаты анализа процессов в схеме инвертора одного типа, например инвертора тока, путем определенных преобразований распространить на схему инвертора другого типа - инвертора напряжения, и наоборот.

Индуктивность сглаживающего реактора L_d в инверторе тока имеет конечное значение и оказывает существенное влияние на динамические характеристики инвертора, т. е. чем меньше эта индуктивность, тем меньше всплески и провалы выходного напряжения при скачкообразных изменениях нагрузки инвертора. В цепях постоянного тока некоторых инверторов напряжения имеется индуктивность, обеспечивающая коммутацию тиристорov. Поэтому наличие индуктивности в цепи постоянного тока еще не является достаточным признаком для определения типа схемы (инвертор тока или инвертор напряжения). Необходимо знать характер изменения входного тока инвертора.

Применение полностью управляемых ключей позволяет не только упростить схемы автономных инверторов, но и значительно повысить качество преобразуемых параметров в преобразователях. Такая возможность реализуется посредством широтно-импульсной модуляции процессов изменения напряжений и токов инвертора. В преобразователях переменного тока применяется ШИМ по синусоидальным или другим требуемым законам изменения основных параметров. В результате обеспечивается синусоидальность (снижение уровня высших гармоник по сравнению с основной гармоникой) напряжения или тока. Кроме того, формирование напряжения требуемого спектрального состава позволяет создавать новые виды силовых электронных устройств — активные и гибридные фильтры. Одновременно со снижением высших гармоник тока (напряжения) ШИМ повышает коэффициент мощности в выпрямителях, инверторах, ведомых сетью, преобразователях частоты и других типах преобразователей.

Полностью управляемые ключи в преобразователях переменного/постоянного тока позволяют расширить диапазоны изменения углов сдвига между напряжением сети и током и обеспечивают работу устройства со значениями углов управления от 0 до 2α . При этом обычно используется синусоидальная ШИМ и, следовательно, существенное улучшение качества входных и выходных параметров преобразователя. Полностью управляемые ключи позволяют создавать прямые преобразователи частоты, не только понижающие, но и повышающие частоту выходного напряжения по сравнению с частотой входного напряжения. В регуляторах переменного напряжения полностью управляемые ключи позволяют посредством ШИМ обеспечить синусоидальность тока в нагрузке и повысить входной коэффициент мощности.

Тема 14. Устройства цифровой и импульсной электроники

Логический элемент (логический вентиль) – это электронная схема, выполняющая некоторую простейшую логическую операцию.

Логический элемент может быть реализован в виде отдельной интегральной схемы. Часто интегральная схема содержит несколько логических элементов.

Логические элементы используются в устройствах цифровой электроники (логических устройствах) для выполнения простого преобразования логических сигналов.

Выделяются следующие классы логических элементов (так называемые логики):

- резисторно-транзисторная логика (ТРЛ);
- диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
- транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
- эмиттерно-транзисторная логика (ЭСЛ);
- транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки (ТТЛШ);

- логика на основе МОП-транзисторов с каналами типа $p(p\text{-МДП})$;
- логика на основе МОП-транзисторов с каналами типа $n(n\text{-МДП})$;
- логика на основе комплементарных ключей на МДП-транзисторах (КМДП, КМОП);
- интегральная инжекционная логика И²Л;
- логика на основе полупроводника из арсенида галлия GaAs.

Логические устройства разделяют на два класса: комбинационные и последовательностные.

Устройство называют комбинационным, если его выходные сигналы в некоторый момент времени однозначно определяются входными сигналами, имеющими место в этот момент времени.

Иначе устройство называют последовательностным или конечным автоматом (цифровым автоматом, автоматом с памятью). В последовательностных устройствах обязательно имеются элементы памяти. Выходные сигналы последовательностных устройств определяются не только сигналами, имеющимися на входах в данный момент времени, но и состоянием элементов памяти. Таким образом, реакция последовательностного устройства на определенные входные сигналы зависит от предыстории его работы.

Шифратор – это комбинационное устройство, преобразующее десятичные числа в двоичную систему счисления, причем каждому входу может быть поставлено в соответствие десятичное число, а набор выходных логических сигналов соответствует определенному двоичному коду. Число входов и выходов в полном шифраторе связано соотношением $m=2^n$, где n – число входов, m – число выходов. Шифратор для преобразования десятиразрядного единичного кода (десятичных чисел от 0 до 9) в двоичный код.

Основное назначение шифратора – преобразование номера источника сигнала в код (например, номера нажатой кнопки некоторой клавиатуры).

Дешифратором называется комбинационное устройство, преобразующее n -разрядный двоичный код в логический сигнал, появляющийся на том выходе, десятичный номер которого соответствует двоичному коду. Число входов и выходов в так называемом полном дешифраторе связано соотношением $m=2^n$, где n – число входов, а m – число выходов.

Дешифратор – одно из широко используемых логических устройств. Его применяют для построения различных комбинационных устройств. Шифраторы и дешифраторы являются примерами простейших преобразователей кодов.

Преобразователями кодов называют устройства, предназначенные для преобразования одного кода в другой, при этом часто они выполняют нестандартные преобразования кодов. Преобразователи кодов обозначают через X/Y.

Мультиплексором называют комбинационное устройство, обеспечивающее передачу в желаемом порядке цифровой информации, поступающей по нескольким входам на один выход. Мультиплексоры обозначают через MUX, а также через MS. Функционально мультиплексор можно изобразить в виде коммутатора, обеспечивающего подключение одного из нескольких входов (их называют информационными) к одному выходу устройства. Кроме информационных входов в мультиплексоре имеются адресные входы и разрешающие (стробирующие). Сигналы на адресных входах определяют, какой конкретно информационный канал подключен к выходу. Если между числом информационных входов n и числом адресных входов m действует соотношение $n=2^m$, то такой мультиплексор называют полным. Если $n < 2^m$, то мультиплексор называют неполным.

Демультимплексором называют устройство, в котором сигналы с одного информационного входа поступают в желаемой последовательности по нескольким выходам в зависимости от кода на адресных шинах. Таким образом, демультимплексор в функциональном отношении противоположен мультиплексору. Демультимплексоры обозначают через DMX или DMS.

Сумматоры – это комбинационные устройства для сложения чисел. Рассмотрим сложение двух одноразрядных двоичных чисел, для чего составим таблицу сложения (таблицу истинности), в которой отразим значения входных чисел A и B, значение результата суммирования Si значение переноса в старший разряд P.

Триггер – простейшее последовательностное устройство, которое может находиться в одном из двух возможных состояний и переходить из одного состояния в другое под воздействием

входных сигналов. Триггер является базовым элементом последовательностных логических устройств.

Триггеры классифицируют по следующим признакам:

- способу приема информации;
- принципу построения;
- функциональным возможностям.

Различают асинхронные и синхронные триггеры.

Асинхронный триггер изменяет свое состояние непосредственно в момент появления соответствующего информационного сигнала.

Синхронные триггеры реагируют на информационные сигналы только при наличии соответствующего сигнала на входе синхронизации C (строб).

По функциональным возможностям триггеры разделяются на следующие классы:

- с отдельной установкой состояния 0 и 1 (RS– триггеры);
- универсальные (JK– триггеры);
- с приемом информации по одному входу D (D– триггеры, или триггеры задержки);
- со счетным входом T (T–триггеры).

Счетчики импульсов – это последовательностное цифровое устройство, обеспечивающее хранение слова информации и выполнение над ним микрооперации счета, заключающейся в изменении значения числа в счетчике на 1. По существу счетчик представляет собой совокупность соединенных определенным образом триггеров. Основным параметром счетчика – модуль счета. Это максимальное число единичных сигналов, которое может быть сосчитано счетчиком. Счетчики обозначаются через СТ.

Счетчики классифицируют:

по модулю счета:

- двоично-десятичные;
- двоичные;
- с произвольным постоянным модулем счета;
- с переменным модулем счета;

по направлению счета:

- суммирующие;
- вычитающие;
- реверсивные;

по способу формирования внутренних связей:

- с последующим переносом;
- с параллельным переносом;
- с комбинированным переносом;
- кольцевые.

Регистр – это последовательностное логическое устройство, используемое для хранения n -разрядных двоичных чисел и выполнения преобразований над ними. Регистр представляет собой упорядоченную последовательность триггеров, число которых соответствует числу разрядов в слове. С каждым регистром обычно связано комбинационное цифровое устройство, с помощью которого обеспечивается выполнение некоторых операций над словами.

Типичными являются следующие операции:

- прием слова в регистр;
- передача слова из регистра;
- поразрядные логические операции;
- сдвиг слова влево или вправо на заданное число разрядов;
- преобразование последовательного кода слова в параллельный и обратно;
- установка регистра в начальное состояние (сброс).

Фактически любое цифровое устройство можно представить в виде совокупности регистров, соединенных друг с другом при помощи комбинационных цифровых устройств.

Регистры классифицируются по следующим видам:

- накопительные (регистры памяти, хранения);
- сдвигающие.

В свою очередь сдвигающие регистры делятся:

- по способу ввода-вывода информации на
 - параллельные;
 - последовательные;
 - комбинированные;
- по направлению передачи информации на
 - однонаправленные;
 - реверсивные.

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.

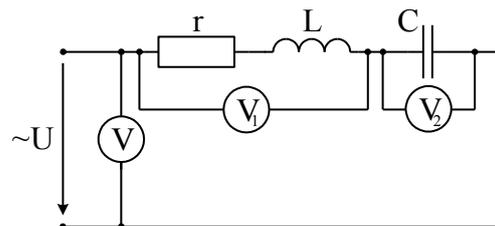
Цель практических занятий – научить динамическому и математическому моделированию статических и динамических процессов, происходящих в механических системах, на примере решения типовых задач.

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

Тема 1. Расчет простых цепей переменного синусоидального тока. Векторные диаграммы. Символический метод расчета. Резонанс напряжений и резонанс токов

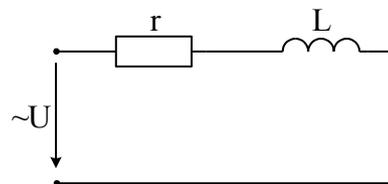
На практическом занятии необходимо решить разноуровневые задачи по пройденному лекционному материалу. Примерный перечень задач приведен ниже. Рекомендуемая литература и дополнительный теоретический материал представлены в рабочей программе дисциплины «Электротехника и промышленная электроника».

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



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

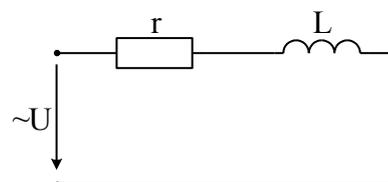
$U = 14\sin\omega t$, $x_L = 10 \text{ Ом}$, $r = 10 \text{ Ом}$.



Задача 3. Определить $U(t)$, если:

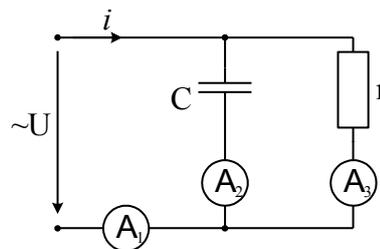
$r = 5 \text{ Ом}$, $L = 40 \text{ мГ}$,

$U_L = 240\sin(1000t + 150)$.



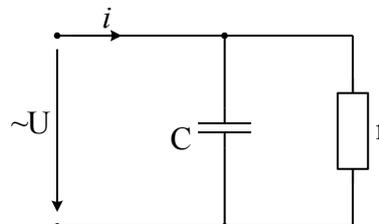
Задача 4. Определить I_2 , если:

$$I_1 = 2 \text{ A}, \quad I_3 = 1.6 \text{ A}.$$



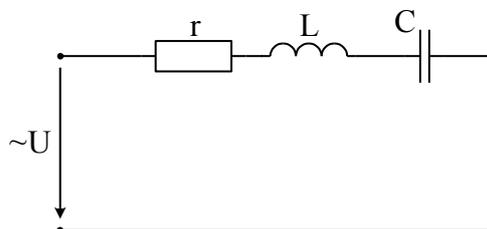
Задача 5. Определить x_C и коэффициент мощности схемы, если:

$$U = 40 \text{ В}, \quad I = 8 \text{ А}, \quad r = 10 \text{ Ом}.$$



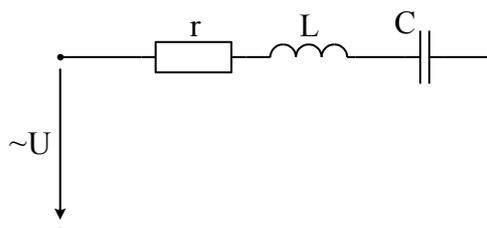
Задача 6. Определить $i(t)$, если:

$$r = 10 \text{ Ом}, \quad x_L = 20 \text{ Ом}, \quad x_C = 10 \text{ Ом}, \\ U = 141 \sin(\omega t + 60).$$

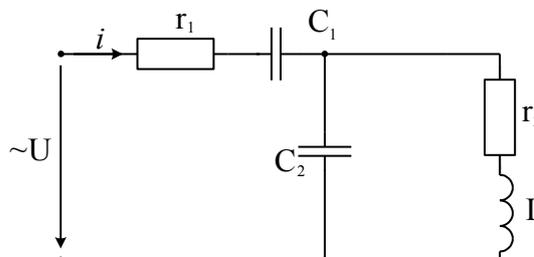


Задача 7. Определить закон изменения тока в цепи $i(t)$, если:

$$r = 5 \text{ Ом}, \quad x_L = 10 \text{ Ом}, \quad x_C = 15 \text{ Ом}, \\ U = 141 \sin(\omega t + 30).$$

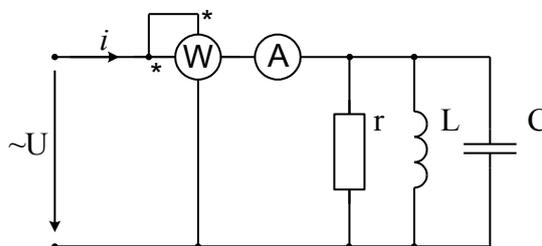


Задача 8. Записать закон Ома в общем виде для тока i .

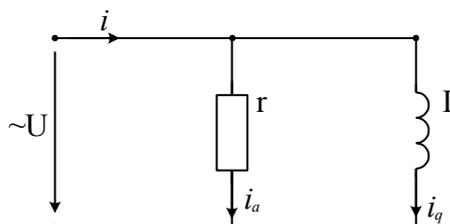


Задача 9. Определить I_A , P_W , если:

$$|r| = |x_L| = |x_C| = 2 \text{ Ом}, \\ U = 200 \sqrt{2} \sin \omega t$$

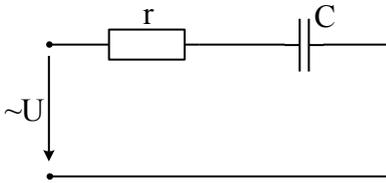


Задача 10. Определить I , если:
 $b_L = 2 \text{ Ом}^{-1}$, $I_a = 1.5 \text{ А}$, $q = 1.5 \text{ Ом}^{-1}$.



Тема 2. Гармонический анализ и разложение периодических функций. Расчет простых цепей несинусоидального тока. Мощности несинусоидального тока

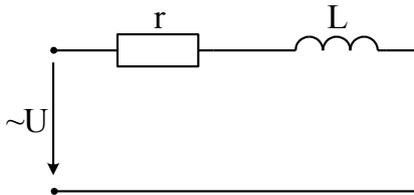
Задача 1.



Дано: $U = 100 + 100 \sin \omega t + 50 \sin (3\omega t + 68)$,
 $r = 2 \text{ Ом}$, $C = 10,5 \text{ мкФ}$, $f = 50 \text{ Гц}$.

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

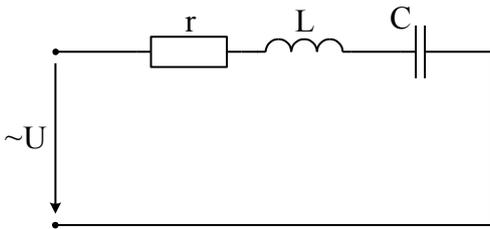
Задача 2.



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

Определить: мгновенное значение напряжения U.

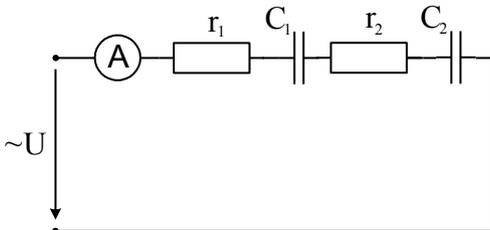
Задача 3.



Дано: $U = 180 \sin \omega t + 120 \sin 3\omega t$,
 $r = 3 \text{ Ом}$, $L = 95,5 \text{ мГн}$, $C = 11,8 \text{ мкФ}$,
 $f = 50 \text{ Гц}$.

Определить: мгновенное значение тока.

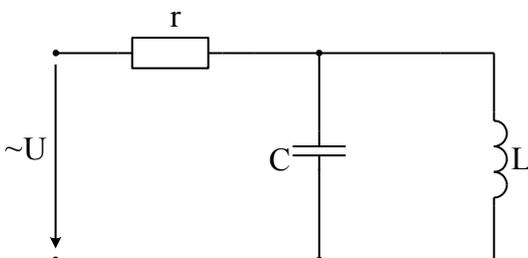
Задача 4.



Дано: $U = 300 \sin \omega t + 102 \sin (3 \omega t - 78,5^\circ)$,
 $r_1 = 8 \text{ Ом}$, $C_1 = 6 \text{ мкФ}$, $r_2 = 12 \text{ Ом}$,
 $C_2 = 4,6 \text{ мкФ}$, $f = 50 \text{ Гц}$.

Определить: показания амперметра.

Задача 5.

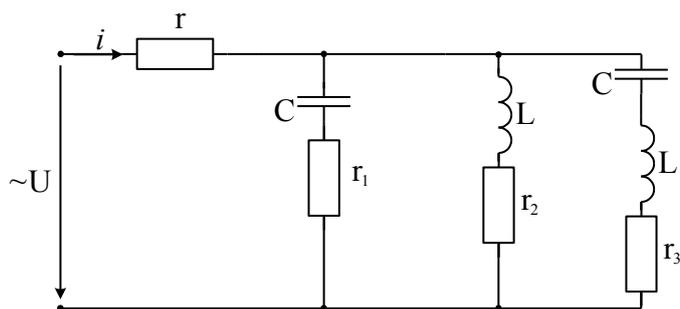


Дано: $U = 200 + 100 \sin 3 \omega t$,
 $r = 50 \text{ Ом}$, $X_L = \omega L = 5 \text{ Ом}$,

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = 45 \text{ Ом}.$$

Определить: действующее значение тока в неразветвленной части цепи.

Задача 6.



Дано: $U = 120 + 282 \sin \omega t$,
при угловой частоте ω $X_C = X_L = 30 \text{ Ом}$,
 $r_1 = r_2 = 40 \text{ Ом}$, $r_3 = 100 \text{ Ом}$.

Определить: мгновенное значение
тока i .

Задача 7.

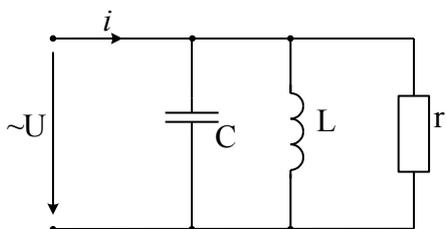
Дано: напряжение и ток в цепи изменяются по законам:

$$U = 80 \sqrt{2} \sin(\omega t + 15^\circ) + 60 \sqrt{2} \sin(3 \omega t - 20^\circ),$$

$$i = 40 \sqrt{2} \sin(\omega t + 75^\circ) + 30 \sqrt{2} \sin(3 \omega t + 40^\circ).$$

Определить: активную мощность цепи P .

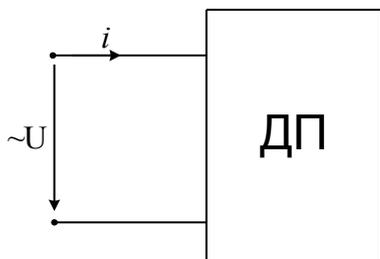
Задача 8.



Дано: $U = 100 + 50 \sin(\omega t + 50^\circ) + 25 \sin 3 \omega t$,
 $r = 20 \text{ Ом}$, $C = 100 \text{ мкФ}$, $L = 10 \text{ мГн}$,
 $\omega = 1000 \text{ 1/с}$, на 1^{ой} гармонике в цепи возникает резонанс то-
ков.

Определить: мгновенное значение тока i .

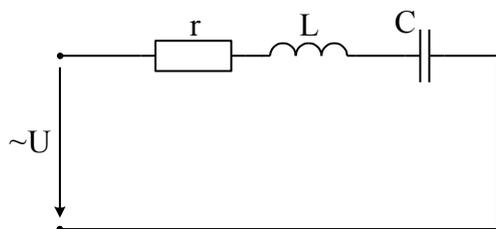
Задача 9.



Дано: для двухполюсника
 $U = 1 + 0,83 \sin(\omega_1 t + 60^\circ)$,
 $i = 0,1 + 1,3 \sin(\omega_1 t + 0,4 \sin 2 \omega_1 t)$.

Определить: активную и полную мощность цепи.

Задача 10.



Дано: $U = 400 + 282 \sin \omega t$,
 $X_L = X_C = 60 \text{ Ом}$ при угловой частоте ω ,
 $r = 40 \text{ Ом}$.

Определить: действующее значение тока и напряжение на
отдельных участках цепи.

Тема 3. Расчет переходных процессов классическим методом в цепях с одним и двумя накопителями энергии

На практическом занятии необходимо решить индивидуальное задание по пройденному лекционному материалу. Рекомендуемая литература и дополнительный теоретический материал представлены в рабочей программе дисциплины «Электротехника и промышленная электроника».

Электрическая схема и значения её параметров выбираются по номеру варианта задания. Номер варианта соответствует порядковому номеру студента в журнале.

Для студентов, номера которых от 1 до 10-го, выбирается схема, соответствующая номеру варианта (рис. 1 – 10).

Для вариантов, больше 11-го, номер схемы (номер рисунка) соответствует второй цифре варианта. При этом варианты 10, 20 и т.д. используют схему №10 (рис. 10).

Параметры схемы (значение R , L , C) и реакция цепи, которую требуется определить, приведены в таблице и соответствуют номеру варианта.

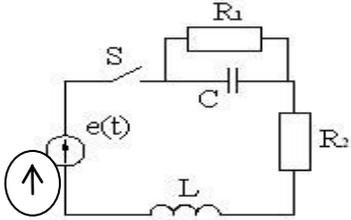
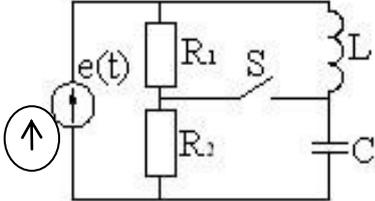
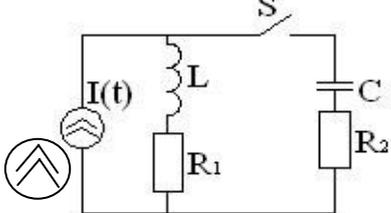
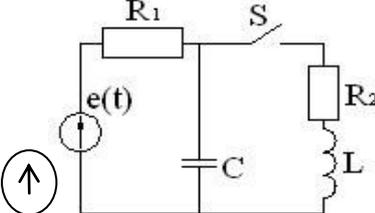
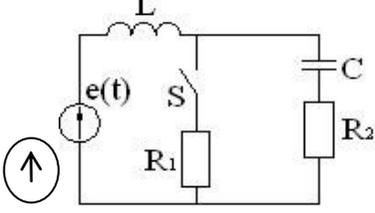
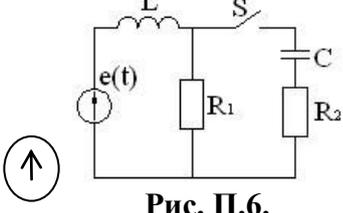
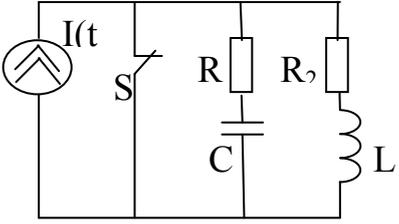
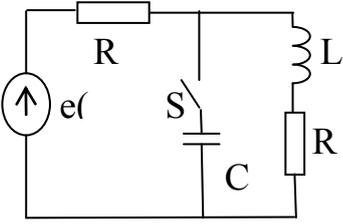
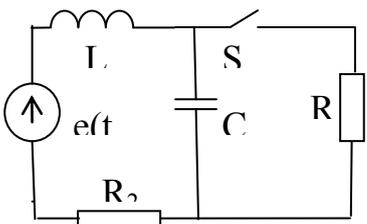
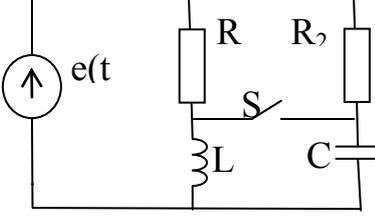
 <p>Рис. П.1.</p>	 <p>Рис. П.2.</p>
 <p>Рис. П.3.</p>	 <p>Рис. П.4.</p>
 <p>Рис. П.5.</p>	 <p>Рис. П.6.</p>
 <p>Рис. П.7.</p>	 <p>Рис. П.8.</p>
 <p>Рис. П.9.</p>	 <p>Рис. П.10.</p>

Таблица параметров цепи и искомой реакции

Номер варианта	R1 Ом	R2 Ом	L мГн	C мкФ	Искомая реакция цепи
1.	1	14	15	340	i_{R_2}
2.	15	2	14	360	i_L
3.	3	16	18	350	i_{R_1}
4.	17	4	18	370	u_C
5.	5	11	20	390	i_L
6.	12	13	22	380	i_{R_2}
7.	7	13	24	400	u_C
8.	20	8	28	420	i_L
9.	9	18	28	410	i_{R_2}
10.	19	10	30	430	i_L
11.	2	9	11	360	u_{R_2}
12.	1	4	13	340	u_C
13.	6	3	15	370	i_L
14.	5	8	17	350	i_{R_2}
15.	10	7	19	380	u_C
16.	8	3	21	390	i_L
17.	5	6	23	420	i_{R_1}
18.	4	7	25	400	u_C
19.	7	2	29	430	i_{R_1}
20.	9	10	27	410	u_C
21.	10	4	11	410	i_L
22.	9	6	12	430	i_{R_1}
23.	8	8	13	400	i_{R_2}
24.	7	10	14	420	i_L
25.	8	2	15	390	i_{R_2}
26.	5	1	16	380	u_C
27.	4	3	17	350	i_L
28.	3	5	18	370	i_{R_1}
29.	2	7	19	340	u_C
30.	1	9	20	360	i_{R_2}

1) Определить реакцию электрической цепи, если воздействие, задаваемое электродвижущей силой источника напряжения или током источника тока, постоянно и равно:

$$e(t) = 100 \text{ В}; \quad I(t) = 1 \text{ А.}$$

Расчёт выполнить классическим методом.

- 2) Определить эту же реакцию при заданном воздействии операторным методом.
 3) Построить зависимость искомой реакции от времени на промежутке времени $t = (4 - 5)$

τ.

Если корни характеристического уравнения p_1 и p_2 действительные и различные, то

$$\tau = \frac{1}{|p_{\min}|}$$

где p_{\min} – наименьший из корней p_1 и p_2 .

В случае комплексно сопряжённых корней характеристического уравнения

$$p_{1,2} = \alpha + j\omega$$

$$\tau = \frac{1}{|\alpha|}$$

Тема 4. Расчет резистивных нелинейных и магнитных цепей

На практическом занятии необходимо решить групповое задание по пройденному лекционному материалу. Рекомендуемая литература и дополнительный теоретический материал представлены в рабочей программе дисциплины «Электротехника и промышленная электроника».

Задача 1. Прямая задача расчета мц

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

вариант	A, мм	B, мм	a, мм	b, мм	c, мм	d, мм	δ, мм	Прямая задача			Обратная задача		
								Вδ, Тл	I, А	материал	I, А	w, вит	материал
1	290	330	70	40	60	30	4	0,5	0,1	чугун	0,2	1300	чугун
2	300	250	60	50	40	30	9	1,9	0,5	электротехническая сталь	0,4	1900	литая сталь

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

Задача 2. (обратная задача расчета мц)

Цель. По заданной намагничивающей силе (МДС) необходимо определить магнитный поток в магнитопроводе.

Задачи. Определить суммарный магнитный поток цепи, если известны габариты и материал магнитопровода, ток и число витков электромагнита (см. таб. выше).

Тема 5. Опытное определение параметров трансформатора. Расчет и построение механических характеристик асинхронных двигателей и ДПТ

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 промышленная электроника».

Задача 1. По паспортным данным и результатам осмотра однофазного двухобмоточного трансформатора установлено, что число витков первичной обмотки $w_1=424$, а вторичной обмотки $w_2=244$, действительное сечение сердечника $S = 28,8 \text{ см}^2$; 10% приходится на изоляцию пластин, активное сопротивление первичной обмотки $R_1=1,2$ Ом, вторичной обмотки $R_2=1,4$ Ом, потери холостого хода составляют 1% от номинального значения потребляемой мощности, напряжение на первичной обмотке $U_2=220\text{В}$, активный ток обмоток $I_1=2,95$ А, $I_2=4,85$ А, ток холостого хода 5% от $I_{1 \text{ ном}}$.

Определить амплитудное значение магнитной индукции, ЭДС, вторичной обмотки, электрические и магнитные потери, номинальный КПД.

Задача 2. Первичную обмотку однофазного трансформатора, потребляющего мощность $S = 12$ Кв А, подключили к сети постоянного тока напряжением $U = 2$ В. При этом ток в обмотке $I = 20$ А, затем ее подключили к сети переменного тока с частотой 50 Гц и напряжением $U = 220$ В, амперметр показал $I_x = 5$ А, ваттметр – $P_x = 75$ Вт, а вольтметр вторичной обмотки – $U_2 = 36,6$ В.

Определить активное, индуктивное и сопротивления постоянному току первичной обмотки, потери и КПД трансформатора, если электрические потери первичной обмотки равны электрическим потерям вторичной обмотки, а $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$.

Задача 3. Однофазный двухобмоточный трансформатор испытали в режиме холостого хода и короткого замыкания. При опытах получили следующие данные: номинальное напряжение первичной обмотки $U_1 = 10000$ В; ток холостого хода $I_x = 0,25$ А; потери холостого хода $P_x = 125$ Вт; напряжение на вторичной обмотке $U_2 = 380$ В; номинальное напряжение короткого замыкания $U_k = 500$ В; номинальный активный ток первичной обмотки $I_{\text{ном}} = I_{1к} = 2,5$ А; номинальный ток вторичной обмотки $I_{2\text{ном}} = I_{2к} = 79,4$ А

Потери короткого замыкания $P_k = 600$ Вт.

В опыте короткого замыкания указаны суммарные электрические потери двух обмоток, значение которых одинаковы. Определить коэффициент мощности при холостом ходе и опыте короткого замыкания, полное, активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки, номинальный КПД.

Задача 4. Однофазный трансформатор имеет следующие данные: номинальная мощность $S_{\text{ном}} = 5000$ кВ * А; потери холостого хода $P_x = 1400$ Вт; потери короткого замыкания при номинальной мощности $P_k = 4500$ Вт; ток холостого хода $I_x = 4\%$ от номинального значения тока первичной обмотки. Напряжение первичной обмотки $U_1 = 35$ кВ, напряжение вторичной обмотки $U_2 = 400$ В. Определить полное сопротивление первичной обмотки, коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора, коэффициент трансформации, КПД трансформатора при номинальной нагрузке, при нагрузке 0,5; 0,75; 1,25 и коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$. При какой нагрузке КПД трансформатора будет максимальным и чему равно его значение?

Задача 5. Однофазный автотрансформатор с первичным напряжением $U_1 = 220$ В, вторичным напряжением $U_2 = 127$ В имеет в первичной обмотке $w_1 = 125$ витка и при полной активной нагрузке дает потребителю ток $I_2 = 9$ А. Определить число витков вторичной обмотки w_2 , пренебрегая током холостого хода. Определить ток в первичной обмотке I_1 , на общем участке обмотки I_2 , сечение проводников S_2 на общем участке обмотки, сечение проводников S_1 на участке, где проходит только первичный ток, мощность, передаваемую электрическим путем, коэффициент полезности автотрансформатора, если плотность тока $J = 2$ А / мм².

Задача 6. Трехфазный трансформатор имеет следующие данные: номинальная мощность $S_{\text{ном}} = 250$ кВ А, высшее напряжение $U_1 = 10\,000$ В, низшее напряжение $U_2 = 400$ В, активное сечение стержня и ярма $S_c = S_y = 200$ см², наибольшая магнитная индукция в стержне $B_c = 1,4$ Тл. Найти число витков в обмотке высшего и низшего напряжений с учетом регулирования на $\pm 5\%$.

Задача 7. Амперметр на 5 А, вольтметр на 100 В и ваттметр на 5 А и 100 В (со шкалой 500 делений) включены через измерительный трансформатор тока ТШЛ – 20 10000/5 и трансформатор напряжения НТМИ – 10000/100 для измерения тока, напряжения и мощности. Определить ток, напряжение, активную мощность и коэффициент мощности первичной цепи, если во вторичной цепи измерительных трансформаторов тока $I_2 = 3$ А, напряжение $U_2 = 99,7$ В, а показания ваттметра – 245 делений.

Задача 8. Вольтметр на 100 В со шкалой на 100 делений подсоединен к вторичной обмотке трансформатора напряжения НОСК -6 -66 ($U_1 = 6000$ В). Определить напряжение сети, если стрелка вольтметра остановилась на 95-м делении. Определить погрешности при измерении приборами первого класса точности.

Задача 9. Трехфазный трансформатор ТМ- 63 /10 имеет следующие данные: низшее напряжение $U_2 = 400$ В, потери при холостом ходе $P_x = 265$ Вт, потери при коротком замыкании $P_k =$

1280 Вт, напряжение короткого замыкания U_k составляет 5,5 % от номинального значения, ток холостого хода I_k составляет 2,8 % от номинального значения. Определить: а) фазные напряжения U_ϕ при группе соединения трансформатора 'Y/Δ; б) фазный n_ϕ и линейный n_Δ коэффициенты трансформации; в) номинальные токи первичных и вторичных обмоток; г) КПД при нагрузке 0,5 от номинального значения и $\cos\varphi = 0,8$; д) активное и реактивное сопротивление фазы при коротком замыкании; е) абсолютное значение напряжения короткого замыкания; ж) процентное изменение напряжения на вторичной цепи при $\cos\varphi = 0,8$, индуктивном и емкостном характере нагрузки и при номинальном токе; з) напряжение во вторичной цепи, соответствующее этим нагрузкам.

Задача 10. Вторичная обмотка трансформатора тока ТКЛ – 3 рассчитана на включение амперметра с пределом измерения 5 А. Класс точности приборов 0,5. Определить номинальный ток в первичной цепи и в амперметре, погрешности измерения приборов, если коэффициент трансформации $K_1 = 60$, а ток первичной цепи $I_1 = 225$ А.

Тема 6. ВАХ и параметры полупроводниковых приборов. Расчет параметров биполярных и полевых транзисторов

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 промышленная электроника».

Задача 1. Для диода Д312 при изменении прямого напряжения от 0,2 до 16 мА. Определить крутизну характеристики и дифференциальное сопротивление диода.

Задача 2. Определить изменение прямого тока для диода Д311А, если известно, что при изменении прямого напряжения $U_{пр}$ от 0,2 до 0,6 В крутизна характеристики $S = 150$ мСм.

Задача 3. При изменении прямого напряжения $U_{пр}$ от 0,2 до 0,4 В дифференциальное сопротивление диода $R_i = 36,4$ Ом. Определить изменение прямого тока диода.

Задача 4. Определить на сколько изменится прямое сопротивление опорного диода Д814А, если при токе стабилизации $I_{ст} = 5$ мА напряжение стабилизации изменяется от 7 до 8,5 В.

Задача 5. Какое напряжение можно стабилизировать на нагрузке при последовательном включении двух опорных диодов Д814Г, каждый из которых имеет напряжение стабилизации $U_{ст} = 10-12$ В?

Задача 6. Как можно включить в электрическую сеть два однотипных полупроводниковых диода, рассчитанных на максимально допустимый ток 100 мА каждый, если в цепи проходит ток $I = 150$ мА?

Задача 7. Для диодов КД103А наибольшее обратное напряжение $U_{обр} = 50$ В. Как можно включить такие диоды в цепь, в которой имеется напряжение $U = 80$ В?

Задача 8. В транзисторе КТ315А, включенном по схеме с общим эмиттером, ток базы изменился на 0,1 мА. Определить изменение тока эмиттера, если коэффициент передачи тока базы $h_{21Б} = 0,975$.

Задача 9. Для транзистора КТ312А статический коэффициент усиления тока базы $h_{21э} = 10$ 100. Определить, в каких пределах может изменяться коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21Б}$.

Задача 10. Для транзистора ГТ109А коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21Б} = 0,95$ 0,98. Определить в каких пределах может изменяться коэффициент усиления тока базы

Тема 7. Расчет усилителей на биполярных транзисторах.

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

Задача 1. На нижней граничной частоте двухкаскадного усилителя коэффициент частотных искажений второго каскада $M_{Н2} = 1,3$ при общем коэффициенте частотных искажений $M_H = 1,41$. На средних частотах усиление усилителя $K\theta = 200$ и усиление второго каскада $K\theta_2 = 10$. Опре-

делить напряжение на выходе первого каскада на нижней граничной частоте, если входное напряжение усилителя для всех частот одинаково: $U_{ВХ} = 50$ мВ.

Задача 2. По входной характеристике транзистора КТ312А в схеме с общим эмиттером определить входное сопротивление переменному току $R_{ВХ}$ при напряжении на коллекторе $U_K = 5$ В и напряжениях на базе $U_B = 0,3; 0,4; 0,5$ В. Построить зависимость $R_{ВХ} = f(U_B)$.

Задача 3. Для транзистора КТ339А, включенного по схеме с общей базой, при изменении тока эмиттера на 10 мА ток коллектора изменится на 9,7 мА. Определить коэффициент усиления по току для транзистора в схеме с общим эмиттером.

Задача 4. Для транзистора ГТ403А, включенного по схеме с общим эмиттером, ток коллектора изменяется на 140 мА, а ток эмиттера – на 145 мА. Определить коэффициент усиления тока базы.

Задача 5. Для транзистора КТ315А, включенного по схеме с общим эмиттером, входное сопротивление переменному току $R_{ВХ} = 160$ Ом. Определить входное сопротивление транзистора в схеме с общей базой, если коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21Б} = 0,96$.

Задача 6. В трехкаскадном усилителе первый каскад, имеющий коэффициент усиления $K_1 = 20$, охвачен цепью отрицательной обратной связи с коэффициентом $K_{ос 1} = 0,01$, а два других каскада охвачены общей цепью отрицательной связи при коэффициенте $K_{ос 2} = 0,02$. Определить коэффициент усиления усилителя, если коэффициенты усиления второго и третьего каскадов соответственно равны $K_2 = 20, K_3 = 15$.

Задача 7. Коэффициент усиления усилительного каскада $K = 50$. Переведите это значение в децибелы.

Задача 8. Известно, что усиление по напряжению трехкаскадного усилителя равно 1000. Определить усиление второго каскада, если усиление первого каскада составляет 25 дБ, а третьего – 10 дБ.

Задача 9. В трехкаскадном усилителе усиление каждого каскада составляет 30, 20 и 10 дБ. Определить общее усиление усилителя.

Задача 10. Коэффициенты усиления отдельных каскадов усилителя составляют 20, 30 и 10. Определить общий коэффициент усиления усилителя. Перевести полученный результат в децибелы.

Тема 8. Расчет однофазных выпрямителей и стабилизаторов.

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 промышленная электроника».

Задача 1. Построить схему двухполупериодного мостового выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром и определить коэффициент сглаживания при условии, что амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_{2m} = 250$ В, выпрямленный ток, проходящий через каждый диод, $I_0 = 50$ мА, частота сети $f_c = 400$ Гц, емкость конденсатора фильтра $C_\phi = 10$ мкФ.

Задача 2. Определить частоту пульсации первой гармоники напряжения на нагрузке двухполупериодного выпрямителя, если напряжение первичной обмотки трансформатора имеет частоту $f_c = 400$ Гц?

Задача 3. В схему однополупериодного выпрямителя включен емкостный сглаживающий фильтр. Определить емкость конденсатора фильтра, если сопротивление нагрузки $R_H = 820$ Ом, частота сети $f_c = 50$ Гц, коэффициент сглаживания $q = 10$.

Задача 4. В схему однополупериодного выпрямителя включен индуктивный сглаживающий фильтр. Определить индуктивность дросселя, если выпрямленный ток $I_0 = 75$ мА, выпрямленное напряжение $U_0 = 120$ В, частота сети $f_c = 400$ Гц, коэффициент сглаживания $q = 15$.

Задача 5. В схему двухполупериодного мостового выпрямителя включен индуктивно-емкостный сглаживающий фильтр. Определить элементы фильтра L_ϕ, C_ϕ , если выпрямленный ток, проходящий через каждый диод, $I_0 = 100$ мА, выпрямленное напряжение на нагрузке $U_0 = 150$ В, частота сети $f_c = 50$ Гц, коэффициент сглаживания $q = q_L q_C = 100$.

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.

Основной формой контроля проработки материала является опрос, проводимый при допуске к лабораторной работе, выполнение домашних заданий, РГР, тестирование.

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.

I. 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 приходиться 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.

II. 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.

III. 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. (Например: для напряжения масштаб $m_U=10$ В/см, для тока – $m_I=0,2$ А/см.) 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 промышленная электроника» практикуются следующие виды и формы самостоятельной работы студентов:

- выполнение лабораторных и практических работ;
- оформление отчётов;
- завершение практических работ;
- подготовка к устному опросу, к дискуссии
- подготовка к тестированию
- подготовка к письменной, контрольной работе, тестированию, контрольной точке;
- выполнение расчетно-графической работы (РГР).

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 промышленная электроника»:

- устный опрос;
- дискуссия;
- контрольная работа;
- контрольная точка;
- РГР;
- 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 работой

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 внеа-

удиторную 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, контрольные работы, 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, контрольные работы);

- подготовку и написание рефератов;

- выполнение контрольных работ;

- 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 контрольной работы 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 работ и рефератов 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 РГР

Одним из основных видов занятий является выполнение индивидуальных расчетно-графических работ (РГР). Работа над индивидуальным заданием помогает студентам проверить степень усвоения ими курса, вырабатывает у них навык самостоятельной работы. Все задания вы-

полняются студентом в часы, отведенные на самостоятельную работу, опираясь на изученный теоретический материал, изложенный в лекционном курсе, и проработанный на практических аудиторных занятиях. Все РГР выполняются согласно варианту, номер которого студенту сообщается на первом практическом занятии. РГР может состоять из одной или нескольких задач на разные темы.

К представленным на проверку индивидуальным расчетно-графическим работам предъявляются следующие требования:

- каждое задание оформляется как отдельная работа на листах форматом А4, скрепленных скоросшивателем или с помощью степлера, с титульным листом, выполняемым по образцу (см. приложение 1).

- для замечаний преподавателя должны быть оставлены поля шириной не менее 4 см.

- условие задания, схема электрической цепи и данные, соответствующие варианту, приводятся полностью, без сокращений, перед началом решения.

- схемы выполняются карандашом с помощью чертежных инструментов, элементы электрических схем вычерчиваются в соответствии с принятым ГОСТом и обозначениями (см. приложение 2), для этого можно воспользоваться линейкой-графаретом радиоинженера.

- решение следует начинать с основных положений, т.е. указать, какие физические законы или расчетные методы предполагается использовать при решении, привести математическую запись этих законов и методов, а также пояснить значения буквенных или цифровых обозначений которые будут использоваться при решении.

- в ходе решения не следует изменять однажды принятые направления токов и наименования узлов, сопротивлений, а также обозначения, заданные условием.

- каждому этапу решения нужно давать пояснения.

- расчет каждой определяемой величины следует выполнить сначала в общем виде, а затем в полученную формулу подставить числовые значения и привести окончательный результат с указанием единиц измерения.

- вычисления должны быть сделаны до третьей значащей цифры.

- промежуточные и конечные результаты расчетов должны быть ясно выделены из общего текста.

- решение не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований и арифметических расчетов.

- графический материал (графики и векторные диаграммы) должны быть выполнены на миллиметровой бумаге аккуратно, карандашом с помощью чертежных принадлежностей, в удобном масштабе (на 1 см координатной оси должно приходиться $1 \cdot 10^{\pm n}$ или $2 \cdot 10^{\pm n}$ единиц измерения физической величины, где n – целое число).

- весь график в целом (или векторная диаграмма) и отдельные кривые на нем (или вектора) должны иметь названия. градуировку осей следует выполнять, начиная с нуля, равномерно через один или два сантиметра. числовые значения координат точек, по которым строятся кривые, не приводить.

- индивидуальное задание должно быть выполнено и сдано на проверку не позднее срока установленного учебным планом.

- в случае затруднений при решении задания студент может обратиться к преподавателю за консультацией, которые проводятся согласно расписанию консультаций.

- РГР зачитывается, если решения не содержат ошибок принципиального характера и выполнены все перечисленные требования.

- не зачтенная РГР должна быть выполнена заново и представлена на повторную проверку вместе с первоначальной работой и замечаниями преподавателя. Исправления ошибок в ранее проверенном тексте не допускаются. Если неправильно выполнена не вся работа, а только часть ее (например, графическая часть), то переработанную и исправленную часть или графический материал следует скрепить с первоначальным текстом и поместить после него под заголовком «Исправление ошибок».

Методические рекомендации к выполнению контрольной работы

Контрольная работа является одной из составляющих учебной деятельности студента по овладению знаниями в области физиологии и биохимии растений. К ее выполнению необходимо приступить только после изучения тем дисциплины.

Целью контрольной работы является определения качества усвоения лекционного материала и части дисциплины, предназначенной для самостоятельного изучения.

Задачи, стоящие перед студентом при подготовке и написании контрольной работы:

1. закрепление полученных ранее теоретических знаний;
2. выработка навыков самостоятельной работы;
3. выяснение подготовленности студента к будущей практической работе.

Контрольные выполняются студентами в аудитории, под наблюдением преподавателя. Тема контрольной работы известна 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 контрольной работы предшествует инструктаж преподавателя.

Ключевым требованием при подготовке контрольной работы выступает творческий подход, умение обрабатывать и анализировать информацию, делать самостоятельные выводы, обосновывать целесообразность и эффективность предлагаемых рекомендаций и решений проблем, чётко и логично излагать свои мысли. Подготовку контрольной 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 промышленная электроника».

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 — 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. 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.
4. 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.:Вышш.шк.,2001.-416с. .
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. – 46 с. - http://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/3104.pdf
6. Бабищев, 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.