

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**и контрольные задания для студентов
специальностей 1-50 01 01 «Технология пряжи, тканей, трикотажа и
нетканых материалов», 1-50 01 02 «Конструирование и технология
швейных изделий», 1-50 02 01 «Конструирование и технология изделий из
кожи» заочной формы обучения**

ВИТЕБСК

2012

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор УО
«ВГТУ»

С.И. Малашенков

« ____ » _____ 2012 г.

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**и контрольные задания для студентов
специальностей 1-50 02 01 «Конструирование и технология изделий из
кожи», 1-50 01 02 «Конструирование и технология швейных изделий»
заочной формы обучения**

РЕКОМЕНДОВАНО
Редакционно-издательским
советом УО «ВГТУ»
« ____ » _____ 2012 г.
протокол № _____

ВИТЕБСК

2012

УДК 621.3(07)

Электротехника и основы промышленной электроники : методические указания и контрольные задания для студентов специальностей 1-50 01 01 «Технология пряжи, тканей, трикотажа и нетканых материалов», 1-50 01 02 «Конструирование и технология швейных изделий», 1-50 02 01 «Конструирование и технология изделий из кожи» заочной формы обучения.

Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО "ВГТУ", 2012.

Составители: доц. Ильющенко А.В.,
ст. преп. Куксевич В.Ф.,
ст. преп. Клименкова С.А.

Методические указания содержат теоретический материал, необходимый для анализа цепей постоянного, однофазного и трехфазного переменного токов, расчета параметров и характеристик двигателей переменного и постоянного токов, однофазных выпрямителей и усилителей на биполярных транзисторах. Предложенные для контрольных работ задачи соответствуют всем разделам дисциплины.

Одобрено кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» УО "ВГТУ" 26.09.2012 г., протокол № 2.

Рецензент: доц. Смелков Д.В.
Редактор: доц. Кузнецов А.А.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом
УО "ВГТУ" _____ г., протокол № ____.

Ответственный за выпуск: Букин Ю.А.

Учреждение образования "Витебский государственный технологический университет"

Подписано к печати _____ . Формат _____ . Уч.-изд. лист. _____ .
Печать ризографическая. Тираж _____ экз. Заказ № _____ . Цена _____ руб.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Лицензия № 02330/0494384 от 16 марта 2009 г.

210035, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

Содержание

<i>Введение</i>	4
<i>Контрольная работа № 1</i>	5
<i>Тема 1. Электрические цепи постоянного тока</i>	5
<i>Тема 2. Электрические цепи переменного синусоидального тока</i>	10
<i>Тема 3. Электрические цепи переменного трехфазного тока</i>	15
<i>Контрольная работа № 2</i>	19
<i>Тема 4. Асинхронные двигатели</i>	19
<i>Тема 5. Машины постоянного тока</i>	21
<i>Тема 6. Выпрямители переменного тока</i>	23
<i>Тема 7. Электронные усилители</i>	30
<i>Литература</i>	37

Введение

Данные методические указания предназначены для студентов заочной формы обучения специальностей «Технология швейных изделий» и «Технология изделий из кожи» по дисциплине «Электротехника и основы промышленной электроники».

Цель изучения дисциплины заключается в формировании у студентов знаний и умения анализа электрических цепей постоянного и переменного синусоидального токов, устройства и физических процессов, происходящих в различных электротехнических устройствах, физических основ работы полупроводниковых приборов, различных устройств промышленной электроники.

В результате изучения дисциплины студент должен знать:

- основные теоретические формулы, устанавливающие связь между электротехническими величинами;
- физические процессы, происходящие в электрических цепях постоянного, переменного однофазного и трехфазного синусоидальных токов;
- расчет цепей переменного синусоидального тока с применением комплексных чисел;
- физические основы работы различных электротехнических устройств и машин, их характеристики и параметры;
- физические основы работы полупроводниковых приборов, различных устройств полупроводниковой электроники: выпрямителей, усилителей, импульсных устройств.

Студент должен уметь:

- использовать различные методы расчета простых и сложных электрических цепей постоянного и переменного синусоидального токов;
- работать с электроизмерительными приборами;
- исследовать экспериментально характеристики и параметры различных электрических цепей и машин, электронных приборов и устройств;
- анализировать полученные результаты.

Изучение дисциплины базируется в основном на учебном материале следующих дисциплин: «Высшая математика» (линейная алгебра, дифференциальное и интегральное исчисление, теория функций комплексного переменного), «Физика» (разделы «Электричество» и «Магнетизм»), «Вычислительная техника».

Изучение дисциплины предусматривает применение ЭВМ при проведении лабораторных занятий и выполнении контрольных работ.

Материал дисциплины используется при изучении метрологии, автоматизации технологических процессов отрасли.

Учебная программа рассчитана на 20 аудиторных часов, всего 146 часов.

Основой изучения дисциплины является самостоятельная работа студента с рекомендуемой литературой. Основными этапами учебного процесса являются: прослушивание лекций по различным разделам дисциплины,

выполнение лабораторных и контрольных работ. Всего студент должен выполнить 2 контрольные работы, охватывающие различные разделы дисциплины.

Завершается изучение дисциплины сдачей экзамена.

Контрольная работа № 1

Тема 1. Электрические цепи постоянного тока

Введение. Элементы электрических цепей. Простейшая электрическая цепь постоянного тока. Закон Ома. Режимы работы электрической цепи. Схемы замещения источников энергии. Законы Кирхгофа. Соединения приемников, эквивалентные преобразования соединений резисторов звездой и треугольником. Анализ сложных электрических цепей, методы: непосредственного применения законов Кирхгофа, контурных токов, напряжения между двумя узлами, принцип наложения, эквивалентного генератора.

Методические указания

Анализ электрических цепей постоянного тока проводится с использованием законов Ома и Кирхгофа. Закон Ома

$$U = IR.$$

Законы Кирхгофа:

$$1. \sum_{k=3}^m I_k = 0,$$

то есть алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю. При этом токи, втекающие в узел, условно считаются положительными, токи, вытекающие из узла – отрицательными.

$$2. \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{k=1}^m I_k R_k + \sum_{j=1}^p U_j,$$

то есть алгебраическая сумма ЭДС, действующих в замкнутом контуре, равна алгебраической сумме падений напряжений на элементах данного контура плюс алгебраическая сумма напряжений между точками. При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа руководствуются следующим. Выбирается произвольно направление обхода контура. Если направление ЭДС совпадает с направлением обхода, то она берется со знаком (+), если не совпадает со знаком (-). Если направление тока в ветви совпадает с направлением обхода, то падение напряжения IR берется с (+), если не совпадает, то с (-).

Если цепь содержит m ветвей и n узлов, то для нахождения токов необходимо составить систему из m уравнений. По первому закону Кирхгофа

составляется $n - 1$ уравнение. Остальные $m - (n - 1)$ уравнения составляются по второму закону Кирхгофа.

Решив полученную систему уравнений, определяют искомые токи в ветвях. Если в результате решения какие-то токи получились отрицательными, это означает, что их истинное направление противоположно выбранному.

Проверкой правильности решения задачи является расчет баланса мощностей:

$$\sum_{i=1} E_i I_i = \sum_{k=1} I_k^2 R_k.$$

При этом необходимо учесть, что если направления ЭДС и тока совпадают, то произведение IE берется с (+), если не совпадает, то с (-).

Метод контурных токов позволяет уменьшать число уравнений системы. Цепь разделяется на независимые контуры. Считается, что в каждом контуре протекает какой-то свой контурный ток. Составляется система уравнений по II закону Кирхгофа, число которых равно числу контуров, и определяются контурные токи. Истинные токи ветвей равны алгебраической сумме контурных токов.

Метод напряжения между двух узлов используется, если цепь состоит из соединенных параллельно активных и пассивных ветвей. Рассчитав напряжение между узлами и используя II закон Кирхгофа для каждой ветви, определяют токи ветвей.

Задача 1

Для цепи, изображенной на рисунке 1:

- определить токи в ветвях методом контурных токов;
- проверить правильность решения, преобразовав треугольник сопротивлений R_4, R_5, R_6 в эквивалентную звезду;
- рассчитать баланс мощностей.

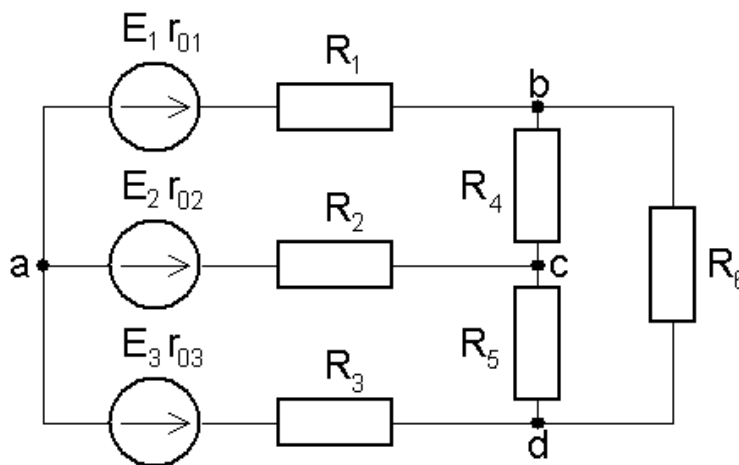


Рисунок 1 – Схема электрической цепи постоянного тока

Таблица 1 – Данные для выполнения задачи 1

Номер варианта	Параметры элементов схемы $R, \text{ Ом}; E, \text{ В}$											
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	r_{01}	r_{02}	r_{03}	E_1	E_2	E_3
1	4	8	6	12	16	20	0,2	0,4	-	8	14	6
2	10	6	14	8	10	12	0,5	0,5	-	-15	10	18
3	8	4	6	4	6	8	-	0,1	0,3	6	4	-7
4	7	15	10	15	20	20	0,3	-	0,5	12	-10	15
5	12	14	16	6	9	6	0,5	0,3	-	25	20	30
6	11	8	7	5	12	36	-	0,4	0,6	-14	12	20
7	15	7	9	13	14	9	0,8	-	1,0	16	8	-9
8	25	18	20	14	18	12	0,7	-	0,3	20	-15	24
9	20	16	12	6	6	6	-	0,4	0,8	13	18	14
10	30	35	25	18	10	16	0,2	0,6	-	-22	25	20
11	18	14	16	11	13	15	0,8	0,5	-	18	13	-17
12	17	21	8	22	18	14	0,5	-	0,2	8	-5	12
13	22	15	9	8	6	6	-	0,3	0,4	10	12	9
14	16	10	15	12	15	20	0,6	0,8	-	-16	14	17
15	8	6	7	9	12	15	0,3	0,7	-	15	11	-12
16	10	8	6	4	2	3	-	0,8	0,2	14	-6	18
17	13	15	17	9	6	12	0,3	-	0,5	5	9	10
18	6	8	4	4	5	8	0,4	0,2	-	-6	10	15
19	15	14	12	20	25	24	-	0,3	0,9	22	18	-16
20	27	22	35	15	20	25	0,8	-	0,3	27	-18	30
21	14	16	18	12	16	15	0,6	0,4	-	10	14	15
22	7	12	9	6	8	4	-	0,2	0,8	-9	13	8
23	12	10	15	14	14	16	0,9	-	0,4	17	12	-13
24	9	7	5	10	6	8	0,7	0,8	-	11	-25	14
25	3	5	4	2	4	6	0,3	-	0,2	8	9	6

Пример выполнения задания

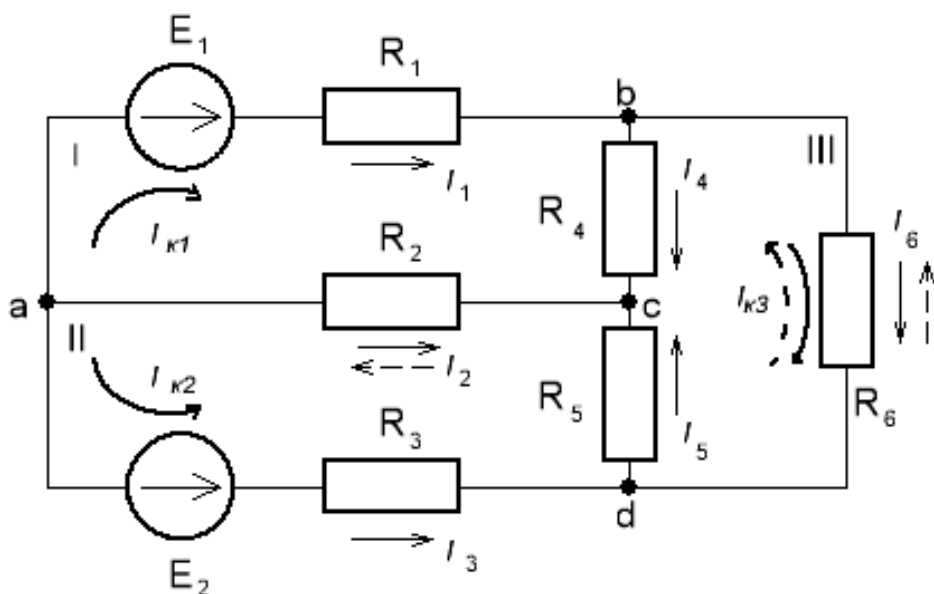


Рисунок 2 – Схема электрической цепи с указанием токов

$$E_1 = 10B; E_2 = 15B;$$

$$R_1 = 6 \text{ Oì }; R_2 = 18 \text{ Oì }; R_3 = 9 \text{ Oì }; R_4 = 6 \text{ Oì }; R_5 = 12 \text{ Oì }; R_6 = 6 \text{ Oì } .$$

$$R_3 = 9 \text{ Oì }; R_4 = 6 \text{ Oì }; R_5 = 12 \text{ Oì }; R_6 = 6 \text{ Oì } .$$

$$R_5 = 12 \text{ Oì }; R_6 = 6 \text{ Oì } .$$

Выбираем произвольное направление токов в независимых контурах.

Составляем уравнение по II закону Кирхгофа для трех независимых контуров (рис. 2)

$$\begin{cases} E_1 = I_{k1}(R_1 + R_2 + R_4) + I_{k2}R_2 - I_{k3}R_4; \\ E_2 = I_{k2}(R_2 + R_3 + R_5) + I_{k1}R_2 + I_{k3}R_5; \\ 0 = I_{k3}(R_4 + R_5 + R_6) - I_{k1}R_4 + I_{k2}R_5; \end{cases}$$

$$\begin{cases} 10 = 30I_{k1} + 18I_{k2} - 6I_{k3}; \\ 15 = 18I_{k1} + 39I_{k2} + 12I_{k3}; \\ 0 = -6I_{k1} + 12I_{k2} + 24I_{k3}. \end{cases}$$

Решая полученную систему уравнений, получаем

$$I_{k1} = 0,03A;$$

$$I_{k2} = 0,435A;$$

$$I_{k3} = -0,2102A.$$

Контурный ток I_{k3} получился отрицательным, поэтому его направление изменяем на противоположное (пунктирная стрелка).

Определим истинные токи ветвей

$$I_1 = I_{k1} = 0,03A;$$

$$I_2 = -I_{k1} - I_{k2} = -0,4654A;$$

$$I_3 = I_{k2} = 0,4354A;$$

$$I_4 = I_{k1} + I_{k3} = 0,2402A;$$

$$I_5 = I_{k2} - I_{k3} = 0,2252A;$$

$$I_6 = -I_{k3} = -0,2102A.$$

Изменяем направление тока I_2 , I_6 на противоположное.

Рассчитываем баланс мощностей

$$10 \cdot 0,03 + 15 \cdot 0,4354 = 0,03^2 \cdot 6 + 0,4654^2 \cdot 18 + 0,4354^2 \cdot 9 + 0,2402 \cdot 6 + 0,2252^2 \cdot 12 + 0,2102^2 \cdot 6;$$

$$6,881 = 6,878B\grave{o} .$$

Баланс мощностей сходится, следовательно, задача решена верно.
 Рассчитываем токи методом напряжения между двумя узлами.

Преобразуем треугольник резисторов R_4, R_5, R_6 в эквивалентную звезду (рис. 3).

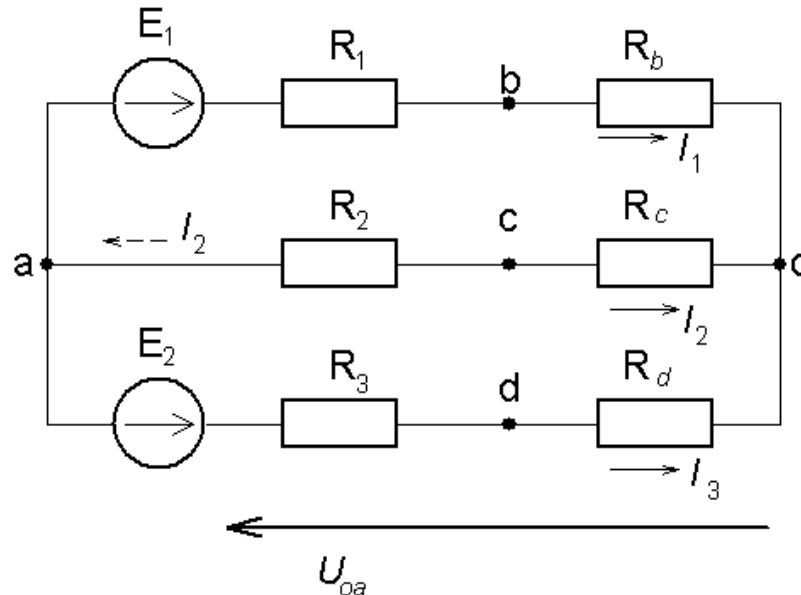


Рисунок 3 – Схема эквивалентной звезды

Сопротивления

$$R_b = \frac{R_4 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = 1,50 \text{ Ом} ;$$

$$R_c = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = 30 \text{ Ом} ;$$

$$R_d = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = 30 \text{ Ом} .$$

Проводимости ветвей

$$g_1 = \frac{1}{R_1 + R_b} = 0,133 \text{ С} ;$$

$$g_2 = \frac{1}{R_2 + R_c} = 0,0476 \text{ С} ;$$

$$g_3 = \frac{1}{R_3 + R_d} = 0,0833 \text{ С} .$$

Напряжение

$$U_{oa} = \frac{E_1 \cdot g_1 + E_2 \cdot g_3}{g_1 + g_2 + g_3} = 9,775 \text{ В} .$$

Токи

$$I_1 = (E_1 - U_{oa})g_1 = 0,0299 \text{ A};$$

$$I_2 = -U_{oa} \cdot g_2 = -0,4653 \text{ A};$$

$$I_3 = (E_2 - U_{oa})g_3 = 0,4352 \text{ A}.$$

Ток I_2 получился отрицательным, изменяем его направление на противоположное.

Принимая потенциал точки «O» $\varphi_o = 0$, потенциалы точек b , c и d будут:

$$\varphi_b = I_1 \cdot R_b = 0,04488 \text{ В};$$

$$\varphi_c = -I_2 \cdot R_c = -1,3959 \text{ В};$$

$$\varphi_d = I_3 \cdot R_d = 1,3056 \text{ В}.$$

Токи

$$I_4 = \frac{\varphi_b - \varphi_c}{R_4} = 0,24 \text{ А};$$

$$I_5 = \frac{\varphi_d - \varphi_c}{R_5} = 0,225 \text{ А};$$

$$I_6 = \frac{\varphi_d - \varphi_b}{R_6} = 0,21 \text{ А}.$$

Значения токов ветвей, полученные данным методом, совпадают со значениями, рассчитанными методом контурных токов.

Тема 2. Электрические цепи переменного синусоидального тока

Переменные токи. Период, частота и фаза переменного синусоидального тока. Действующие значения электрических величин. Векторные диаграммы. Цепи переменного тока, содержащие r , L и C . Неразветвленная цепь. Активная, реактивная и полная мощности, $\cos\varphi$. Резонанс напряжений. Разветвленные цепи. Резонанс токов. Векторные диаграммы цепей. Расчет цепей переменного тока методом комплексных чисел. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме.

Методические указания

Переменными являются токи, изменяющиеся во времени. Ток определен, если известна его зависимость от времени $i = F(t)$. Значение переменного тока в любой произвольно взятый момент времени называется мгновенным. Обозначение мгновенных значений электротехнических величин: ЭДС – e ; напряжение – u , ток – i , мощность – P . Для мгновенных значений справедливы законы Ома и Кирхгофа:

$$i = \frac{u}{r}; \sum i = 0; \sum e = \sum ir; p = ui.$$

Наибольшее распространение в практике получил переменный ток, изменяющийся по синусоидальному закону:

$$e = E_m \sin(\omega t \pm \psi),$$

где E_m – амплитуда (максимальное значение);

ω – угловая частота, $\omega = 2\pi f$;

f – частота сети;

ψ – начальная фаза.

Действующие значения синусоидальных величин

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Если в цепь последовательно включены r, L, C , то полное сопротивление этой цепи

$$Z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2},$$

где r – активное сопротивление;

x_L – индуктивное (реактивное) сопротивление;

x_C – емкостное (реактивное) сопротивление.

Тогда закон Ома для цепи переменного тока

$$I = \frac{U}{Z}.$$

При включении в цепь реактивных элементов между напряжениями и токами возникает сдвиг фаз, что иллюстрируется векторными диаграммами.

При анализе задач по переменному току очень широко используется представление электротехнических величин в комплексной форме, причем часто используется их выражение для $t = 0$ и учитываются только начальные фазы. Тогда

$$\dot{E} = E e^{j\psi_e}; \quad \dot{U} = U e^{j\psi_u}; \quad \dot{I} = I e^{j\psi_i},$$

где $E; U; I$ – действующие значения ЭДС, напряжения, тока;

$\psi_e; \psi_u; \psi_i$ – их начальные фазы.

Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z}; \quad \sum \dot{I}_i = 0; \quad \sum \dot{E} = \sum \dot{I}Z.$$

Мощности в цепи переменного тока:

- активная мощность $P = UI \cos\varphi$;

- реактивная мощность $Q = UI \sin\varphi$;

- полная мощность $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

В комплексной форме $S = \dot{U}\dot{I}^* = P + jQ$.

$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$;

$Q = \sum Q_L - \sum Q_C$.

Расчет цепей переменного тока проводится теми же методами, что и цепей постоянного тока.

Задача 2

Для цепи (рис. 4) выполнить следующее:

- начертить схему цепи в соответствии с условиями варианта;
- рассчитать токи ветвей и неразветвленной части и напряжения на отдельных элементах и участках;
- построить на комплексной плоскости векторные диаграммы токов и напряжений;
- определить активную, реактивную, полную мощности, рассчитать баланс мощностей, коэффициент мощности.

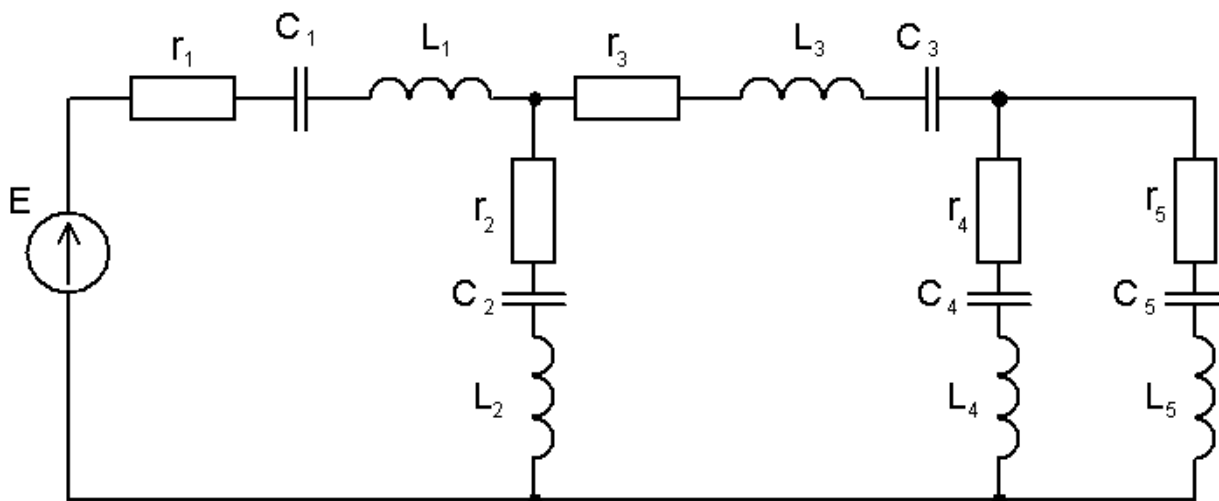


Рисунок 4 – Схема электрической цепи переменного тока

Таблица 2 – Данные для выполнения задачи 2

Вариант	E, B	$r, \text{ Ом}; C, \text{ мкФ}; L, \text{ мГн}$														
		r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1	200	6	-	18	8	12	-	637	100	200	-	15	-	-	-	32
2	180	8	16	-	4	-	637	-	200	-	-	-	-	16	16	-
3	150	12	4	24	-	16	-	100	-	-	318	-	-	32	115	-
4	175	-	14	36	18	8	200	-	-	159	-	-	95	95	-	16
5	100	20	-	-	-	24	-	-	159	637	-	32	16	-	-	64
6	125	10	8	22	16	14	159	159	318	-	637	-	95	-	48	-
7	140	15	10	36	15	18	-	318	-	637	-	16	-	32	-	95
8	150	16	12	16	20	15	-	-	159	-	-	-	32	64	-	32
9	220	18	24	-	10	-	100	159	637	-	300	-	-	-	16	-
10	210	-	16	12	-	10	-	-	100	318	-	95	48	-	-	16

Окончание таблицы 2

11	190	30	-	8	12	22	318	637	-	300	-	32	48	-	95	32
12	185	14	18	10	6	12	-	240	300	637	-	-	32	-	-	48
13	130	-	12	6	15	-	159	-	159	-	300	-	95	115	57	-
14	135	24	14	14	-	16	300	637		300	-	95	-	95	-	95
15	215	8	10	18	25	8	-	-	318	-	318	48	32	-	64	-
16	80	18	24	-	22	14	200	318	-	637	318	-	-	32	-	-
17	90	30	20	6	16	16	100	-	637	318	-	-	48	95	-	95
18	165	15	-	16	12	22	-	-	159	-	200	48	95	-	16	-
19	145	-	25	8	-	10	-	318	-	-	637	32	-	16	48	32
20	120	16	15	4	6	10	637	200	159	637	-	-	-	-	-	48
21	115	22	8	12	18	12	318	-	-	-	318	-	32	48	32	-
22	185	10	14	10	14	8	200	-	318	-	200	-	48	-	95	-
23	95	6	18	-	10	15	-	637	159	318	-	95	-	-	-	95
24	100	12	6	14	20	5	637	159	-	200	-	-	-	95	-	64
25	150	20	30	16	8	14	-	-	-	-	318	32	95	32	48	-

При расчете реактивных сопротивлений учесть, что частота переменного тока $f = 50$ Гц.

Пример выполнения задания

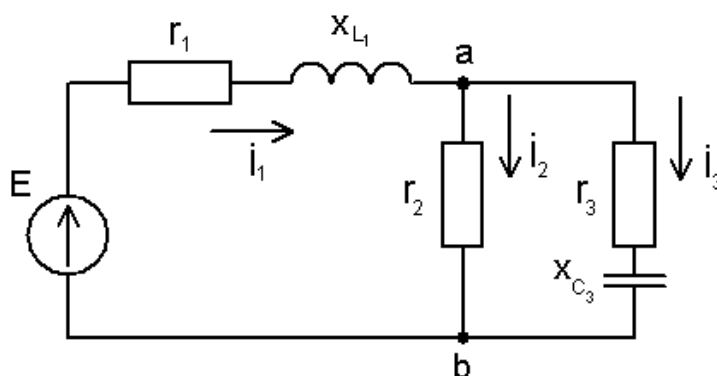


Рисунок 5 – Схема разветвленной цепи переменного тока

$$E = 200\text{В};$$

$$r_1 = 5\ \text{О}\dot{\text{и}};$$

$$r_2 = 10\ \text{О}\dot{\text{и}};$$

$$r_3 = 8\ \text{О}\dot{\text{и}};$$

$$x_{L_1} = 5\ \text{О}\dot{\text{и}};$$

$$x_{C_3} = 6\ \text{О}\dot{\text{и}}.$$

Выражение сопротивлений ветвей в комплексной форме

$$z_1 = r_1 + jx_{L_1} = 5 + j \cdot 5 = 7,07 \cdot e^{j \cdot 45^\circ} \text{ O}\hat{i} ;$$

$$z_2 = r_2 = 10 \text{ O}\hat{i} ;$$

$$z_3 = r_3 - jx_{C_3} = 8 - j \cdot 6 = 10 \cdot e^{-j \cdot 36,87^\circ} \text{ O}\hat{i} .$$

Сопротивление параллельного участка цепи

$$z_{ab} = \frac{z_2 \cdot z_3}{z_2 + z_3} = \frac{10 \cdot 10 \cdot e^{-j \cdot 36,87^\circ}}{10 + 8 - j \cdot 6} = \frac{100 \cdot e^{-j \cdot 36,87^\circ}}{18 - j \cdot 6} = \frac{100 \cdot e^{-j \cdot 36,87^\circ}}{18,974 \cdot e^{-j \cdot 18,43^\circ}} =$$

$$= 5,27 \cdot e^{-j \cdot 18,44^\circ} = 5 - j \cdot 1,667 \text{ O}\hat{i} .$$

Полное сопротивление цепи

$$z = z_1 + z_{ab} = 5 + j \cdot 5 + 5 - j \cdot 1,667 = 10 + j \cdot 3,333 = 10,54 e^{j \cdot 18,42^\circ} \text{ O}\hat{i} .$$

Ток неразветвленной части цепи

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{z} = \frac{200}{10,54 \cdot e^{j \cdot 18,42^\circ}} = 18,975 \cdot e^{-j \cdot 18,42^\circ} \text{ A}.$$

Напряжение

$$\dot{U}_{ab} = \dot{I}_1 \cdot z_{ab} = 18,975 \cdot e^{-j \cdot 18,42^\circ} \cdot 5,27 \cdot e^{-j \cdot 18,44^\circ} = 100 \cdot e^{-j \cdot 36,86^\circ} \text{ B}.$$

Токи

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{ab}}{r_2} = \frac{100 \cdot e^{-j \cdot 36,86^\circ}}{10} = 10 \cdot e^{-j \cdot 36,86^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{ab}}{z_3} = \frac{100 \cdot e^{-j \cdot 36,86^\circ}}{10 \cdot e^{-j \cdot 36,87^\circ}} = 10 \text{ A}.$$

Полная мощность, потребляемая цепью

$$S = \dot{E} \cdot \dot{I}_1^* = 200 \cdot 18,975 \cdot e^{j \cdot 18,42^\circ} = 3795 \cdot e^{j \cdot 18,42^\circ} = 3600,6 + j \cdot 1199 \text{ ВА};$$

$$P = 3600,6 \text{ Вт};$$

$$Q = 1199 \text{ В}\hat{A}\hat{д}.$$

Баланс мощностей

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 + I_3^2 r_3 = 18,975^2 \cdot 5 + 10^2 \cdot 10 +$$

$$10^2 \cdot 8 = 3600 \text{ Вт};$$

$$Q = Q_1 - Q_3 = I_1^2 x_{L_1} - I_3^2 x_{C_3} = 18,975^2 \cdot 5 - 10^2 \cdot 6 = 1200 \text{ В}\hat{A}\hat{д}.$$

Баланс мощностей выполняется, следовательно, задача решена верно.

Для построения векторной диаграммы определяем напряжение

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot z_1 = 18,975 \cdot e^{-j \cdot 18,42^\circ} \cdot 7,07 \cdot e^{j \cdot 45^\circ} = 134,15 \cdot e^{j \cdot 26,58^\circ} \text{ B}.$$

Строим векторную диаграмму

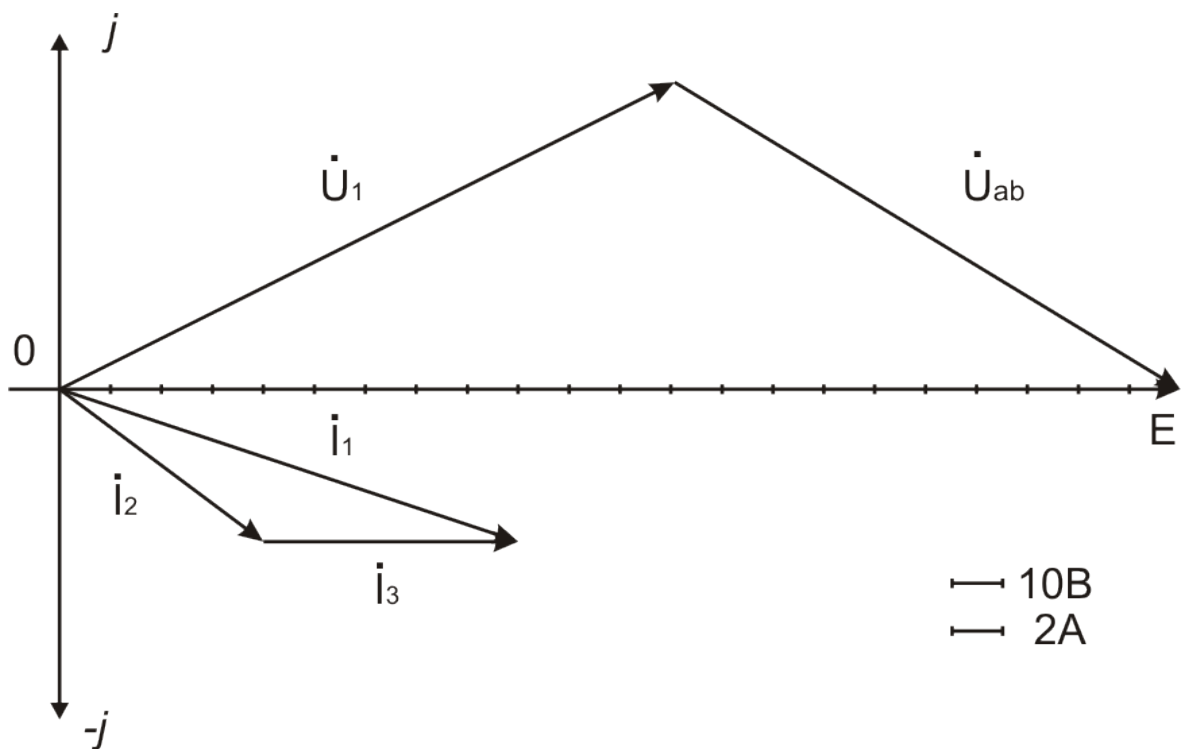


Рисунок 6 – Векторная диаграмма

Тема 3. Электрические цепи переменного трехфазного тока

Получение трехфазного тока. Основные определения, способы соединений обмоток генератора и нагрузок. Соединение звездой. Фазные и линейные напряжения и токи. Четырехпроводная система, симметричный и несимметричный режимы. Трехпроводная система. Соединение треугольником. Способы повышения $\cos\varphi$ в трехфазных цепях.

Методические указания

При соединении звездой в четырехпроводной системе $U_l = \sqrt{3} U_\phi$, $I_l = I_\phi$. Векторы фазных напряжений равны по величине, но отличаются по фазе на угол 120° , векторная диаграмма представляет собой правильную трехлучевую звезду.

$$\dot{U}_A = U_\phi; \dot{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}; \dot{U}_C = U_\phi e^{j120^\circ}.$$

Векторы линейных напряжений определяются на основании II закона Кирхгофа и также представляют правильную трехлучевую звезду.

Линейные (фазные) токи рассчитываются по закону Ома для каждой фазы:

$$\dot{I}_\phi = \frac{\dot{U}_\phi}{Z_\phi}.$$

При построении векторной диаграммы учитываются сдвиги по фазе

между соответствующими фазными напряжениями и токами. Ток нейтрального провода $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$, то есть векторной сумме линейных токов.

При обрыве нейтрального провода или если сопротивление его не равно 0, напряжение на фазах приемника изменяется, что можно рассчитать, используя метод напряжения между двумя узлами.

При соединении треугольником нагрузки включаются между линейными проводами и поэтому $U_{л} = U_{ф}$.

По закону Ома определяются фазные токи. Линейные токи определяются с использованием I закона Кирхгофа. Если нагрузка симметричная, то фазные токи будут одинаковы по величине и образуют правильную трехлучевую звезду. Отметим, что при соединении треугольником векторная сумма линейных токов всегда равна 0.

Мощности в трехфазных цепях рассчитываются в отдельности для каждой фазы, и общая мощность трехфазного приемника равна алгебраической сумме мощностей всех фаз.

При расчете трехфазных цепей необходимо учитывать, что фазные (линейные) напряжения генератора не зависят от нагрузки, равны по величине, и векторы их сдвинуты относительно друг друга на угол 120° . Напряжения на фазах нагрузки зависят от схемы соединения. В случае соединения звездой и наличия нейтрального провода фазные напряжения на нагрузках равны соответствующим фазным напряжениям генератора. При отсутствии нейтрального провода и несимметричной нагрузке фазные напряжения на нагрузке отличаются от фазных напряжений генератора и определяются по формулам

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_{oo'}, \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_{oo'}, \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_{oo'},\end{aligned}$$

где напряжение между узлами o и o' определяется выражением

$$\dot{U}_{oo'} = \frac{\dot{U}_A \cdot y_a + \dot{U}_B \cdot y_b + \dot{U}_C \cdot y_c}{y_a + y_b + y_c},$$

где y_a, y_b, y_c – полные проводимости фаз.

Фазные токи независимо от схемы соединения определяются

$$\dot{I}_\delta = \frac{\dot{U}_\delta}{Z_\delta}.$$

Линейные токи при соединении нагрузок треугольником определяются как векторные суммы с использованием первого закона Кирхгофа для узлов a, b, c .

Активная и реактивная мощности рассчитываются для каждой фазы в отдельности. Активная мощность трехфазного приемника равна

арифметической сумме фазных, а реактивная определяется алгебраической суммой фазных мощностей.

Задача 3

Для вариантов 1 – 25 для цепи на рисунке 7 выполнить следующее:

- начертить схему цепи в соответствии с условиями варианта;
- определить фазные и линейные токи;
- определить мощности отдельных фаз и мощность трехфазного приемника в целом;
- построить векторные диаграммы.

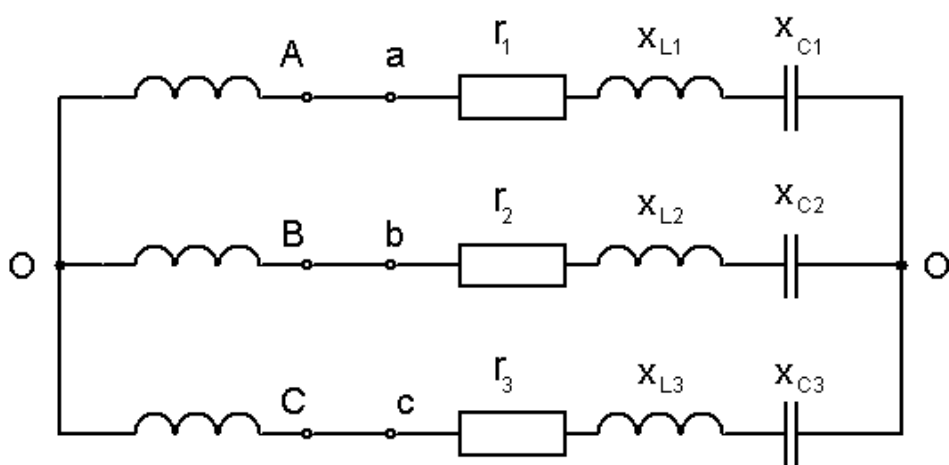


Рисунок 7 – Схема соединения звездой

Для вариантов 26 – 50 для цепи на рисунке 8 выполнить следующее:

- начертить схему цепи в соответствии с условиями варианта;
- определить фазные и линейные токи;
- определить мощности отдельных фаз и мощность трехфазного приемника в целом;
- построить векторные диаграммы.

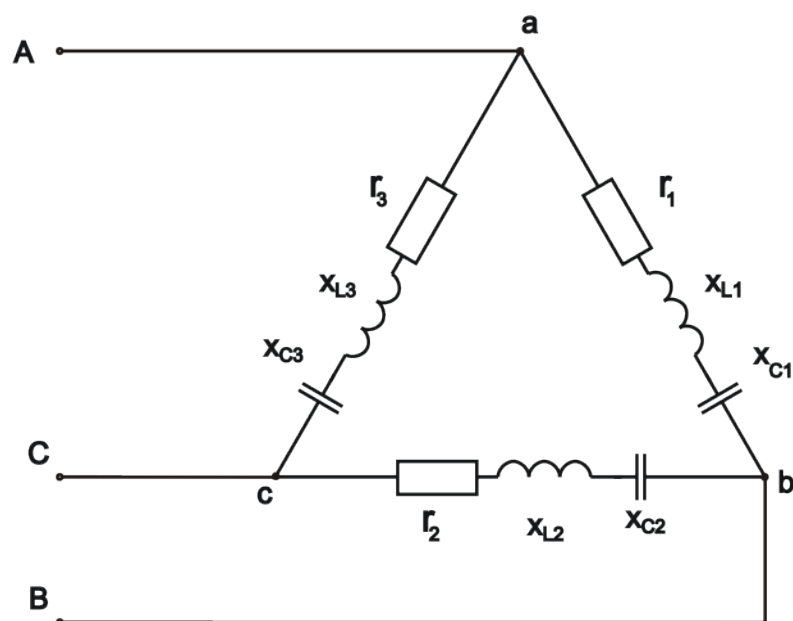


Рисунок 8 – Схема соединения треугольником

Таблица 3 – Данные для выполнения задачи 3

Вариант	U_n, B	$r, x_L, x_C [Om]$								
		r_1	r_2	r_3	x_{L1}	x_{L2}	x_{L3}	x_{C1}	x_{C2}	x_{C3}
1	380	20	18	25	40	45	-	30	35	40
2	220	15	22	18	-	30	24	20	-	-
3	127	8	12	10	-	12	-	-	-	15
4	127	14	8	12	12	-	16	-	10	-
5	380	22	18	16	11	-	-	-	15	12
6	220	30	20	25	-	14	22	15	-	-
7	220	18	16	14	-	-	12	15	18	-
8	127	10	-	14	8	-	-	-	15	18
9	190	-	10	8	18	18	-	-	-	12
10	240	24	14	-	-	6	18	18	-	-
11	200	16	15	22	12	-	-	-	10	22
12	380	12	24	18	-	-	24	16	14	-
13	350	30	22	26	25	16	-	-	-	14
14	340	28	32	-	-	24	-	22	-	35
15	260	14	28	40	12	-	18	-	30	-
16	250	22	30	35	-	20	-	16	-	25
17	150	8	12	5	6	-	-	-	16	5
18	180	10	14	15	-	12	14	5	-	-
19	230	18	-	12	14	22	-	-	-	14
20	220	13	18	16	-	-	12	17	14	-
21	127	7	11	14	9	8	-	-	-	10
22	170	17	8	10	-	6	8	15	-	-
23	240	24	20	18	16	16	-	-	-	24
24	350	32	38	40	-	-	16	24	26	-
25	340	40	35	45	35	30	-	-	-	35

Контрольная работа № 2

Тема 4. Асинхронные двигатели

Устройство асинхронного двигателя (АД). Вращающееся магнитное поле. Принцип работы АД. ЭДС статора, неподвижного и вращающегося ротора. Схема замещения нагруженного АД, механические характеристики. Устойчивая работа АД. Построение механической характеристики АД по каталожным данным. Рабочие характеристики АД. Пуск, регулирование частоты вращения и тормозные режимы АД.

Методические указания

При включении обмоток статора к сети переменного трехфазного тока в статоре возникает вращающееся с частотой n_0 магнитное поле:

$$n_0 = \frac{60 f_c}{p},$$

где p – число пар полюсов.

Магнитное поле наводит в обмотке ротора ЭДС, вызывающую токи, взаимодействие которых с магнитным полем обуславливает возникновение вращающего момента M , приводящего ротор во вращение. Скорость ротора будет увеличиваться до какой-то скорости n , при которой величина вращающего момента будет равна моменту сил сопротивления M_c , приложенных к валу ротора:

$$M = M_c.$$

Частоты вращения магнитного поля и ротора разные, что характеризуется скольжением:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}.$$

В обычном двигательном режиме $0 \leq s \leq 1$. При пуске $n = 0$ и $s = 1$, при идеальном холостом ходе $n = n_0$ и $s = 0$.

Вращающий момент, развиваемый двигателем, рассчитывается по формуле:

$$M = \frac{3pU_{1\phi}^2 r_2'}{\omega_0 s \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_k^2 \right]}.$$

Или по упрощенной формуле

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

где M_k и s_k соответственно, критический момент и критическое скольжение.

Определив по каталожным данным значения M_k и s_k , изменяя величину скольжения с интервалом $0,1$ в пределах от 0 до 1 , легко получить данные для построения механической характеристики $M(s)$ АД.

Задача 4

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором питается от сети с линейным напряжением 380 В. Величины, характеризующие номинальный режим двигателя: мощность на валу $P_{2н}$; частота вращения ротора $n_{2н}$; коэффициент мощности $\cos \varphi_n$; КПД η_n . Обмотки фаз статора соединены звездой. Кратность критического момента относительно номинального $k_m = M_k/M_n$. Определить: а) номинальный ток в фазе обмотки статора; б) число пар полюсов обмотки статора; в) номинальное скольжение; г) номинальный момент на валу ротора; д) критический момент; е) критическое скольжение, пользуясь формулой, приведенной в теоретической части; ж) значения моментов, соответствующие значениям скольжения $s_n; s_k; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$; з) пусковой момент при снижении напряжения в сети на 10 %. Построить механическую характеристику $n(M)$ электродвигателя.

Таблица 4 – Данные для выполнения задачи 4

Вариант	$U_{ном},$ В	$P_{ном},$ кВт	$S_{ном},$ %	$\eta_{ном}$	$\cos\varphi_{ном}$	p	$M_{max}/M_{ном}$	$M_{пуск}/M_{ном}$	$I_{пуск}/I_{ном}$
1	220	0,8	3,0	0,78	0,86	1	2,2	1,9	7,0
2	380	0,1	3,0	0,795	0,87	1	2,2	1,9	7,0
3	380	1,5	4,0	0,805	0,88	1	2,2	1,8	7,0
4	380	2,2	4,5	0,83	0,89	1	2,2	1,8	7,0
5	380	3,0	3,5	0,845	0,89	1	2,2	1,7	7,0
6	380	4,0	2,0	0,855	0,89	1	2,2	1,7	7,0
7	380	5,5	3,0	0,86	0,89	1	2,2	1,7	7,0
8	380	7,5	3,5	0,87	0,89	1	2,2	1,6	7,0
9	380	10	4,0	0,88	0,89	1	2,2	1,5	7,0
10	380	13	3,5	0,88	0,89	1	2,2	1,5	7,0
11	380	17	3,5	0,88	0,90	1	2,2	1,2	7,0
12	380	22	3,5	0,88	0,90	1	2,2	1,1	7,0
13	380	30	3,0	0,89	0,90	1	2,2	1,1	7,0
14	380	40	3,0	0,89	0,91	1	2,2	1,0	7,0
15	380	55	3,0	0,90	0,92	1	2,2	1,0	7,0
16	380	75	3,0	0,90	0,92	1	2,2	1,0	7,0
17	380	100	2,5	0,915	0,92	1	2,2	1,0	7,0
18	380	10	3,0	0,885	0,87	2	2,0	1,4	7,0

Окончание таблицы 4

19	380	13	3,0	0,885	0,89	2	2,0	1,3	7,0
20	380	17	3,0	0,89	0,89	2	2,0	1,3	7,0
21	380	22	3,0	0,90	0,90	2	2,0	1,2	7,0
22	380	30	3,0	0,91	0,91	2	2,0	1,2	7,0
23	380	40	3,0	0,92	0,92	2	2,0	1,1	7,0
24	380	55	3,0	0,92	0,92	2	2,0	1,1	7,0
25	380	75	3,0	0,92	0,92	2	2,0	1,1	7,0

Тема 5. Машины постоянного тока

Устройство машины постоянного тока. ЭДС генератора постоянного тока (ГПТ). Способы возбуждения машин постоянного тока. ГПТ с независимым, параллельным и смешанным возбуждением. Реакция якоря и коммутация в машинах ПТ. Двигатели постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением, их механические характеристики. Пуск, регулирование частоты вращения и тормозные режимы ДПТ.

Методические указания

Основными частями машин постоянного тока являются: неподвижный статор, вращающийся якорь и щеточно-коллекторное устройство. Функция статора – создать на поверхности якоря магнитное поле с требуемой индукцией B . Обмотка якоря состоит из катушек, уложенных в пазы и соединенных между собой, то есть представляет собой замкнутый контур. Щеточно-коллекторное устройство осуществляет контакт с внешней цепью. При вращении якоря с частотой n первичным двигателем в якоре наводится ЭДС E .

$$E = K_e n \Phi,$$

где K_e – электрическая постоянная машины.

Машина работает в качестве источника электрической энергии.

Если якорь подключить к внешнему источнику, то взаимодействие тока якоря с магнитным полем статора обеспечивает возникновение вращающегося момента, действующего на якорь и приводящего его во вращение.

Связь между частотой вращения якоря n и вращающим моментом M является механической характеристикой и выражается формулой

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{r_y}{K_e K_m \Phi^2} M,$$

где K_m – магнитная постоянная, r_y – сопротивление якоря.

Механическая характеристика представляет собой прямую, не проходящую через начало координат. Для ее построения достаточно двух точек:

1. Точка номинального режима M_n, n_n .
2. Точка идеального холостого хода $M = 0, n = n_0$.

Частоту идеального холостого хода можно определить, используя данные для номинального режима:

$$n_0 = n_n \frac{U_n}{U_n - I_{ян} r_{я}}$$

При пуске двигателя для уменьшения пускового тока в цепь якоря включается пусковой реостат, сопротивление которого рассчитывается, исходя из формулы:

$$I_{ян} = \frac{U}{r_{я} + r_n}$$

Обычно берут $I_{ян} = (1,5 \div 2,5) I_{ян}$.

Задача 5

Двигатель параллельного возбуждения, номинальное напряжение которого $U_{ном}$, при номинальной нагрузке потребляет ток $I_{ном}$, а при холостом ходе I_0 . Номинальная частота вращения $n_{ном}$, сопротивление обмотки якоря $R_{я}$, сопротивление цепи возбуждения $R_{в}$. Магнитные и механические потери принять постоянными при всех режимах работы двигателя. Определить: номинальную мощность двигателя $P_{ном}$ на валу, номинальный вращающий момент $M_{ном}$, номинальный КПД $\eta_{ном}$, значение пускового момента при токе $I_{пуск} = 2I_{ном}$ и соответствующее сопротивление пускового реостата, а также частоту вращения якоря при $I_{я.ном}$, но при введенном в цепь возбуждения добавочном сопротивлении, увеличивающем заданное в условии задачи значение $R_{в}$ на 30 %. Построить естественную механическую характеристику двигателя.

Таблица 5 – Данные для выполнения задачи 5

Номер варианта	$U_{ном}, В$	$I_{ном}, А$	$I_0, А$	$R_{я}, Ом$	$R_{в}, Ом$	$\eta_{ном}, об/мин$
1	220	15	1,6	1,2	180	1025
2	220	53	6,3	0,212	33	1225
3	115	100	9,5	0,11	50	1000
4	110	267	30,0	0,04	27,5	1100
5	220	16,3	1,78	1,16	75	1025
6	110	7,8	0,7	0,8	210	1240
7	220	19,9	2,0	1,5	150	960
8	110	35	3,2	0,6	60	1400
9	220	32	2,8	0,94	120	1600
10	220	34	3,0	0,45	110	1100
11	110	9,5	0,9	1,9	200	850
12	110	20	1,8	0,7	80	940
13	220	15	1,5	0,82	200	1350
14	110	8,2	0,8	1,4	220	1450
15	220	20,5	2,35	0,74	258	1025

16	220	40	4,2	0,52	190	1420
----	-----	----	-----	------	-----	------

Окончание таблицы 5

17	110	10,5	1,2	1,2	160	960
18	110	18,6	2,0	0,9	120	825
19	220	16	1,8	0,6	270	1600
20	220	32	3,5	0,62	200	1350
21	110	28	3,2	0,55	80	875
22	110	25	2,6	0,58	90	1110
23	220	60	6,8	0,40	130	935
24	220	50	5,7	0,40	150	1340
25	220	102	9,5	0,12	110	750

Тема 6. Выпрямители переменного тока

Полупроводники и их проводимость, p - n переход. Полупроводниковые диоды, их вольтамперные характеристики. Однофазные выпрямители.

Методические указания

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним электрическим p - n переходом и двумя выводами.

Выпрямительные полупроводниковые диоды предназначены для пропускания тока определенного направления. Их основу составляет электронно-дырочный переход (ЭДП), который получают методом сплавления или диффузии двух полупроводников p - и n -типа.

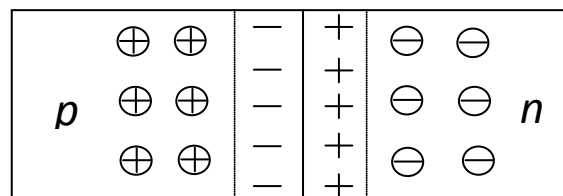


Рисунок 9 — Структура p - n перехода

Рассмотрим работу p - n перехода при отсутствии внешнего источника ЭДС (рис. 9). Пусть левая область имеет дырочную проводимость, а правая — электронную. Так как концентрация дырок в p -слое больше, чем в n -слое, то часть дырок перейдет из p -слоя в n -слой. Одновременно будет проходить диффузионный переход электронов из n -слоя в p -слой. При уходе дырок из p -слоя в нем создается объемный отрицательный заряд, а при уходе электронов из n -слоя в нем останется некомпенсированный объемный положительный заряд. При этом в p - n переходе возникает потенциальный барьер — разность потенциалов φ , препятствующая дальнейшему диффузионному переходу носителей.

Если внешний источник ЭДС E положительным выводом подключить к

p -слою, а отрицательный – к n -слою, то потенциал барьера снизится до величины $\varphi - E$ и диффузионный поток дырок из p -слоя в n -слой, а электронов из n -слоя в p -слой резко возрастет. Через p - n переход потечет так называемый прямой ток.

Если изменить подключение источника ЭДС на обратную полярность, то потенциальный барьер увеличивается до $\varphi + E$. В этом режиме через p - n переход проходят только неосновные носители заряда: дырки из n -слоя в p -слой и электроны из p -слоя в n -слой, т. е. через переход течет обратный ток. Величина обратного тока на несколько порядков меньше величины прямого тока, так как концентрация неосновных носителей гораздо меньше концентрации основных. Эта особенность p - n перехода используется при создании полупроводниковых диодов.

Основной характеристикой выпрямительного диода является его вольтамперная характеристика (ВАХ) (рис. 10).

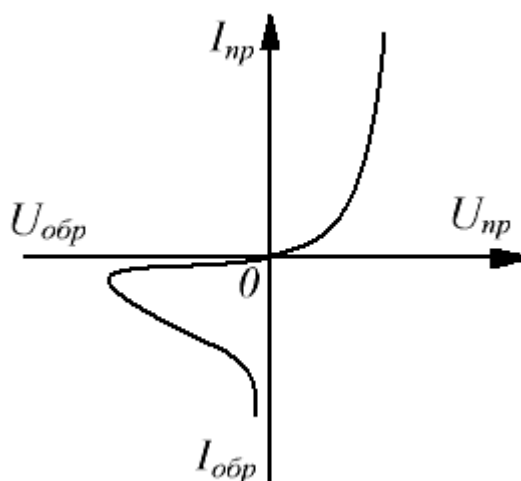


Рисунок 10 — Вольтамперная характеристика выпрямительного диода

Основными параметрами выпрямительных полупроводниковых диодов являются:

- постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ при заданном прямом токе $I_{пр}$;
- максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр.макс}$, при котором диод еще может нормально работать длительное время;
- постоянный обратный ток $I_{обр}$, протекающий через диод при обратном напряжении, равном $U_{обр.макс}$;
- средний выпрямленный ток $I_{пр.ср}$, который может длительно проходить через диод при допустимой температуре его нагрева;
- максимально допустимая мощность $P_{макс}$, рассеиваемая диодом, при которой обеспечивается заданная надежность диода.

Для преобразования переменного синусоидального тока в пульсирующий одного направления применяются выпрямители, использующие вентильные свойства полупроводниковых приборов. Рассмотрим работу однофазной

мостовой схемы выпрямления (рис. 11), содержащую 4 вентиля.

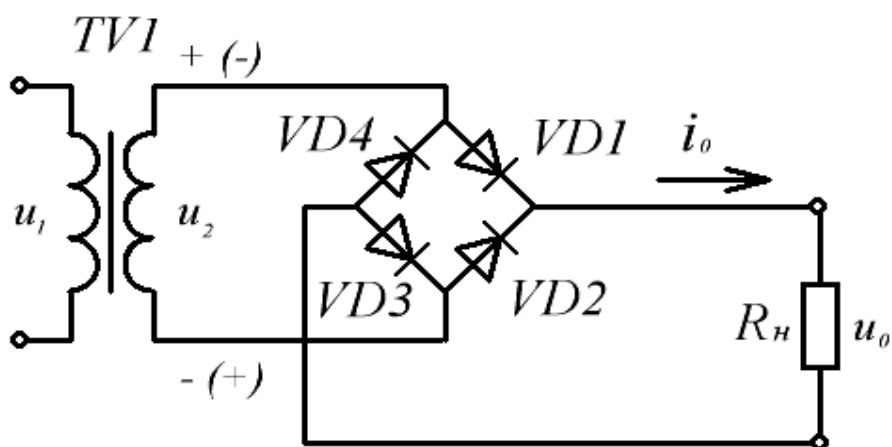


Рисунок 11 — Однофазная мостовая схема выпрямления

В одну диагональ моста включена вторичная обмотка трансформатора $TV1$, ко второй диагонали подключена нагрузка R_n . В любой момент времени в работе участвуют два вентиля. В течение первого полупериода (потенциалы вторичной обмотки на рис. 11 без скобок), ток проходит по цепи: $+u_2, VD1, R_n, VD3, -u_2$. В следующий полупериод полярность u_2 меняется (потенциалы вторичной обмотки на рис. 11 в скобках) и ток проходит по цепи: $(+)u_2, VD2, R_n, VD4, (-)u_2$. Таким образом, ток в нагрузке протекает в течение обоих полупериодов в одном направлении.

Обычно среднее значение напряжения U_0 на нагрузке является заданной величиной, определяемой требованиями нагрузки. Тогда действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_0 = 1,11 U_0.$$

Максимальное значение обратного напряжения, приложенного к вентилям в непроводящий отрезок времени

$$U_{обр.мах} = \frac{\pi}{2} U_0.$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{U_2}{R_n} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{U_0}{R_n} = 1,11 I_0.$$

Ток первичной обмотки трансформатора

$$I_1 = \frac{I_2}{n} = \frac{1,11}{n} I_0,$$

где $n = \frac{U_1}{U_2}$ — коэффициент трансформации.

Важным параметром выпрямителя является коэффициент пульсаций q . Как видно из диаграммы напряжений (рис. 12), напряжение в нагрузке

пульсирует, и его мгновенное значение изменяется в течение полупериода от нуля до максимального. Напряжение u_0 , помимо постоянной составляющей U_0 , содержит бесконечный ряд гармонических составляющих различной амплитуды и частоты.

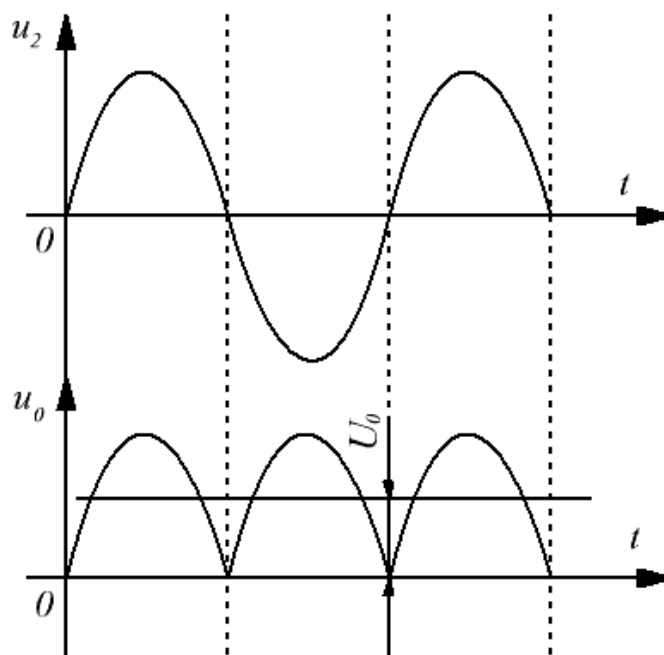


Рисунок 12 – Диаграммы напряжений однофазной мостовой схемы выпрямления

Разложение в ряд Фурье кривой u_0 позволяет определить амплитуду высших гармоник:

$$U_{\Gamma\nu m} = \frac{2U_0}{(\nu m)^2 - 1},$$

где $\nu = 1; 2; 3$ – номера гармоник; m – эквивалентное число фаз выпрямления (m можно определить как число пульсаций выпрямленного напряжения в нагрузке за период T напряжения сети). Коэффициент пульсаций q определяется отношением амплитуды любой гармоники к среднему значению напряжения U_0 . Из всех гармоник наибольшую амплитуду имеет основная (первая) гармоника. Тогда

$$q_1 = \frac{U_{0.Г}}{U_0} = \frac{2}{m^2 - 1}.$$

Так как выпрямленное напряжение пульсирует в нагрузке дважды за период сети (рис. 12), то $m = 2$ и $q_1 = 0,67 = 0,67\%$, т.е. амплитуда первой гармоники составляет 67 % от U_0 .

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения в нагрузке применяют сглаживающие фильтры. Они размещаются между звеном вентилей и нагрузкой.

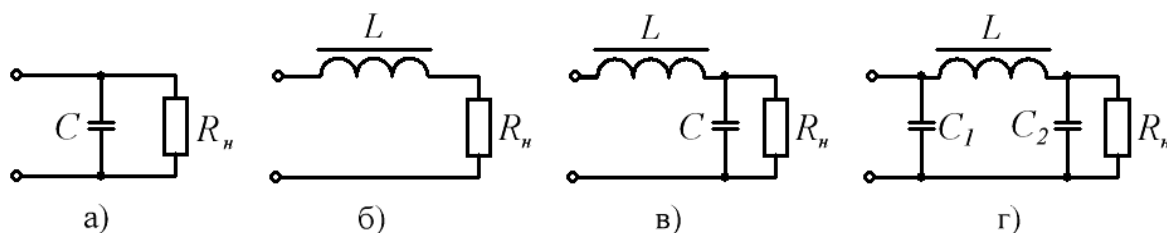


Рисунок 13 – Сглаживающие фильтры: а – емкостной; б – индуктивный; в – Г-образный LC-фильтр; г – П-образный фильтр

Отношение коэффициента пульсаций q_1 на выходе выпрямителя к требуемому коэффициенту пульсаций q_2 на нагрузке определяет степень сглаживания выпрямленного напряжения и называется коэффициентом сглаживания S фильтра:

$$S = \frac{q_1}{q_2}.$$

Работа емкостного фильтра (рис. 13 а) основана на периодическом переходном процессе заряда емкости от выпрямителя и разряда на нагрузку R_n . Величина коэффициента пульсаций на выходе емкостного фильтра рассчитывается по формуле

$$q = \frac{I}{2\pi f_c \tau_p}.$$

Индуктивный фильтр (рис. 13 б) представляет собой дроссель L , включенный последовательно с нагрузкой. При пульсирующем выходном напряжении вентильного звена вследствие действия ЭДС самоиндукции форма кривой тока в нагрузке окажется сглаженной. Коэффициент сглаживания индуктивного фильтра при выполнении условия $\omega_{0.Г} L \gg R_n$ рассчитывается по формуле

$$S = \frac{\omega_{0.Г} L}{R_n} = \frac{2\pi m f_c L}{R_n}.$$

Более высокий коэффициент сглаживания имеет Г-образный LC-фильтр (рис. 13 в). В нем индуктивность частично задерживает переменную составляющую напряжения. Так как сопротивление емкости переменной составляющей невелико, то падение напряжения на C от нее также мало. В результате совместного действия индуктивности и емкости пульсации напряжения на нагрузке значительно уменьшатся. Коэффициент сглаживания Г-образного фильтра рассчитывается по формуле

$$S = (2\pi m f_c)^2 LC - 1.$$

Для получения высоких коэффициентов сглаживания применяют П-образный фильтр (рис. 13 г), который можно рассматривать состоящим из

емкостного C_1 и Г-образного LC_2 фильтров. Параметры П - образного фильтра определяют из выражения

$$S = (2\pi f_c)^3 m^3 C_1 LC_2 R_H 10^{-12},$$

где C – в мкФ, L – в Гн.

Задача 6

По заданным в таблице 6 параметрам выполнить следующее: а) рассчитать параметры трансформатора, б) рассчитать параметры вентиля, в) рассчитать параметры фильтра, г) по полученным данным выбрать подходящий тип полупроводниковых диодов, конденсаторов.

Таблица 6 – Данные для выполнения задачи 6

№ варианта	U_0, B	I_0, A	U_1, B	$q_2, \%$
1	10	1	220	0,3
2	50	0,5	220	0,5
3	24	2	127	1
4	5	0,6	127	0,5
5	12	0,3	220	0,05
6	9	0,6	220	0,03
7	48	0,8	127	0,2
8	15	6	220	3
9	100	0,25	220	0,01
10	27	0,5	220	0,15
11	36	3	127	0,75
12	120	0,4	220	0,3
13	18	1,5	220	0,02
14	32	4	220	0,5
15	180	0,4	127	2
16	60	1,5	220	3
17	25	5	220	5
18	8	0,1	220	0,04
19	28	0,5	127	0,5
20	75	0,5	220	0,25
21	125	0,4	127	0,05
22	6	1,5	127	0,2
23	40	0,3	127	0,3
24	45	0,1	220	0,02
25	80	03	220	0,25

Пример выполнения задания

Рассчитать схему выпрямителя со сглаживающим фильтром, работающим на активную нагрузку. Данные для расчета: $U_0 = 20 B$; $I_0 = 5 A$; $U_f = 220 B$; $f_c = 50 Гц$; $U_{mn} = 15 mB$.

Схема выпрямления – однофазная мостовая (рис. 11). При такой схеме $f_n = 2f_c$.

Рассчитываем параметры трансформатора

$$U_2 = 1,11 \cdot U_0 = 1,11 \cdot 20 = 22,2 \text{ В},$$

$$I_2 = 1,11 \cdot I_0 = 1,11 \cdot 5 = 5,55 \text{ А}.$$

Находим коэффициент трансформации

$$K_{\delta D} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{22,2} = 9,9.$$

Определяем I_1

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{1,11}{K_{\delta D}} \Rightarrow I_1 = \frac{1,11 \cdot I_0}{K_{\delta D}} = \frac{1,11 \cdot 5}{9,9} = 0,56 \text{ А}.$$

Находим мощность трансформатора

$$P_{\delta D} = P_0 \cdot 1,23 = I_0 \cdot U_0 \cdot 1,23 = 123 \hat{\text{А}} \cdot \text{В}.$$

Выбираем нормализованный трансформатор ТПП-308.

Рассчитываем диоды. Находим величину среднего тока в прямом направлении

$$I_{i\delta \cdot \bar{n}\delta} = 0,5 \cdot I_0 = 2,5 \text{ А}.$$

Амплитуда тока в прямом направлении

$$I_{i\delta \cdot m} = I_0 \cdot \frac{\pi}{2} = 7,85 \text{ А}.$$

Амплитуда обратного напряжения

$$U_{mi\delta} = U_0 \cdot \frac{\pi}{2} = 31,4 \text{ В}.$$

Выбираем диоды (при рабочей температуре не более 50 °С) КД202А ($I_{нрmax} = 10 \text{ А}$, $U_{обрт} = 35 \text{ В}$, $I_{обр} = 0,8 \text{ А}$, $I_{нрср} = 5 \text{ А}$).

Рассчитываем параметры фильтра:

Необходимый коэффициент сглаживания фильтра

$$S = \frac{q_1}{q_2} = \frac{0,67}{0,00075} = 5266,$$

где $q_1 = 0,67$; $q_2 = \frac{15 \text{ мВ}}{20 \text{ В}} = 0,00075$.

Выбираем П-образный LC-фильтр (рис. 13 г). Для него

$$S = (4\pi \cdot f_c)^3 \cdot C_{1\delta} \cdot C_{2\delta} \cdot L_{1\delta}.$$

Сопротивление нагрузки

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0} = \frac{20}{5} = 4 \hat{\Omega}.$$

Примем $C_{1\delta} = C_{2\delta} = C_{\delta}$; $L_{1\delta} = L_{\delta}$;

$$C_{\delta}^2 \cdot L_{\delta} = \frac{S}{(4\pi \cdot f_c)^3 \cdot R_0} = \frac{5266}{(4\pi \cdot 50)^3 \cdot 4} \approx 0,525 \cdot 10^{-5} (\hat{O}^2 \tilde{A}i).$$

Примем $L_{\phi} = 0,5 \text{ Гн}$, тогда $C_{\phi} = 3250 \text{ мкФ}$. Принимаем $C_{\phi} = 3300 \text{ мкФ}$.

Тема 7. Электронные усилители

Транзисторы, их основные параметры и характеристики. Схемы включения транзисторов. Усилители электрических сигналов на транзисторах.

Методические указания

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор, состоящий из двух $p-n$ переходов и имеющий три вывода. Он состоит из трёх чередующихся областей полупроводников, имеющих проводимость p и n типов (рис. 14). В зависимости от их расположения различают транзисторы $p-n-p$ и $n-p-n$ типов.

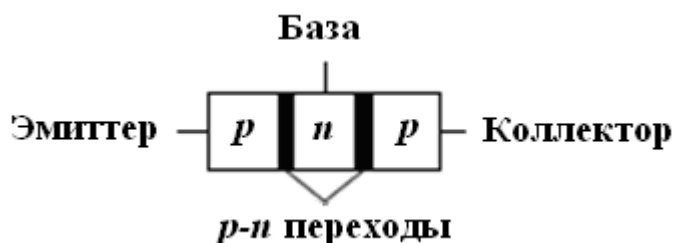


Рисунок 14 – Структура биполярного транзистора

Условные графические обозначения транзисторов обоих типов приведены на рис. 15.

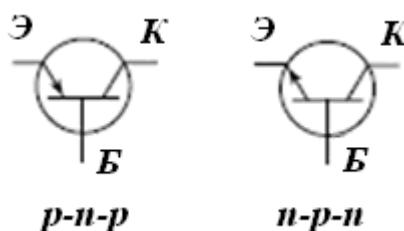


Рисунок 15 – Условные графические обозначения транзисторов

Выводы транзистора называются: Э — эмиттер, Б — база и К — коллектор. Направление стрелки указывает положение области с проводимостью n -типа.

Электронным усилителем называется устройство, преобразующее электрические сигналы небольшой мощности на входе в электрические сигналы большей мощности на выходе. Увеличение сигнала в усилителе происходит за счет преобразования энергии источника питания, осуществляемое с помощью активных управляемых элементов (УЭ), как правило, биполярных и полевых транзисторов.

Основными параметрами усилителей являются:

1. Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}.$$

2. Коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}.$$

3. Коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}.$$

В зависимости от того, какой из выводов биполярного транзистора при включении делают общим для входной и выходной цепей, различают схемы с общей базой (ОБ), общим коллектором (ОК) и общим эмиттером (ОЭ). При этом в схеме с ОБ усиливается только напряжение, в схеме с ОК – только ток, в схеме с ОЭ – и ток и напряжение (мощность).

Наибольшее распространение в схемах усилительных каскадов получила схема с ОЭ и термостабилизацией режима покоя (рис. 16).

Основными элементами схемы являются:

- источник питания E_k , осуществляющий подачу энергии в выходную цепь для усиления сигнала;
- транзистор VT – управляемый входным сигналом элемент, изменяющий свое сопротивление
- резистор R_k , выполняющий две функции: задающий ток покоя коллектора $I_{ко}$ и создающий динамический режим работы транзистора.

Остальные элементы схемы являются вспомогательными. Конденсаторы C_b и C_k являются разделительными. C_b используется для развязки входной цепи усилителя по постоянному току от источника входного сигнала. C_k пропускает в цепь нагрузки только переменную составляющую выходного сигнала и задерживает постоянную составляющую.

Резисторы R_1 и R_2 являются делителем напряжения и задают начальный режим работы базы: ток покоя базы $I_{бo}$ и напряжение покоя между базой и эмиттером $U_{бэo}$.

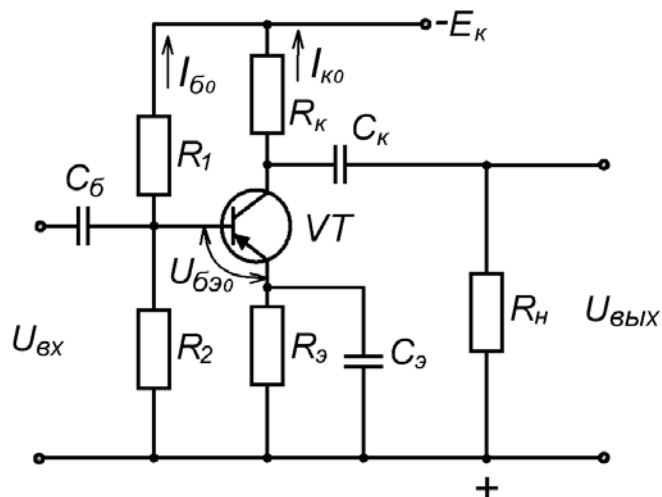


Рисунок 16 – Усилительный каскад на биполярном транзисторе с общим эмиттером

Рассмотрим принцип действия данного каскада.

При отсутствии входного сигнала во входной и в выходной цепях протекают, создаваемые дополнительным источником питания E_k , токи покоя усилителя $I_{б0}$ и $I_{к0}$. Они поддерживают транзистор в активном (проводящем) состоянии.

При подаче на вход переменного напряжения:

- в случае отрицательной полуволны, отрицательное напряжение на базе увеличивается, увеличивается и ток базы $i_{б}$; транзистор начинает работать в пропускном режиме и ток $i_{к}$ возрастает; выходное напряжение в это время (согласно II закону Кирхгофа) становится менее отрицательным

$$U_{\hat{e}} = -E_{\hat{e}} + i_{\hat{e}} R_{\hat{e}};$$

- в случае положительной полуволны, напряжение на базе становится менее отрицательным, ток базы $i_{б}$ уменьшается, транзистор прикрывается, уменьшается ток $i_{к}$; выходное напряжение в это время, определяемое тем же II законом Кирхгофа, становится более отрицательным.

В результате форма усиливаемого сигнала сохраняется неизменной, а амплитуда увеличивается, так как $u_{\hat{a}\hat{o}} < u_{\hat{a}\hat{i}\hat{o}}$, $i_{\hat{a}} < i_{\hat{e}}$.

Работа данного каскада зависит от температурного режима. При изменении температуры изменяются прежде всего $U_{бэ0}$ и коэффициент усиления тока транзистором β . Это приводит к нарушению режима работы усилительного каскада, в результате транзистор может перейти к работе на нелинейных участках характеристик, нарушится форма выходного сигнала.

Для термостабилизации точки покоя в цепь эмиттера включен резистор R_3 , создающий отрицательную обратную связь (ООС) по току. При изменении температуры транзистора изменяется напряжение между базой и эмиттером за счет изменения напряжения на R_3 . Изменение $U_{бэ}$ приводит к изменению тока

I_{δ} , а значит и тока коллектора I_K . Таким образом $I_{ко}$ будет поддерживаться на заданном уровне.

Емкость C_3 шунтирует R_3 по переменному току, исключая тем самым проявление ООС в каскаде по переменным составляющим. Отсутствие C_3 привело бы к уменьшению коэффициентов усиления каскада.

Чаще всего выходной сигнал усилителя снимается между коллектором и общей точкой усилителя. При этом фаза выходного сигнала противоположна фазе входного, поэтому такие усилители называются инвертирующими.

Задача 7

Рассчитать каскад транзисторного усилителя напряжения, принципиальная схема которого изображена на рис. 16, и определить h -параметры выбранного типа транзистора. Данные для расчета приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Данные для выполнения задачи 7

Номер варианта	$U_{вых\ max}, B$	$R_n, Ом$	$f_n, Гц$	E_{num}, B
1	3,0	600	100	12
2	2,0	400	90	16
3	1,0	250	120	9
4	5,0	450	200	27
5	8,0	350	150	12
6	2,4	600	180	3
7	3,4	550	140	12
8	1,6	280	160	6
9	4,0	590	170	17
10	2,2	440	110	9
11	3,4	600	150	12
12	1,5	200	60	3
13	1,7	250	70	6
14	1,8	300	80	9
15	2,0	350	90	12
16	2,1	400	120	15
17	2,3	450	140	18
18	2,5	480	150	24
19	2,7	500	160	27
20	2,8	520	170	24
21	3,0	540	180	20
22	3,1	550	200	18
23	3,2	580	220	15
24	3,5	560	230	12
25	3,6	480	250	9

Пример выполнения задания

Рассчитать каскад транзисторного усилителя напряжения для схемы с общим эмиттером. Данные для расчета: $U_{выхт} = 6,5 \text{ В}$; $R_n = 640 \text{ Ом}$; $f_n = 280 \text{ Гц}$; $E_{пит} = 18 \text{ В}$; $M_n = 1,25$.

Выбирают тип транзистора, руководствуясь следующими соображениями

а) $U_{кэ доп} \geq (1,1 \div 1,3)E_{пит} = 1,2 \cdot 18 = 21,6 \text{ В}$;

б) $I_{к доп} > 2I_{нм} = \frac{2U_{выхт}}{R_n}$, где $I_{нм}$ – наибольшая возможная амплитуда

тока нагрузки

$$I_{им} = \frac{U_{выхт}}{R_n} = \frac{6,5}{640} = 0,0102 \text{ А} = 10,2 \text{ мА}$$

Тогда $I_{к доп} > 2I_{нм} = 2 \cdot 0,0102 = 0,0204 \text{ А} = 20,4 \text{ мА}$.

Выбирают транзистор КТ315А, для которого $I_{к доп} = 100 \text{ мА}$, $U_{кэ доп} = 25 \text{ В}$, $\beta_{min} = 20$, $\beta_{max} = 90$, $I_{к мин доп} = 1 \text{ мкА}$, $P_{к max} = 150 \text{ мВт}$.

Для построения нагрузочной прямой находят (рабочую) точку покоя (0), для этого определяют

$$I_{к0} = 1,2 \cdot I_{нм} = 1,2 \cdot 10,2 = 12,24 \text{ мА},$$

$$U_{кэ0} = U_{выхт} + \Delta U_{кэ} = 6,5 + 1 = 7,5 \text{ В}.$$

Вторая точка нагрузочной прямой $U_{кэ max} = E_{пит} = 18 \text{ В}$. По полученным значениям строится нагрузочная прямая.

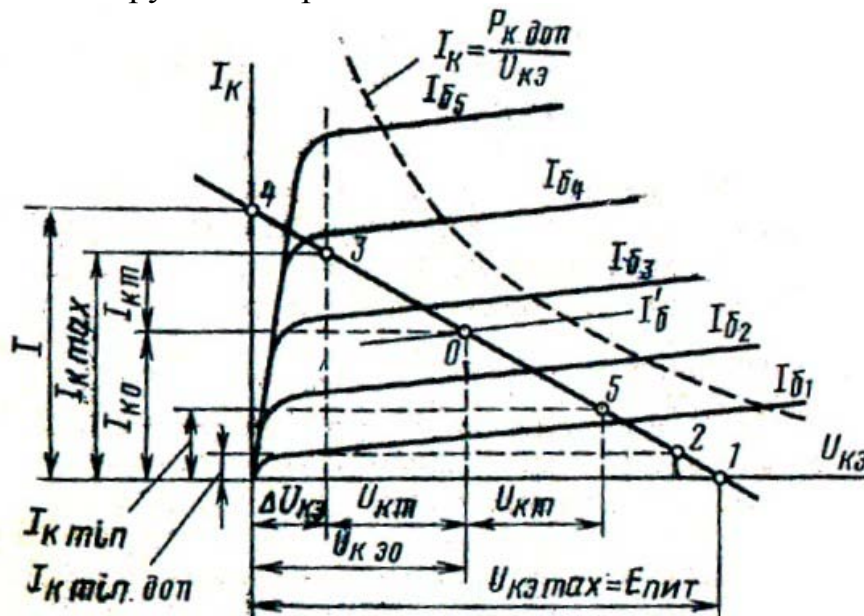


Рисунок 17 – Построение нагрузочной прямой на выходных статических характеристиках

По статическим выходным характеристикам (рис. 17) и нагрузочной прямой находят $I = 20,5 \text{ мА}$, откуда

$$R_{iá} = \frac{E_{ièò}}{I} = \frac{18}{20,5 \cdot 10^{-3}} = 878 \hat{\Omega}$$

Следовательно

$$R_e = \frac{R_{iá}}{1,2} = \frac{878}{1,2} = 731,7 \hat{\Omega}$$

$$R_3 = R_{oò} - R_k = 878 - 731,7 = 146,3 \text{ Ом.}$$

Определяют наибольшее амплитудное значение входного сигнала тока $I_{ex\ m}$ и напряжение $U_{ex\ m}$, необходимые для обеспечения заданного значения $U_{вых\ m}$. Задавшись наименьшим значением коэффициента усиления транзистора по току β_{min} , получают

$$I_{ex\ m} = I_{òm} = I_{км}/\beta_{min} = 7,5/20 = 0,375 \text{ мА.}$$

Аналогично рассчитывают значения

$$I_{ò\ max} = 0,987 \text{ мА, } I_{ò\ min} = 0,237 \text{ мА.}$$

По входной статической характеристике (рис. 18) и найденным значениям $I_{ò\ max}$ и $I_{ò\ min}$ находят значения

$$U_{òэ\ min} = 0,545 \text{ В, } U_{òэ\ max} = 0,665 \text{ В,}$$

$$2U_{ex\ m} = U_{òэ\ max} - U_{òэ\ min} = 0,665 - 0,545 = 0,12 \text{ В.}$$

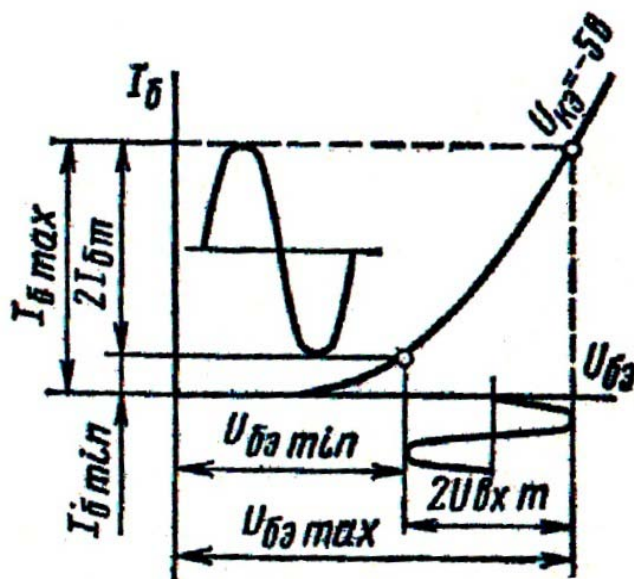


Рисунок 18 – Входная статическая характеристика транзистора

Находят входное сопротивление транзистора переменному току

$$R_{ex\sim} = 2U_{ex\ m}/2I_{òm} = \frac{0,12}{2 \cdot 0,375 \cdot 10^{-3}} = 160 \hat{\Omega}$$

Рассчитывают сопротивления делителя R_1 и R_2 . Для уменьшения шунтирующего действия делителя на входную цепь каскада по переменному току принимают $R_{1-2} \geq 8R_{ex\sim} = 8 \cdot 160 = 1280 \text{ Ом.}$

Отсюда, с учетом $R_{1-2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$, получают

$$R_1 = \frac{E_{i\hat{e}o} \cdot R_{1-2}}{R_y \cdot I_{\hat{e}i}} = \frac{18 \cdot 1280}{146,3 \cdot 12,24 \cdot 10^{-3}} = 12866,4 \hat{\text{I}} ,$$

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_{1-2}}{R_1 - R_{1-2}} = \frac{12866,4 \cdot 1280}{12866,4 - 1280} = 1421,4 \hat{\text{I}} .$$

Определяют, будет ли схема достаточно стабильна:

Коэффициент неустойчивости работы каскада

$$S = \frac{R_y \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2}{R_y \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2 / (1 + \beta_{\max})} =$$

$$= \frac{146,3 \cdot (12866,4 + 1421,4) + 12866,4 \cdot 1421,4}{146,3 \cdot (12866,4 + 1421,4) + 12866,4 \cdot 1421,4 / (1 + 90)} = 8,89 .$$

Для нормальной работы каскада коэффициент неустойчивости не должен превышать нескольких единиц. Следовательно, работа рассчитанного каскада стабильна.

Определяют емкость разделительного конденсатора C_p

$$C_{\delta} = \frac{1}{2\pi \cdot f_i \cdot R_{\hat{a}\hat{i}o} \sqrt{M_i^2 - 1}} = \frac{1}{2\pi \cdot f_i (R_{\hat{e}} + R_i) \cdot \sqrt{M_i^2 - 1}} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 280 \cdot (731,7 + 640) \cdot \sqrt{1,25^2 - 1}} = 0,74 \hat{\text{I}}\hat{\text{O}} .$$

Принимают $C_p = 0,75 \text{ мкФ}$.

Находят емкость конденсатора C_s

$$C_y \geq \frac{10}{2\pi \cdot f_i \cdot R_y} = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 280 \cdot 146,3} = 3,89 \cdot 10^{-5} \hat{\text{O}} = 38,9 \hat{\text{I}}\hat{\text{O}} .$$

Для полного устранения отрицательной обратной связи необходимо включить $C_s \geq 38,9 \text{ мкФ}$. Принимают $C_s = 50 \text{ мкФ}$.

Коэффициент усиления каскада по напряжению

$$K_U = \frac{U_{\hat{a}\hat{i}o\hat{m}}}{U_{\hat{a}\hat{o}m}} = \frac{6,5}{0,06} = 108,33 .$$

Определяют h -параметры выбранного типа транзистора по входным и выходным характеристикам транзистора

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{\hat{a}y}}{\Delta I_{\hat{a}}} = \frac{0,12}{0,75 \cdot 10^{-3}} = 160 (\hat{\text{I}}) , \quad h_{12} = \frac{\Delta U_{\hat{a}y}}{\Delta U_{\hat{e}y}} = \frac{0,12}{5} = 0,024 ,$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_{\hat{e}}}{\Delta I_{\hat{a}}} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 75 , \quad h_{22} = \frac{\Delta I_{\hat{e}}}{\Delta U_{\hat{e}y}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{13} = 0,115 \cdot 10^{-3} (\hat{\text{N}}\hat{\text{I}}) .$$

Литература

1. Электротехника с основами электроники / А. А. Федорченко, Ю. Г. Синдеев. – Москва : Дашков и К, 2007. – 416 с.
2. Электротехника / под ред. В. С. Пантюшина. – Москва : Высшая школа, 1976. – 463 с.
3. Электротехника : учебник / П. А. Бутырин. – Москва : Академия, 2007. – 272 с.
4. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – Москва : Высшая школа, 2003. – 542 с.
5. Электротехника / Ю. М. Борисов [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
6. Электротехника, электроника и импульсная техника / А. Г. Морозов. – Москва : Высшая школа, 1987. – 448 с.
7. Электротехника и электроника / Б. И. Петленко [и др.]. – Москва : Академия, 2007. – 320 с.
8. Основы промышленной электроники / под ред. В. Г. Герасимова. – Москва : Высшая школа, 1986. – 336 с.
9. Электротехника и основы электроники : методические указания и контрольные задания для студентов-заочников инженерно-технических специальностей высших учебных заведений / Б. П. Соколов, В. Б. Соколов. – Москва : Высшая школа, 1985. – 128 с.