

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего
Профессионального Образования
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»
(МИИТ)

Кафедра: «Электрификация
и электроснабжение»

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Задание на контрольную работу №1 с методическими указаниями
по дисциплине для студентов-бакалавров 3 курса
направления: «**Управление в технических системах**»

профиля: «**Системы и технические средства автоматизации и управления**»

Москва, 2013 г.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Выбор варианта задания

Задачи контрольных работ имеют 100 вариантов, отличающихся друг от друга схемами и числовыми значениями заданных величин. Исходные данные к задачам определяют по двум последним цифрам учебного шифра студента: по последней цифре выбирается номер схемы, а по предпоследней цифре – номер столбца в табл. 1 и 2. Например, шифру 1110-УТ6-0291 соответствует схема 1 и девятый вариант числовых значений.

Требования к оформлению контрольной работы

1. Каждую работу выполняют в отдельной тетради, на обложке которой указываются фамилия, имя, отчество, шифр и номер контрольной работы. Контрольная работа должна оформляться чернилами аккуратно, с оставлением полей шириной не менее 30 мм. Страницы работы следует пронумеровывать.

2. Студент обязан выполнять контрольную работу по своему варианту. Выбор варианта производится по двум последним цифрам учебного шифра студента.

3. Текст задания (условие задачи) должен быть переписан в контрольную работу полностью без пропусков и сокращений со всеми рисунками и числовыми значениями для своего варианта.

4. Расчетную часть каждой задачи следует сопровождать краткими и четкими пояснениями. Материал контрольной работы должен излагаться грамотно, записи и формулировки должны быть точными и ясными.

5. Выдерживают следующий порядок записи при вычислениях: сначала приводят формулу, заменяют символы их числовыми значениями, затем выполняют преобразования с числами, после этого дают результат вычислений и указывают единицу измерения. Вычисления должны быть сделаны с точностью до третьей значащей цифры. При решении задач необходимо пользоваться Международной системой единиц СИ.

6. Все графические построения должны быть выполнены аккуратно карандашом с помощью чертежного инструмента, в соответствии с утвержденным ГОСТом. По осям координат необходимо указывать размерность и масштаб.

7. В конце работы должны быть указаны: список литературы, которая использовалась при решении, дата и подпись студента.

8. Работы, выполненные не по своему варианту, а также написанные неразборчиво, не рецензируются.

9. Правильно выполненная контрольная работа возвращается к студенту с указанием «Допущен к зачету» и при необходимости с перечнем замечаний, которые студент должен исправить к зачету.

10. После получения отрецензированной работы студент должен исправить все ошибки и сделать требуемые дополнения. При большом количестве исправлений они делаются в конце работы.

ЗАДАЧА №1
РАСЧЁТ РАЗВЕТВЛЁННОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ

Для электрической цепи, вариант которой соответствует последней цифре учебного шифра студента и изображенной на рис. 1, выполнить следующее:

1. Записать систему уравнений для определения токов в ветвях путем непосредственного применения законов Кирхгофа. Решить эту систему уравнений не надо.
2. Определить токи во всех ветвях методом контурных токов.
3. Составить баланс мощностей.
4. Построить потенциальную диаграмму для любого замкнутого контура, включающего в себя обе ЭДС.

Значения ЭДС источников и сопротивлений резисторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры цепи	Предпоследняя цифра учебного шифра студента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$E_1, \text{В}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
$r_1, \text{Ом}$	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1
$E_2, \text{В}$	150	140	130	60	70	80	90	100	110	120
$r_2, \text{Ом}$	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2
$R_1, \text{Ом}$	6	7	8	9	10	11	10	9	8	7
$R_2, \text{Ом}$	7	8	9	10	9	8	7	8	7	6
$R_3, \text{Ом}$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$R_4, \text{Ом}$	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13
$R_5, \text{Ом}$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$R_6, \text{Ом}$	18	19	21	22	23	13	14	16	17	18

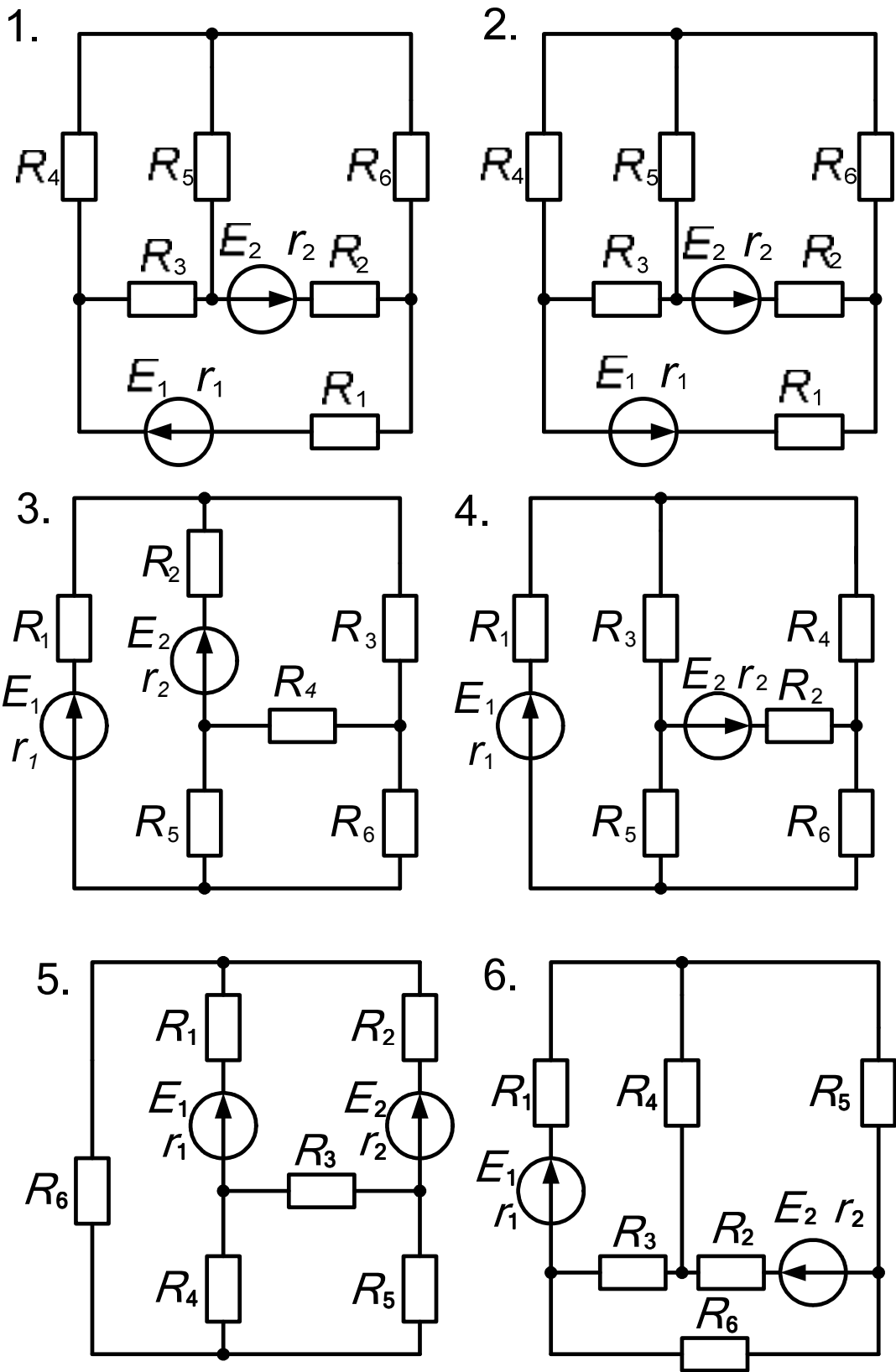


Рис. 1 (начало)

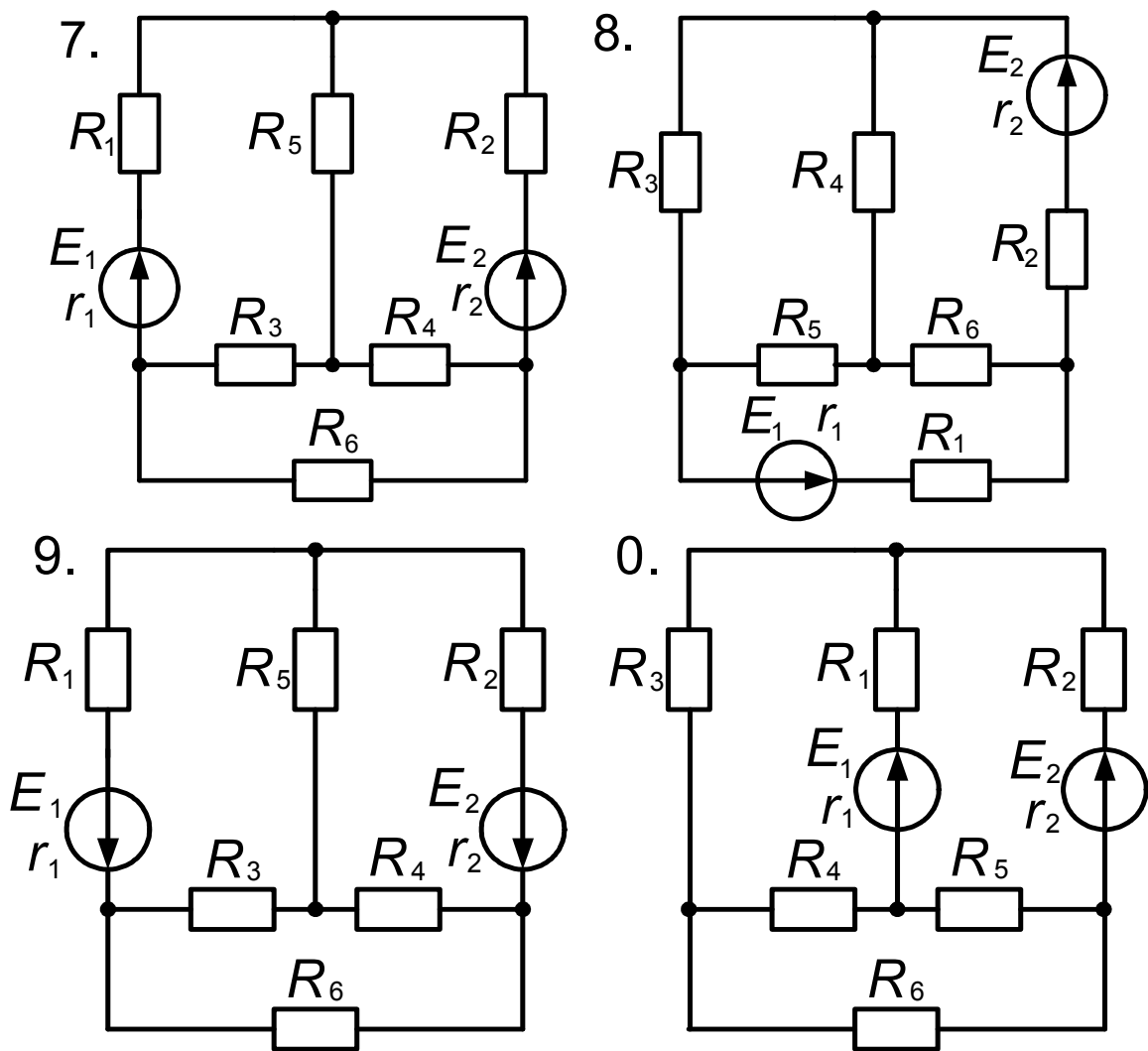


Рис. 1 (окончание)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАЧЕ 1

На рис. 1 представлены схемы сложных линейных электрических цепей постоянного тока, состоящие из нескольких ветвей и узлов. *Ветвью* электрической цепи называют такой её участок, который состоит только из последовательно включенных источников ЭДС и сопротивлений. Во всех элементах ветви в любой момент времени ток имеет одно и то же значение. Точки, в которых сходятся не менее трёх ветвей, называются *узлами*. Сложные цепи имеют несколько замкнутых *контуров*, состоящих из разных ветвей. В задаче 1 заданными являются величины и направления всех ЭДС, значения внутренних и внешних сопротивлений, а требуется определить токи в ветвях.

Расчёт токов с помощью законов Кирхгофа

Расчет линейной электрической цепи можно выполнить, составив систему уравнений по законам Кирхгофа.

Для этого сначала выбирают положительное направление тока в каждой ветви. Это можно делать произвольно, но лучше воспользоваться следующей методикой: если в ветви есть источник ЭДС, то направление тока в ней считают совпадающим с направлением ЭДС; в ветвях без ЭДС ток направляют произвольно, учитывая, по возможности, первый закон Кирхгофа:

алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю: $\sum I = 0$. Число независимых уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа на единицу меньше числа узлов в схеме.

Остальные уравнения составляют по второму закону Кирхгофа для независимых контуров: *в любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме напряжений на сопротивлениях, входящих в этот контур:*

$$\sum E = \sum IR.$$

Перед составлением уравнений по второму закону Кирхгофа необходимо произвольно выбрать направление обхода контура (по или против движения часовой стрелки), причем направление обхода разных контуров могут быть различными. Для упрощения дальнейших расчетов советуем выбирать направления обхода всех контуров одинаковыми по движению часовой стрелки.

Число независимых уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа равно числу независимых контуров. Общее число уравнений должно быть равно числу искомых неизвестных.

Решать полученную систему уравнений не следует, так как существуют более экономичные методы определения токов в ветвях.

Метод контурных токов

Одним из таких способов является метод контурных токов, согласно которому считают, что в каждом независимом контуре цепи течет свой ток, который обозначают I_{11} , I_{22} , I_{33} и т.д.

Для этих контурных токов записывают стандартную систему уравнений, которая для случая трех независимых контуров имеет вид:

$$R_{11} I_{11} + R_{12} I_{22} + R_{13} I_{33} = E_{11},$$

$$R_{21} I_{11} + R_{22} I_{22} + R_{23} I_{33} = E_{22},$$

$$R_{31} I_{11} + R_{32} I_{22} + R_{33} I_{33} = E_{33},$$

где R_{11} , R_{22} , R_{33} – собственные сопротивления первого, второго и третьего контуров, равные сумме всех сопротивлений, входящих в контур (всегда положительные);

$R_{12} = R_{21}$, $R_{13} = R_{31}$, $R_{23} = R_{32}$ – взаимные сопротивления первого и второго, первого и третьего, второго и третьего контуров, которые равны сопротивлению ветви, общей для этих контуров; взаимное сопротивление положительно, если контурные токи, протекающие через общую ветвь, имеют одинаковое направление и отрицательно при различных направлениях контурных токов (при выборе одинаковых направлений обхода всех контуров взаимные сопротивления всегда отрицательны);

E_{11} , E_{22} , E_{33} – контурные ЭДС, равные алгебраической сумме ЭДС, входящих в контур (если ЭДС совпадает с направлением обхода контура, то она берется со знаком "+", если не совпадает, то со знаком "-").

Решая полученную систему одним из известных способов, определяют контурные токи I_{11} , I_{22} и I_{33} , а затем по контурным токам находят действительные. В тех ветвях, где протекает только один контурный ток, действительный ток по величине совпадает с

контурным. В ветвях, где протекает несколько контурных токов, действительный ток равен алгебраической сумме контурных токов.

Составление баланса мощностей

Уравнение энергетического баланса при питании только от источников ЭДС записывается следующим образом

$$\sum EI = \sum I^2 R.$$

Если через источник ЭДС течёт ток, направление которого совпадает с направлением ЭДС, то источник ЭДС отдаёт энергию и его мощность, равная произведению EI , записывается в левую часть уравнения энергетического баланса с положительным знаком. Если же ток I направлен навстречу ЭДС E , то источник ЭДС работает как потребитель энергии, и его мощность EI записывается в левую часть уравнения энергетического баланса с отрицательным знаком.

Построение потенциальной диаграммы

Потенциальной диаграммой называют график изменения потенциалов точек цепи при перемещении вдоль замкнутого контура от сопротивлений участков цепи. Потенциал исходной точки контура, выбираемой произвольно, принимают за нуль.

Расчёт потенциалов ведут по направлению обхода контура, которое выбирается произвольно. При расчёте потенциалов точек контура следует иметь в виду следующее:

1. На участке с сопротивлением R при переходе от одной точки к другой потенциал изменяется на величину падения напряжения на сопротивлении этого участка $\Delta\varphi_R = \pm IR$. Потенциал увеличивается, если обход осуществляется против направления тока, и понижается, если обход осуществляется по направлению тока.

2. На участке с ЭДС E потенциал изменяется на величину ЭДС $\Delta\varphi_E = \pm E$. Потенциал повышается в том случае, когда переход от одной точки к другой осуществляется по направлению ЭДС (от минуса к плюсу), и понижается, когда переход осуществляется против направления ЭДС.

Для построения диаграммы необходимо отложить по оси абсцисс в определённом масштабе последовательно сопротивления отдельных участков контура по направлению обхода, начиная с исходной точки. По оси ординат в определённом масштабе откладываются значения потенциалов соответствующих точек контура. Ломаная линия, соединяющая концы ординат, равных потенциалам соответствующих точек, представляет собой потенциальную диаграмму.

ЗАДАЧА №2

РАСЧЁТ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Для электрической цепи, вариант которой соответствует последней цифре учебного шифра студента и изображенной на рис. 2, требуется:

1. Определить комплексным методом действующие значения токов во всех ветвях цепи.
2. Составить баланс активных, реактивных и полных мощностей и оценить погрешность расчета.
3. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Значение напряжения источника U и параметры резисторов, индуктивностей и емкостей для каждого варианта приведены в табл. 2. Частота питающего напряжения $f = 50$ Гц.

Таблица 2

Параметры цепи	Предпоследняя цифра учебного шифра студента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U , В	127	220	380	127	220	380	127	220	380	127
r_1 , Ом	15	20	25	30	35	40	45	40	35	30
L_1 , мГн	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60
C_1 , мкФ	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
r_2 , Ом	35	30	40	50	30	60	20	15	20	15
L_2 , мГн	100	150	200	100	50	80	75	60	90	110
C_2 , мкФ	100	80	60	75	55	65	70	80	50	90
r_3 , Ом	20	25	30	40	25	15	10	10	20	25
L_3 , мГн	80	100	60	50	100	120	60	70	50	40
C_3 , мкФ	60	90	50	80	100	90	75	60	85	60

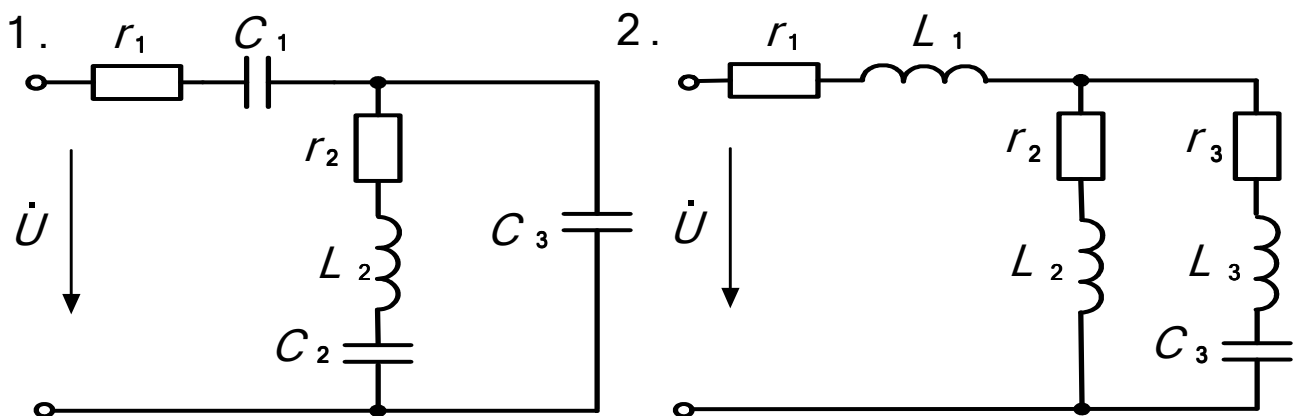


Рис. 2 (начало)

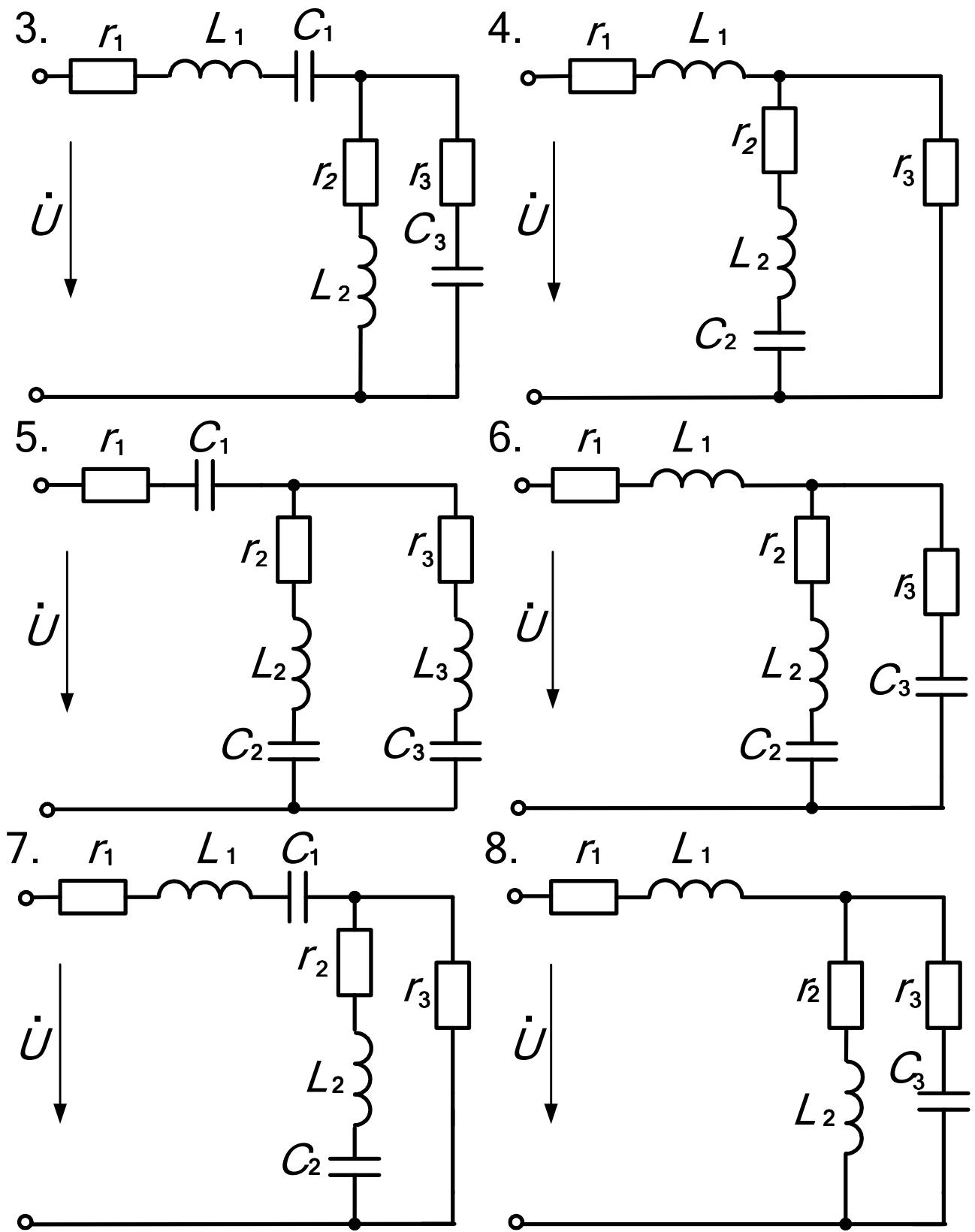


Рис. 2 (продолжение)

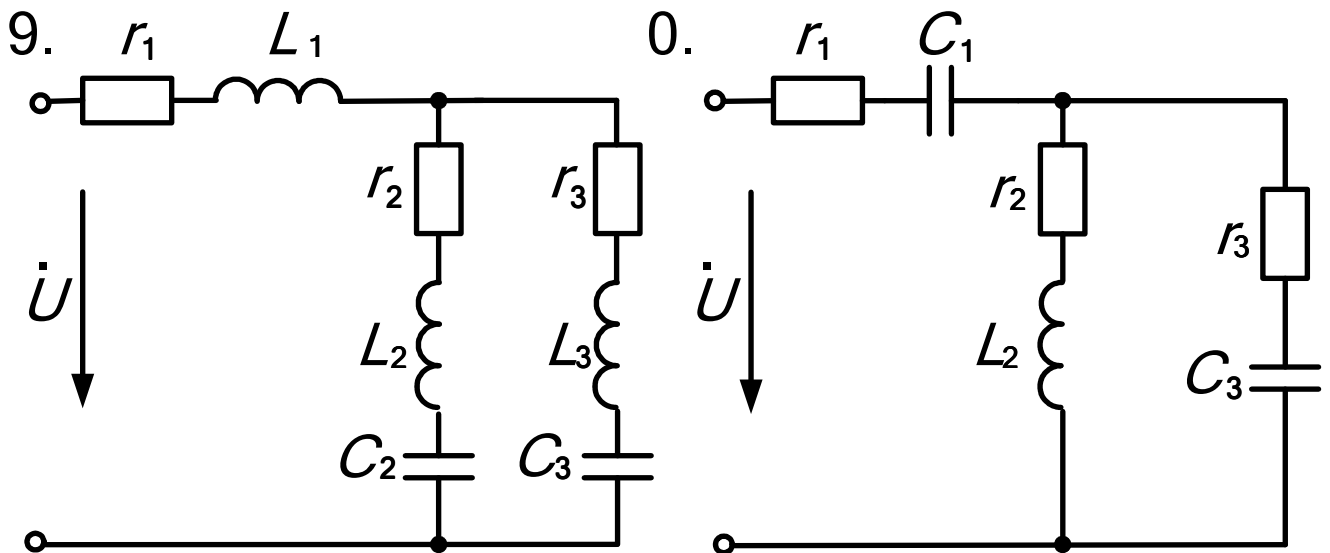


Рис. 2 (окончание)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАЧЕ 2

В комплексном методе расчёта электрических цепей переменного тока ЭДС, напряжения, токи, сопротивления, проводимости и мощности представляют в виде комплексов. Комплексные значения величин, изменяющихся по гармоническому закону, обозначают соответствующими прописными буквами, над которыми ставят точку: \dot{E} , \dot{U} , \dot{I} . Для обозначения модулей этих величин применяют те же буквы, но без точек над ними E , U , I .

Комплекс полного сопротивления обозначают прописной буквой \underline{Z} , комплекс полной проводимости – буквой \underline{Y} . Модули этих величин обозначают соответствующими строчными буквами z и y . Комплексные числа записываются в одной из следующих форм

$$\dot{A} = a + j \cdot b \quad \text{– алгебраическая форма;}$$

$$\dot{A} = A \cdot (\cos \alpha + j \cdot \sin \alpha) \quad \text{– тригонометрическая форма;}$$

$$\dot{A} = A \cdot e^{j \cdot \alpha} \quad \text{– показательная форма,}$$

$$\text{где } A = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{– модуль комплексного числа;}$$

$$\alpha = \operatorname{arctg}(b/a) \quad \text{– аргумент комплексного числа;}$$

$$j = \sqrt{-1} \quad \text{– мнимая единица.}$$

Если напряжение и ток изменяются по закону синуса

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u);$$

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

то эти величины в комплексной форме запишутся так

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\psi_u} \quad \text{и} \quad \dot{I} = I \cdot e^{j\psi_i},$$

где $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ и $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ – действующие значения напряжения и тока.

Комплекс полного сопротивления участка цепи, состоящего из последовательно включенных r, L и C

$$\underline{Z} = r + jx_L - jx_C = r + j(x_L - x_C) = r + jx = z \cdot e^{j\varphi},$$

где $x_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление;

$$x_C = \frac{1}{\omega C} \text{ – емкостное сопротивление;}$$

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} \text{ – модуль комплексного сопротивления;}$$

$\varphi = \arctg(x/r)$ – аргумент комплексного сопротивления.

Для расчёта цепей синусоидального переменного тока комплексным методом применяются все методы, известные из теории электрических цепей постоянного тока. Отличие состоит в том, что вместо действительных чисел, соответствующих токам, напряжениям и сопротивлениям в цепях постоянного тока, при расчёте цепей переменного тока используются комплексные числа. При умножении и делении комплексных чисел необходимо использовать показательную форму записи, а при сложении и вычитании – алгебраическую форму.

Пример. Для электрической цепи (рис. 3) найти действующие значения токов; активные, реактивные и полные мощности всей цепи с проверкой баланса мощностей; построить векторную диаграмму токов и напряжений.

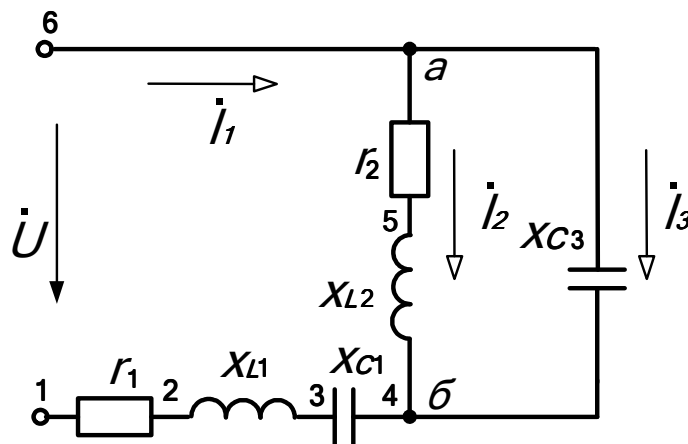


Рис. 3

Дано: $U = 380$ В, $r_1 = 6$ Ом, $x_{L1} = 12$ Ом, $x_{C1} = 4$ Ом,
 $r_2 = 10$ Ом, $x_{L2} = 8$ Ом, $x_{C3} = 6$ Ом.

Решение. Записываем комплексы сопротивлений ветвей

$$\underline{Z}_1 = r_1 + jx_{L1} - jx_{C1} = 6 + j12 - j4 = 6 + j8 = 10e^{j53^\circ} \text{ Ом,}$$

$$\underline{Z}_2 = r_2 + jx_{L2} = 10 + j8 = 12,8e^{j39^\circ} \text{ Ом,}$$

$$\underline{Z}_3 = -jx_{C3} = -j6 = 6e^{-j90^\circ} \text{ Ом.}$$

Найдём комплекс полного сопротивления параллельного участка цепи

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{23} &= \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{12,8e^{j39^\circ} \cdot 6e^{-j90^\circ}}{10 + j8 - j6} = \frac{76,8e^{-j51^\circ}}{10 + j2} = \frac{76,8e^{-j51^\circ}}{10,2e^{j11^\circ}} = \\ &= 7,53e^{-j62^\circ} = (3,54 - j6,65) \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Найдём комплекс полного сопротивления всей цепи

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = 6 + j8 + 3,54 - j6,65 = 9,54 + j1,35 = 9,64e^{j8^\circ}$$

Приняв $\dot{U} = U$, найдем комплексы токов в ветвях и напряжение на параллельном участке \dot{U}_{ab} .

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{380e^{j0^\circ}}{9,64e^{j8^\circ}} = 39,4e^{-j8^\circ} \text{ А}$$

$$\dot{U}_{ab} = \dot{I}_1 \underline{Z}_{23} = 39,4e^{-j8^\circ} \cdot 7,53e^{-j62^\circ} = 297e^{-j70^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_2} = \frac{297e^{-j70^\circ}}{12,8e^{j39^\circ}} = 23,2 \cdot e^{-j109^\circ} \text{ А}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_3} = \frac{297e^{-j70^\circ}}{6e^{-j90^\circ}} = 49,5e^{j20^\circ} \text{ А}$$

Комплекс полной мощности источника

$$\underline{S}_{\text{источн.}} = \dot{U} \cdot \dot{I}_1^* = P_{\text{источн.}} + jQ_{\text{источн.}},$$

где $\dot{I}_1^* = 39,4e^{j8^\circ}$ А – комплексно-сопряжённый ток.

$$\underline{S}_{\text{источн.}} = \dot{U} \cdot \dot{I}_1^* = 380e^{j0^\circ} \cdot 39,4e^{j8^\circ} = 14972e^{j8^\circ} = 14826 + j2084,$$

Откуда $P_{\text{источн.}} = 14826 \text{ Вт}$, $Q_{\text{источн.}} = 2084 \text{ вар}$.

Активная мощность приемника

$$P_{\text{приемн.}} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 + I_3^2 r_3 = 39,4^2 \cdot 6 + 23,2^2 \cdot 10 + 0 = 14696 \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{приемн.}} = I_1^2 (X_{L1} - X_{C1}) + I_2^2 X_{L2} - I_3^2 X_{C3} = 39,4^2 \cdot 8 + 23,2^2 \cdot 8 - 49,5^2 \cdot 6 = 2023 \text{ вар}$$

$$\underline{S}_{\text{приемн.}} = \sqrt{P_{\text{приемн.}}^2 + Q_{\text{приемн.}}^2} = 14835 \text{ ВА}.$$

Баланс мощностей выполняется

$$P_{\text{источн.}} \approx P_{\text{приемн.}}; Q_{\text{источн.}} \approx Q_{\text{приемн.}}; S_{\text{источн.}} \approx S_{\text{приемн.}}$$

Для построения топографической диаграммы вычислим напряжения на всех элементах цепи:

$$U_{r1} = I_1 \cdot r_1 = 39,4 \cdot 6 = 236 \text{ В};$$

$$U_{L1} = I_1 \cdot X_{L1} = 39,4 \cdot 12 = 473 \text{ В};$$

$$U_{C1} = I_1 \cdot X_{C1} = 39,4 \cdot 4 = 158 \text{ В};$$

$$U_{r2} = I_2 \cdot r_2 = 23,2 \cdot 10 = 232 \text{ В};$$

$$U_{L2} = I_2 \cdot X_{L2} = 23,2 \cdot 8 = 186 \text{ В};$$

$$U_{C3} = I_3 \cdot X_{C3} = 49,5 \cdot 6 = 297 \text{ В}.$$

Задавшись масштабом токов, отложим на комплексной плоскости векторы токов \dot{I}_1, \dot{I}_2 и \dot{I}_3 (рис. 4). Сумма векторов токов $\dot{I}_2 + \dot{I}_3$ равна вектору тока \dot{I}_1 .

Примем потенциал точки 1 равным нулю, обходить схему будем навстречу положительному направлению токов. Выберем масштаб напряжений.

Построим из точки 1 вектор напряжения на сопротивлении r_1 \dot{U}_{r1} , который совпадает по направлению с током \dot{I}_1 , получим на диаграмме точку 2.

Из точки 2 построим вектор напряжения на индуктивности L_1 \dot{U}_{L1} (по фазе опережает ток \dot{I}_1 на 90°), получим точку 3.

Построим из точки 3 вектор напряжения на емкости C_1 \dot{U}_{C1} (по фазе отстает от тока \dot{I}_1 на 90°), получим на диаграмме точку 4. Из этой точки дальше пойдут 2 вектора.

Из точки 4 построим вектор напряжения на индуктивности L_2 \dot{U}_{L2} (по фазе опережает ток \dot{I}_2 на 90°), получим точку 5.

Построим из точки 5 вектор напряжения на сопротивлении $r_2 \dot{U}_{r2}$, который совпадает по направлению с током \dot{I}_2 , получим на диаграмме точку 6.

Вернемся к точке 4 и построим вектор напряжения на емкости $C_3 \dot{U}_{C3}$ (по фазе отстаёт от тока \dot{I}_3 на 90°), и попадем в точку 6.

Вектор, соединяющий точку 1 с точкой 6 и направленный из точки 1 к точке 6, изображает напряжение \dot{U} на зажимах цепи. Вектор, проведённый из начала координат в какую-либо точку диаграммы, изображает комплексный потенциал соответствующей точки цепи.

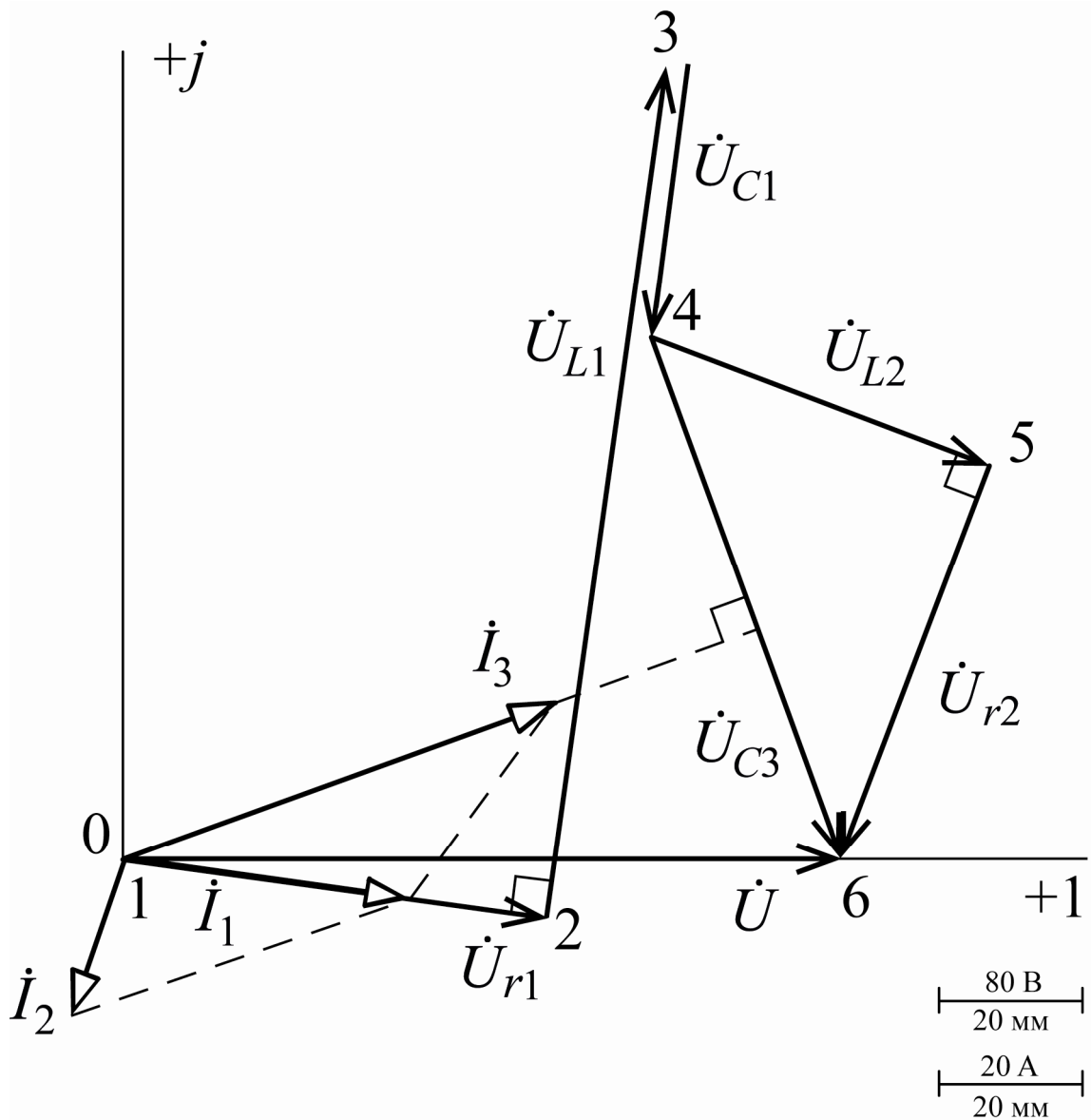


Рис. 4

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб. для вузов. – М.: Гардарики, 2006.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб. для бакалавров. – М.: Юрайт, 2012.
3. Сборник задач по теоретическим основам электротехники/ Под ред. Бессонова Л.А. – М.: Высшая школа, 2006.
4. Серебряков А.С., Шумейко В.В. МATHCAD и решение задач электротехники: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005.
5. Частоедов Л.А., Гирина Е.С. Теоретические основы электротехники. Ч.I. Учебное пособие. – М.: РГОТУПС, 2007.
6. Частоедов Л.А., Ручкина Л.Г., Гирина Е.С. Теоретические основы электротехники. Электротехника и электроника. Часть 1. Методические указания по решению задач для студентов 2 и 3 курсов инженерно-технических специальностей. – М.: РГОТУПС, 2006.

Дополнительная

1. Беневоленский С.Б., Марченко А.Л. Основы электротехники: Уч. пос. для втузов. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2006.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учеб. для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007.
3. Рекус Г.Г. Основы электротехники и электроники в задачах с решениями: Уч. пос. – М.: Высшая школа, 2005.