

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

Кафедра «Электротехника»

В. Н. ГАЛУШКО

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО И СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

**Учебно-методическое пособие для самостоятельной
работы студентов дневной формы обучения
факультета “Управление процессами перевозок”**

Гомель 2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

Кафедра «Электротехника»

В. Н. ГАЛУШКО

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО И СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

**Учебно-методическое пособие для самостоятельной
работы студентов дневной формы обучения
факультета “Управление процессами перевозок”**

*Одобрено методической комиссией факультета
“Управление процессами перевозок”*

Гомель 2012

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.211
Г16

Рецензент – зав. кафедрой «Электрический подвижной состав» канд.
техн. наук, доцент *В. С. Могила* (УО «БелГУТ»)

Галушко, В. Н.

Г16 Линейные электрические цепи постоянного и синусоидального тока :
учеб.-метод. пособие для самостоятельной работы студ. дневной формы
обучения факультета “Управление процессами перевозок” / В. Н. Галушко ;
М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель :
БелГУТ, 2012. – 64 с.
ISBN 978-985-554-002-2

Даны задания с методическими указаниями для самостоятельной работы студентов
при выполнении расчетно-графических работ по расчету электрических цепей постоян-
ного и синусоидального тока по курсу «Электротехника и основы электроники».

Предназначено для студентов дневной формы обучения факультета “Управление
процессами перевозок”.

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.211

ISBN 978-985-554-002-2

© Галушко В. Н., 2012
© Оформление. УО «БелГУТ», 2012

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Расчетно-графическая работа является составной частью обязательных работ, выполняемых студентами при изучении курса «Электротехника и основы электроники». Эта работа начинается освоением лекционного материала и самостоятельной работы с учебной литературой. После изучения теории по данной теме следует проанализировать решения задач, приведенные в рекомендованных учебниках и задачниках, и несколько задач решить самостоятельно. Затем следует приступить к выполнению расчетно-графической работы.

Выполнение расчетно-графической работы является важным этапом в самостоятельной работе студента над курсом, указывающим на закрепление соответствующих теоретических знаний.

Учебным планом по дисциплине «Электротехника и основы электроники» предусмотрена одна расчетно-графическая работа, содержащая три задачи: первая – по расчету линейной электрической цепи постоянного тока; вторая – по расчету линейной однофазной цепи синусоидального тока; третья – по расчету трехфазных цепей.

Решаемый вариант расчетно-графической работы определяют по *трем цифрам* шифра. По *двум первым* цифрам шифра из рисунков 13–15 выбирают номер схемы электрической цепи, а по *последней* цифре из таблиц 1, 2, 3 берут строку с соответствующими числовыми данными. Например, для шифра 123 выбирают двенадцатую схему и числовые данные, соответствующие третьей строке таблицы.

При выполнении расчетно-графической работы целесообразно использовать вычислительную технику. Буквенные обозначения в тексте и схемы должны соответствовать ГОСТ 1.494–77, расчет производится в абсолютных единицах СИ, а векторные диаграммы и графики выполняют на миллиметровой бумаге.

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОФОРМЛЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

1 Расчетно-графическая работа выполняется на одной стороне стандартных (формата А4) листов белой писчей бумаги, на обложке которой должны быть указаны: шифр, фамилия и инициалы студента, учебная группа.

2 На первой странице (следующей после титульного листа) приводятся: формулировка задачи, схема электрической цепи и параметры ее элементов. Далее, приводятся расчетные схемы со всеми необходимыми цифровыми и буквенными обозначениями, возможно использование графических редакторов.

3 Кратко даются пояснения по всем этапам расчета, при этом сначала записываются уравнения и расчетные формулы в общем виде, а затем производится подстановка числовых значений.

Для всех используемых в расчетах величин указывается их размерность.

Рисунки, графики, вспомогательные схемы, векторные диаграммы должны располагаться по тексту после соответствующих ссылок. Каждый рисунок должен быть подписан. В тексте допускаются только общепринятые сокращения слов.

4 Вычисления производятся с точностью, при которой относительная погрешность расчета не превышает 1 %.

5 Графики и диаграммы должны выполняться с соблюдением масштаба. Для координатных осей необходимо выбирать равномерные масштабы, кратные 1; 2; 2,5; 5; 10 и т. д. во всем диапазоне изменения величины. Все вертикальные и горизонтальные шкалы должны быть оцифрованы равномерно на одной высоте и начинаться с нуля.

6 Незачтенная расчетно-графическая работа должна быть исправлена в соответствии с замечаниями и представлена на повторную рецензию. Для исправлений можно использовать обратную сторону предыдущего листа. При большом количестве исправлений на одной странице ее нужно переписать и вклеить рядом со страницей, содержащей замечания рецензента.

7 Расчетно-графическая работа, выполненная не по варианту, оформленная неаккуратно и написанная неразборчиво, не рецензируется.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1. Расчет линейной электрической цепи постоянного тока

Для цепи, изображенной на рисунке 1, известны ЭДС $E_1 = 220$ В, $E_2 = 110$ В и внутренние сопротивления источников питания $r_{01} = 1$ Ом, $r_{02} = 2$ Ом, а также сопротивления $r_1 = 5$ Ом, $r_2 = 15$ Ом, $r_3 = 25$ Ом, $r_4 = 7$ Ом, $r_5 = 30$ Ом, $r_6 = 20$ Ом.

Не о б х о д и м о :

1 Составить систему уравнений для определения токов путем непосредственного применения законов Кирхгофа. Решать эту систему уравнений не следует.

2 Определить токи ветвей методом контурных токов.

3 Составить баланс мощностей.

4 Построить потенциальную диаграмму для контура, включающего две ЭДС.

Решение

1 Задаёмся направлением токов всех ветвей и обозначаем эти токи на схеме. Стрелка источника ЭДС показывает направление увеличения потенциала. При определении направления тока следует учитывать тот факт, что ток в ветви течёт от большего потенциала к меньшему.

Схема на рисунке 1 имеет четыре узла и шесть ветвей. Для электрической цепи, содержащей $u - 1$ уравнения, поэтому составляем три уравнения по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} \text{для узла } a: I_3 + I_6 - I_1 = 0; \\ \text{для узла } b: I_1 + I_2 - I_4 = 0; \\ \text{для узла } c: I_4 - I_5 - I_3 = 0. \end{cases}$$

Составляем уравнения по второму закону Кирхгофа для выбранных трех независимых контуров:

$$\begin{cases} \text{для контура I: } r_3 I_3 + (r_1 + r_{01}) I_1 + r_4 I_4 = E_1; \\ \text{для контура II: } r_6 I_6 + (r_1 + r_{01}) I_1 - (r_2 + r_{02}) I_2 = E_1 - E_2; \\ \text{для контура III: } (r_2 + r_{02}) I_2 + r_4 I_4 + r_5 I_5 = E_2. \end{cases}$$

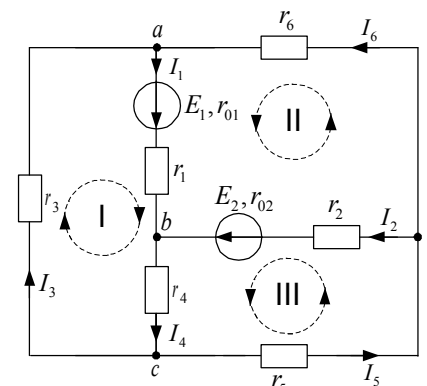


Рисунок 1 – Схема цепи постоянного тока

2 Определяем токи ветвей методом контурных токов.

Направления контурных токов выбираем произвольно (по ходу часовой стрелки или против) и показываем стрелками внутри контуров, как это показано на рисунке 2. Если принять все направления обхода контурных токов одинаковыми, то взаимные сопротивления контуров (входящие одновременно в два разных контура) берут со знаком «+».

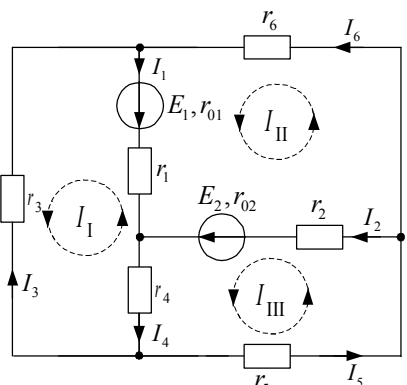


Рисунок 2 – Схема цепи постоянного тока с направлениями контурных токов

Составляем уравнение для первого контура, обходя его в направлении, указанном на рисунке 2 и учитывая падения напряжения от всех контурных токов в сопротивлениях первого контура. Для контурного тока I_I будем иметь суммарное падение напряжения, равное $(r_{01} + r_1 + r_3 + r_4) I_I$. По сопротивлению $(r_{01} + r_1)$ проходит ток I_{II} , который не совпадает с направлением контурного тока I_I , проходящего по данным сопротивлениям, поэтому используется знак «-». По сопротивлению r_4 протекает контурный ток I_{III} , который в данном резистивном элементе направлен встречно контурному току I_I , значит используется знак «-». В первый контур входит ЭДС E_1 , причем ее направление не совпадает с направлением контурного тока I_I , поэтому применяется знак «-». Уравнение для первого контура примет вид

$$I_I (r_{01} + r_1 + r_3 + r_4) - I_{II} (r_{01} + r_1) - I_{III} r_4 = -E_1.$$

Аналогично составляем уравнения для второго и третьего контуров. В общем виде для электрической цепи, изображенной на рисунке 2, система контурных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} r_{11} I_I + r_{12} I_{II} + r_{13} I_{III} = E_I; \\ r_{21} I_I + r_{22} I_{II} + r_{23} I_{III} = E_{II}; \\ r_{31} I_I + r_{32} I_{II} + r_{33} I_{III} = E_{III}, \end{cases}$$

где $r_{11} = r_{01} + r_1 + r_3 + r_4 = 1 + 5 + 25 + 7 = 38 \text{ Ом}$;

$r_{22} = r_{01} + r_1 + r_{02} + r_2 + r_6 = 1 + 5 + 2 + 15 + 20 = 43 \text{ Ом}$;

$r_{33} = r_{02} + r_2 + r_4 + r_5 = 2 + 15 + 7 + 30 = 54 \text{ Ом}$.

Взаимные сопротивления берут со знаком «+», если контурные токи, проходящие по этим сопротивлениям, имеют одинаковое направление, и со знаком «-», если направления контурных токов противоположны. В рассмотренном примере взаимное сопротивление первого и второго контуров $r_{12} = -(r_{01} + r_1)$, и $r_{21} = -(r_{01} + r_1)$. Отсюда видно, что $r_{12} = r_{21}$, т. е.

взаимные сопротивления, отличающиеся одно от другого порядком индексов, равны между собой:

$$r_{12} = r_{21} = -(r_{01} + r_1) = -(1 + 5) = -6 \text{ Ом};$$

$$r_{13} = r_{31} = -r_4 = -7 \text{ Ом};$$

$$r_{23} = r_{32} = -(r_{02} + r_2) = -(2 + 15) = -17 \text{ Ом}.$$

Контурные ЭДС берут со знаком «+», если ее направление совпадает с направлением контурного тока, и со знаком «-», если эти направления противоположны.

$$E_I = -E_1 = -220 \text{ В};$$

$$E_{II} = E_1 - E_2 = 220 - 110 = 110 \text{ В};$$

$$E_{III} = E_2 = 110 \text{ В}.$$

Решение системы линейных алгебраических уравнений выполним методом Крамера. Найдем определитель матрицы сопротивлений:

$$\Delta = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 38 & -6 & -7 \\ -6 & 43 & -17 \\ -7 & -17 & 54 \end{vmatrix} = 71775 \text{ Ом}^3,$$

а также следующие определители:

$$\Delta_I = \begin{vmatrix} E_I & r_{12} & r_{13} \\ E_{II} & r_{22} & r_{23} \\ E_{III} & r_{32} & r_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -220 & -6 & -7 \\ 110 & 43 & -17 \\ 110 & -17 & 54 \end{vmatrix} = -354200 \text{ В} \cdot \text{Ом}^2;$$

$$\Delta_{II} = \begin{vmatrix} r_{11} & E_I & r_{13} \\ r_{21} & E_{II} & r_{23} \\ r_{31} & E_{III} & r_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 38 & -220 & -7 \\ -6 & 110 & -17 \\ -7 & 110 & 54 \end{vmatrix} = 198550 \text{ В} \cdot \text{Ом}^2;$$

$$\Delta_{III} = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & E_I \\ r_{21} & r_{22} & E_{II} \\ r_{31} & r_{32} & E_{III} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 38 & -6 & -220 \\ -6 & 43 & 110 \\ -7 & -17 & 110 \end{vmatrix} = 162800 \text{ В} \cdot \text{Ом}^2.$$

Находим контурные токи:

$$I_I = \frac{\Delta_I}{\Delta} = \frac{-354200}{71775} = -4,935 \text{ А}; \quad I_{II} = \frac{\Delta_{II}}{\Delta} = \frac{198550}{71775} = 2,766 \text{ А};$$

$$I_{III} = \frac{\Delta_{III}}{\Delta} = \frac{162800}{71775} = 2,268 \text{ А}.$$

Зная контурные токи, можно определить реальные токи в ветвях. Если в ветви проходит только один контурный ток, то истинный ток в ветви будет равен контурному току по значению и одинаково направлен. Токи в ветвях, по которым проходит несколько контурных токов, равны их алгебраической

сумме. Например, реальный ток первой ветви формируется двумя контурными токами I_{II} и I_I . Ток I_{II} совпадает по направлению с реальным, а I_I направлен навстречу реальному, поэтому $I_1 = I_{II} - I_I$.

В рассмотренном примере токи в ветвях:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{II} - I_I = 2,766 + 4,935 = 7,701 \text{ A;} \\ I_2 &= I_{III} - I_{II} = 2,268 - 2,766 = -0,498 \text{ A;} \\ I_3 &= -I_I = 4,935 \text{ A;} \\ I_4 &= I_{III} - I_I = 2,268 + 4,935 = 7,203 \text{ A;} \\ I_5 &= I_{III} = 2,268 \text{ A;} \\ I_6 &= I_{II} = 2,766 \text{ A.} \end{aligned}$$

Если ток имеет знак «-», то действительное его направление в ветви противоположно произвольно выбранному.

3 Проверим правильность результатов расчета, записав уравнение баланса электрических мощностей. При этом истинное направление тока I_2 противоположно предварительно выбранному. Из проведенных расчетов следует: источник ЭДС E_1 совпадает с направлением тока I_1 , значит функционирует в режиме генерирования энергии; источник ЭДС E_2 ее потребляет, так как противоположен положительному направлению тока I_2 .

Мощность источников энергии

$$P_{\text{ист}} = E_1 I_1 - E_2 I_2 = 220 \cdot 7,701 - 110 \cdot 0,498 = 1639,44 \text{ Вт.}$$

Мощность нагрузок

$$\begin{aligned} P_{\text{нагр}} &= I_1^2(r_1 + r_{01}) + I_2^2(r_2 + r_{02}) + I_3^2 r_3 + I_4^2 r_4 + I_5^2 r_5 + I_6^2 r_6 = \\ &= 7,701^2 \cdot (5 + 1) + 0,498^2 \cdot (15 + 2) + 4,935^2 \cdot 25 + \\ &+ 7,203^2 \cdot 7 + 2,268^2 \cdot 30 + 2,766^2 \cdot 20 = 1639,42 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Относительная погрешность результатов расчета

$$\begin{aligned} \delta_p \% &= \frac{|P_{\text{ист}} - P_{\text{нагр}}|}{0,5(P_{\text{ист}} + P_{\text{нагр}})} \cdot 100 \% = \\ &= \frac{|1639,44 - 1639,42|}{0,5(1639,44 + 1639,42)} \cdot 100 \% = 0,00122 \% \end{aligned}$$

Относительная погрешность расчета балансом мощностей не превышает 1 %, значит расчет токов схемы выполнен правильно.

4 Построим потенциальную диаграмму для контура, включающего две ЭДС.

Потенциальную диаграмму строим для второго контура цепи (рисунок 3), так как в рассматриваемый контур входят два источника ЭДС E_1 и E_2 . В представленной на рисунке 3 схеме направление тока I_2 изменено на противоположное, в дальнейших расчетах потенциалов используется положи-

тельное значение величины данного тока. Разбиваем данный контур на участки, границы которых обозначаем буквами a, b, c, d, e . Заземляем точку a , условно считая ее потенциал нулевым, и обходим контур по часовой стрелке от этой точки в той последовательности, в какой точки встречаются на пути. Таким образом, $\varphi_a = 0$. Следующей точкой на пути обхода контура будет точка b . На участке ab находится источник ЭДС E_1 с внутренним сопротивлением r_{01} . Направление обхода контура совпадает с направлением ЭДС E_1 , значит потенциал повышается, также происходит уменьшение потенциала на значение величины падения напряжения на резисторе r_{01} (при совпадении направлений тока и обхода контура знак отрицательный, в противном случае он положительный)

$$\begin{aligned} \varphi_b &= \varphi_a + E_1 - I_1 r_{01} = \\ &= 220 - 7,701 \cdot 1 = 212,3 \text{ В.} \end{aligned}$$

При переходе от точки b к точке c происходит уменьшение потенциала на значение величины падения напряжения на резисторе r_1 (направление обхода контура совпадает с направлением тока в резисторе r_1):

$$\begin{aligned} \varphi_c &= \varphi_b - I_1 r_1 = \\ &= 212,3 - 7,701 \cdot 5 = 173,8 \text{ В.} \end{aligned}$$

Выполнив аналогичные расчеты, найдем потенциалы остальных точек:

$$\varphi_d = \varphi_c - E_2 - I_2 r_{02} = 173,8 - 110 - 0,498 \cdot 2 = 62,8 \text{ В;}$$

$$\varphi_e = \varphi_d - I_2 r_2 = 62,8 - 0,498 \cdot 15 = 55,33 \text{ В;}$$

$$\varphi_a = \varphi_e - I_6 r_6 = 55,33 - 2,766 \cdot 20 = 0 \text{ В.}$$

В нашем случае потенциал последней точки равен нулю, что дает возможность также проверить правильность расчета токов (как и при составлении баланса электрических мощностей) и потенциалов.

Результаты расчета используем для построения потенциальной диаграммы. На оси абсцисс откладывают сопротивление участков в той последовательности, как они встречаются при обходе контура от точки с нулевым потенциалом. Вдоль оси ординат откладывают рассчитанные ранее потенциалы соответствующих точек (рисунок 4).

Из потенциальной диаграммы можно найти напряжение между двумя любыми точками как разность потенциалов между ними.

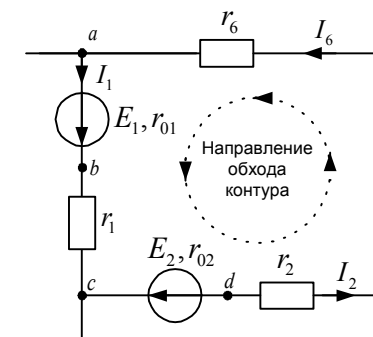


Рисунок 3 – Контур для построения потенциальной диаграммы

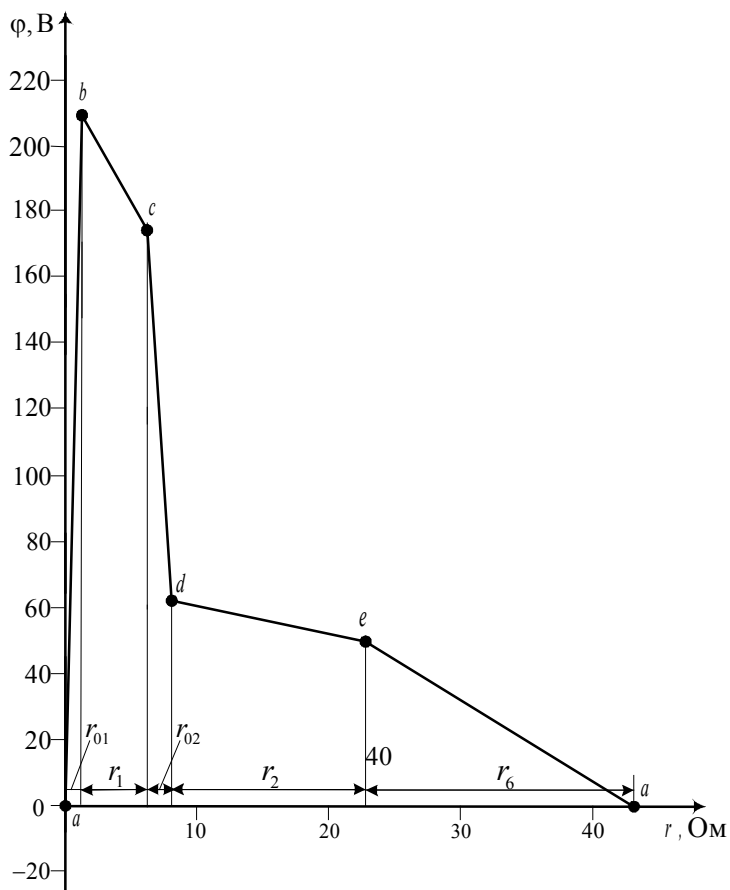


Рисунок 4 – Потенциальная диаграмма контура

Пример 2. Расчет линейной электрической цепи синусоидального тока

Электрическая цепь 5, подключённая к сети переменного тока с напряжением $U = 220$ В и частотой 50 Гц, имеет следующие параметры: активные сопротивления $r_1 = 15$ Ом, $r_2 = 10$ Ом; индуктивности $L_1 = 63,8$ мГн, $L_2 = 47,8$ мГн, $L_3 = 63,7$ мГн; ёмкости $C_2 = 318$ мкФ, $C_3 = 212,3$ мкФ.

Н е о б х о д и м о :

1 Рассчитать сопротивления реактивных элементов цепи, комплексное эквивалентное сопротивление всей цепи.

2 Определить действующие значения токов в ветвях с помощью комплексных чисел.

3 Определить показания приборов, указанных на схеме.

4 Составить баланс активных и реактивных мощностей.

5 Определить характер (индуктивный или ёмкостный) и параметры элемента, который необходимо включить последовательно с источником питания, чтобы в цепи возник резонанс напряжений.

6 Построить векторную диаграмму, на которой изобразить векторы всех токов и напряжений на участках цепи.

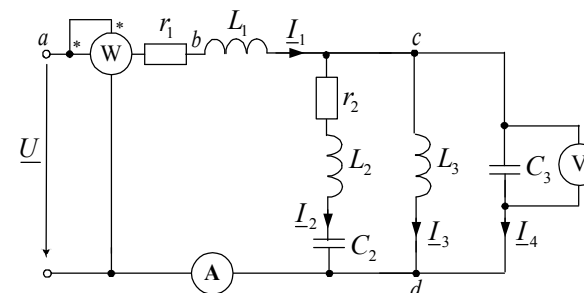


Рисунок 5 – Схема разветвлённой цепи переменного тока

Решение

1 Задачу начинаем решать с преобразования реальных параметров цепи в их символьные изображения в комплексной форме. Первым преобразуем источник питания. В примере задано действующее значение его напряжения, начальную фазу принимаем равной нулю ($\psi_U = 0$), что позволяет записать действующее напряжение в комплексной форме записи:

$$\underline{U} = Ue^{j\psi_U} = 220 e^{j0} = 220 \text{ В.}$$

Угловая частота ω в записанном выражении для мгновенного значения напряжения определяется в зависимости от заданной частоты источника переменного тока

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ 1/с.}$$

Индуктивные сопротивления

$$x_{L1} = \omega L_1 = 314 \cdot 63,8 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ Ом,}$$

$$x_{L2} = \omega L_2 = 314 \cdot 47,8 \cdot 10^{-3} = 15 \text{ Ом,}$$

$$x_{L3} = \omega L_3 = 314 \cdot 63,7 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ Ом.}$$

Ёмкостные сопротивления

$$x_{C2} = 1/(\omega C_2) = 1/(314 \cdot 318 \cdot 10^{-6}) = 10 \text{ Ом,}$$

$$x_{C3} = 1/(\omega C_3) = 1/(314 \cdot 212,3 \cdot 10^{-6}) = 15 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление участков цепи в комплексной форме

$$\underline{z}_1 = r_1 + jx_{L1} = 15 + j20 \text{ Ом, } \underline{z}_2 = r_2 + jx_{L2} - jx_{C2} = 5 + j15 - j10 = 5 + j5 \text{ Ом,}$$

$$\underline{z}_3 = jx_{L3} = j20 \text{ Ом, } \underline{z}_4 = -jx_{C3} = -j15 \text{ Ом.}$$

Преобразованная цепь изображена на рисунке 6, а.

Чтобы не загромождать рисунок, в преобразованной схеме исключены измерительные приборы, которые на расчёт токов и напряжений не влияют.

По аналогии с цепью постоянного тока осуществляем эквивалентные преобразования цепи, представленные на рисунках 6, б и в.

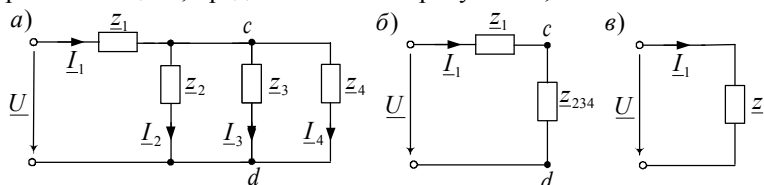


Рисунок 6 – Эквивалентная (а) и упрощенные (б, в) схемы цепи

Параллельно соединенные элементы $\underline{z}_2, \underline{z}_3, \underline{z}_4$ заменяем одним эквивалентным \underline{z}_{234}

$$\underline{z}_{234} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{z}_2} + \frac{1}{\underline{z}_3} + \frac{1}{\underline{z}_4}} = \frac{1}{\frac{1}{5 + j5} + \frac{1}{j20} + \frac{1}{-j15}} = 5,902 + j4,918 \text{ Ом.}$$

Последовательно соединенные элементы \underline{z}_1 и \underline{z}_{234} заменяем одним эквивалентным \underline{z}

$$\underline{z} = \underline{z}_1 + \underline{z}_{234} = 15 + j20 + 5,902 + j4,918 = 20,902 + j24,918 \text{ Ом.}$$

2 Для упрощенной схемы, представленной на рисунке 6, в, по закону Ома определим действующее значение комплексного тока \underline{I}_1 в неразветвленной части цепи:

$$\underline{I}_1 = \frac{U}{\underline{z}} = \frac{220}{20,902 + j24,918} = 4,347 - j5,182 = 6,764 e^{-j50^\circ} \text{ А.}$$

Далее, определяем падение напряжения на участках:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{I}_1 r_1 = (4,347 - j5,182) \cdot 15 = 65,2 - j77,737 = 101,5 e^{-j50^\circ} \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{I}_1 jx_{L1} = (4,347 - j5,182) \cdot j20 = 103,65 + j86,94 = 135,3 e^{j40^\circ} \text{ В.}$$

Комплексное падение напряжения на параллельном участке

$$\underline{U}_{cd} = \underline{I}_1 \underline{z}_{234} = (4,347 - j5,182) \cdot (5,902 + j4,918) = 51,14 - j9,21 = 51,97 e^{-j10^{12}'} \text{ В.}$$

Токи в ветвях после разветвления:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{cd}}{\underline{z}_2} = \frac{51,14 - j9,21}{5 + j5} = 4,194 - j6,035 = 7,349 e^{-j55^{12}'} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{cd}}{\underline{z}_3} = \frac{51,14 - j9,21}{j20} = -0,46 - j2,557 = 2,598 e^{-j100^{12}'} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_4 = \frac{\underline{U}_{cd}}{\underline{z}_4} = \frac{51,14 - j9,21}{-j15} = 0,614 + j3,41 = 3,464 e^{j79^{48}'} \text{ А.}$$

Если разветвленный участок имеет только две ветви, включенные парал-

лельно, то токи в ветвях после разветвления можно определять без расчета \underline{U}_{cd} , используя формулу разброса.

3 Модули показательной формы выражений для токов есть действующие значения реальных токов ветвей, которые фиксируют приборы электромагнитной системы. Следовательно, амперметр в первой ветви покажет 6,764 А.

Вольтметр, включенный параллельно емкостному элементу, покажет падение напряжения на нем. Так как падение напряжения на участке есть произведение тока участка на значение его сопротивления, то получаем:

$$\underline{U}_V = \underline{I}_4 \underline{z}_V = \underline{U}_{cd},$$

где \underline{z}_V – полное комплексное сопротивление участка, на котором определяется падение напряжения.

Так как в примере находим падение напряжения на емкостном элементе с сопротивлением x_{C3} , то

$$\underline{z}_V = -jx_{C3} = -j15 \text{ Ом.}$$

Падение напряжения на емкостном элементе

$$\underline{U}_V = (0,614 + j3,41) \cdot (-j15) = 51,14 - j9,21 = 51,97 e^{-j10^{12}'} \text{ В.}$$

Показание вольтметра есть модуль выражения \underline{U}_V , т. е. $U_V = 51,97 \text{ В}$.

Ваттметр, включенный на входе цепи, показывает активную мощность, потребляемую всей схемой. Эта мощность будет действительной частью выражения комплекса полной мощности \underline{S} на входе, которая имеет вид

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}_1^* = 220 \cdot (4,347 + j5,182) = 956,34 + j1140,04 = 1488 e^{j50^\circ} \text{ В·А.}$$

Активная мощность $P_{\text{ист}} = 956,34 \text{ Вт}$, реактивная мощность

$$Q_{\text{ист}} = 1140,04 \text{ вар, значит показание ваттметра } P_w = 956,34 \text{ Вт.}$$

4 Для проверки результатов расчета необходимо составить баланс активных и реактивных мощностей. Эти балансы показывают, что активные и реактивные мощности на входе должны быть равны сумме соответственно активных и реактивных мощностей всех потребителей.

Активная мощность на входе определена, а активные мощности отдельных потребителей рассчитывают как произведение активного сопротивления участка на квадрат действующего значения тока этого участка. В рассматриваемой схеме два активных потребителя r_1 и r_2 . Суммарная активная мощность нагрузки

$$P_{\text{нагр}} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = 6,764^2 \cdot 15 + 7,349^2 \cdot 5 = 956,3 \text{ Вт.}$$

Относительная ошибка вычислений для активной мощности

$$\delta_p \% = \frac{|P_{\text{ист}} - P_{\text{нагр}}|}{0,5(P_{\text{ист}} + P_{\text{нагр}})} \cdot 100 \% = \frac{|956,34 - 956,3|}{0,5(956,34 + 956,3)} \cdot 100 \% = 0,0042 \%.$$

Ошибка менее одного процента допускается. Она возникает из-за округления числовых данных при расчете.

Реактивную мощность потребителей определяют как произведение квадрата тока реактивного элемента на его сопротивление. Причем реактивная мощность катушки индуктивности положительна, а конденсатора отрицательна.

Суммарная реактивная мощность всех потребителей

$$Q_{\text{нагр}} = I_1^2 x_{L1} + I_2^2 (x_{L2} - x_{C2}) + I_3^2 x_{L3} - I_4^2 x_{C3} =$$

$$= 6,764^2 \cdot 20 + 7,349^2 \cdot (15 - 10) + 2,598^2 \cdot 20 - 3,464^2 \cdot 15 = 1140,07 \text{ вар.}$$

Относительная ошибка вычислений для активной мощности

$$\delta_Q \% = \frac{|Q_{\text{ист}} - Q_{\text{нагр}}|}{0,5(Q_{\text{ист}} + Q_{\text{нагр}})} \cdot 100 \% = \frac{|1140,04 - 1140,07|}{0,5(1140,04 + 1140,07)} \cdot 100 \% = 0,0026 \%$$

Таким образом, баланс активных и реактивных мощностей соблюдается, значит токи определены правильно.

5 Для возникновения в цепи резонанса напряжений необходимо, чтобы полное сопротивление всей цепи было только активным. Из выражения для полного сопротивления ($z = 20,902 + j24,918 \text{ Ом}$) видно, что эквивалентное реактивное сопротивление исходной цепи равно $+24,918 \text{ Ом}$. Знак плюс указывает на индуктивный характер эквивалентной реактивности. Устранить эту реактивность можно включением в первую ветвь конденсатора с емкостным сопротивлением $x_C = -24,918 \text{ Ом}$ (минус подчеркивает емкостный характер реактивности). После такого включения реактивные сопротивления взаимно компенсируются, а полное сопротивление становится активным и равно $20,902 \text{ Ом}$. В цепи наступает резонанс напряжений. Необходимая емкость для получения резонанса напряжений

$$C = 1/(\omega x_C) = 1/(314 \cdot 24,918 \cdot 10^{-6}) = 127,8 \cdot 10^{-6} = 127,8 \text{ мкФ.}$$

6 На рисунке 7 приведена векторная диаграмма, на которой относительно осей координат комплексной плоскости $+j$ и $+1$ в масштабе построены векторы напряжений и токов. Вектор строится под углом к вещественной оси комплексной плоскости $+1$. Значение этого угла равно аргументу показательной формы комплексного выражения. При положительном значении аргумента угол откладывается от вещественной оси против часовой стрелки, а при отрицательном – по часовой. Длина вектора должна в масштабе соответствовать модулю показательной формы комплексного выражения. Например, вектор входного действующего значения напряжения ($U = 220 \text{ В}$) должен иметь длину в 11 масштабных отрезков (в масштабном отрезке 20 В).

Вектор входного комплексного напряжения складывается из векторов трех комплексных напряжений: $\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{cd}$ ($\underline{U} = \underline{U}_{ab} + \underline{U}_{bc} + \underline{U}_{cd}$).

Между точками a и b находится резистор с сопротивлением r_1 . Напряжение на нем совпадает по фазе с током \underline{I}_1 , поэтому вектор \underline{U}_{ab} параллелен вектору тока \underline{I}_1 . К вектору \underline{U}_{ab} прибавляем вектор напряжения \underline{U}_{bc} . Между точ-

ками b и c находится индуктивный элемент с сопротивлением x_{L1} . Напряжение на индуктивном элементе опережает ток \underline{I}_1 на 90° , поэтому вектор \underline{U}_{bc} перпендикулярен вектору тока \underline{I}_1 .

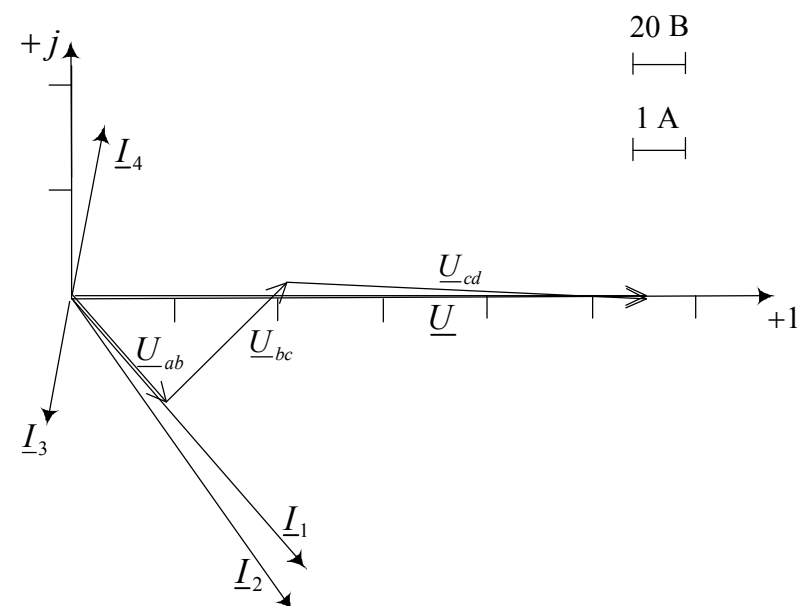


Рисунок 7 – Векторная диаграмма разветвленной цепи переменного тока

Пример 3. Расчет трехфазной цепи с приемниками, соединенными «звездой» и «треугольником»

К трёхфазной симметричной сети с линейным напряжением $U_L = 380 \text{ В}$ подключена цепь (рисунок 8) с параметрами: активные сопротивления $r_1 = 5 \text{ Ом}$, $r_2 = 10 \text{ Ом}$, $r_3 = 15 \text{ Ом}$; индуктивность $L_3 = 31,8 \text{ мГн}$; ёмкость $C_2 = 159 \text{ мкФ}$.

Н е о б х о д и м о :

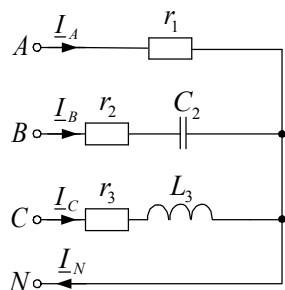
1 При соединении приёмников звездой с нейтральным проводом определить токи в линейных и нейтральном проводах, а также активную и реактивную мощности, потребляемые нагрузкой при симметричной системе напряжений на нагрузке. Построить топографическую диаграмму напряжений и на ней показать векторы всех токов.

2 Те же элементы трёхфазной нагрузки включить треугольником и определить фазные и линейные токи. Рассчитать значения активной и реактивной мощностей, потребляемых нагрузкой. Построить векторную диаграмму напряжений и токов для этого случая.

Решение

1 Расчет трехфазной цепи при соединении потребителей звездой.

Так как в схеме есть нейтральный провод, то напряжение на фазах нагрузки равно соответствующему фазному напряжению источника питания (обмотки генератора считаем соединенными звездой, а сопротивлением нейтрального провода пренебрегаем):



$$\underline{U}_a = \underline{U}_A = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}},$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{-j120^\circ},$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j120^\circ};$$

в численном виде:

$$\underline{U}_a = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В};$$

$$\underline{U}_b = 220 e^{-j120^\circ} = -110 - j190,5 \text{ В};$$

$$\underline{U}_c = 220 e^{j120^\circ} = -110 + j190,5 \text{ В}.$$

Рисунок 9 – Схема трёхфазной цепи при соединении потребителей звездой

Определим реактивные сопротивления, принимая частоту сети переменного тока равной 50 Гц, а угловую частоту

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ 1/с}.$$

Реактивное индуктивное сопротивление

$$x_{L3} = \omega L_3 = 314 \cdot 31,8 \cdot 10^{-3} = 10 \text{ Ом}.$$

Реактивное емкостное сопротивление

$$x_{C2} = 1/(\omega C_2) = 1/(314 \cdot 159 \cdot 10^{-6}) = 20 \text{ Ом}.$$

В общем случае полное сопротивление каждой из фаз в комплексной форме определяют с помощью выражения, которое использовалось в однофазных цепях,

$$\underline{z}_\phi = r + j(x_L - x_C).$$

Применяем эту формулу для нашего конкретного случая и получаем полные сопротивления фаз в следующем виде:

$$\underline{z}_a = r_1 = 5 \text{ Ом};$$

$$\underline{z}_b = r_2 - jx_{C2} = 10 - j20 \text{ Ом};$$

$$\underline{z}_c = r_3 + jx_{L3} = 15 + j10 \text{ Ом}.$$

Комплексные сопротивления фаз различны, следовательно, нагрузка несимметричная.

Токи в линейных проводах (фазные токи нагрузки) определяем с помощью закона Ома:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{z}_a} = \frac{220}{5} = 44 = 44 e^{j0^\circ} \text{ А};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{z}_b} = \frac{-110 - j190,5}{10 - j20} = 5,42 - j8,21 = 9,838 e^{-j56^\circ 34'} \text{ А};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{z}_c} = \frac{-110 + j190,5}{15 + j10} = 0,785 + j12,177 = 12,2 e^{-j86^\circ 19'} \text{ А}.$$

Ток в нейтральном проводе находим по первому закону Кирхгофа

$$\begin{aligned} \underline{I}_N &= \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 44 + 5,42 - j8,21 + 0,785 + j12,177 = \\ &= 50,205 + j3,967 = 50,36 e^{j4^\circ 31'} \text{ А}. \end{aligned}$$

Полные мощности фаз:

$$\underline{S}_a = \underline{U}_a \underline{I}_a^* = 220 \cdot 44 e^{j0^\circ} = 9680 e^{j0^\circ} = 9680 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_b = \underline{U}_b \underline{I}_b^* = (-110 - j190,5) \cdot (5,42 + j8,21) = 967,8 - j1935,6 = 2164 e^{-j63^\circ 26'} \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_c = \underline{U}_c \underline{I}_c^* = (-110 + j190,5) \cdot (0,785 - j12,177) = 2233,3 + j1489 = 2684 e^{j33^\circ 41'} \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Так как вещественная часть полной мощности есть активная мощность цепи, а мнимая часть – реактивная, то, просуммировав отдельно вещественные, а затем мнимые части мощностей трех фаз, определяем трехфазную активную и реактивную мощности.

Активная трехфазная мощность

$$P_{\text{ист}} = P_a + P_b + P_c = 9680 + 967,8 + 2233,3 = 12881,1 \text{ Вт}.$$

Реактивная трехфазная мощность

$$Q_{\text{ист}} = Q_a + Q_b + Q_c = 0 - 1935,6 + 1489 = -446,6 \text{ вар}.$$

Полная мощность

$$S_{\text{ист}} = \sqrt{P_{\text{ист}}^2 + Q_{\text{ист}}^2} = \sqrt{12881,1^2 + (-446,6)^2} = 12888,8 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Активная трехфазная мощность нагрузки может быть определена суммой активных мощностей потребителей каждой из фаз

$$P_{\text{нагр}} = I_A^2 r_1 + I_B^2 r_2 + I_C^2 r_3 = 44^2 \cdot 5 + 9,838^2 \cdot 10 + 12,2^2 \cdot 15 = 12880 \text{ Вт}.$$

Относительная ошибка вычислений для активной мощности

$$\delta_p \% = \frac{|P_{\text{ист}} - P_{\text{нагр}}|}{0,5(P_{\text{ист}} + P_{\text{нагр}})} \cdot 100 \% = \frac{|12881,1 - 12880|}{0,5(12881,1 + 12880)} \cdot 100 \% = 0,0085 \%$$

Реактивная трехфазная мощность нагрузки также определяется суммой реактивных мощностей потребителей каждой из фаз.

$$Q_{\text{нагр}} = I_B^2 x_{C2} + I_C^2 x_{L3} = -9,838^2 \cdot 20 + 12,2^2 \cdot 10 = -447,3 \text{ вар}.$$

Относительная ошибка вычислений для активной мощности

$$\delta_Q \% = \frac{|Q_{\text{ист}} - Q_{\text{нагр}}|}{0,5(Q_{\text{ист}} + Q_{\text{нагр}})} \cdot 100 \% = \frac{|-446,6 + 447,3|}{0,5(446,6 + 447,3)} \cdot 100 \% = 0,157 \%$$

Ошибка менее одного процента допускается. Таким образом, баланс активных и реактивных мощностей соблюдается, значит токи определены правильно.

Векторную диаграмму размещаем на комплексной плоскости с осями +1 и +j, рисунок 10. Выбираем масштаб векторов тока равным 10 А/деление, а векторов напряжения – 40 В/деление. Строим векторы фазных напряжений, а затем векторы токов. Длина вектора соответствует в масштабе модулю показательной формы соответствующего выражения тока или напряжения, а угол, под которым этот вектор строится к вещественной оси, равен аргументу комплексного значения величины.

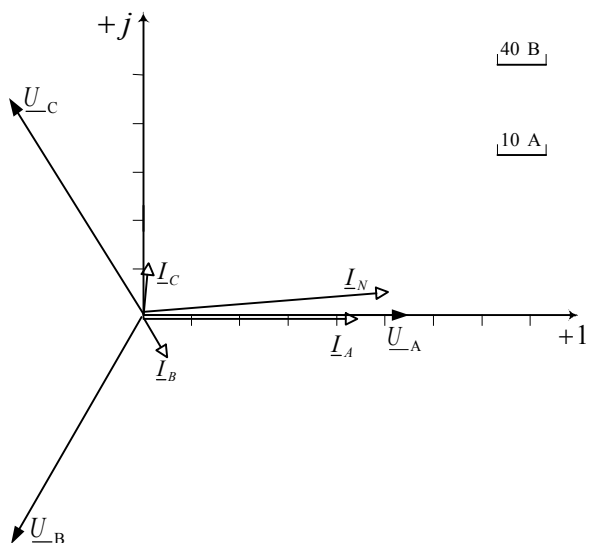


Рисунок 10 – Векторная диаграмма при соединении потребителей звездой с нейтральным проводом

2 Расчёт трёхфазной цепи при соединении потребителей треугольником.

Нарисуем схему трёхфазной цепи, причем элементы из фазы A, B, C соединения потребителей звездой подключим соответственно между точками ab, bc, ca при соединении потребителей треугольником (рисунок 11).

В комплексной форме записи линейные напряжения на нагрузке:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{ab} = U_{\text{л}} e^{j30^\circ} = 380 e^{j30^\circ} = 329 + j190 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_{bc} = U_{\text{л}} e^{-j90^\circ} = 380 e^{-j90^\circ} = -j380 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_{ca} = U_{\text{л}} e^{j150^\circ} = 380 e^{j150^\circ} = -329 + j190 \text{ В}.$$

Сопровитления фаз нагрузки в комплексной форме

$$\underline{z}_{ab} = r_1 = 5 \text{ Ом}; \underline{z}_{bc} = r_2 - jx_{C2} = 10 - j20 \text{ Ом}; \underline{z}_{ca} = r_2 + jx_{L3} = 15 + j10 \text{ Ом}.$$

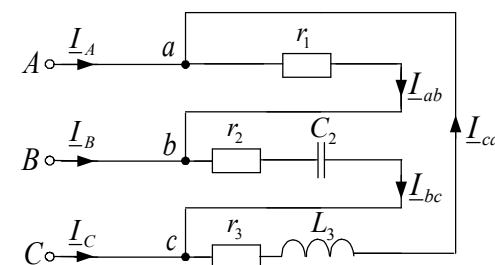


Рисунок 11 – Схема трёхфазной цепи при соединении потребителей треугольником

Фазные токи определяем по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{z}_{ab}} = \frac{329 + j190}{5} = 65,8 + j38 = 76 e^{j30^\circ} \text{ А},$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{z}_{bc}} = \frac{-j380}{10 - j20} = 15,2 - j7,6 = 17 e^{-j26^\circ 34'} \text{ А},$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{z}_{ca}} = \frac{-329 + j190}{15 + j10} = -9,34 + j18,9 = 21,07 e^{-j116^\circ 19'} \text{ А}.$$

Для определения линейных токов используем первый закон Кирхгофа для точек a, в, с схемы (см. рисунок 11):

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 65,8 + j38 - (-9,34 + j18,9) = \\ &= 75,14 + j19,11 = 77,53 e^{j14^\circ 16'} \text{ А}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 15,2 - j7,6 - (65,8 + j38) = \\ &= -50,6 - j45,6 = 68,12 e^{-j138^\circ} \text{ А}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_C &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = -9,34 + j18,9 - (15,2 - j7,6) = \\ &= -24,54 + j26,49 = 36,11 e^{j132^\circ 49'} \text{ А}. \end{aligned}$$

Полные комплексные мощности:

$$\underline{S}_{ab} = \underline{U}_{ab} \underline{I}_{ab}^* = (329 + j190) \cdot (65,8 - j38) = 28868 \text{ В} \cdot \text{А},$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{bc} &= \underline{U}_{bc} \underline{I}_{bc}^* = (-j380) \cdot (15,2 + j7,6) = \\ &= 2888 - j5776 = 6458 e^{-j63^{\circ}26'} \text{ В} \cdot \text{А}, \\ \underline{S}_{ca} &= \underline{U}_{ca} \underline{I}_{ca}^* = (-329 + j190) \cdot (-9,34 - j18,9) = \\ &= 6663,9 + j4443,5 = 8009 e^{j33^{\circ}41'} \text{ В} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Трёхфазная активная мощность

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = 28868 + 2888 + 6663,9 = 38420 \text{ Вт.}$$

Трёхфазная реактивная мощность

$$\begin{aligned} Q &= Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca} = \\ &= 0 - 5776 + 4443,5 = -1332,5 \text{ вар.} \end{aligned}$$

Трёхфазная полная мощность

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{P^2 + Q^2} = \\ &= \sqrt{38420^2 + (-1332,5)^2} = 38443,1 \text{ В} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Векторную диаграмму токов для нагрузки, соединенной треугольником, строим в масштабе на комплексной плоскости относительно осей +1 и +j (рисунок 12).

На векторной диаграмме линейные токи получены на основании первого закона Кирхгофа, путем вычитания одного вектора фазного тока из соответствующего другого.

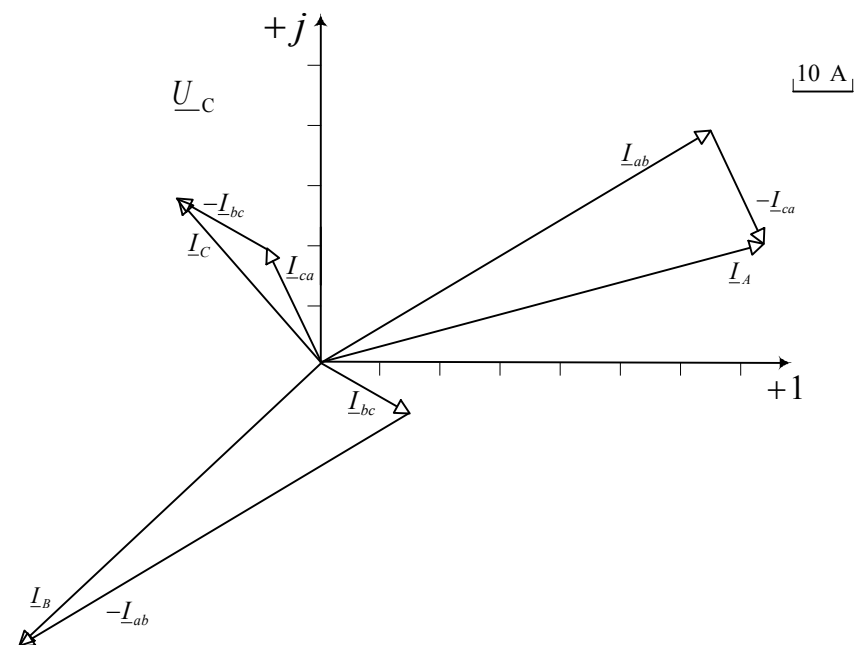


Рисунок 12 – Векторная диаграмма токов для нагрузки, соединённой треугольником

Задача 1. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для электрической цепи постоянного тока известны ЭДС E_1, E_2 и внутренние сопротивления r_{01}, r_{02} источников питания, а также сопротивления r_1-r_6 .

Необходимо:

1 Составить систему уравнений для определения токов путем непосредственного применения законов Кирхгофа. Решать эту систему уравнений не следует.

2 Определить токи ветвей методом контурных токов.

3 Составить баланс мощностей.

4 Построить потенциальную диаграмму для контура, включающего две ЭДС.

Значения параметров элементов цепи приведены в таблице 1, схема электрической цепи постоянного тока представлена на рисунке 13. Теоретический материал и пример расчета приведен в примере 1, а также в учебниках [1. С. 24–35, 56–59; 3. С. 17–53].

Таблица 1 – Числовые значения исходных данных к задаче 1

Вариант	E_1	E_2	r_{01}	r_{02}	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6
	В		Ом							
1	27	12	0,1	0,8	5	3	7	6	3	7
2	12	127	0,3	0,6	3	8	5	3	4	5
3	127	110	0,1	1,0	9	4	5	5	6	7
4	127	12	0,4	1,2	4	7	2	2	4	5
5	36	127	0,5	0,7	6	3	9	3	5	3
6	220	36	0,3	0,8	6	8	3	6	4	6
7	127	220	0,6	1,2	7	4	1	2	5	8
8	220	380	0,5	1,5	9	3	6	5	3	8
9	127	36	0,7	1,2	5	3	7	5	8	9
0	36	220	1,8	2,8	9	6	3	8	6	3

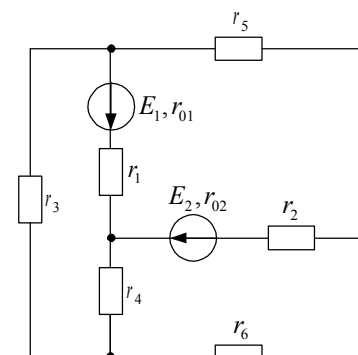


Схема 00

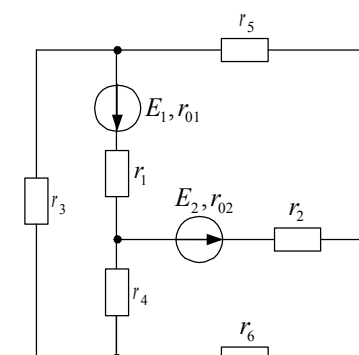


Схема 01

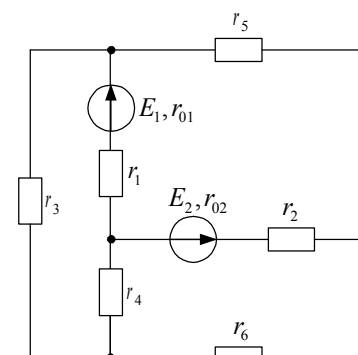


Схема 02

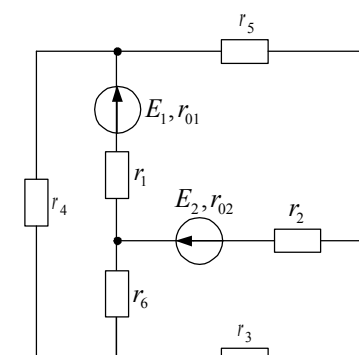


Схема 03

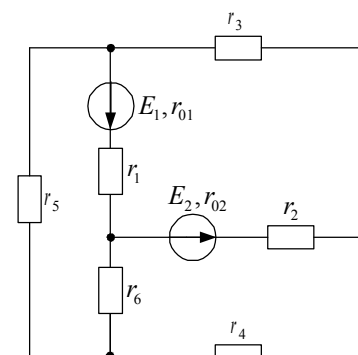


Схема 04

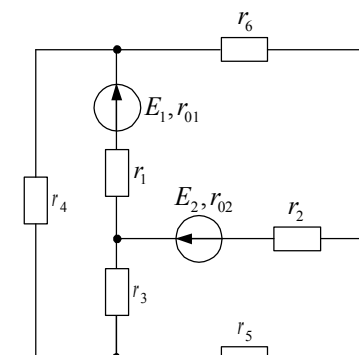


Схема 05

Рисунок 13 (начало) – Варианты электрических цепей к задаче 1

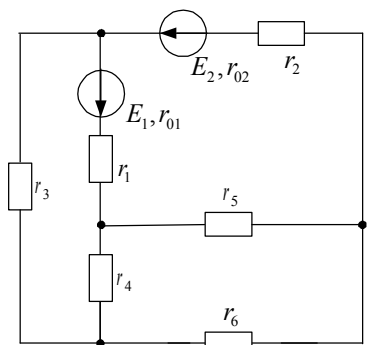


Схема 06

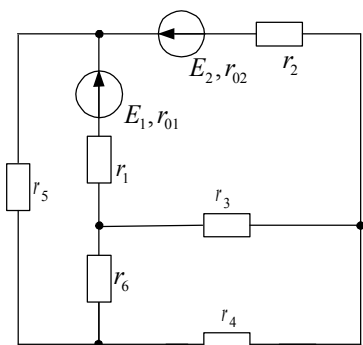


Схема 07

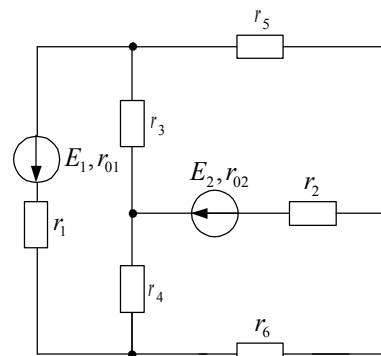


Схема 12

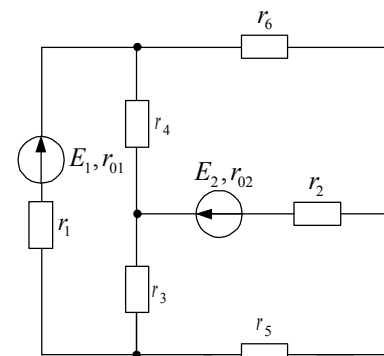


Схема 13

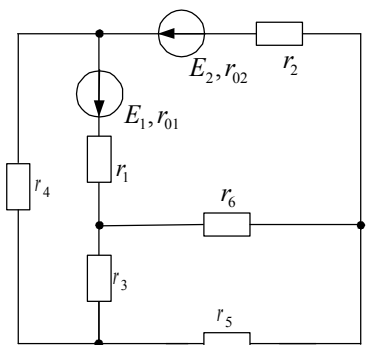


Схема 08

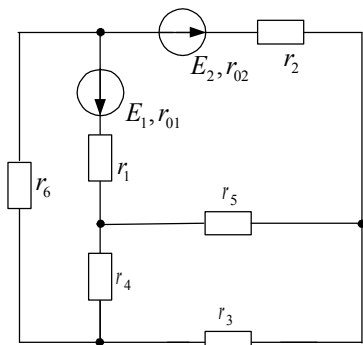


Схема 09

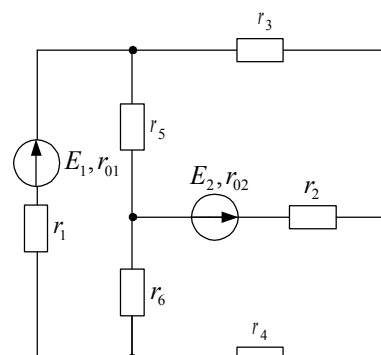


Схема 14

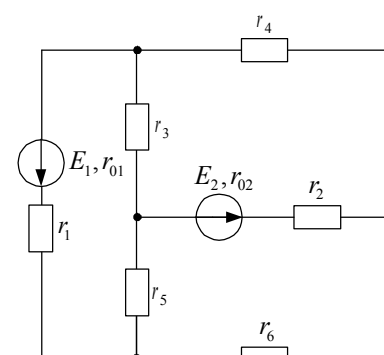


Схема 15

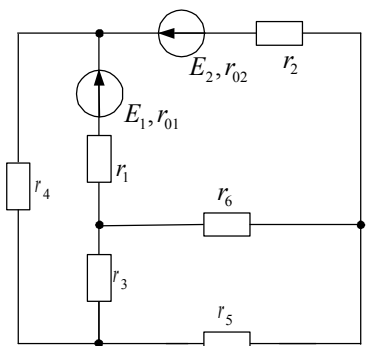


Схема 10

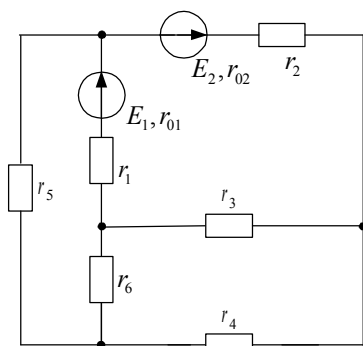


Схема 11

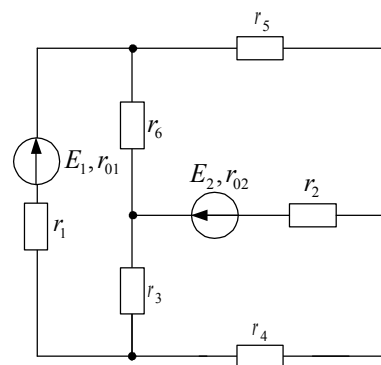


Схема 16

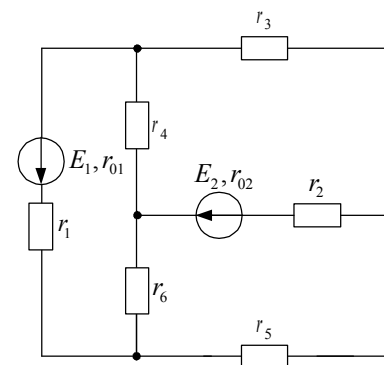


Схема 17

Рисунок 13 (продолжение)

Рисунок 13 (продолжение)

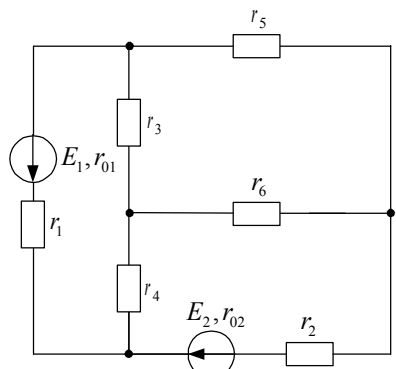


Схема 18

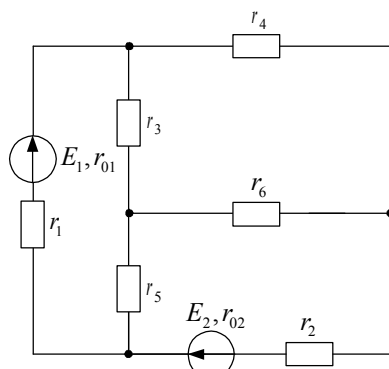


Схема 19

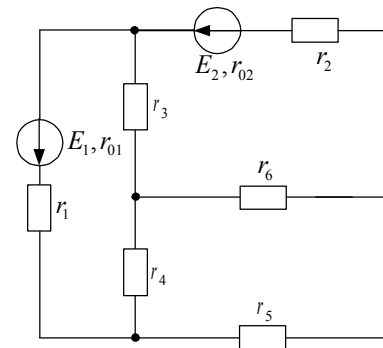


Схема 24

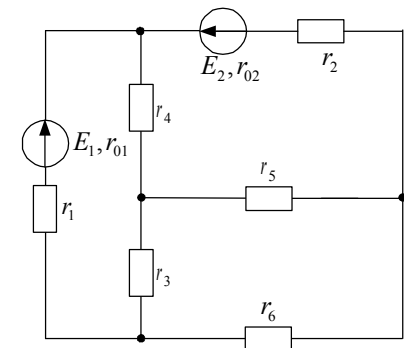


Схема 25

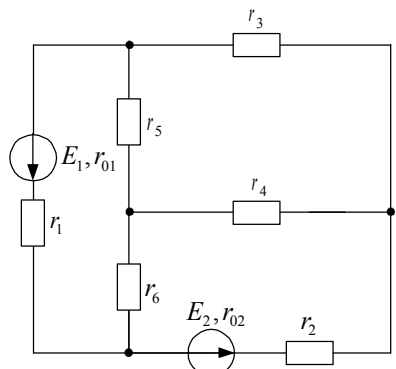


Схема 20

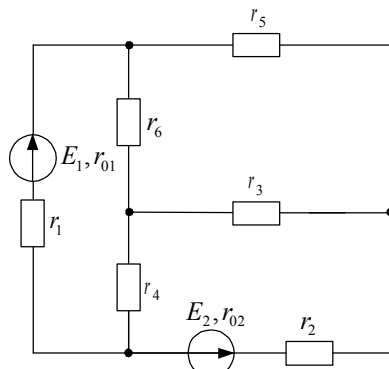


Схема 21

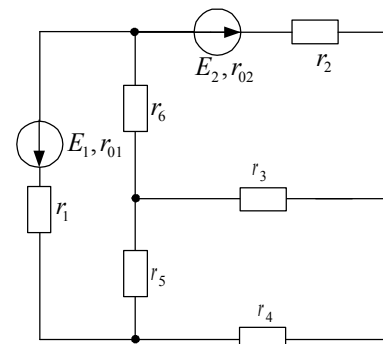


Схема 26

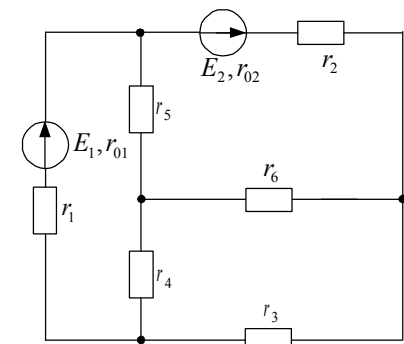


Схема 27

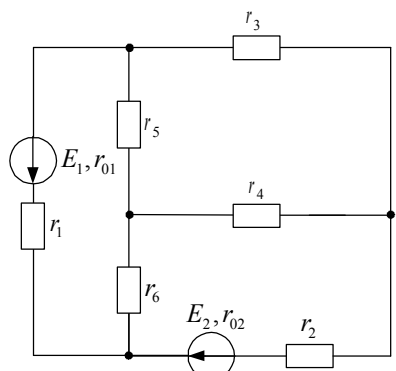


Схема 22

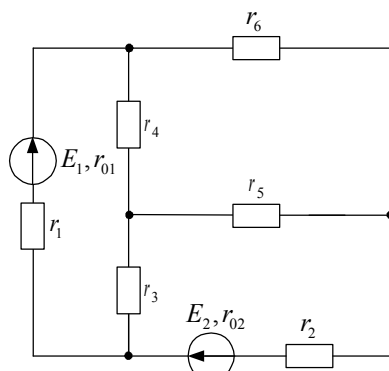


Схема 23

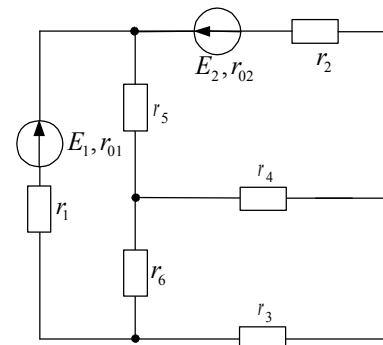


Схема 28

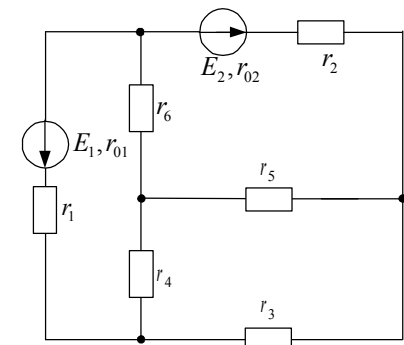


Схема 29

Рисунок 13 (продолжение)

Рисунок 13 (продолжение)

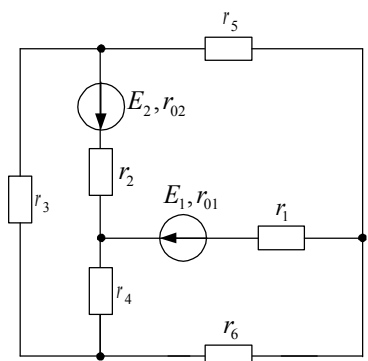


Схема 30

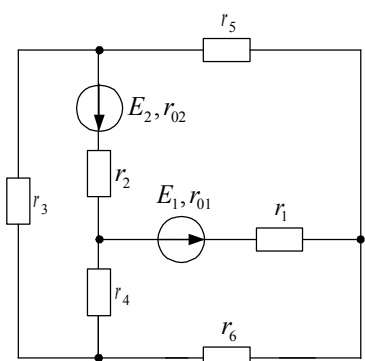


Схема 31

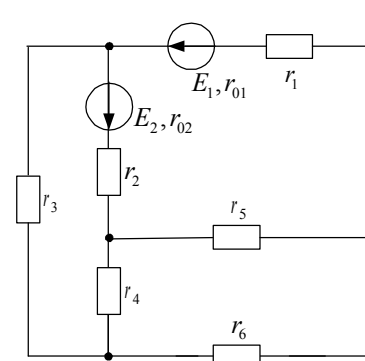


Схема 36

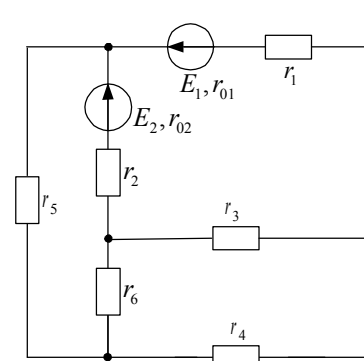


Схема 37

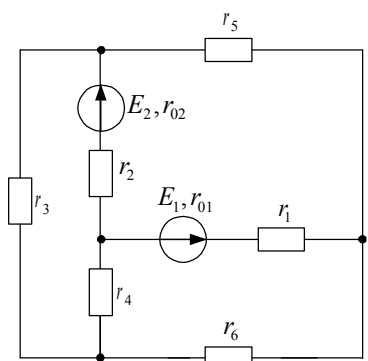


Схема 32

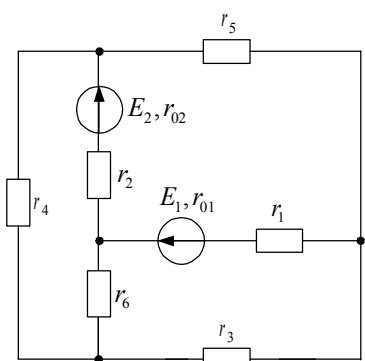


Схема 33

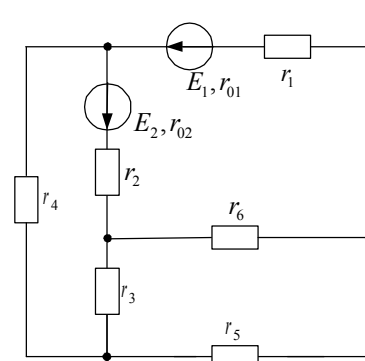


Схема 38

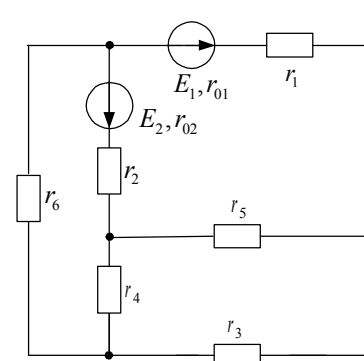


Схема 39

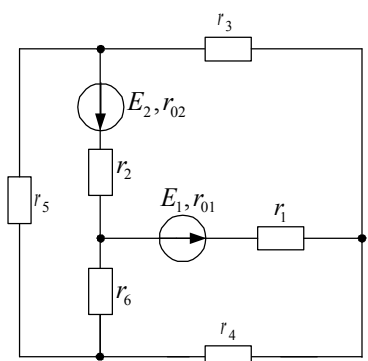


Схема 34

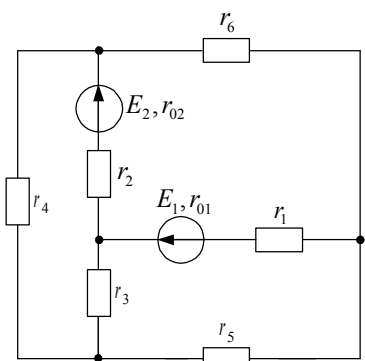


Схема 35

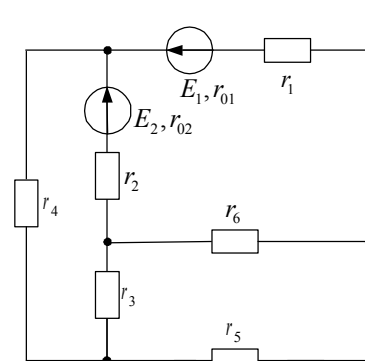


Схема 40

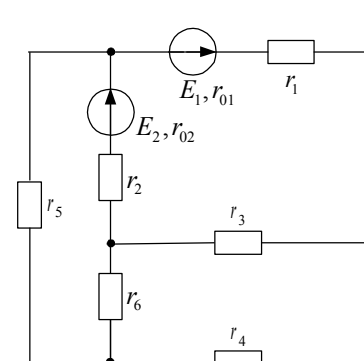


Схема 41

Рисунок 13 (продолжение)

Рисунок 13 (продолжение)

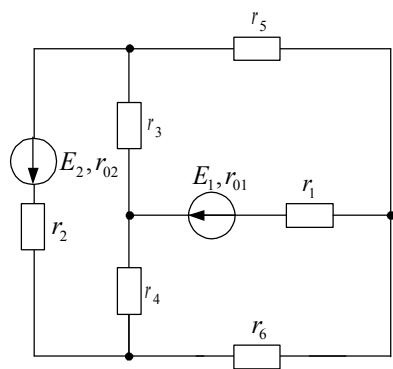


Схема 42

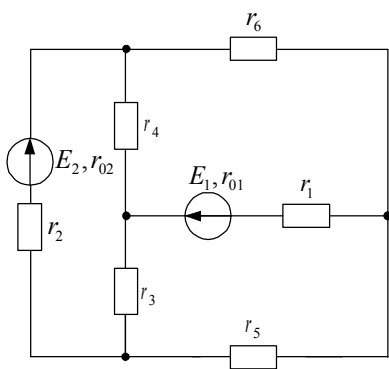


Схема 43

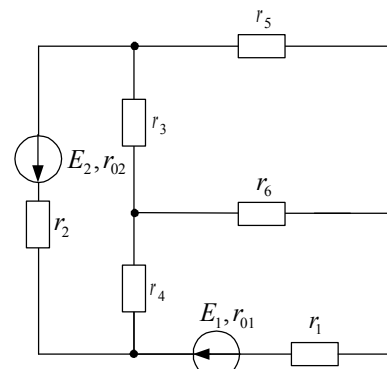


Схема 48

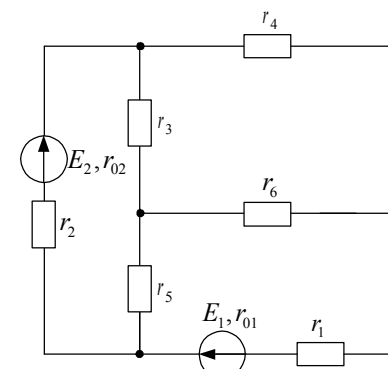


Схема 49

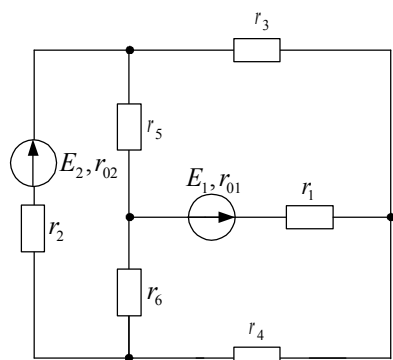


Схема 44

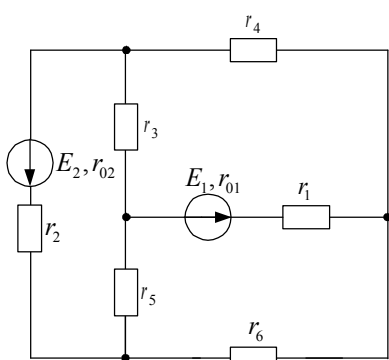


Схема 45

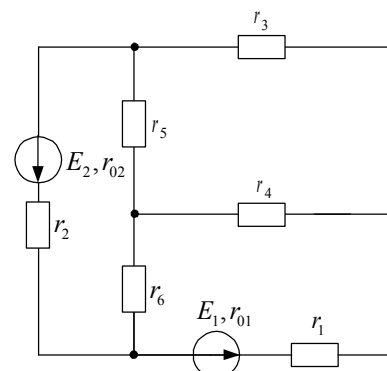


Схема 50

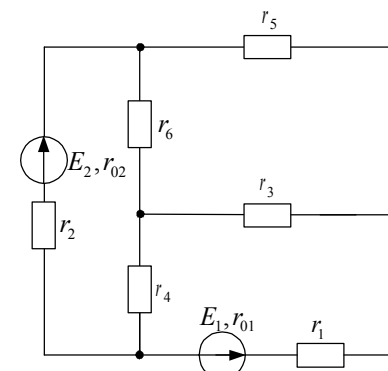


Схема 51

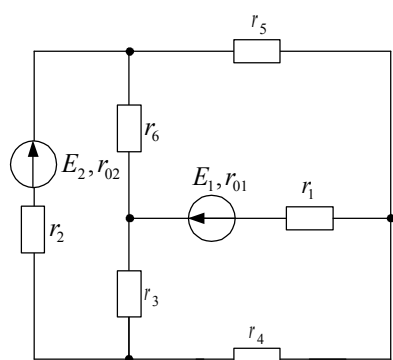


Схема 46

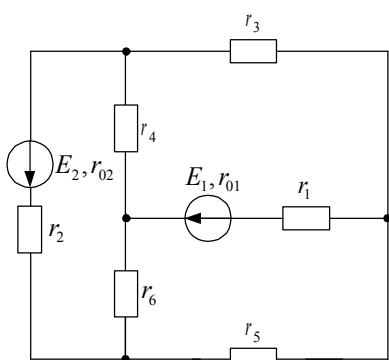


Схема 47

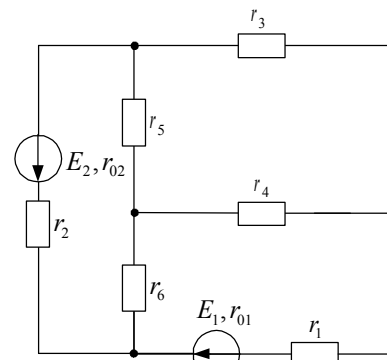


Схема 52

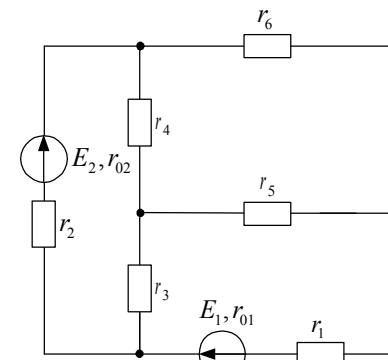


Схема 53

Рисунок 13 (продолжение)

Рисунок 13 (продолжение)

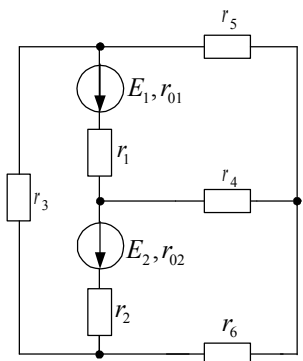


Схема 54

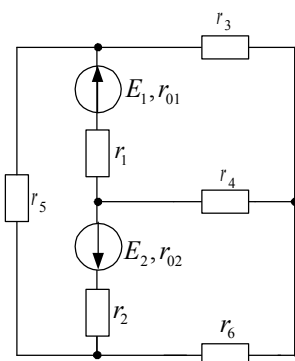


Схема 55

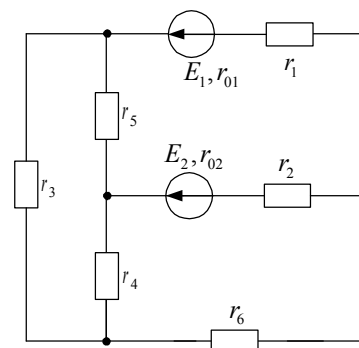


Схема 60

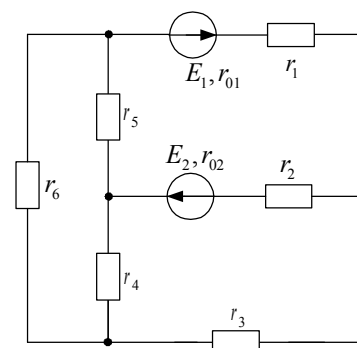


Схема 61

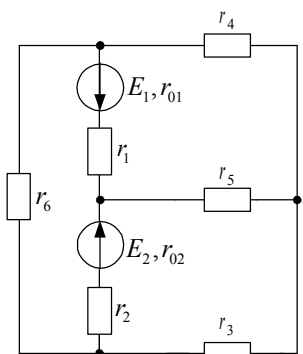


Схема 56

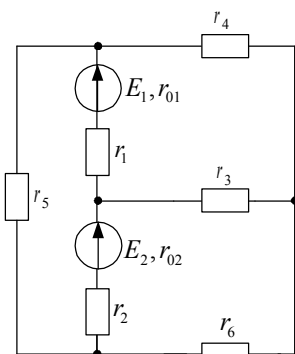


Схема 57

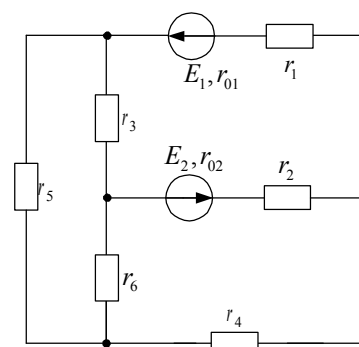


Схема 62

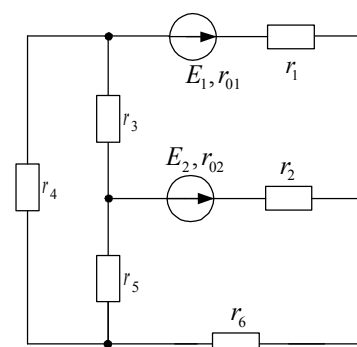


Схема 63

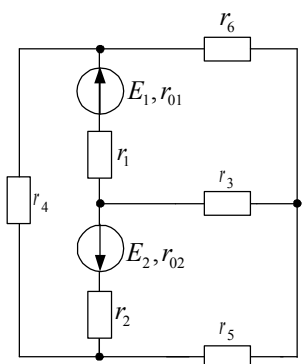


Схема 58

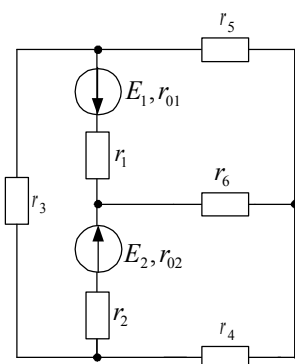


Схема 59

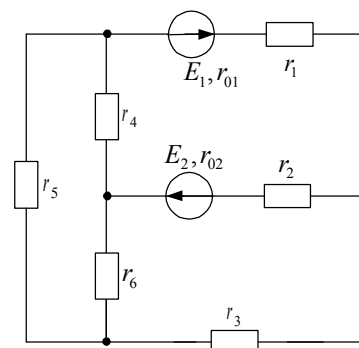


Схема 64

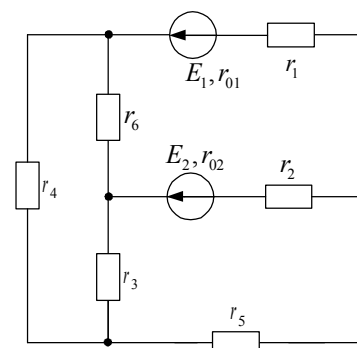


Схема 65

Рисунок 13 (продолжение)

Рисунок 13 (продолжение)

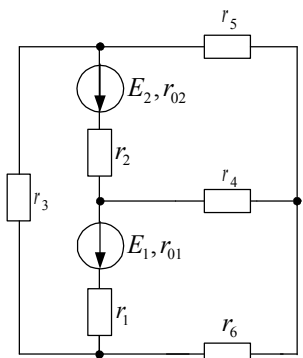


Схема 66

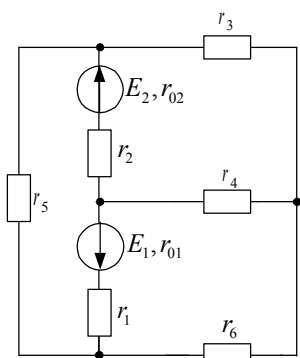


Схема 67

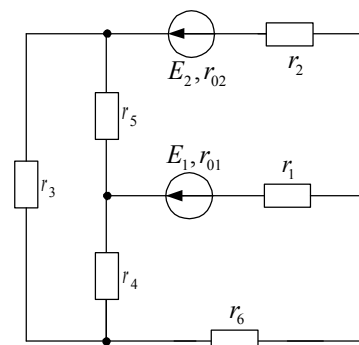


Схема 72

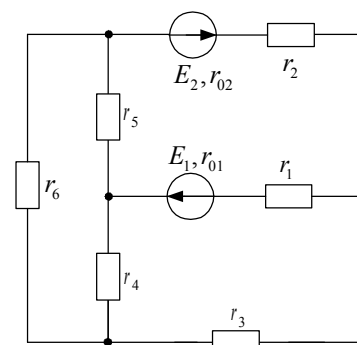


Схема 73

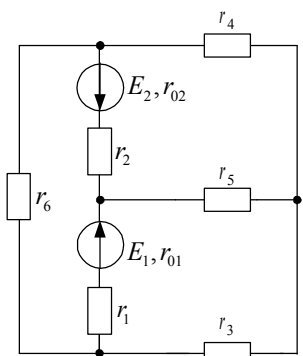


Схема 68

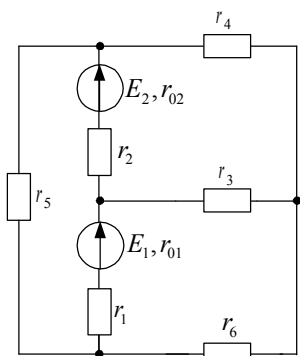


Схема 69

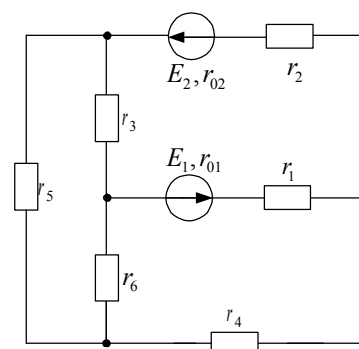


Схема 74

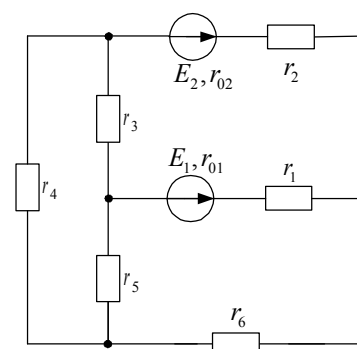


Схема 75

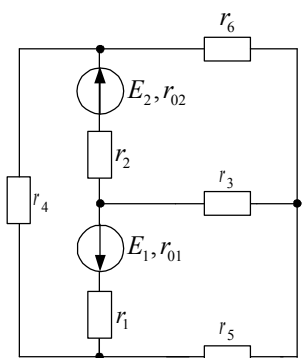


Схема 70

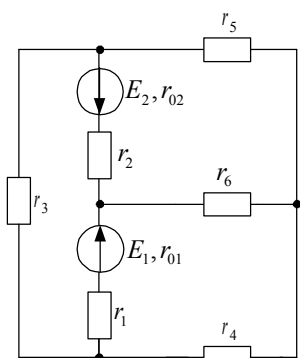


Схема 71

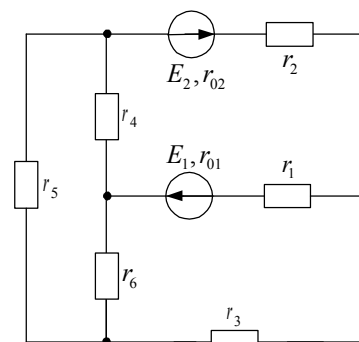


Схема 76

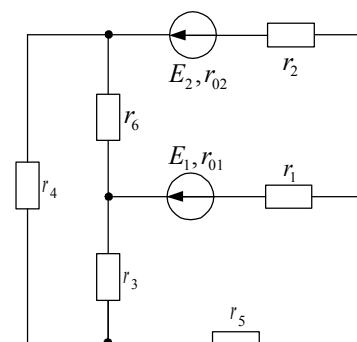


Схема 77

Рисунок 13 (продолжение)

Рисунок 13 (продолжение)

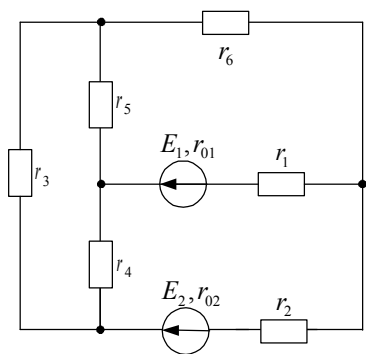


Схема 78

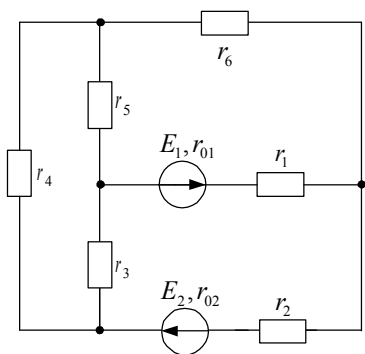


Схема 79

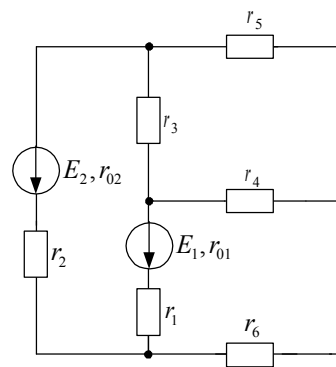


Схема 84

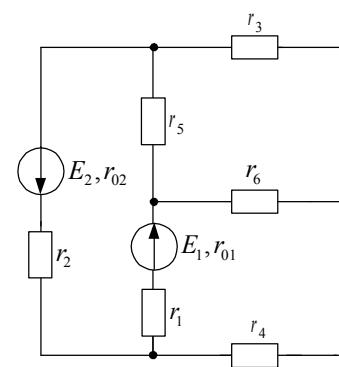


Схема 85

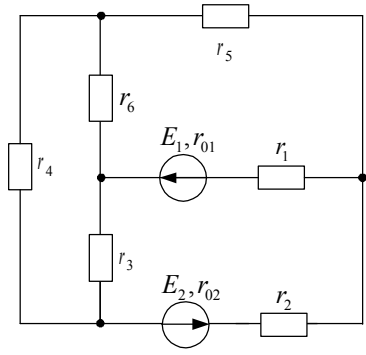


Схема 80

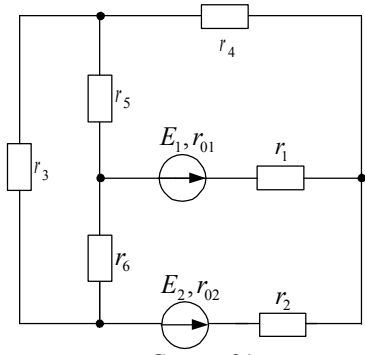


Схема 81

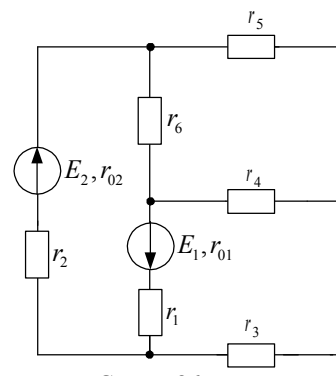


Схема 86

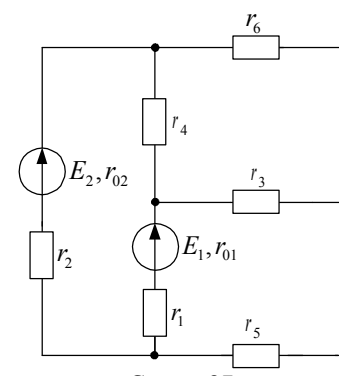


Схема 87

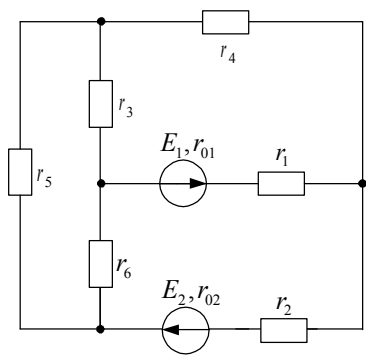


Схема 82

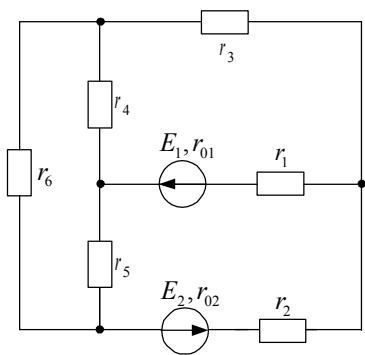


Схема 83

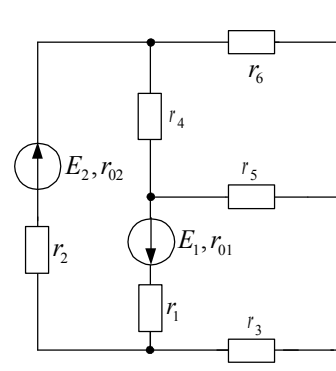


Схема 88

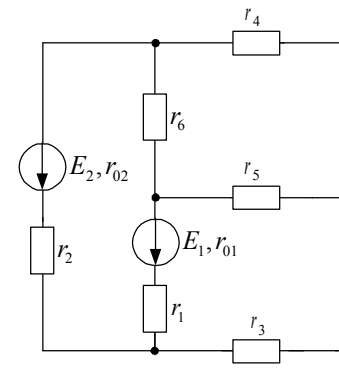


Схема 89

Рисунок 13 (продолжение)

Рисунок 13 (продолжение)

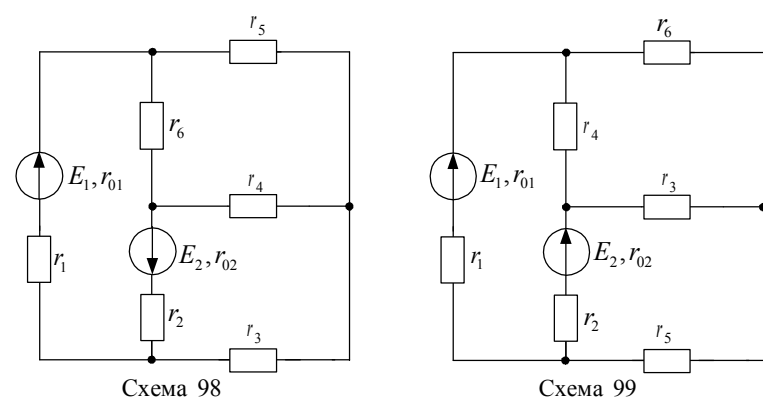
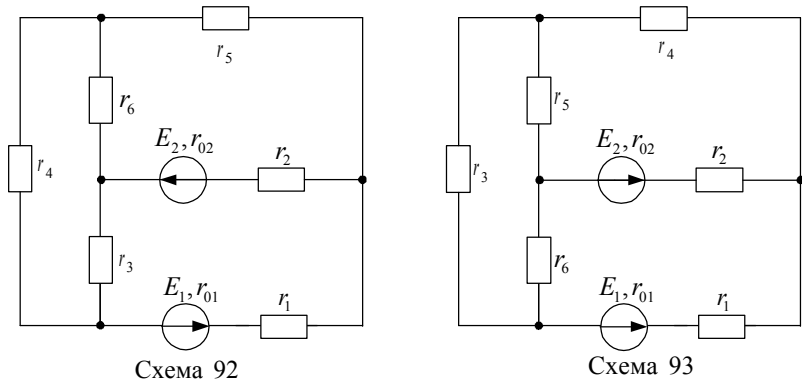
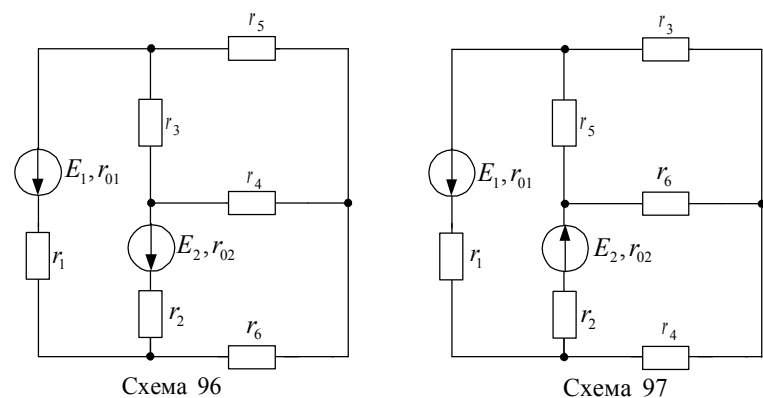
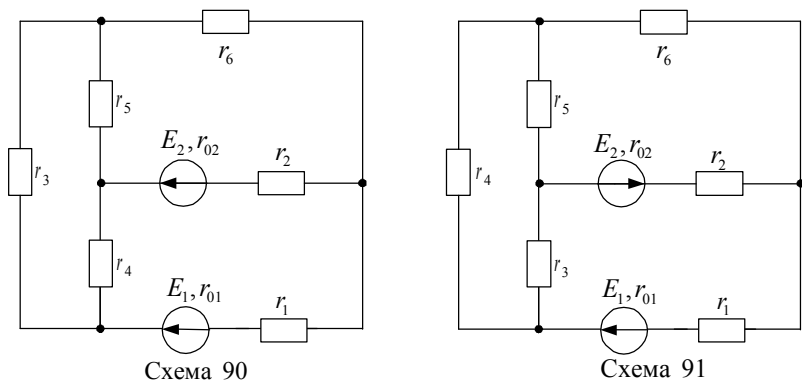


Рисунок 13 (окончание)

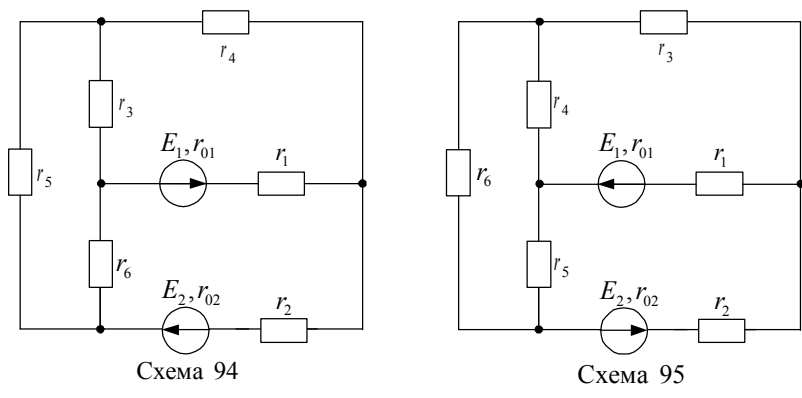


Рисунок 13 (продолжение)

Задача 2. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Электрическая цепь синусоидального тока, подключённая к сети переменного тока с напряжением U и частотой 50 Гц, имеет параметры, численные значения которых приведены в таблице 2, схема цепи представлена на рисунке 14.

Необходимо:

- 1 Рассчитать сопротивления реактивных элементов цепи, комплексное эквивалентное сопротивление всей цепи.
- 2 Определить действующие значения токов в ветвях с помощью комплексных чисел.
- 3 Определить показания приборов, указанных на схеме.
- 4 Составить баланс активных и реактивных мощностей.

5 Определить характер (индуктивный или ёмкостный) и параметры элемента, который необходимо включить последовательно с источником питания, чтобы в цепи возник резонанс напряжений.

6 Построить векторную диаграмму, на которой изобразить векторы всех токов и напряжений на участках цепи.

Теоретический материал и пример расчета приведен в примере 2, а также в учебниках [1. С. 63–85, 114–122; 3. С.55–95].

Таблица 2 – Числовые значения исходных данных к задаче 2

Вариант	U , В	r_1 , Ом	L_1 , мГн	C_1 , мкФ	r_2 , Ом	L_2 , мГн	C_2 , мкФ	r_3 , Ом	L_3 , мГн	C_3 , мкФ
1	220	7	15	800	6	17	1000	10	14	280
2	127	5	20	200	8	18	800	9	16	300
3	380	9	45	400	7	20	600	8	15	400
4	380	3	80	300	6	48	400	7	13	380
5	127	6	10	500	5	13	500	6	17	420
6	220	7	14	1000	3	31	700	5	13	460
7	220	9	50	700	6	20	900	4	18	520
8	127	1	40	300	7	16	450	6	12	340
9	380	12	70	650	6	18	650	8	19	450
0	127	8	20	480	9	26	800	7	11	500

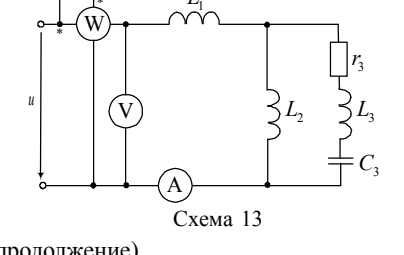
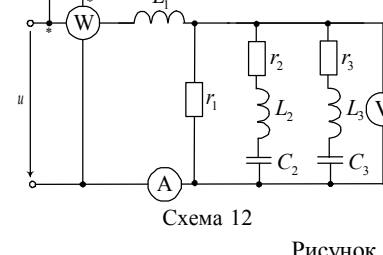
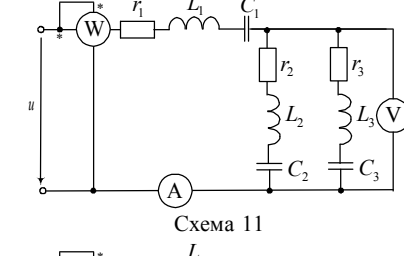
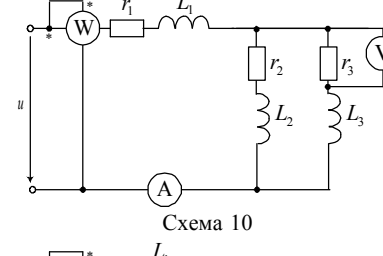
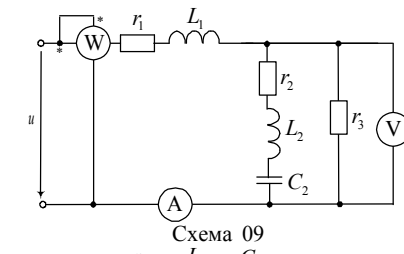
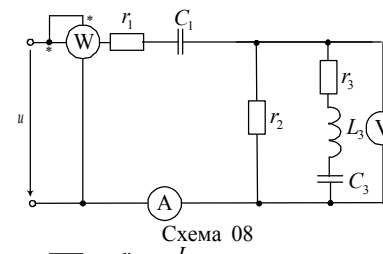
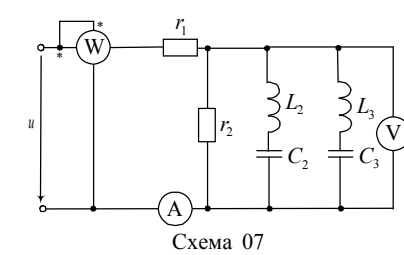
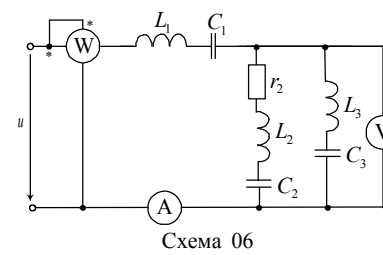
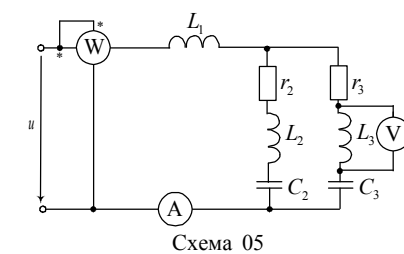
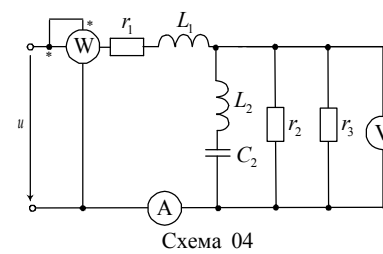
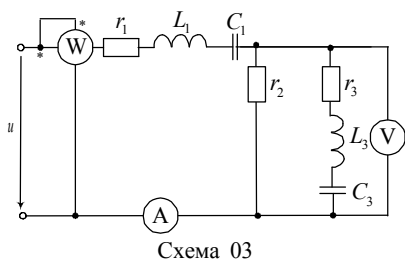
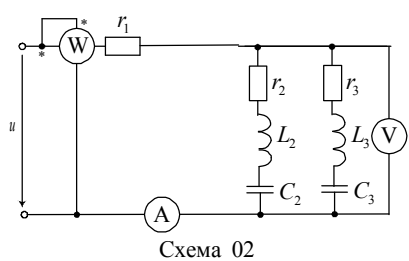
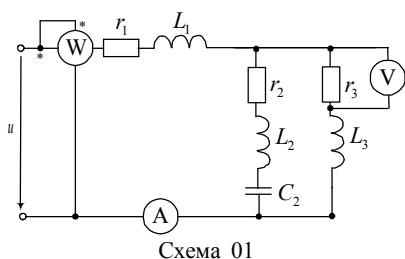
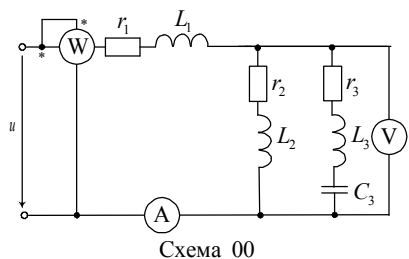


Рисунок 14 (начало) – Варианты электрических цепей к задаче 2

Рисунок 14 (продолжение)

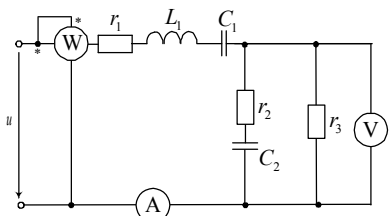


Схема 14

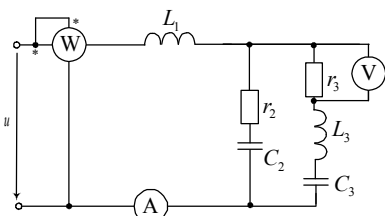


Схема 15

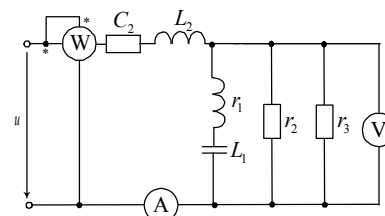


Схема 24

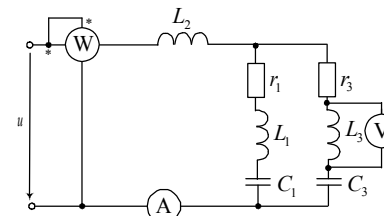


Схема 25

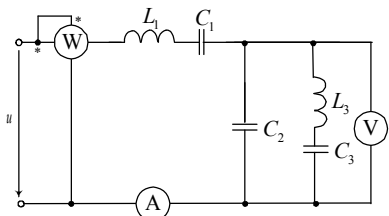


Схема 16

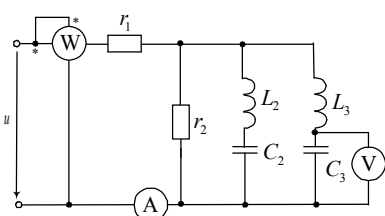


Схема 17

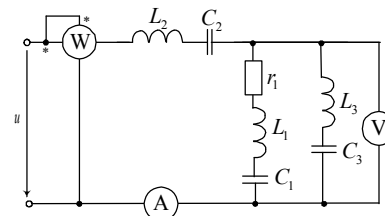


Схема 26

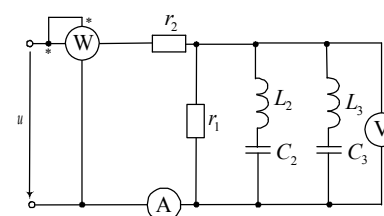


Схема 27

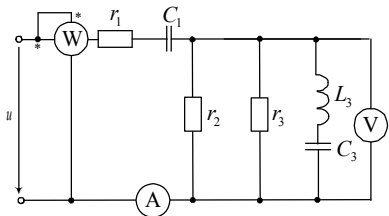


Схема 18

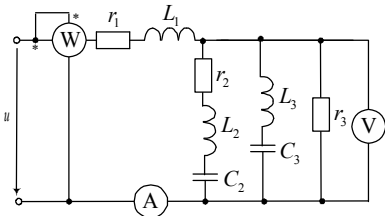


Схема 19

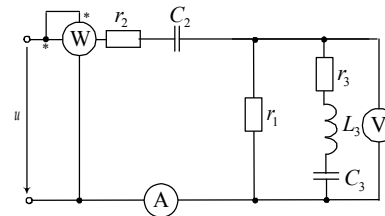


Схема 28

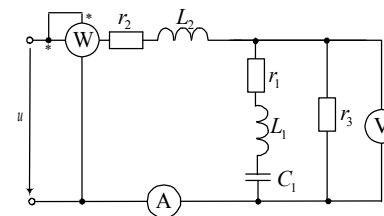


Схема 29

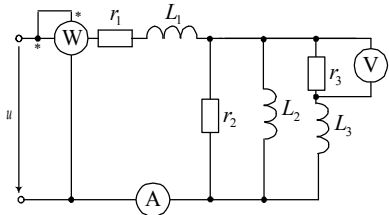


Схема 20

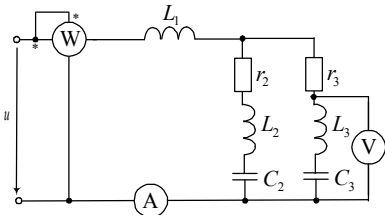


Схема 21

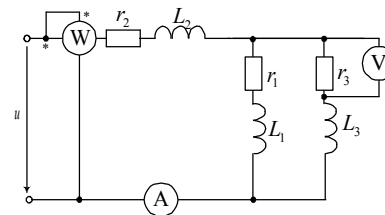


Схема 30

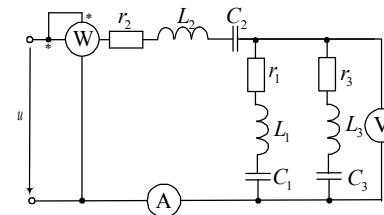


Схема 31

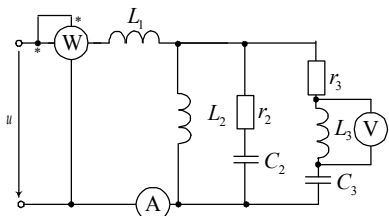


Схема 22

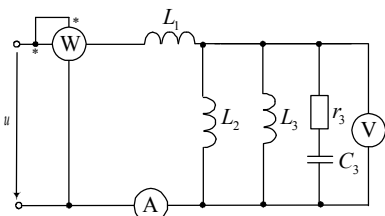


Схема 23

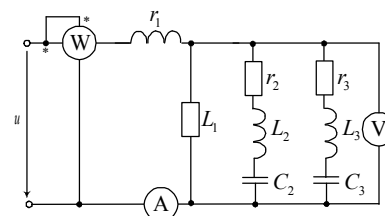


Схема 32

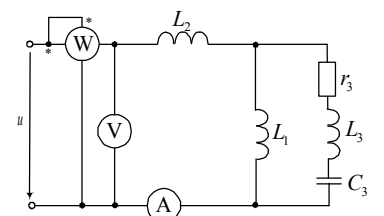


Схема 33

Рисунок 14 (продолжение)

Рисунок 14 (продолжение)

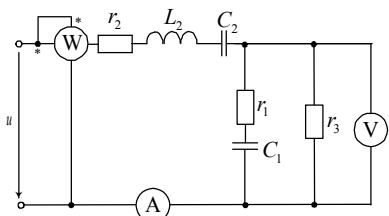


Схема 34

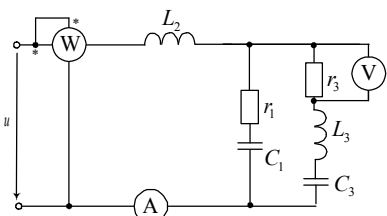


Схема 35

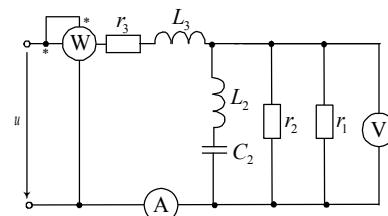


Схема 44

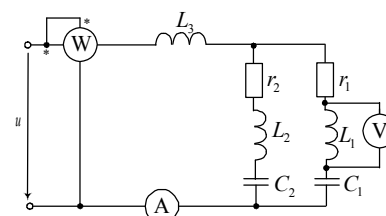


Схема 45

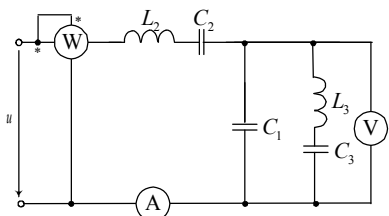


Схема 36

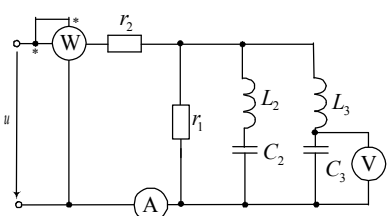


Схема 37

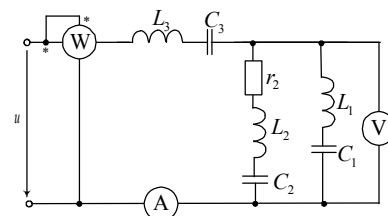


Схема 46

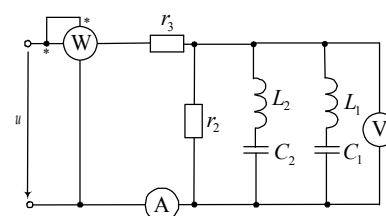


Схема 47

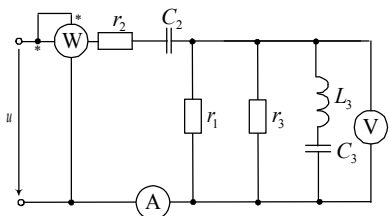


Схема 38

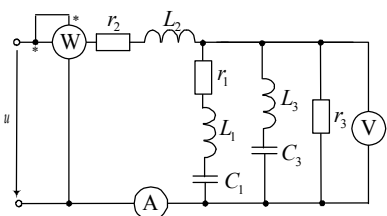


Схема 39

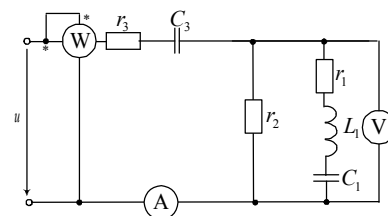


Схема 48

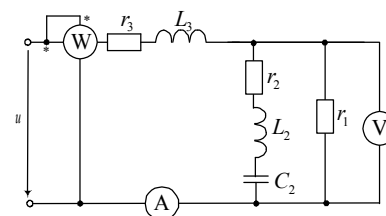


Схема 49

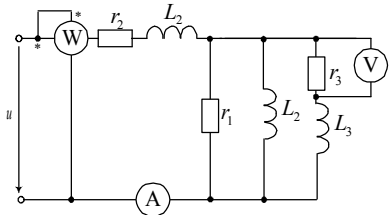


Схема 40

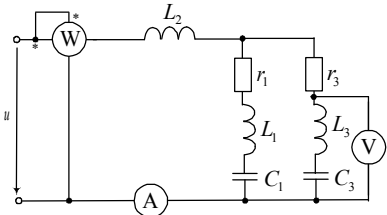


Схема 41

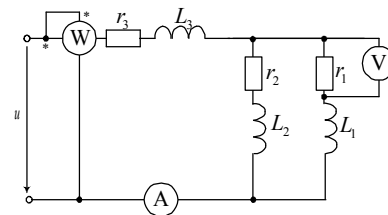


Схема 50

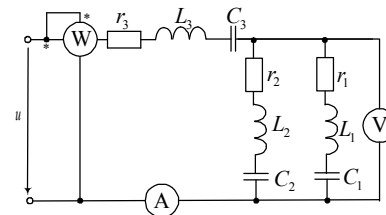


Схема 51

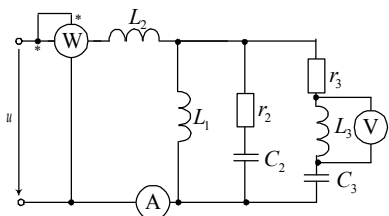


Схема 42

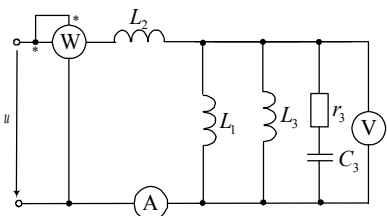


Схема 43

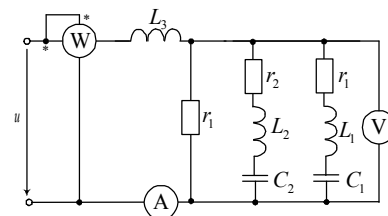


Схема 52

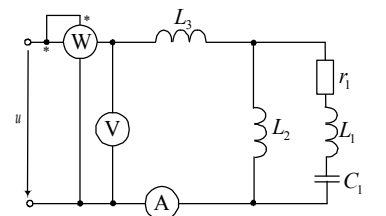


Схема 53

Рисунок 14 (продолжение)

Рисунок 14 (продолжение)

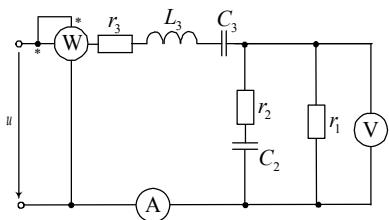


Схема 54

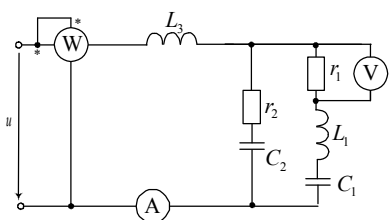


Схема 55

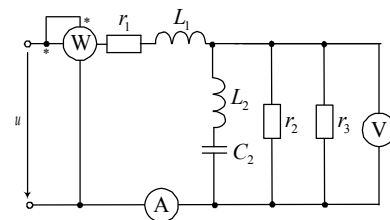


Схема 64

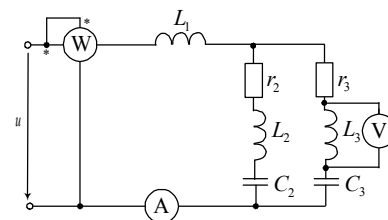


Схема 65

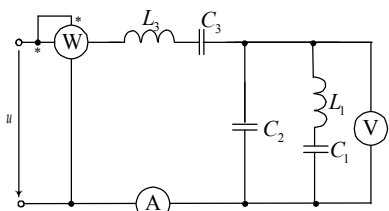


Схема 56

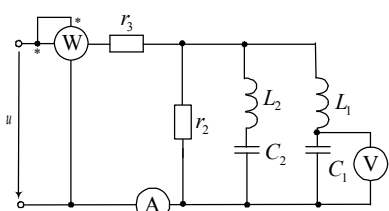


Схема 57

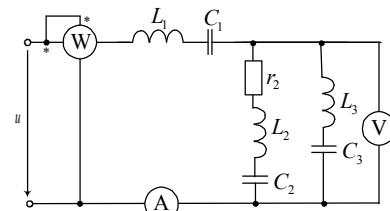


Схема 66

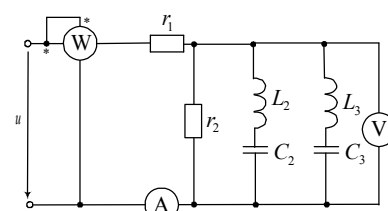


Схема 67

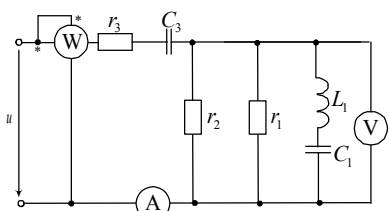


Схема 58

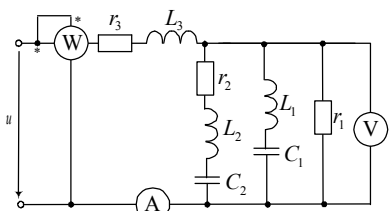


Схема 59

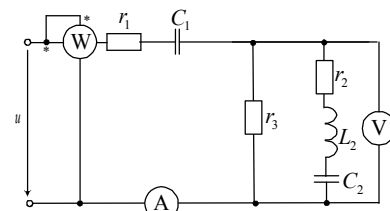


Схема 68

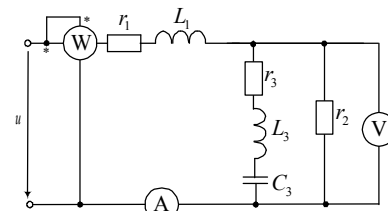


Схема 69

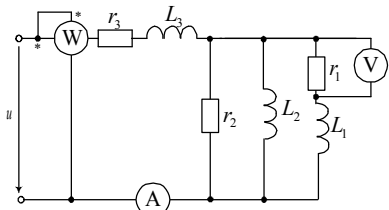


Схема 60

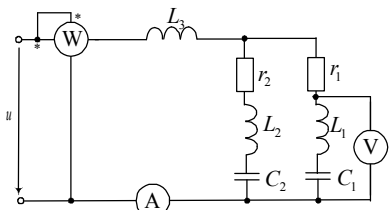


Схема 61

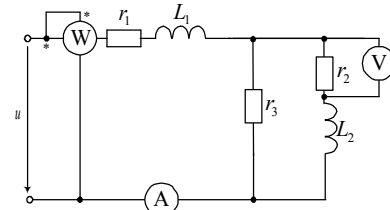


Схема 70

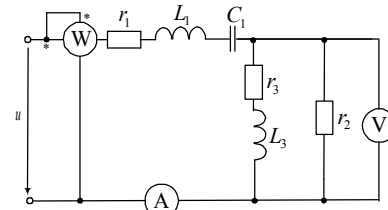


Схема 71

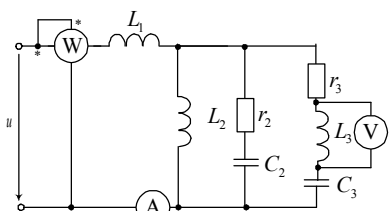


Схема 62

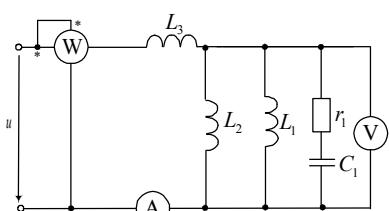


Схема 63

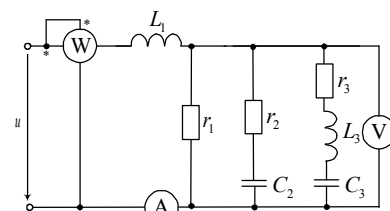


Схема 72

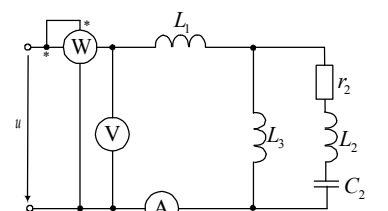


Схема 73

Рисунок 14 (продолжение)

Рисунок 14 (продолжение)

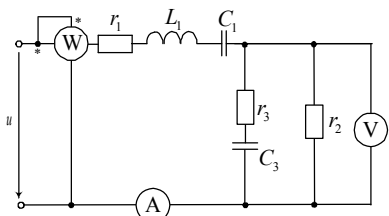


Схема 74

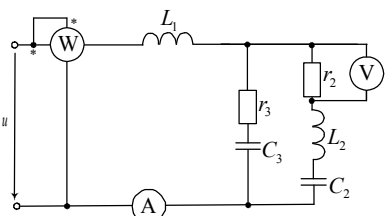


Схема 75

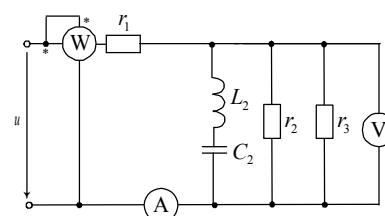


Схема 84

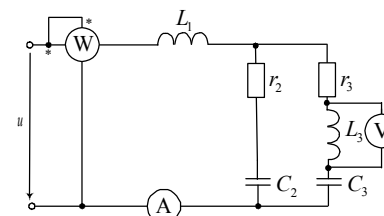


Схема 85

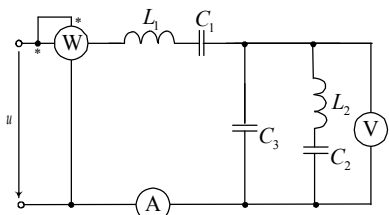


Схема 76

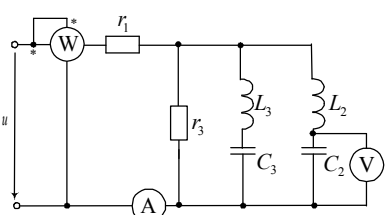


Схема 77

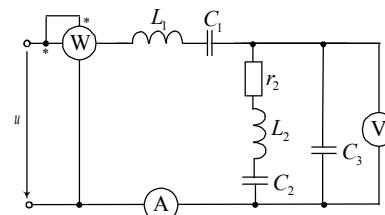


Схема 86

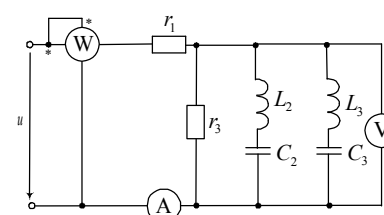


Схема 87

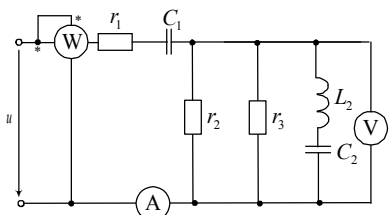


Схема 78

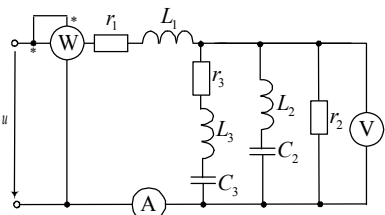


Схема 79

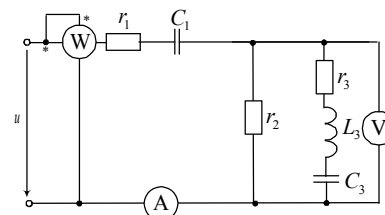


Схема 88

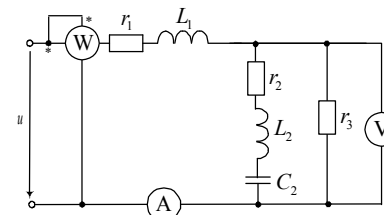


Схема 89

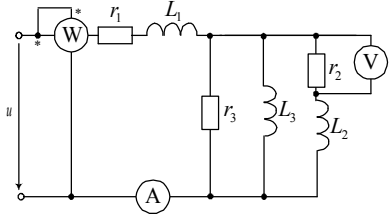


Схема 80

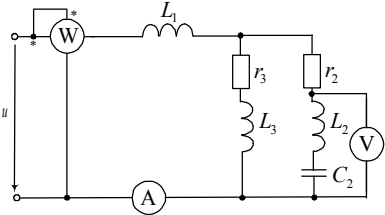


Схема 81

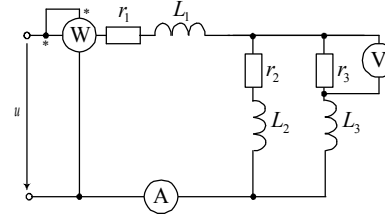


Схема 90

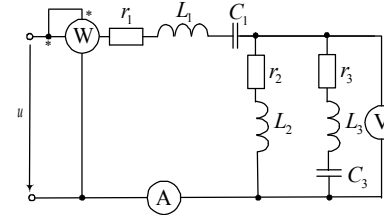


Схема 91

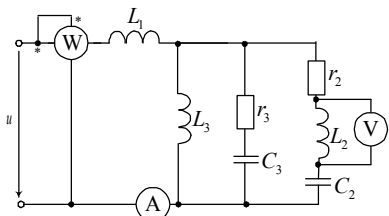


Схема 82

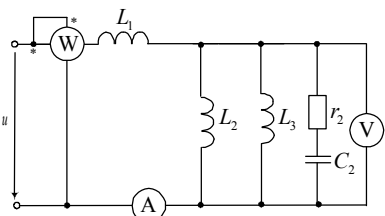


Схема 83

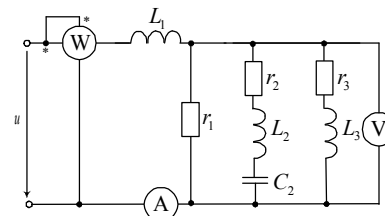


Схема 92

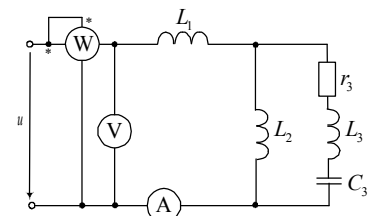


Схема 93

Рисунок 14 (продолжение)

Рисунок 14 (продолжение)

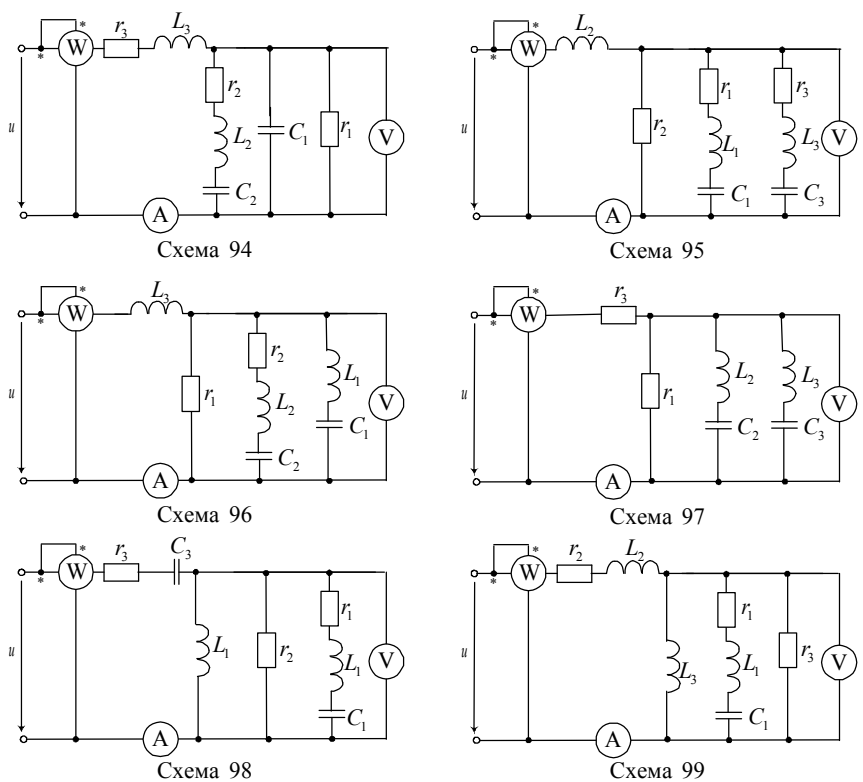


Рисунок 14 (окончание)

Задача 3. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ПРИЕМНИКАМИ, СОЕДИНЕННЫМИ «ЗВЕЗДОЙ» И «ТРЕУГОЛЬНИКОМ»

К трёхфазной симметричной сети с линейным напряжением U_L подключена цепь. Значения параметров элементов трёхфазной цепи приведены в таблице 3, схема трёхфазной цепи представлена на рисунке 15.

Необходимо:

1 При соединении приёмников звездой с нейтральным проводом определить токи в линейных и нейтральном проводах, а также активную и реактивную мощности, потребляемые нагрузкой при симметричной системе напряжений на нагрузке. Построить топографическую диаграмму напряжений и на ней показать векторы всех токов.

2 Те же элементы трёхфазной нагрузки включить треугольником и определить фазные и линейные токи. Рассчитать значения активной и реактивной мощностей, потребляемых нагрузкой. Построить векторную диаграмму напряжений и токов для этого случая.

Теоретический материал и пример расчета приведен в примере 3, а также в учебниках [1–4].

Таблица 3 – Числовые значения исходных данных к задаче 3

Вариант	U_L , В	Сопротивления, Ом								
		r_1 , Ом	L_1 , мГн	C_1 , мкФ	r_2 , Ом	L_2 , мГн	C_2 , мкФ	r_3 , Ом	L_3 , мГн	C_3 , мкФ
1	380	3	35	700	8	170	200	3	90	800
2	220	8	40	500	3	100	600	7	70	200
3	380	12	65	300	1	40	900	9	45	500
4	380	6	90	600	2	60	700	5	35	700
5	220	3	100	600	4	30	300	3	50	800
6	220	5	130	1200	9	50	400	1	13	600
7	380	3	30	700	7	70	700	8	80	570
8	220	8	50	300	6	90	350	5	50	390
9	380	10	90	650	3	55	550	3	30	750
0	220	2	40	300	2	47	700	11	110	200

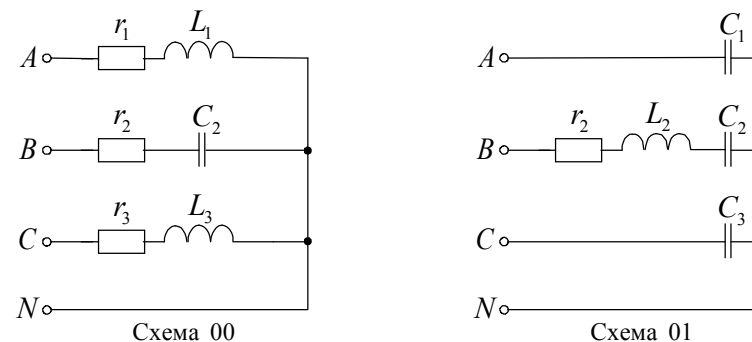


Рисунок 15 (начало) – Варианты электрических цепей к задаче 3

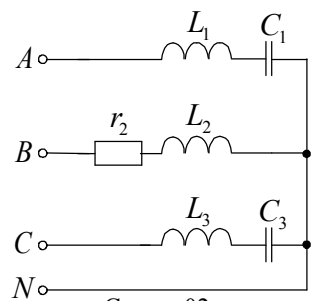


Схема 02

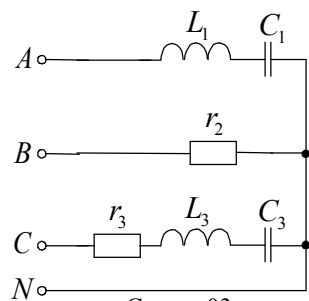


Схема 03

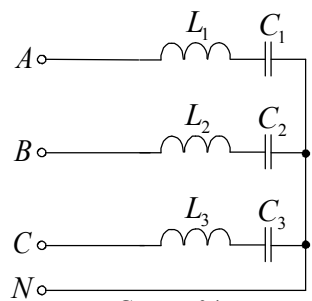


Схема 04

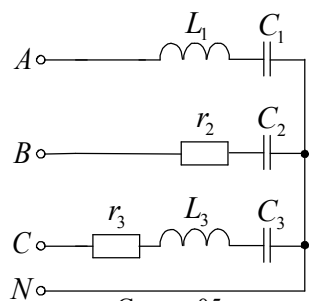


Схема 05

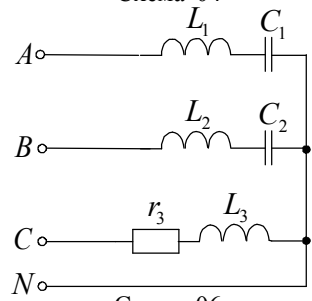


Схема 06

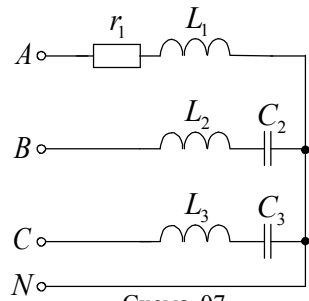


Схема 07

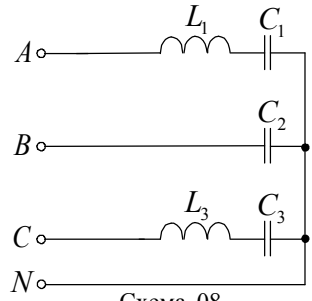


Схема 08

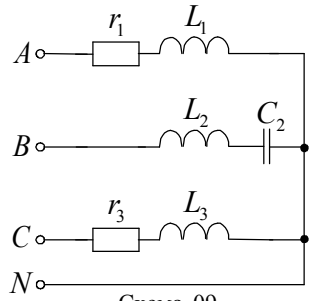


Схема 09

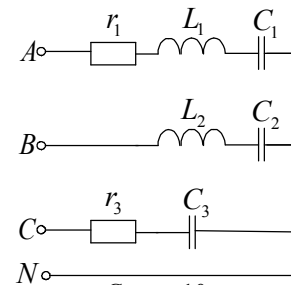


Схема 10

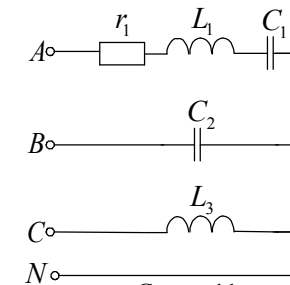


Схема 11

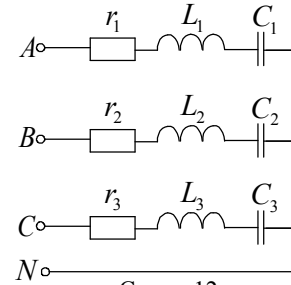


Схема 12

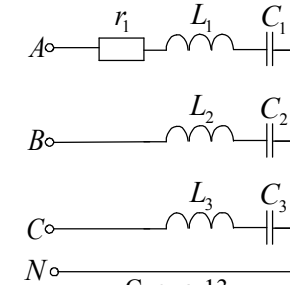


Схема 13

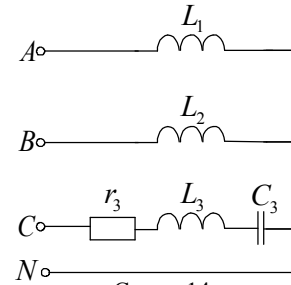


Схема 14

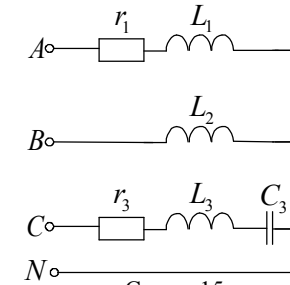


Схема 15

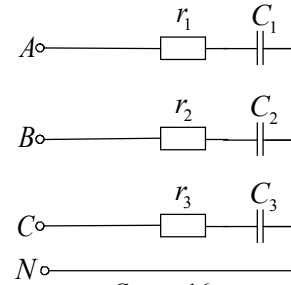


Схема 16

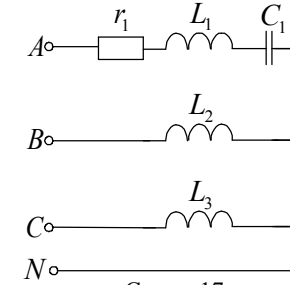


Схема 17

Рисунок 15 (продолжение)

Рисунок 15 (продолжение)

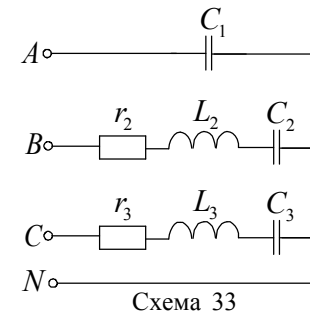
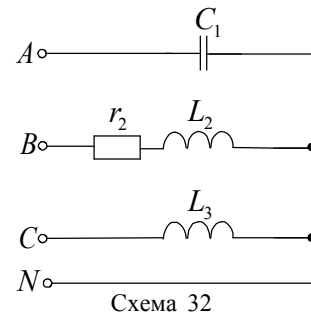
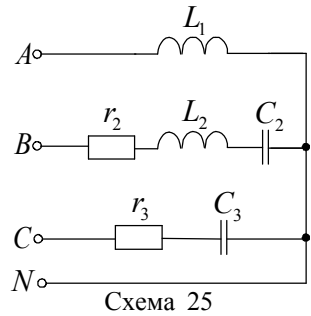
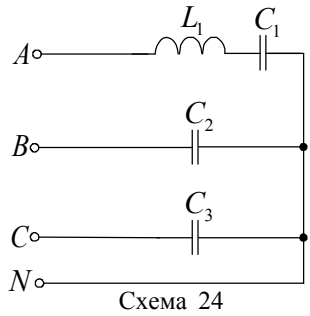
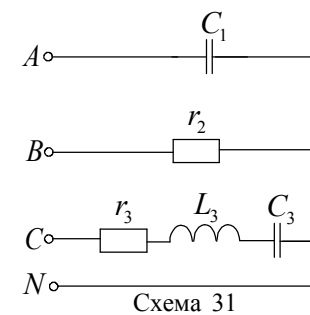
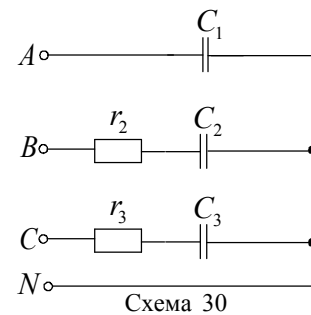
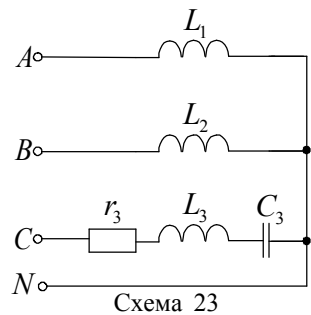
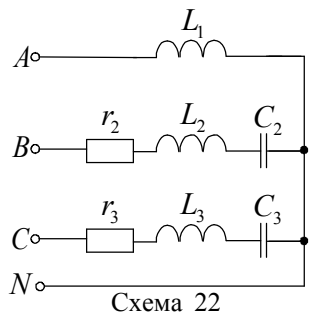
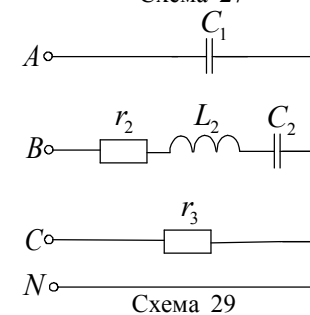
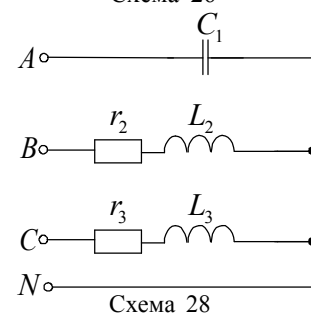
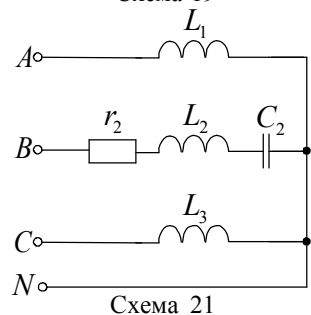
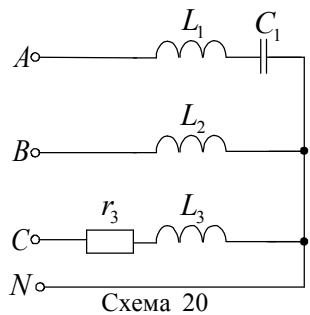
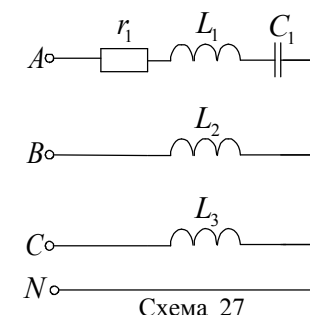
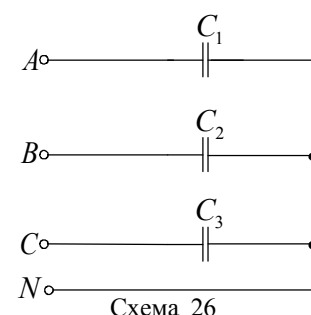
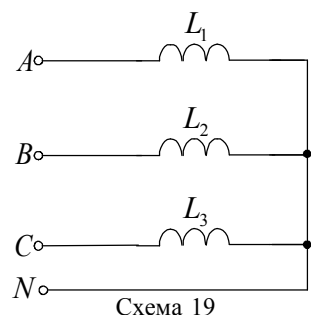
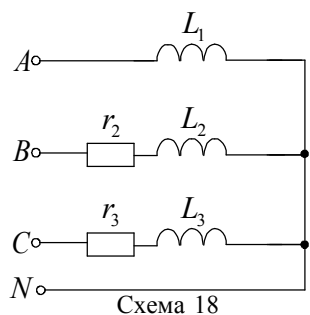


Рисунок 15 (продолжение)

Рисунок 15 (продолжение)

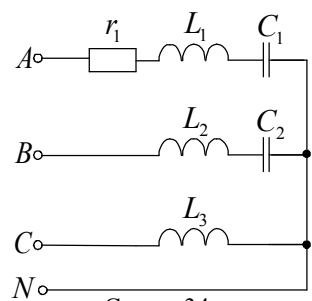


Схема 34

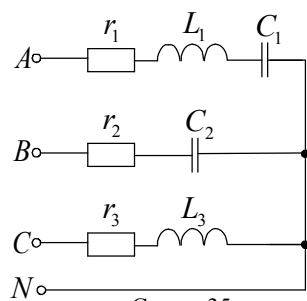


Схема 35

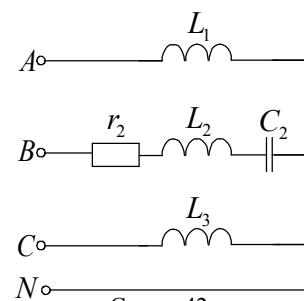


Схема 42

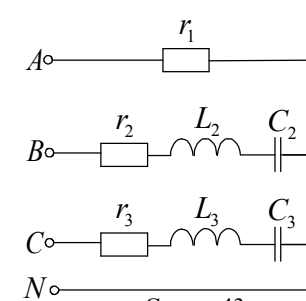


Схема 43

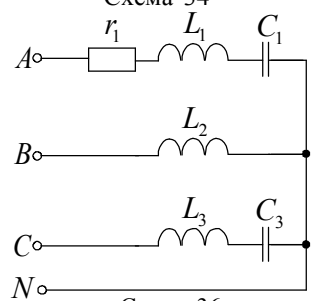


Схема 36

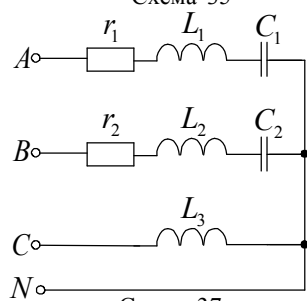


Схема 37

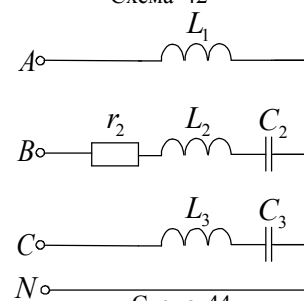


Схема 44

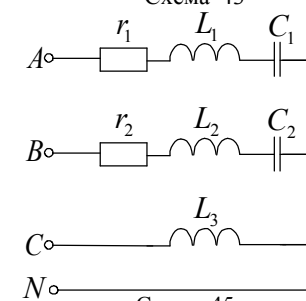


Схема 45

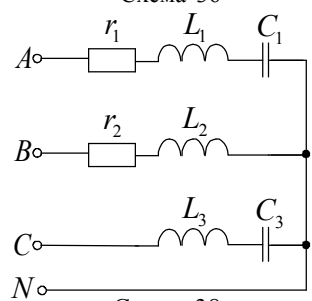


Схема 38

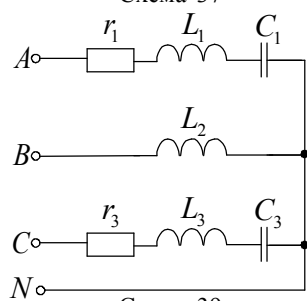


Схема 39

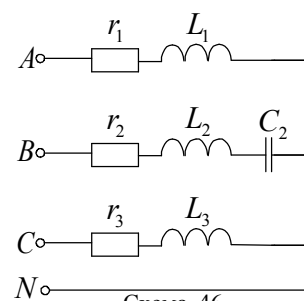


Схема 46

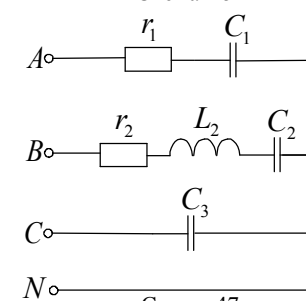


Схема 47

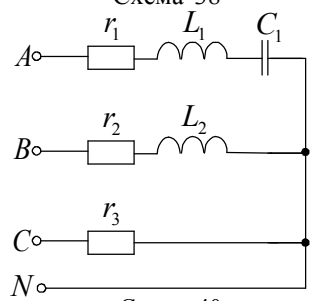


Схема 40

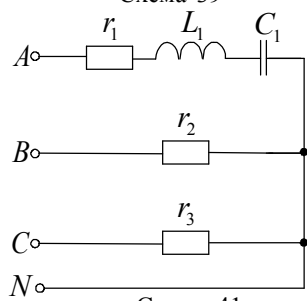


Схема 41

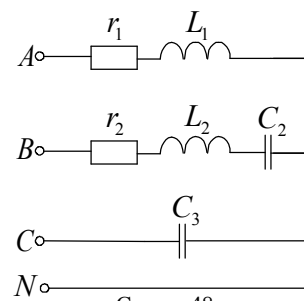


Схема 48

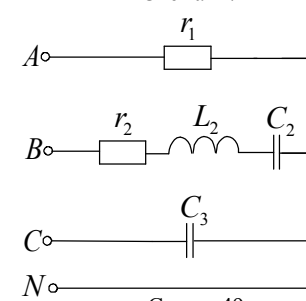


Схема 49

Рисунок 15 (продолжение)

Рисунок 15 (продолжение)

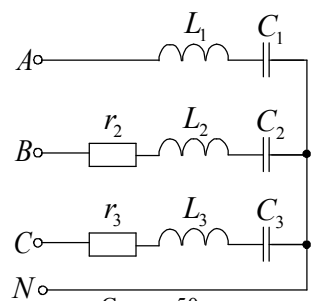


Схема 50

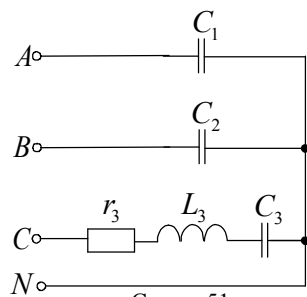


Схема 51

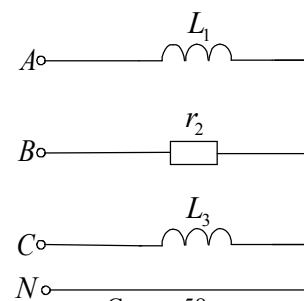


Схема 58

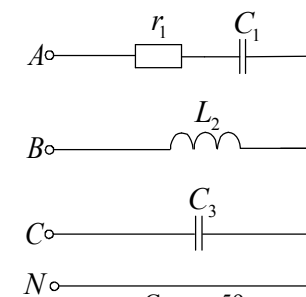


Схема 59

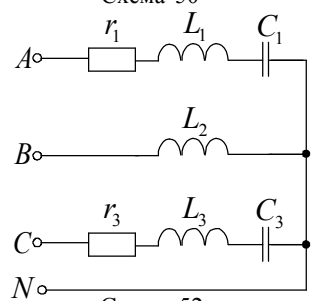


Схема 52

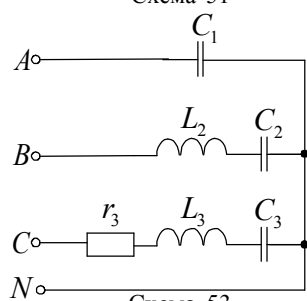


Схема 53

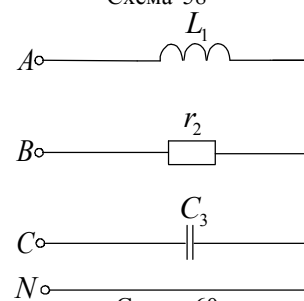


Схема 60

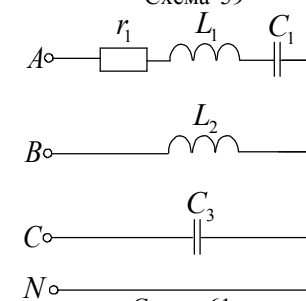


Схема 61

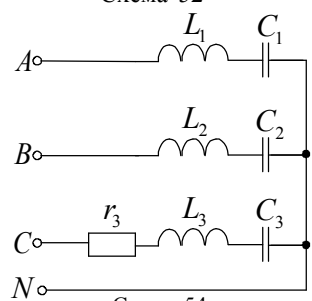


Схема 54

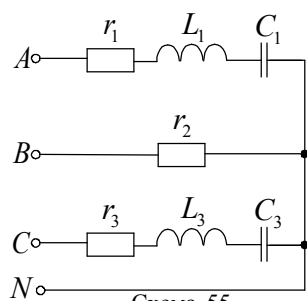


Схема 55

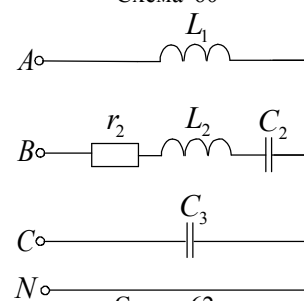


Схема 62

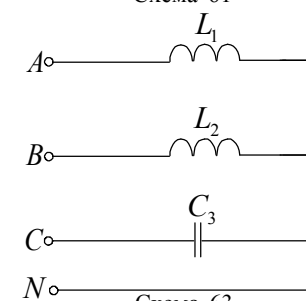


Схема 63

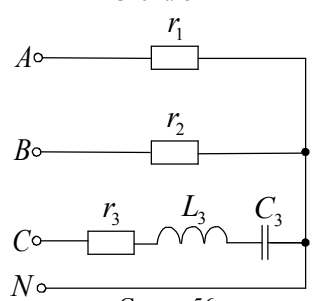


Схема 56

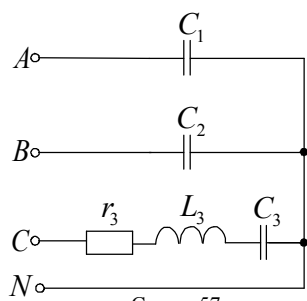


Схема 57

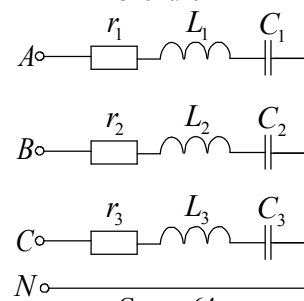


Схема 64

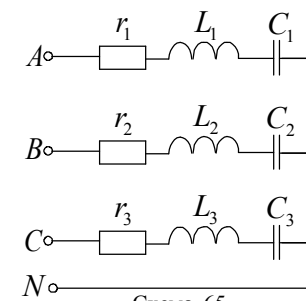


Схема 65

Рисунок 15 (продолжение)

Рисунок 15 (продолжение)

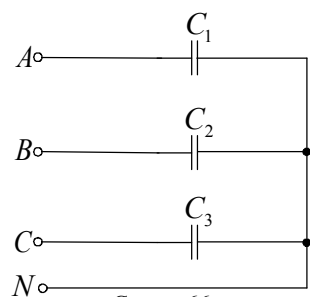


Схема 66

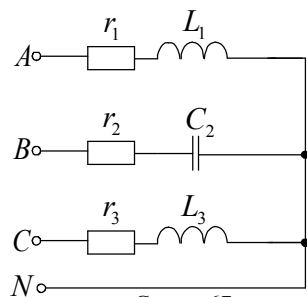


Схема 67

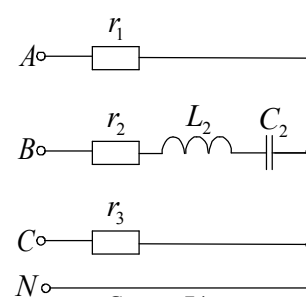


Схема 74

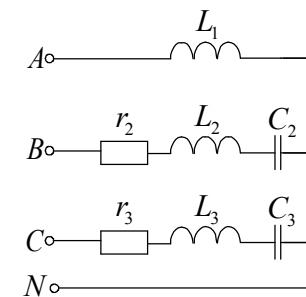


Схема 75

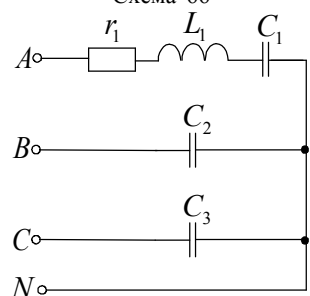


Схема 68

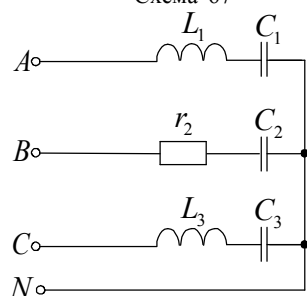


Схема 69

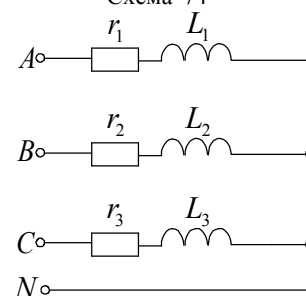


Схема 76

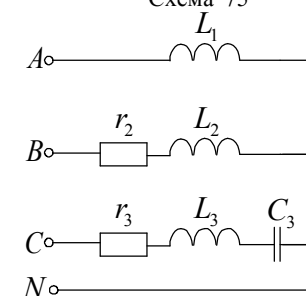


Схема 77

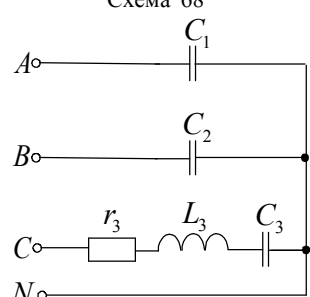


Схема 70

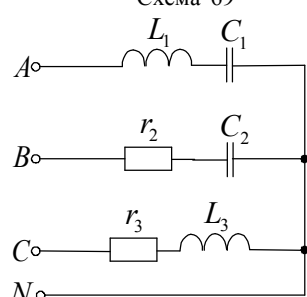


Схема 71

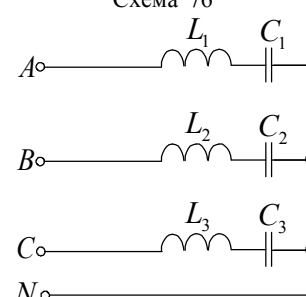


Схема 78

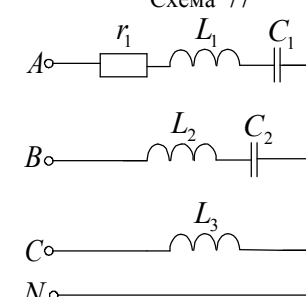


Схема 79

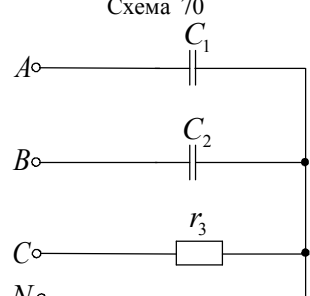


Схема 72

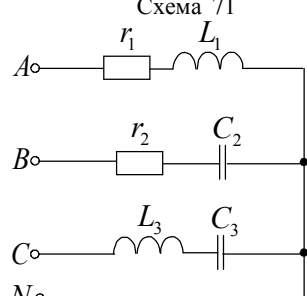


Схема 73

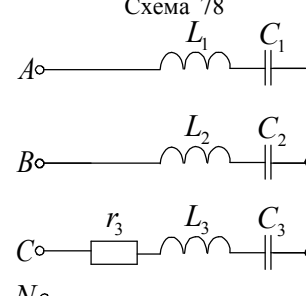


Схема 80

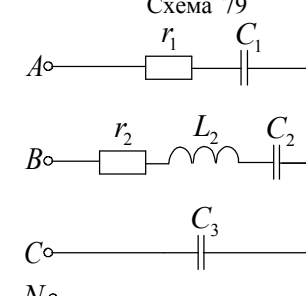


Схема 81

Рисунок 15 (продолжение)

Рисунок 15 (продолжение)

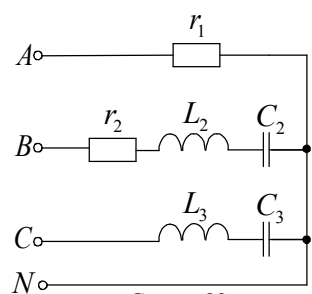


Схема 82

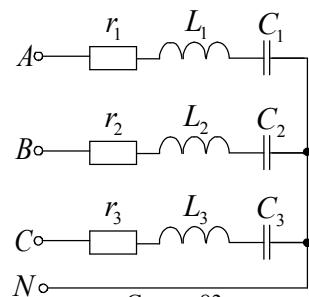


Схема 83

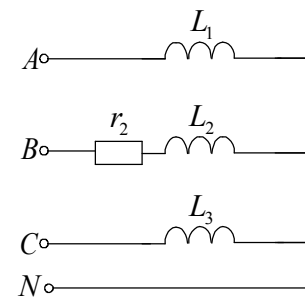


Схема 90

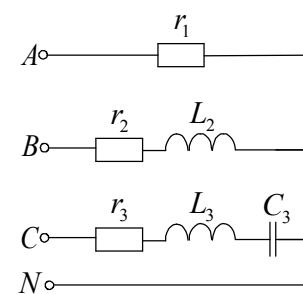


Схема 91

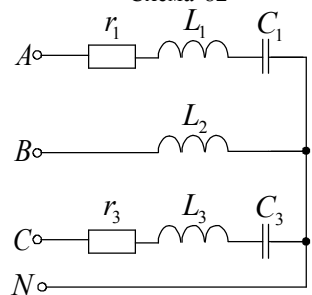


Схема 84

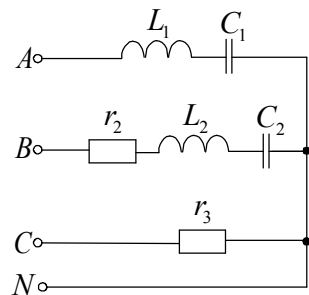


Схема 85

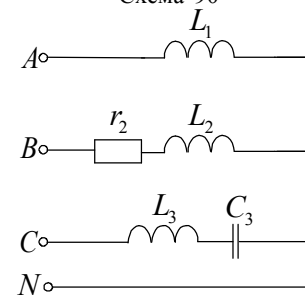


Схема 92

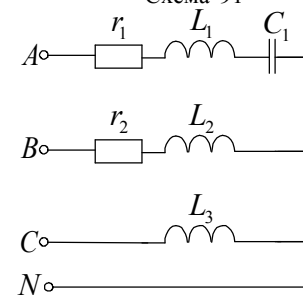


Схема 93

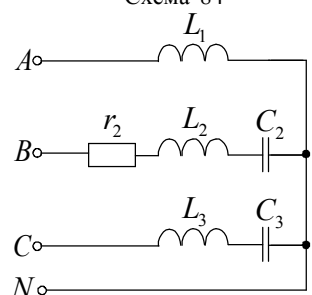


Схема 86

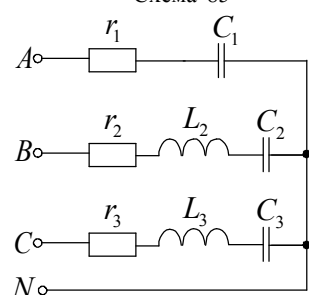


Схема 87

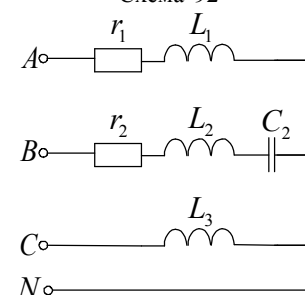


Схема 94

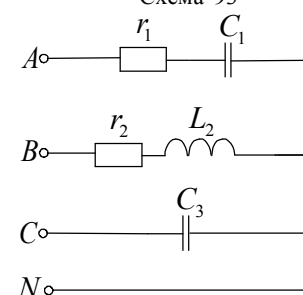


Схема 95

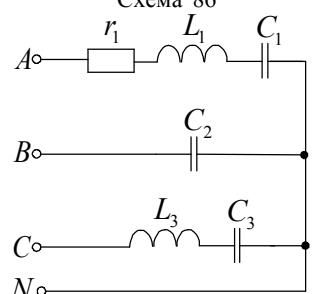


Схема 88

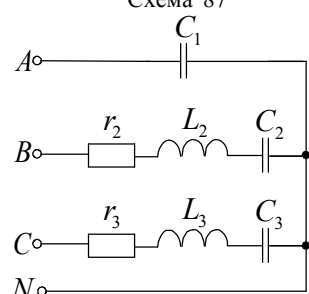


Схема 89

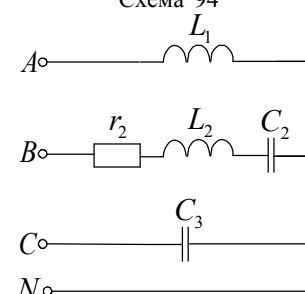


Схема 96

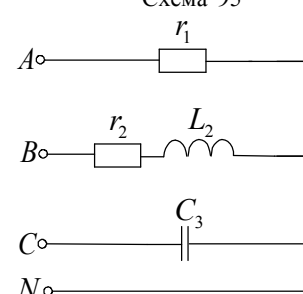


Схема 97

Рисунок 15 (продолжение)

Рисунок 15 (продолжение)

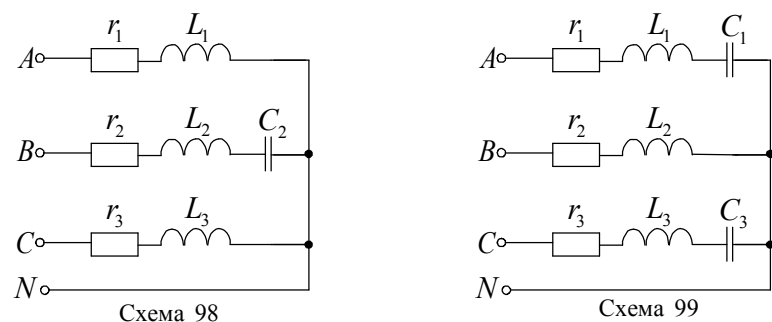


Рисунок 15 (окончание)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
- 2 Теоретические основы электротехники. Т. 1 / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 536 с.
- 3 **Батура, М. П.** Теория электрических цепей : учеб. для студентов электротехн. спец. / М. П. Батура, А. П. Кузнецов, А. П. Курулев. – 2-е изд., испр. – Минск : Вышэйшая школа, 2007. – 608 с.
- 4 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 2006. – 638 с.
- 5 **Вольнский, Б. А.** Электротехника : учеб. для вузов / Б. А. Вольнский, Е. Н. Зейн, В. Е. Шатерников. – М. : Высш. шк., 1986. – 528 с.
- 6 **Касаткин, А. С.** Электротехника : учеб. для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М. : Высш. шк., 2000. – 542 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие методические указания по выполнению расчетно-графических и контрольных работ.....	3
Требования, предъявляемые к оформлению расчетно-графической работы.....	4
Примеры решения задач.....	5
Пример 1. Расчет линейной электрической цепи постоянного тока.....	5
Пример 2. Расчет линейной электрической цепи синусоидального.....	10
Пример 3. Расчет трехфазной цепи с приемниками, соединенными «звездой» и «треугольником».....	15
Задача 1. Расчет линейной электрической цепи постоянного тока.....	21
Задача 2. Расчет линейной электрической цепи синусоидального тока.....	38
Задача 3. Расчет трехфазной цепи с приемниками, соединенными «звездой» и «треугольником».....	49
Список литературы.....	63

Учебное издание

Галушко Виктор Николаевич

**ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО И
СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА**

Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов
электротехнических специальностей

Редактор Т. М. Р и з е в с к а я
Технический редактор В. Н. К у ч е р о в а

Подписано в печать 19.04.2012 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,57. Тираж 500 экз.
Зак. № . Изд. № 145.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0552508 от 09.07.2009 г.
ЛИ № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.
246022 г. Гомель, ул. Кирова, 34