

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Т.Н. Мармус, Л.Н. Горбунова, С.А. Гусева

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

**Учебное пособие для выполнения
расчетно-графических работ**

**Благовещенск
Издательство ДальГАУ
2012**

УДК 621.3

Горбунова Л.Н., Мармус Т.Н., Гусева С.А.

Учебное пособие предназначено для выполнения индивидуальной расчетно-графической работы (РГР) студентами очного обучения по направлениям: 110800.62 – агроинженерия (технологические системы в агробизнесе); 190600.62 – эксплуатация транспортно – технологических машин и комплексов; 250300.62 – технология и оборудование лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств; 260100.62 – продукты питания из растительного сырья; 260200.62 – продукты питания животного происхождения; 260800.62 – технология продукции и организации общественного питания; 270800.62 - строительство; 280100.62 – природообустройство и водопользование в соответствии с требованиями ФГОС ВПО по дисциплине «Электротехника и электроника».

Рецензент: Шевченко М.В. – к.с.-х.н., доцент кафедры ПЭЭ в АПК.

Рекомендовано к печати в издательстве методическим советом института электрификации и автоматизации Дальневосточного государственного аграрного университета (Протокол № 9 от 14 мая 2012 г).

Издательство ДальГАУ

2012

ВВЕДЕНИЕ

Расчетно–графическая работа является самостоятельной работой студента и завершает изучение курса «Электротехника и электроника», при выполнении которого закрепляются знания, полученные во время изучения теоретического материала. Расчетно-графическая работа позволяет закрепить и углубить теоретические знания и выработать навыки применения их для решения конкретных практических задач с умением оформлять технические документы. В соответствии с действующей программой курса «Электротехника и электроника» расчетно-графическая работа должна содержать:

- титульный лист (приложение 1);
- содержание;
- основная часть;
- заключение;
- список использованной литературы.

Количество задач расчетно-графического задания №1 и №2 определяется ведущим преподавателем с учетом стандартов для определенной специальности.

Правила оформления расчетно-графической работы

Расчетно-графическая работа выполняется аккуратно, без исправлений, на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (297х210 мм) и оформляется в соответствии с ГОСТами 2.105-79;2.304-81 и «стандарт организации, система качества – общие требования к оформлению текстовой части» (Благовещенск, 2007).

Разделы должны иметь порядковую нумерацию и обозначаться арабскими цифрами. Они могут быть разделены на подразделы. Подразделы нумеруются арабскими цифрами в пределах каждого раздела.

Уравнения и формулы, приводимые в расчетно-пояснительной записке, следует помещать на отдельных строках. Выше или ниже каждой формулы должно быть оставлено не менее одной строки. Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не пояснялись ранее в тексте, должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснение каждого символа следует давать с новой строки в той последовательности, в которой они приведены в формуле. Первая строка пояснения должна начинаться со слова «где» без двоеточия после него.

Пример: ток в электрической ветви вычисляется по формуле

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.1)$$

где U – напряжение на зажимах электрической ветви, В;

R – сопротивление электрической ветви, Ом.

Формулы должны нумероваться арабскими цифрами в пределах раздела. Номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы, и его записывают справа в круглых скобках, на одинаковом расстоянии от правого поля на всех страницах текста. Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в круглых скобках, например: в формуле (1.1). Уравнения и системы уравнений нумеруются вместе с формулами.

Все формулы и расчеты выполняются только в единицах системы СИ.

Иллюстрации должны быть расположены после первого упоминания в тексте записи. Она должна иметь наименование и пояснительные данные (подрисовочный текст).

Таблицы должны иметь точное краткое название, подписывается сверху в соответствии номера раздела и порядкового номера таблицы.

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ № 1

ЗАДАЧА1. Расчет линейных электрических цепей постоянного тока

В данной задаче необходимо определить токи в ветвях при заданных ЭДС и сопротивлениях, входящих в цепь. Наиболее распространенным методом расчета сложных электрических цепей является классический. Он заключается в непосредственном применении законов Кирхгофа для расчета распределения токов по ветвям.

Для данной схемы(рис. 1.1) необходимо выполнить следующие задания:

- 1) составить систему уравнений для определения токов в схеме по первому и второму законам Кирхгофа;
- 2) найти все токи, пользуясь методом контурных токов;
- 3) проверить правильность решения методом узлового напряжения, предварительно упростить схему, заменив треугольник сопротивлений R_4 , R_5 , R_6 эквивалентной звездой. Начертить расчетную схему с эквивалентной звездой и показать на ней токи;
- 4) записать баланс мощностей для преобразованной схемы;
- 5) построить потенциальную диаграмму в масштабе для внешнего контура схемы.

Дано: $E_1 = 3 \text{ В}$; $E_2 = 66 \text{ В}$; $E_3 = 9 \text{ В}$; $R_{02} = 0,7 \text{ Ом}$; $R_{03} = 1,2 \text{ Ом}$;

$R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 4 \text{ Ом}$; $R_3 = 2 \text{ Ом}$; $R_4 = 2 \text{ Ом}$; $R_5 = 7 \text{ Ом}$; $R_6 = 3 \text{ Ом}$.

1.1 Применение законов Кирхгофа

Расчет выполняется в следующей последовательности:

- произвольно выбирается направление обхода (Н.О.);
- произвольно задается направление токов в ветвях, показав их на схеме стрелками (рис.1.1).
- определяется количество необходимых уравнений для электрической

цепи.

Всего число уравнений составленных по первому и второму законам Кирхгофа равно числу неизвестных токов, то есть числу ветвей, b .

По первому закону Кирхгофа составляется количество уравнений $y - 1$, где y – количество узлов. Узлы выбираются произвольно. В схеме, изображенной на рисунке 1.1 четыре узла, значит, по первому закону Кирхгофа составляются 3 уравнения. Токи, которые входят в узел записываются со знаком «+» и наоборот.

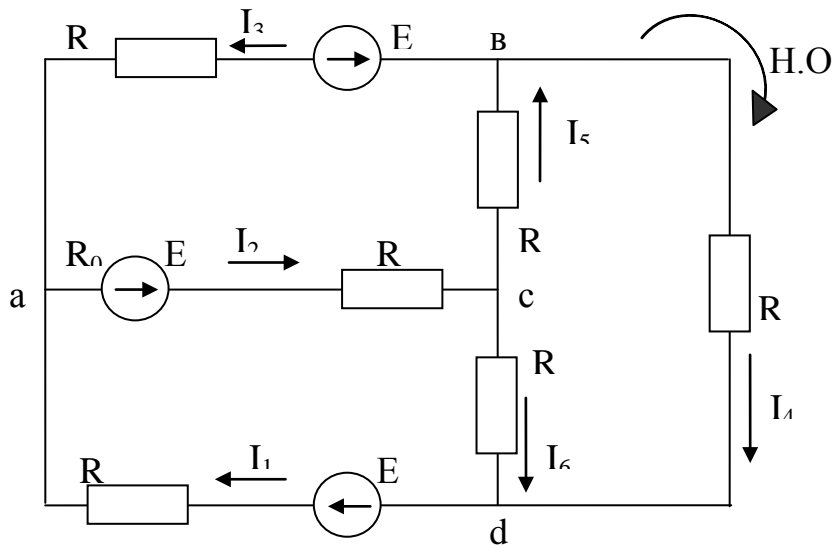


Рисунок 1.1 – Исходная электрическая схема

Составляется система уравнений (1.1) по первому закону Кирхгофа

$$\left. \begin{array}{l} \text{узел "a": } I_1 - I_2 + I_3 = 0; \\ \text{узел "b": } -I_3 - I_4 + I_5 = 0; \\ \text{узел "c": } I_2 - I_5 - I_6 = 0 \end{array} \right\} (1.1)$$

Недостающие уравнения записываются по второму закону Кирхгофа для замкнутых контуров электрической цепи. Количество уравнений составленных по второму закону Кирхгофа равно $b - (y - 1)$. В исходной схеме (рис.1.1) 6 ветвей, значит, составляется $b - (y - 1) = 6 - (4 - 1) = 3$ уравнения по второму закону Кирхгофа.

Для активных контуров схем в общем виде уравнение по второму закону

Кирхгофа имеет вид $\sum_{K=1}^n E_K = \sum_{K=1}^m R_K \cdot I_K$, для пассивных контуров $\sum_{K=1}^m U = 0$.

При совпадении направления ЭДС и тока в сопротивлении с Н.О. контура перед этими величинами ставится знак «+», и наоборот.

Система уравнений по второму закону Кирхгофа имеет вид

$$\left. \begin{array}{l} \text{контур "acda": } R_1 \cdot I_1 + (R_2 + R_{02}) \cdot I_2 + R_6 \cdot I_6 = E_1 + E_2; \\ \text{контур "abca": } -(R_{02} + R_2) \cdot I_2 - (R_3 + R_{03}) \cdot I_3 - R_5 \cdot I_5 = -E_2 + E_3; \\ \text{контур "bdcb": } R_4 \cdot I_4 + R_5 \cdot I_5 - R_6 I_6 = 0; \end{array} \right\} (1.2)$$

В системе уравнений (1.2) внутренние сопротивления источников рассматриваются как последовательно соединенные с сопротивлениями резисторов в отдельно рассматриваемых ветвях. Например, для ветви «ac» внутреннее сопротивление источника E_2 учитывается, как $(R_{02} + R_2)$.

Решая полученную систему из 6 уравнений, определяются токи в ветвях. Если при расчете получится ток с отрицательным знаком, то это значит, что его действительное направление противоположно произвольно выбранному направлению в начале расчета.

1.2 Метод контурных токов

Этот метод заключается в том, что вместо действительных токов в ветвях электрической цепи на основании второго закона Кирхгофа определяют контурные токи в независимых контурах. Контурный ток (условный) – такой расчетный ток, который замыкается только по своему контуру (рис.1.2). В каждом контуре выбирается произвольное направление контурных токов.

Действительный ток, который принадлежит только одному контуру, равен контурному току внешней ветви контура - для рисунка 1.2 имеет вид

$$I_1 = I_{11}; I_3 = I_{22}; I_4 = I_{33} (1.3)$$

В ветви, принадлежащей нескольким контурным токам (на участках смежных ветвей) действительный ток равен алгебраической сумме контурных токов – для рисунка 1.2 действительные токи смежных ветвей имеют вид

$$I_2 = I_{11} + I_{22}; I_5 = I_{22} + I_{33}; I_6 = I_{11} - I_{33}. (1.4)$$

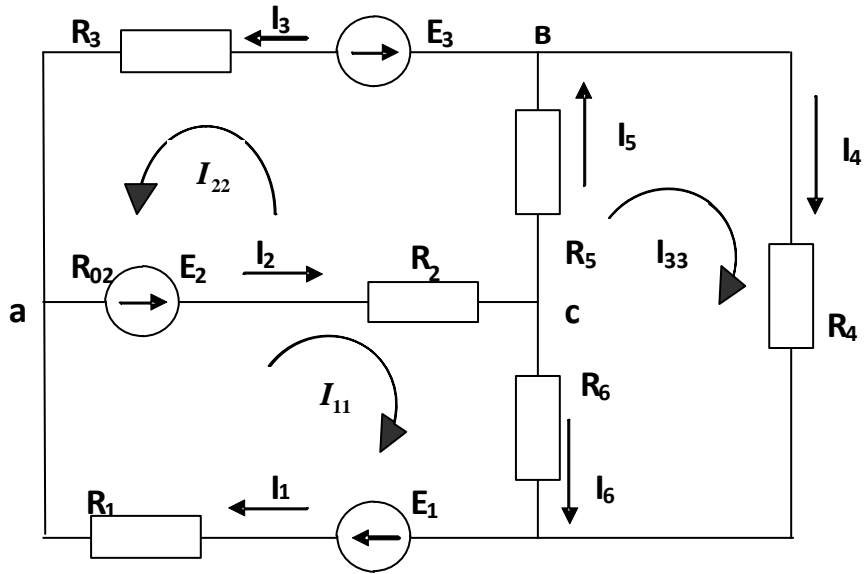


Рисунок 1.2 – Исходная электрическая схема для расчета

Для определения контурных токов составляются уравнения для каждого независимого контура по второму закону Кирхгофа. Число уравнений, равно числу независимых контуров, то есть $N = (b - y) - 1$. В исходной схеме (рис.1.1) три независимых контура, следовательно, уравнений будет три.

Для активного контура уравнение в общем виде $-\sum_{K=1}^n E_K = \sum_{K=1}^m R_K \cdot I_K$, для пассивного контура $-\sum_{K=1}^m R_K \cdot I_K = 0$. Тогда система уравнений для данного расчета имеет вид

$$\begin{aligned} I_{11} \cdot (R_1 + R_{02} + R_2 + R_6) + I_{22} \cdot (R_2 + R_{02}) - I_{33} \cdot R_6 &= E_1 + E_2 \\ I_{11} \cdot (R_{02} + R_2) + I_{22} \cdot (R_2 + R_{02} + R_3 + R_{03} + R_5) + I_{33} \cdot R_5 &= E_2 - E_3 \\ -I_{11} \cdot R_6 + I_{22} \cdot R_5 + I_{33} \cdot (R_4 + R_5 + R_6) &= 0 \end{aligned} \quad (1.5)$$

В систему уравнений (1.5) подставляются значения сопротивлений и ЭДС

$$\begin{aligned} I_{11} \cdot 8,7 + I_{22} \cdot 4,7 - I_{33} \cdot 3 &= 69 \\ I_{11} \cdot 4,7 + I_{22} \cdot 14,9 + I_{33} \cdot 7 &= 57 \\ -I_{11} \cdot 3 + I_{22} \cdot 7 + I_{33} \cdot 12 &= 0 \end{aligned}$$

Система уравнений решается методом определителей. Для этого составляется главный определитель системы (детерминант)

$$\Delta = \begin{vmatrix} 8,7 & 4,7 & -3 \\ 4,7 & 14,7 & 7 \\ -3 & 7 & 12 \end{vmatrix} = 532,68$$

Частные определители находятся путем замены столбца сопротивлений столбцом контурных ЭДС

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 69 & 4,7 & -3 \\ 57 & 14,7 & 7 \\ 0 & 7 & 12 \end{vmatrix} = 4544,4; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 8,7 & 69 & -3 \\ 4,7 & 57 & 7 \\ -3 & 0 & 12 \end{vmatrix} = 97,2;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 8,7 & 4,7 & 69 \\ 4,7 & 14,7 & 57 \\ -3 & 7 & 0 \end{vmatrix} = 1079,4.$$

Тогда контурные токи равны

$$I_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{4544,4}{532,68}; \quad I_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{97,2}{532,68} = 0,182; \quad I_{33} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{1079,4}{532,68}.$$

Действительные токи в ветвях цепи будут считаться из уравнений (1.3) и (1.4) с учетом их направлений на исходной схеме (рис.1.2)

$$I_1 = I_{11} = 8,531 \text{ A};$$

$$I_2 = I_{11} + I_{22} = 8,531 + 0,182 = 8,713 \text{ A};$$

$$I_3 = I_{22} = 0,182 \text{ A};$$

$$I_4 = I_{33} = 2,026 \text{ A};$$

$$I_5 = I_{22} + I_{33} = 0,182 + 2,026 = 2,208 \text{ A};$$

$$I_6 = I_{11} - I_{33} = 8,531 - 2,026 = 6,505 \text{ A}.$$

Проверка правильности решения делается по первому закону Кирхгофа путем подстановки найденных в расчете значений действительных токов в одно из уравнений системы (1.1). Например: $I_1 - I_2 + I_3 = 8,531 - 8,713 + 0,182 = 0 \text{ A}$.

Полученные токи имеют знак «+», следовательно, их выбранные в начале расчета направления совпадают с действительным направлением токов.

1.3 Метод узлового напряжения (метод двух узлов)

Метод применяется для расчета электрических цепей с двумя узлами, между которыми включены активные или пассивные ветви (рис.1.1). Идея метода состоит в том, что по расчетной формуле определяется напряжение между узлами, называемое узловым напряжением. Затем по закону Ома рассчитываются токи в ветвях.

В данной задаче необходимо преобразовать треугольник, состоящий из сопротивлений R_4, R_5, R_6 (рис.1.1) в эквивалентную звезду (рис.1.3). Треугольник сопротивлений и звезда считаются эквивалентными, если после замены одного сопротивления другим токи и напряжения неразветвленной части цепи не изменяют своей величины и направления.

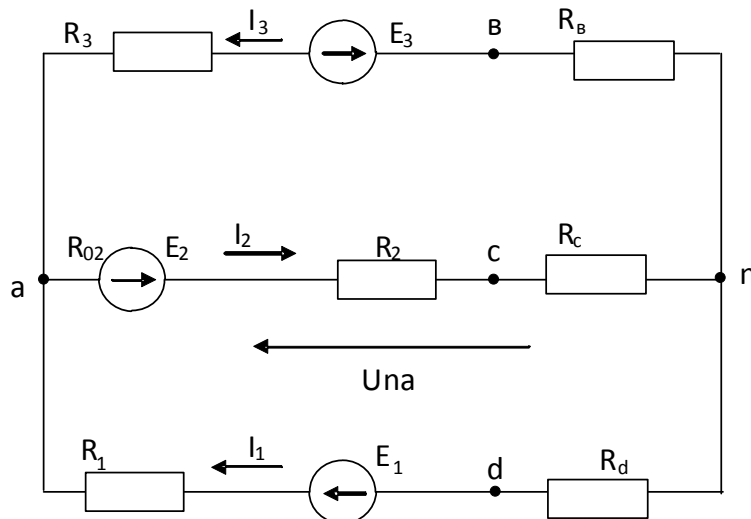


Рис.1.3 – Электрическая схема замещения

На схеме (рис.1.3) задается произвольное направление узлового напряжения U_{na} (от точки n к точке a) и находится его величина по формуле

$$U_{na} = \frac{-E_1 \cdot g_1 + E_2 \cdot g_2 + E_3 \cdot g_3}{g_1 + g_2 + g_3}, \quad (1.6)$$

где g_1, g_2, g_3 – проводимости ветвей.

В формуле (1.6) перед ЭДС ставится знак "-", если направление ЭДС совпадает с направлением узлового напряжения.

Сопротивления лучей эквивалентной звезды (рис.1.3)

$$R_b = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{2 \cdot 7}{2 + 7 + 3} = \frac{14}{12} = 1,167 \text{ Ом};$$

$$R_c = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{7 \cdot 3}{2 + 7 + 3} = \frac{21}{12} = 1,75 \text{ Ом};$$

$$R_d = \frac{R_4 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{2 \cdot 3}{2 + 7 + 3} = \frac{6}{12} = 0,5 \text{ Ом}.$$

Проводимости ветвей с учетом преобразования находятся

$$g_1 = \frac{1}{R_d + R_1} = \frac{1}{1 + 0,5} = \frac{1}{1,5} = 0,667 \text{ См};$$

$$g_2 = \frac{1}{R_2 + R_{02} + R_c} = \frac{1}{4 + 0,7 + 1,75} = \frac{1}{6,45} = 0,155 \text{ См},$$

$$g_3 = \frac{1}{R_3 + R_{03} + R_b} = \frac{1}{2 + 1,2 + 1,167} = \frac{1}{4,367} = 0,229 \text{ См}.$$

Подставляя найденные значения в формулу (1.6), считается узловое напряжение между точкой «a» и точкой «n»

$$U_{na} = \frac{-3 \cdot 0,667 + 66 \cdot 0,155 + 9 \cdot 0,229}{0,667 + 0,155 + 0,229} = \frac{10,29}{1,051} = 9,791 \text{ В}.$$

Токи в ветвях (рис.1.3) находятся по обобщенному закону Ома для активных участков электрической цепи. Если направление ЭДС и узлового напряжения совпадает с направлением тока данной ветви, то перед этими величинами ставится знак "+".

$$I_1 = (E_1 + U_{na}) \cdot g_1 = (3 + 9,791) \cdot 0,667 = 8,531 \text{ А};$$

$$I_2 = (E_2 - U_{na}) \cdot g_2 = (66 - 9,791) \cdot 0,155 = 8,713 \text{ А};$$

$$I_3 = (-E_3 + U_{na}) \cdot g_3 = (9 + 9,791) \cdot 0,229 = 0,182 \text{ А}.$$

Сравнение результатов полученных при расчете токов I_1, I_2, I_3 методами контурных токов и узлового напряжения позволяет сделать вывод о правильности расчета.

1.4 Баланс мощностей в электрических цепях

В любой электрической цепи сумма мощностей всех источников электрической энергии должна быть равна сумме мощностей всех приемников

И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

$$\sum_{K=1}^n E_K \cdot I_K = \sum_{K=1}^m R_K \cdot I_K^2 \quad (1.7)$$

где $\sum_{K=1}^n E_K \cdot I_K$ – сумма мощностей, развиваемых источниками;

$\sum_{K=1}^m R_K \cdot I_K^2$ – сумма мощностей всех приемников.

Равенство (1.7) называется *балансом мощностей* электрической цепи.

Если положительное направление тока совпадает с направлением ЭДС и в результате расчета получено положительное значение тока, то источник вырабатывает (генерирует) электрическую энергию, то есть работает в режиме генератора. Если же получено отрицательное значение тока, то произведение $E \cdot I$ отрицательно, то есть источник работает в режиме потребителя и является приемником электрической энергии.

Составление уравнения баланса мощностей позволит проверить правильность решения предыдущих пунктов рассматриваемой задачи.

В примере уравнение баланса мощностей (рис.1.1) будет записано в следующем виде

Мощность источника будет равна

$$\sum_{K=1}^n E_K \cdot I_K = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 - E_3 \cdot I_3 = 3 \cdot 8,531 + 66 \cdot 8,713 - 9 \cdot 0,182 = 599,013 \text{ Вт}.$$

Мощность потребителя (нагрузки)

$$\begin{aligned} \sum_{K=1}^m R_K \cdot I_K^2 &= R_1 \cdot I_1^2 + (R_2 + R_{02}) \cdot I_2^2 + (R_3 + R_{03}) \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 + R_5 \cdot I_5^2 + R_6 \cdot I_6^2 = \\ &= 1 \cdot 8,531^2 + (4 + 0,7) \cdot 8,713^2 + (2 + 1,2) \cdot 0,182^2 + 2 \cdot 2,026^2 + 7 \cdot 2,208^2 + 3 \cdot 6,506^2 = 599,011 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Расчет уравнения баланса мощностей подтвердил правильность решения предыдущих пунктов задачи, так как $599,013 \text{ Вт} \approx 599,011 \text{ Вт}$

1.5 Построение потенциальной диаграммы

Потенциальная диаграмма – это графическое изображение изменения

потенциала в электрической цепи в зависимости от сопротивлений участков при обходе замкнутого контура, то есть график зависимости $V = f(R)$.

По оси абсцисс в масштабе откладываются сопротивления между характерными точками, а по оси ординат – их потенциалы. Потенциальная диаграмма позволяет определить напряжение между любыми точками цепи, если на оси ординат отмечены потенциалы соответствующих точек.

Чтобы построить потенциальную диаграмму, необходимо выполнить следующие пункты:

- 1) рассчитать электрическую цепь;
- 2) разбить цепь характерными точками, которые разделяют сопротивления и ЭДС;
- 3) заземлить любую точку, потенциал которой будет равен нулю, а потенциалы других точек вычислить. Если Н.О. совпадает с направлением тока, то потенциал уменьшается, при совпадении Н.О с направлением ЭДС потенциал увеличивается;
- 4) на оси абсцисс в выбранном масштабе откладываются сопротивления между характерными точками, начало координат должно соответствовать нулевой точке;
- 5) на оси ординат в масштабе откладываются потенциалы характерных точек;
- 6) полученные точки соединяются прямыми линиями.

В данной задаче потенциальная диаграмма строится для внешнего контура исходной электрической цепи (рис.1.4).

Заземляется точка a (потенциал в этой точке равный нулю), а далее рассчитываются потенциалы в каждой отдельной точке схемы и строится потенциальная диаграмма (рис.1.5).

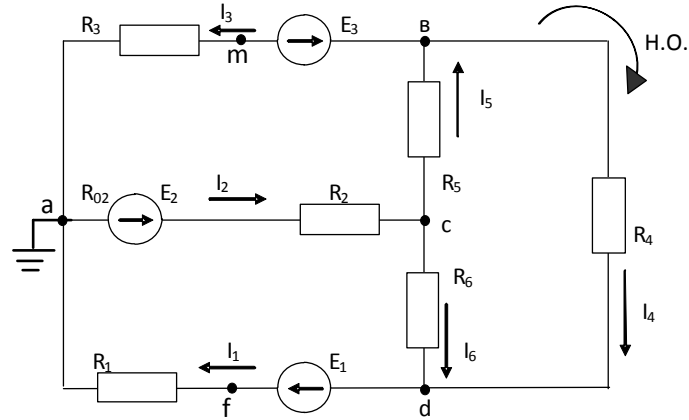


Рис.1.4 –Схема для построения потенциальной диаграммы

$$V_a = 0 \text{ В};$$

$$V_m = V_a + I_3 \cdot R_3 = 0 + 0,182 \cdot 2 = 0,364 \text{ В};$$

$$V_b = V_m + E_3 + I_3 \cdot R_{03} = 0,364 + 9 + 0,182 \cdot 1,2 = 9,583 \text{ В};$$

$$V_d = V_b - I_4 \cdot R_4 = 9,583 - 2,026 \cdot 2 = 5,531 \text{ В};$$

$$V_f = V_d + E_1 = 5,531 + 3 = 8,53 \text{ В};$$

$$V_a = V_f - I_1 \cdot R_1 = 8,53 - 8,531 \cdot 1 = 0,001 \approx 0 \text{ В}.$$

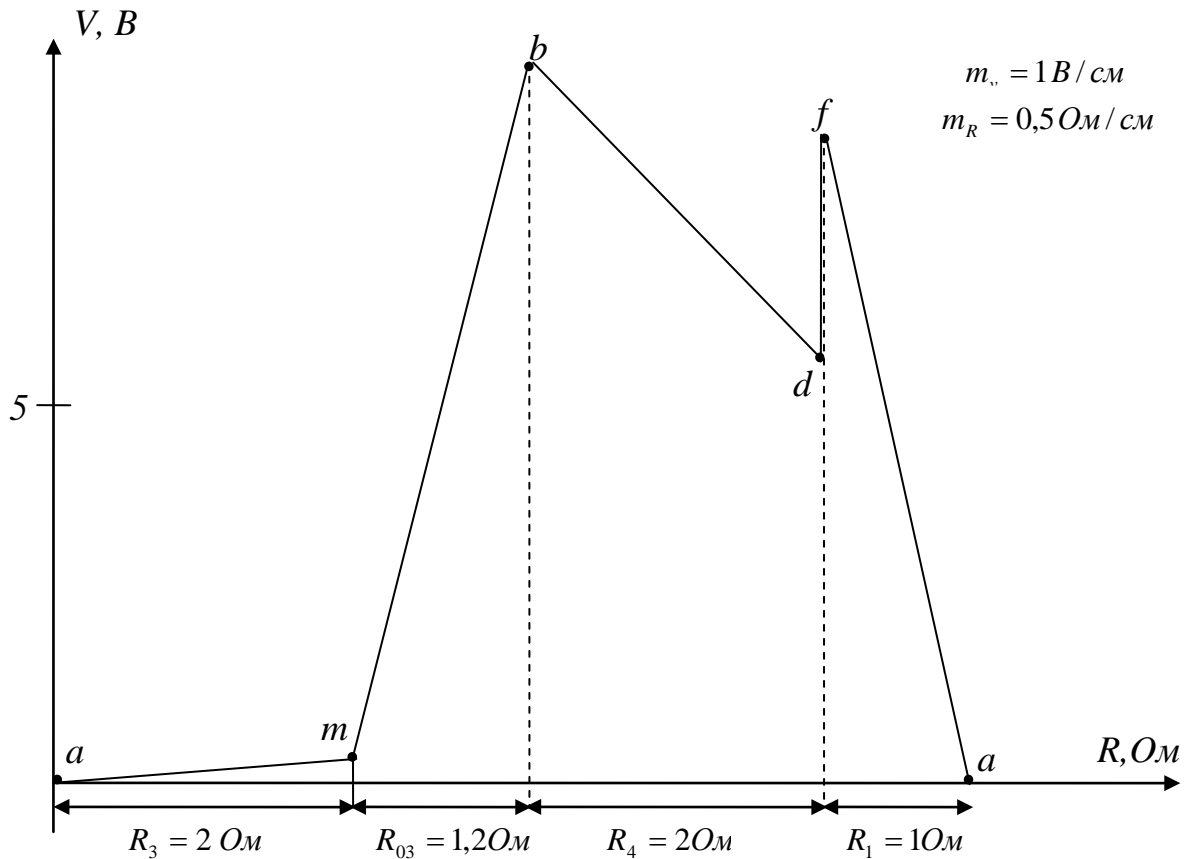


Рисунок 1.5 Потенциальная диаграмма для внешнего контура

Варианты для задачи 1

Для схемы, соответствующей вашему варианту, изображенной на рис.1.1 – 1.24 необходимо выполнить следующие расчеты:

- 1) составить систему уравнений для определения токов по первому и второму законам Кирхгофа;
- 2) найти токи методом контурных токов;
- 3) проверить правильность решения методом узлового напряжения (метод двух узлов), предварительно заменив пассивный треугольник сопротивлений (R_4, R_5, R_6) на эквивалентную звезду;
- 4) записать уравнение баланса мощностей;
- 5) построить потенциальную диаграмму в масштабе для внешнего контура. Исходные данные приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Вариант	рисунок	$E_1,$ В	$E_2,$ В	$E_3,$ В	$r_{01},$ Ом	$r_{02},$ Ом	$r_{03},$ Ом	$r_1,$ Ом	$r_2,$ Ом	$r_3,$ Ом	$r_4,$ Ом	$r_5,$ Ом	$r_6,$ Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1.1	36	10	25	–	0,4	0,5	4	8	3	1	2	7
2	1.2	14	25	28	0,9	1,2	–	5	2	8	2	2	6
3	1.3	10	6	24	0,8	0,3	–	3,5	5	6	6	3	1
4	1.4	6	20	4	–	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
5	1.5	4	24	6	0,9	–	0,5	9	8	1	6	10	4
6	1.6	16	8	9	0,2	0,6	–	2,5	6	6	5	10	5
7	1.7	48	12	6	0,8	1,4	–	4,2	4	2	12	6	2
8	1.8	12	36	12	–	0,4	1,2	3,5	5	1	5	6	9
9	1.9	72	12	4	0,7	1,5	–	6	1	10	4	12	4
10	1.10	12	30	9	0,5	–	0,5	3,5	2,	3	3	1	3
11	1.11	15	63	6	1	–	1,2	5	3	1	2	12	3
12	1.12	16	5	32	–	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
13	1.13	14	25	28	0,9	1,2	–	5	2	8	2	2	6
14	1.14	5	16	30	0,4	–	0,7	6	4	3	2	5	3
15	1.15	21	4	10	–	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1
16	1.16	4	9	18	0,8	–	0,7	2,7	10	4	8	10	2
17	1.17	4	24	6	0,9	–	0,5	9	8	1	6	10	4
18	1.18	16	8	9	0,2	0,6	–	2,5	6	6	5	10	5

Продолжение таблицы 1.1

19	1.19	12	36	12	–	0,4	1,2	3,5	5	1	5	6	9
20	1.20	12	6	40	1,2	0,6	–	2	3	8	5	7	8
21	1.21	72	12	4	0,7	1,5	–	6	1	10	4	12	4
22	1.22	12	48	6	–	0,4	0,4	2,5	1	4	15	2	3
23	1.23	12	30	9	0,5	–	0,5	3,5	2	3	3	1	3
24	1.24	9	6	27	–	1	0,8	4,5	2	8	13	4	3
25	1.2	12	30	25	1	0,4	–	1	5	1	1	6	4
26	1.3	8	40	10	0,8	1	–	5	3	3	3	2	1
27	1.4	16	5	32	–	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
28	1.5	10	6	24	0,8	–	0,3	3,5	5	6	6	3	1
29	1.6	12	6	40	1,2	0,6	–	2	3	8	5	7	8
30	1.7	14	25	28	0,9	1,2	–	5	2	6	2	2	4
31	1.8	36	9	24	–	0,8	0,8	3	4	2	1	5	1
32	1.9	50	20	45	1	0,5	–	25	7	8	4	8	6
33	1.10	50	40	60	0,5	–	1	1	2	4	5	10	10
34	1.11	22	24	10	0,2	–	1,2	2	1	8	4	10	6
35	1.12	6	20	4	–	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
36	1.13	28	50	56	1,8	2,4	–	10	4	18	4	4	12
37	1.14	21	4	10	0,2	–	0,6	7	5	2	8	1	1
38	1.15	42	8	20	–	0,4	1,2	15	14	4	16	1	1
39	1.16	32	18	18	1,4	–	2	7	10	1	10	12	18
40	1.17	4	9	18	0,8	–	0,7	2,7	10	4	8	10	2
41	1.18	20	12	14	0,4	0,8	–	3,5	7	7	6	10	6
42	1.19	55	18	4	–	0,8	0,8	4	8	3	2	4	4
43	1.20	40	25	8	0,2	0,2	–	3	3	2	4	3	2
44	1.21	72	24	8	0,7	3	–	6	2	15	4	6	4
45	1.22	12	48	6	–	0,4	0,4	2,5	1	4	15	2	2
46	1.23	6	15	3	0,25	–	0,25	1,7	2	1,5	1,5	1	1,5
47	1.24	20	15	8	–	0,1	0,1	1,5	1,5	1	2	1,5	2
48	1.1	22	24	10	–	0,2	1,2	2	1	8	4	10	6
49	1.7	14	25	28	0,6	1,2	–	5	2	8	2	2	6
50	1.10	55	18	4	0,8	–	0,8	8	4	3	2	4	4

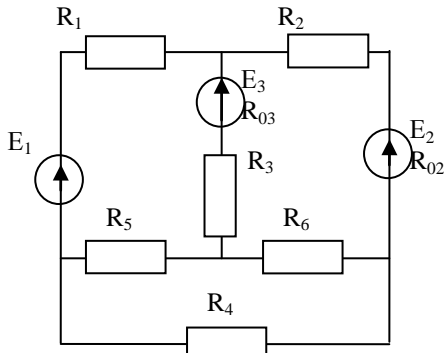


Рисунок 1.1

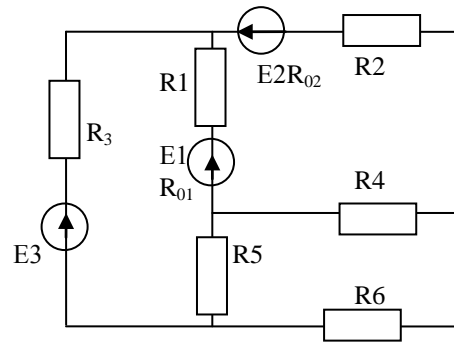


Рисунок 1.2

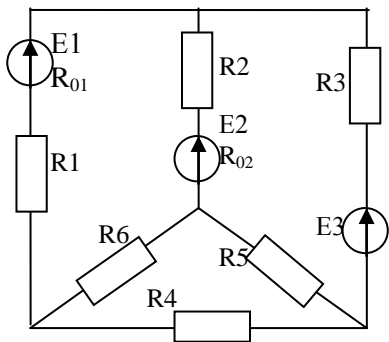


Рисунок 1.3

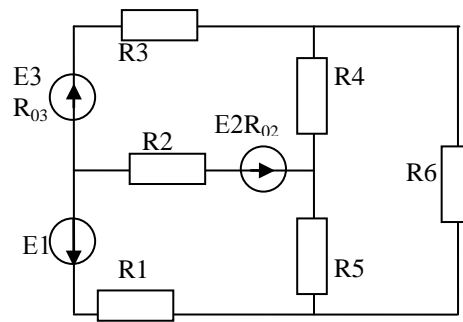


Рисунок 1.4

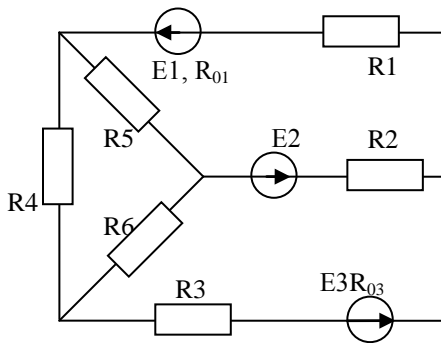


Рисунок 1.5

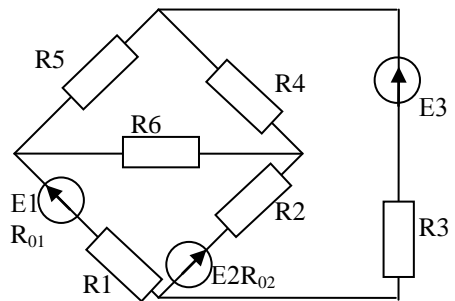


Рисунок 1.6

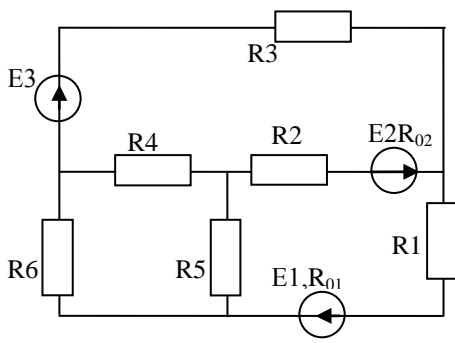


Рисунок 1.7

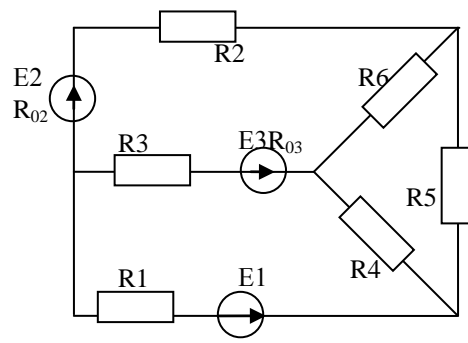


Рисунок 1.8

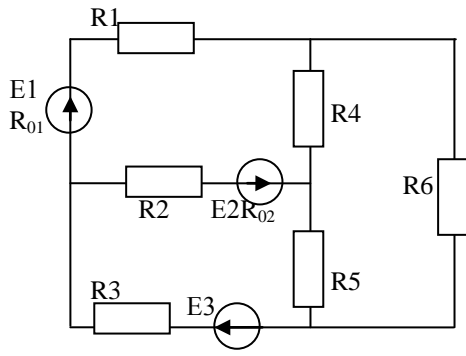


Рисунок 1.9

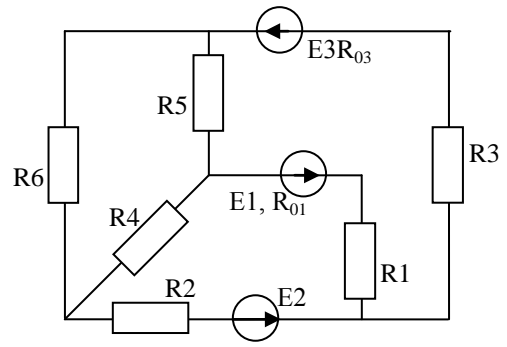


Рисунок 1.10

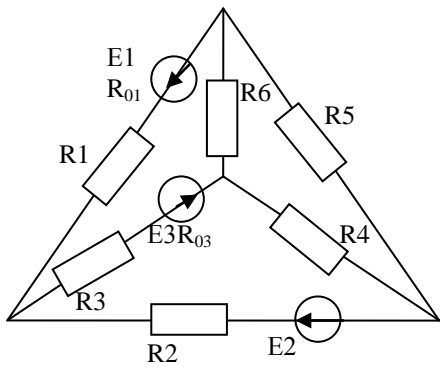


Рисунок 1.11

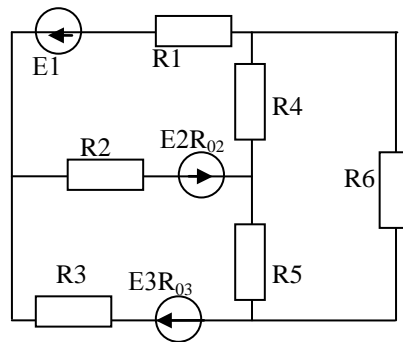


Рисунок 1.12

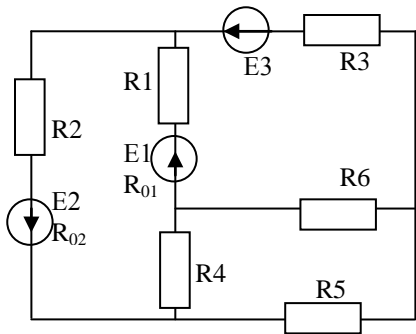


Рисунок 1.13

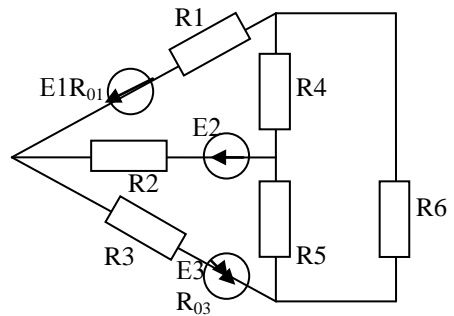


Рисунок 1.14

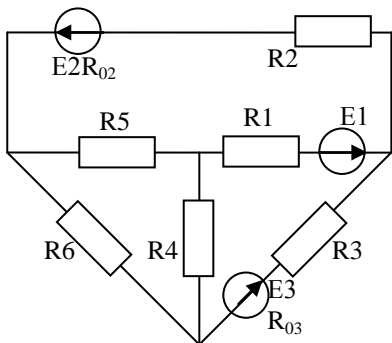


Рисунок 1.15

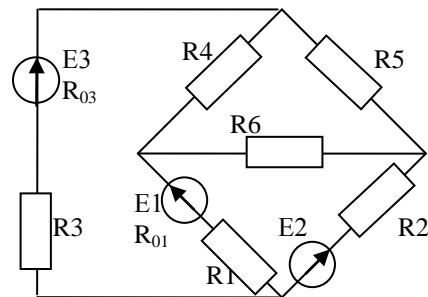


Рисунок 1.16

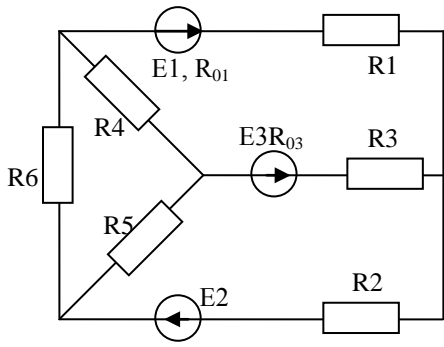


Рисунок 1.17

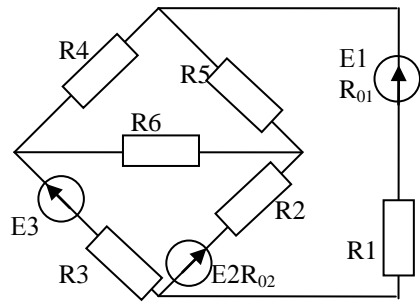


Рисунок 1.18

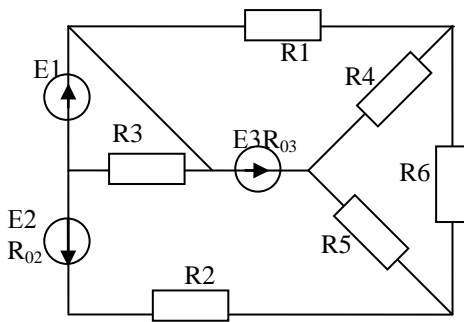


Рисунок 1.19

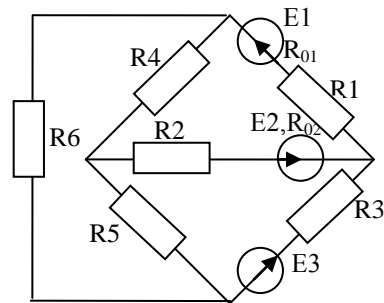


Рисунок 1.20

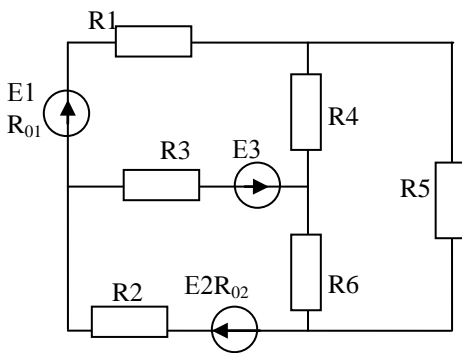


Рисунок 1.21

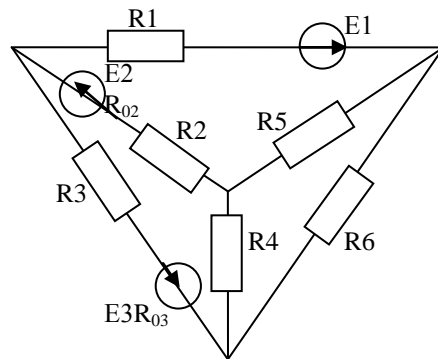


Рисунок 1.22

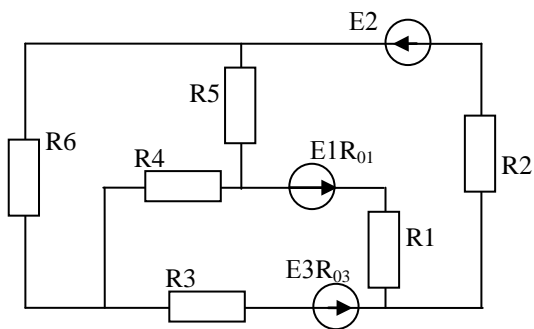


Рисунок 1.23

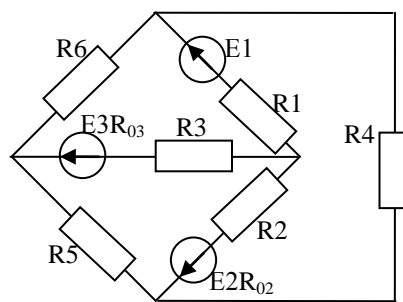


Рисунок 1.24

ЗАДАЧА2. Расчет линейных электрических цепей синусоидального тока

Наиболее распространенным методом расчета данных электрических цепей является метод эквивалентных преобразований. Он заключается в том, что последовательно, начиная с конца схемы, заменяются сопротивления всех элементов электрической цепи одним эквивалентным сопротивлением с последующим использованием закона Ома.

Использование данного метода электрических преобразований рассматривается на примере расчета электрической цепи, представленной на рисунке 2.1.

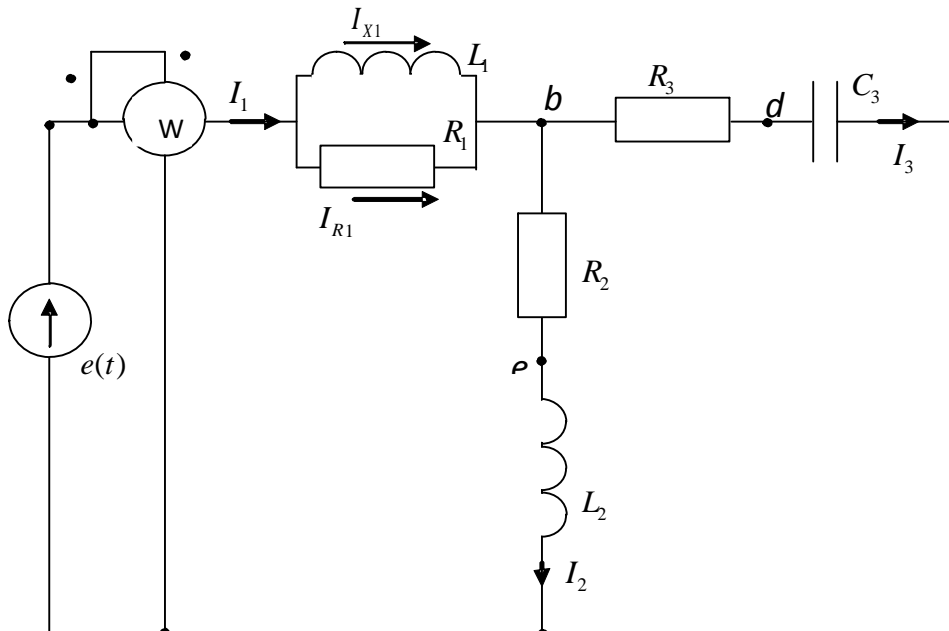


Рис.2.1 – Расчетная электрическая цепь со смешанным соединением сопротивлений

Для данной схемы(рис.2.1) необходимо выполнить следующие задания:

- 1) определить токи в электрических ветвях I_1, I_2, I_3 ;
- 2) составить баланс мощностей;
- 3) определить показание ваттметра;
- 4) построить совмещенную векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений в масштабе.

Дано: $E=200\text{В}; f=50\text{Гц}; r_1=7\text{ Ом}; r_2=8\text{ Ом}; r_3=10\text{ Ом}; C_3=570\text{ мкФ};$
 $L_1=12,3\text{ мГн}; L_2=35,6\text{ мГн}.$

2.1 Расчет токов в ветвях электрической цепи

2.1.1 Задаются произвольно выбранным положительным направлением токов в ветвях электрической цепи (рис.2.1.).

2.1.2 Находятся сопротивления реактивных элементов:

индуктивное сопротивление: $x_{L1} = \omega \cdot L_1 = 314 \cdot 12,3 \cdot 10^{-3} = 3,86\text{ Ом},$

$$x_{L2} = \omega \cdot L_2 = 314 \cdot 35,6 \cdot 10^{-3} = 11,18\text{ Ом}.$$

емкостное сопротивление: $x_{C3} = \frac{1}{\omega \cdot c_3} = \frac{10^6}{314 \cdot 570} = 5,58\text{ Ом},$

где ω -угловая частота, равная $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 314 \cdot 50 = 314\text{ с}^{-1}.$

2.1.3 Находятся значения полных (комплексных) сопротивлений ветвей исходной электрической цепи (рис.2.2, а).

Сопротивление первой ветви считается с учетом того, что резистор соединен параллельно с катушкой индуктивности, то есть

$$\underline{Z}_1 = \frac{r_1 \cdot jx_{L1}}{r_1 + jx_{L1}} = \frac{7 \cdot j 3,86}{7 + j 3,86} = 1,63 + j 2,96 = Ze^{jx} = 3,38e^{j61}\text{ Ом}.$$

Сопротивления второй и третьей ветвей рассчитываются как последовательное соединение элементов в ветви (рис.2.2,а) по формулам

$$\underline{Z}_2 = r_2 + jx_{L2} = 8 + j11,18 = 13,75e^{j55}\text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_3 = r_3 - jx_{C3} = 10 - j5,58 = 11,45e^{j29}\text{ Ом}.$$

Так как вторая и третья ветви соединены параллельно друг другу (рис.2.2,а и рис.2.2,б), расчет общего сопротивления на этом участке сводится к следующему:

$$\underline{Z}_{2,3} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{13,75e^{j55} \cdot 11,45e^{-j29}}{8 + j11,18 + 10 - j5,58} = \frac{157,44e^{j26}}{18 + j5,6} = 8,3e^{j9} = (8,25 + j1,31)\text{ Ом}.$$

После преобразования сопротивление \underline{Z}_{23} соединено последовательно с

сопротивлением \underline{Z}_1 (рис.2.2,б). Поэтому входное сопротивление всей цепи $\underline{Z}_{\text{вх}} = \underline{Z}_{\text{экв}}$ (рис.2.2,в) рассчитывается по формуле

$$\underline{Z}_{\text{экв}} = \underline{Z}_{\text{вх}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = 1,63 + j2,96 + 8,25 + j1,31 = 9,88 + j4,27 = 10,76e^{j24} \text{ Ом}.$$

2.1.4 Расчет токов начинается с определения входного тока (рис.2.2,в) по

закону Ома: $\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{\underline{Z}_{\text{вх}}} = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_{\text{вх}}} = \frac{200e^{j0}}{10,76e^{j24}} = 18,59e^{-j24} = (16,98 - j7,56) \text{ А}.$

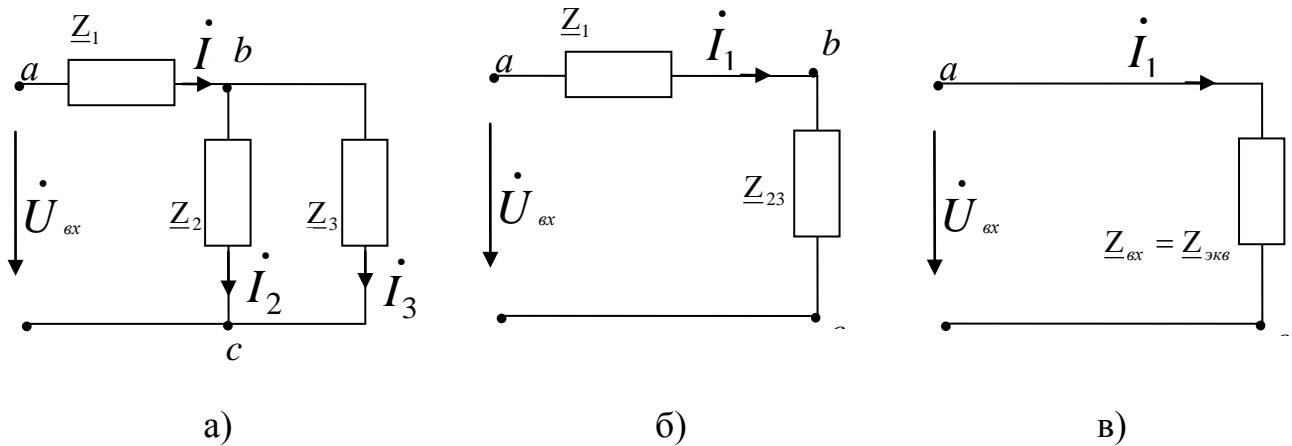


Рисунок 2.2 – Расчетные эквивалентные схемы

Для определения значений токов в параллельных ветвях между узлами «b» и «c» (рис.2.1) необходимо сначала найти значение напряжения на параллельном участке «bc» электрической схемы (рис.2.2,а). Для этого выражается напряжение U_{bc} из закона Ома

$$\dot{U}_{bc} = \underline{Z}_{23} \cdot \dot{I}_1 = 8,35e^{j9} \cdot 18,59e^{-j24} = 155,23e^{-j15} \text{ В}.$$

Комплексные токи в разветвленной части схемы (рис.2.2,а) I_2 и I_3 находятся по закону Ома

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_2} = \frac{15,5,23e^{-j15}}{13,75e^{j55}} = 11,29e^{-j70} = (3,86 - j10,61) \text{ А},$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_3} = \frac{155,23e^{-j15}}{11,45e^{-j29}} = 13,56e^{j14} = (13,16 - j3,28) \text{ А}.$$

Правильность расчета значений найденных токов проверяется для одного

из узлов исходной схемы (рис.2.1) по первому закону Кирхгофа $\sum_{k=1}^n I_n = 0$.

Для узла «b» уравнение по первому закону Кирхгофа записывается в следующем виде: $I_1 - I_2 - I_3 = 0$. Подставляются значения рассчитанных токов, и делается проверка: $16,98 - j7,56 - 3,86 + j10,61 - 13,16 - j3,28 = 0$ А. Можно сделать вывод, что расчет верен.

В исходной схеме (рис.2.1) первая ветвь имеет параллельное соединение резистора и катушки индуктивности. Это необходимо учесть при построении векторной диаграммы токов. Поэтому выполняется расчет токов на активном и реактивном элементах, который имеет вид

$$I_{R1} = \frac{\dot{U}_{ab}}{R_1} = \frac{62,83e^{j37}}{7} = 8,98e^{j37} \text{ А}, \quad I_{X1} = \frac{\dot{U}_{ab}}{jX_1} = \frac{62,83e^{j37}}{3,86e^{j90}} = 16,28e^{-j53} \text{ А}.$$

2.1.5 Для построения топографической диаграммы напряжений необходимо определить падения напряжений на участках цепи (рис2.2,а)

$$\dot{U}_{ab} = \underline{Z}_1 \cdot \dot{I}_1 = 3,38e^{j61} \cdot 18,59e^{-j24} = 62,83e^{j37} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{be} = r_2 \cdot \dot{I}_2 = 8 \cdot 11,29e^{-j70} = 90,32e^{-j70} \text{ В} - \text{совпадает с направлением тока } I_2,$$

$$\dot{U}_{ec} = jX_{L2} \cdot \dot{I}_2 = j11,18 \cdot 11,29e^{-j70} = 126,2e^{j20} \text{ В} - \text{опережает ток } I_2 \text{ на } \varphi = 90^\circ,$$

$$\dot{U}_{ed} = r_3 \cdot \dot{I}_3 = 10 \cdot 13,56e^{j14} = 135,6e^{j14} \text{ В} - \text{совпадает с направлением тока } I_3,$$

$$\dot{U}_{dc} = -jX_{c3} \cdot \dot{I}_3 = -j5,58 \cdot 13,56e^{j14} = 75,67e^{-j76} \text{ В} - \text{отстает от тока } I_3 \text{ на } \varphi = 90^\circ.$$

2.2 Баланс мощностей

Баланс мощностей заключается в равенстве суммарных мощностей, отдаваемых источником электрической энергии и потребляемых электрофизическими элементами электрической цепи. Баланс полных мощностей в комплексной форме имеет вид

$$\sum \underline{S}_{\text{ист}} = \sum \underline{S}_{\text{нагр}}; \quad (2.1)$$

где $\sum \underline{S}_{ист}$ – полная мощность источника,

$\sum \underline{S}_{номр}$ – полная мощность потребителя.

2.2.1 Полная мощность источника рассчитывается по формуле

$$\sum \underline{S}_{ист} = \dot{U}_{вх} \cdot I_1^*, \quad (2.2)$$

где I_1^* – сопряженный комплекс тока I_1 .

Отсюда полная мощность источника в данной задаче будет равна

$$\sum \underline{S}_{ист} = 200e^{j^0} \cdot 18,59e^{j^{24}} = 3718e^{j^{24}} = (3396,56 + j1512) \text{ ВА}.$$

В данной формуле действительная часть комплексного числа является активной мощностью источника, а мнимая часть – реактивной мощностью.

$P_{ист} = 3396,56 \text{ Вт}$ – активная мощность источника;

$Q_{ист} = 1512 \text{ вар}$ – реактивная мощность источника.

2.2.2 Полная мощность потребителя рассчитывается с учетом всех сопротивлений исходной схемы (рис.2.1)

$$\sum \underline{S}_{номр} = \sum \underline{Z} \cdot \dot{I}. \quad (2.3)$$

В данной задаче учитываются все три ветви с тремя комплексными сопротивлениями в показательной форме записи, а значения токов каждой ветви берется только по модулю и возводится в квадрат

$$\begin{aligned} \sum \underline{S}_{номр} &= \underline{Z}_1 I_1^2 + \underline{Z}_2 I_2^2 + \underline{Z}_3 I_3^2 = 3,38e^{j^{61}} \cdot 18,59^2 + 13,75e^{j^{55}} \cdot 11,29^2 + 11,45e^{-j^{29}} \cdot 13,56^2 = \\ &= 1168,09e^{j^{61}} + 1752,63e^{j^{55}} + 210535e^{-j^{29}} = 566,3 + j1021,63 + 1005,27 + j14,35,67 + 1841,38 - \\ &- j1020,69 = (3402,95 + j1509) \text{ ВА}. \end{aligned}$$

$P_{номр} = 3402,95 \text{ Вт}$ – активная мощность потребителя;

$Q_{номр} = 1509 \text{ вар}$ – реактивная мощность потребителя.

2.3. Показание ваттметра

При аналитическом определении показаний приборов (амперметров, вольтметров, ваттметров) необходимо применять распространенные законы и

методы для определения данных величин.

Ваттметр показывает активную мощность

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (2.4)$$

где U и I – действующие значения напряжения и тока;

φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

При определении показаний ваттметра необходимо учитывать ориентацию тока и напряжения по отношению к генераторным зажимам (зажимам, отмеченных звездочками). В нашем случае ток $I_1 = 18,59 \text{ А}$, напряжение $U_{ac} = E = 200 \text{ В}$. Сдвиг по фазе между напряжением и током будет $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0 - (-24^\circ) = 24^\circ$. Тогда, показание ваттметра равно

$$P_w = U_{\text{вх}} \cdot I \cos \varphi_1 = 200 \cdot 18,59 \cdot \cos 24^\circ = 3396,6 \text{ Вт}.$$

2.4 Построение совмещенной векторной диаграммы токов и топографической диаграммы напряжений

Совмещенная векторная диаграмма токов (ВДТ) и топографическая диаграмма напряжений (ТДН) представлена на рисунке 2.3.

Для ее построения необходимо использовать расчеты в пунктах 2.1.4 и 2.1.5.

Сначала откладывается в масштабе $m_U = 20 \text{ В/см}$ вектор входного напряжения U_{ac} по вещественной оси. Затем в масштабе $m_I = 5 \text{ А/см}$ откладываются токи I_2 и I_3 под углами φ_2 и φ_3 соответственно. Сложив векторы токов I_2 и I_3 по правилу параллелограмма, получается вектор входного тока I_1 .

Топографическая диаграмма напряжений строится по замкнутому контуру. Для каждого элемента в отдельности находят значения напряжения (пункт 2.1.5), идя против направления тока в ветвях схемы. Все векторы падений напряжений на элементах цепи замкнутого контура имеют

определенное направления: U_{dc} – отстает от тока I_3 на 90° ; U_{bd} – совпадает по фазе с током I_3 (вектор напряжения параллелен вектору тока); U_{ec} – опережает ток I_2 на 90° ; U_{be} – совпадает по фазе с током I_2 , вектор напряжения U_{ab} получается путем соединения точки «a» и точки «b». Если расчеты сделаны верно, то длина вектора параллельного участка U_{ab} будет совпадать со значением полученным в задаче.

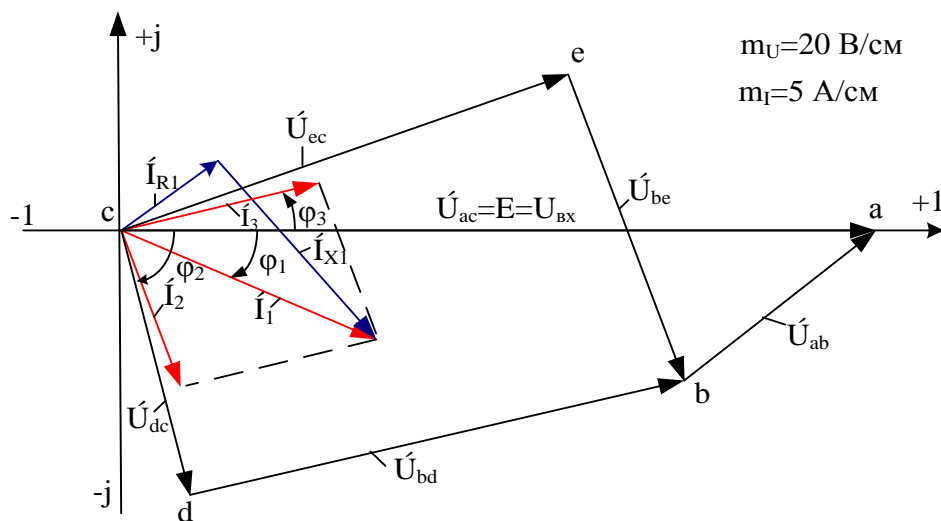


Рисунок 2.3 – Совмещенная векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений

Варианты для задачи 2

Для схемы, соответствующей вашему варианту, изображенной на рис.2.1 - 2.18 необходимо выполнить следующие расчеты:

- 1) определить токи в электрических ветвях исходной схемы I_1, I_2, I_3 ;
- 2) составить баланс мощностей;
- 3) определить показание ваттметра;
- 4) построить совмещенную векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений в масштабе.

Таблица 2.1

Вариант	Рисунок	E, В	f, Гц	C ₁ , мкФ	C ₂ , мкФ	C ₃ , мкФ	L ₁ , мГн	L ₂ , мГн	L ₃ , мГн	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2.1	150	50	–	637	–	14,5	–	–	5	8	2
2	2.2	320	50	635	380	115	–	–	9,5	10	5	7
3	2.3	90	50	131	–	250	–	15,9	–	6	–	5
4	2.4	110	50	–	280	–	–	–	15,9	7	3	5
5	2.5	150	50	–	–	637	15,9	6,37	–	2	4	3
6	2.6	150	50	–	315	–	12,5	–	10,6	6	4	8
7	2.7	220	50	–	–	660	9,3	11,5	12,3	8	9	6
8	2.8	200	50	650	–	340	–	10,2	–	10	–	5
9	2.9	120	50	300	415	–	–	–	13,7	2	4	6
10	2.10	150	50	520	235	315	–	–	29,5	9	6	7
11	2.11	80	50	280	–	–	–	15,7	6,5	4	2	3
12	2.12	100	50	318	–	250	–	115	12,3	6	–	4
13	2.13	210	50	270	–	–	–	13,9	16,5	14	12	15
14	2.14	210	50	–	–	510	11,5	9,37	–	8	14	9
15	2.15	100	50	318	–	600	–	9,55	–	6	–	8
16	2.16	150	50	550	–	–	–	212	–	8	–	7
17	2.17	100	50	350	215	–	–	–	9,7	5	3	7
18	2.18	210	50	–	218	–	11,5	–	19,3	11	14	6
19	2.1	200	50	–	635	–	62,5	–	–	14	11	9
20	2.2	100	50	355	270	145	–	–	18,3	7	8	6
21	2.3	230	50	350	–	280	–	17,3	35,6	17	–	9
22	2.4	230	50	–	317	–	12,5	–	–	7	2	16
23	2.5	180	50	–	–	650	25,8	19,5	11,3	5	12	8
24	2.6	220	50	–	–	580	26,3	85,6	–	13	12	15

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
25	2.7	220	50	–	–	470	15,3	25,6	–	13	11	9
26	2.8	110	50	315	–	240	–	8,9	–	6	–	11
27	2.9	140	50	330	456	–	–	–	12,6	8	4,5	3,5
28	2.10	150	50	435	319	215	–	–	11,5	12	4	8
29	2.11	200	50	180	–	–	–	9,7	16,5	6	3	8
30	2.12	210	50	428	–	280	–	18,5	15,3	12	–	14
31	2.13	140	50	180	–	–	–	13,9	10,9	4	–	15
32	2.14	180	50	–	–	–	19,3	9,5	–	7	4	3
33	2.15	120	50	278	–	450	–	13,55	–	7	–	4
34	2.16	70	50	355	–	–	–	11,2	–	2	–	5
35	2.17	190	50	480	265	215	–	–	19,5	11	8	5
36	2.18	130	50	–	687	–	15,9	–	6,5	11	11	5
37	2.5	215	50	–	290	340	28,9	–	–	9	15	13
38	2.6	200	50	–	570	–	12,3	–	35,6	7	8	10
39	2.7	90	50	–	–	460	19,8	15,5	–	4	2	5
40	2.1	110	50	–	515	–	32,5	–	–	4	9	7
41	2.2	140	50	460	290	560	–	–	45,6	11	6	5
42	2.3	105	50	280	–	290	–	12,9	17,3	8	–	9,5
43	2.4	220	50	–	518	–	–	–	17,3	12	13	9
44	2.5	90	50	–	–	460	19,8	15,5	–	4	2	5
45	2.6	110	50	–	515	–	32,5	–	21,6	4	9	7
46	2.9	210	50	480	265	–	–	–	19,5	5,5	8	7
47	2.10	130	50	265	290	480	–	–	25,9	10	11	5
48	2.11	140	50	560	–	–	–	19,3	45,6	11	6	5
49	2.12	70	50	355	–	236	–	11,2	18,3	2	–	5
50	2.13	220	50	518	–	–	–	28,5	17,3	5	–	4

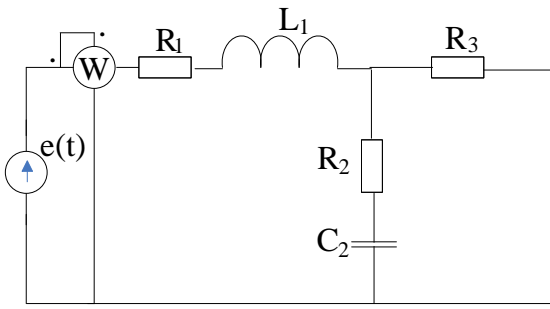


Рисунок 2.1

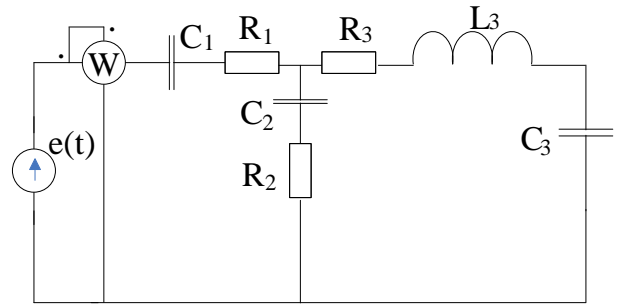


Рисунок 2.2

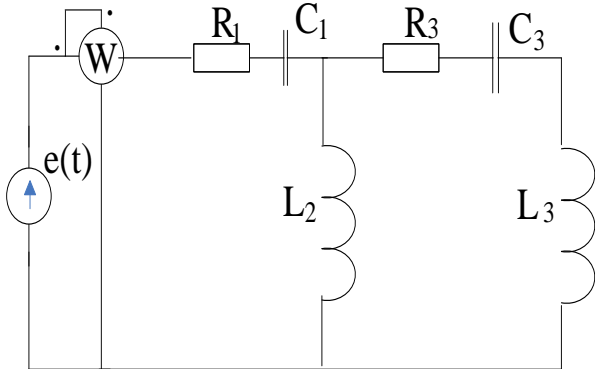


Рисунок 2.3

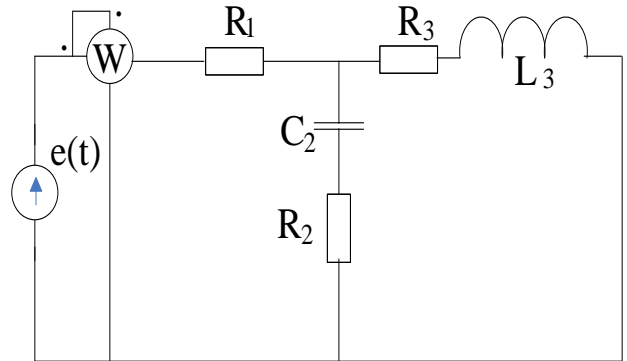


Рисунок 2.4

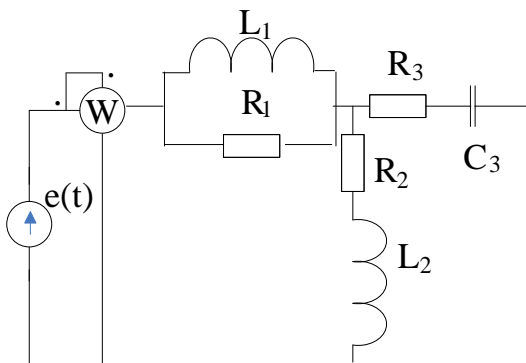


Рисунок 2.5

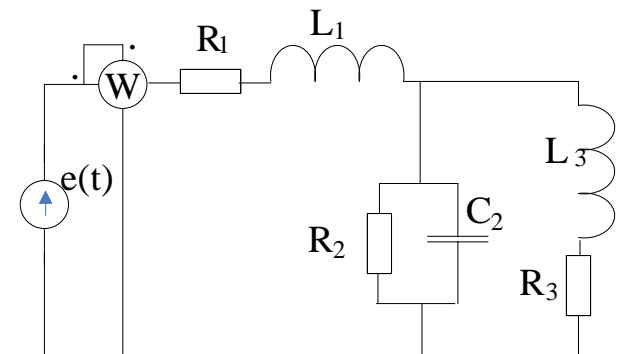


Рисунок 2.6

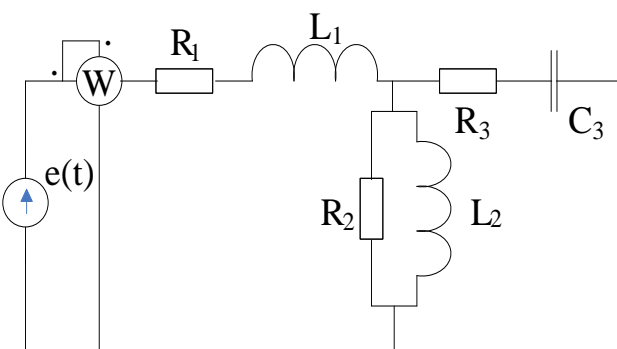


Рисунок 2.7

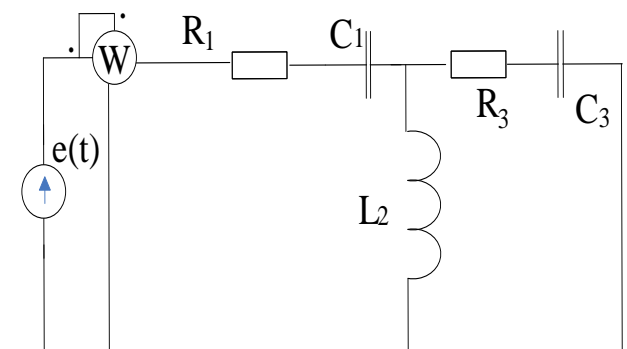


Рисунок 2.8

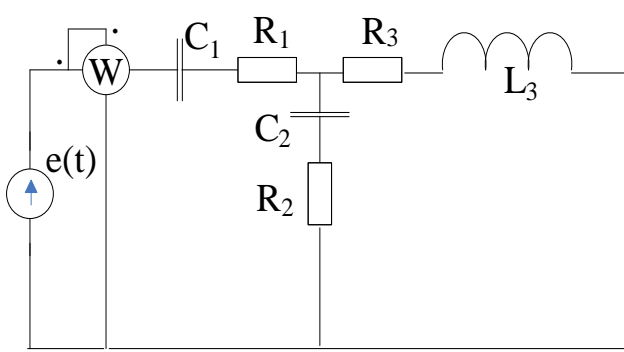


Рисунок 2.9

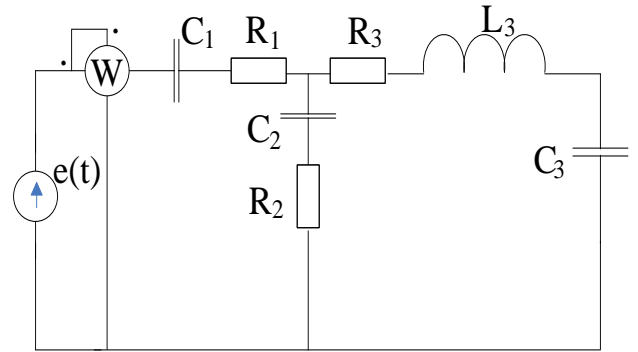


Рисунок 2.10

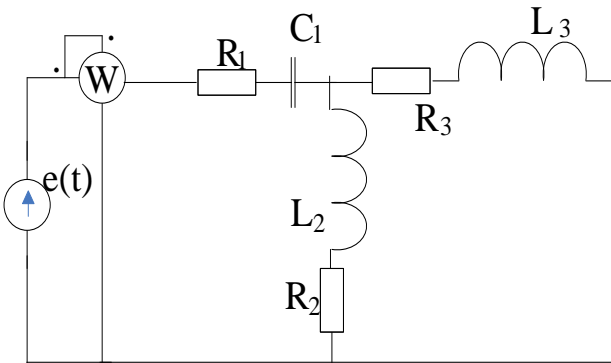


Рисунок 2.11

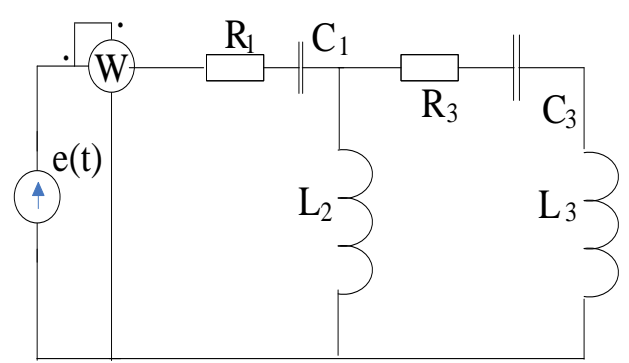


Рисунок 2.12

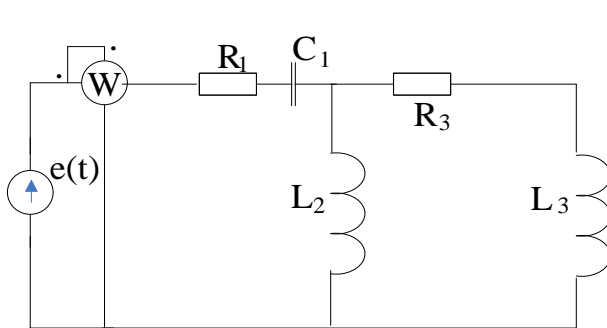


Рисунок 2.13

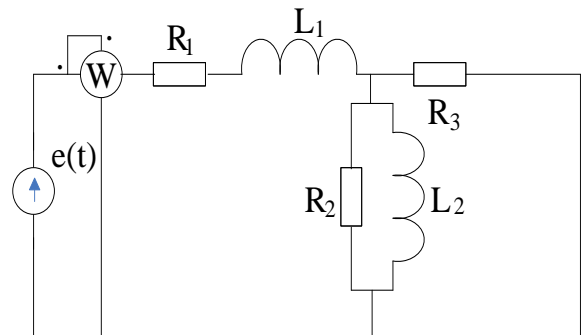


Рисунок 2.14

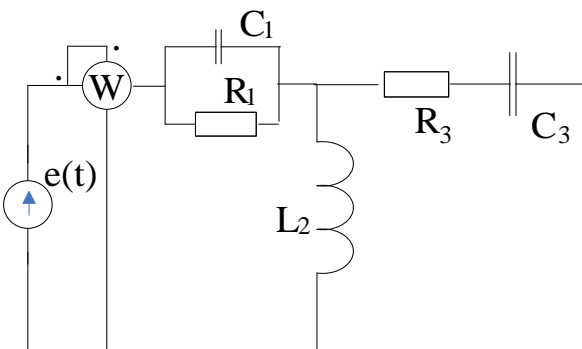


Рисунок 2.15

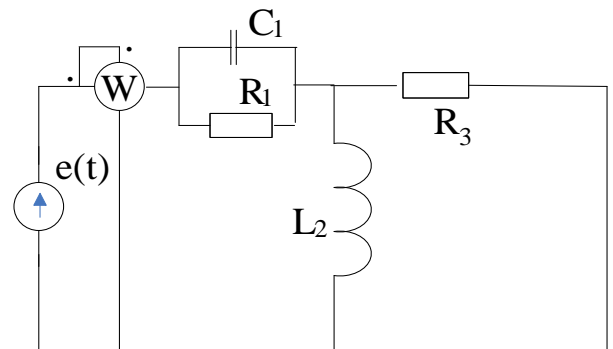


Рисунок 2.16

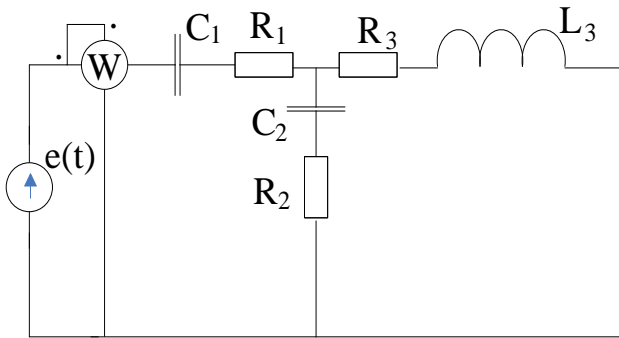


Рисунок 2.17

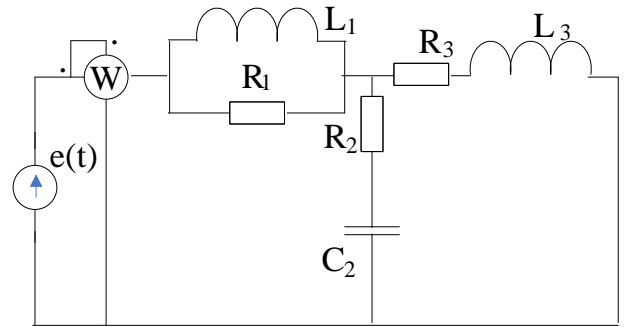


Рисунок 2.18

ЗАДАЧА 3. Расчет трехфазной симметричной электрической цепи

Основной целью при расчетах трехфазных цепей является определение токов во всех фазах при известных параметрах источника питания $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$, сопротивлений потребителя $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ и сопротивлений линейных проводов $\underline{Z}_л$.

При расчете трехфазных цепей применяется метод непосредственного применения законов Кирхгофа, контурных токов, двух узлов и т.д. Использование данных методов рассматривается на примере расчета электрической трехфазной цепи (рис.3.1). Схема имеет трехфазный генератор, создающий симметричную трехфазную систему ЭДС и симметричную нагрузку.

В данной схеме необходимо выполнить следующие задания:

- 1) рассчитать токи схемы;
- 2) найти напряжения на отдельных участках цепи;
- 3) определить активную мощность трехфазной системы;
- 4) построить совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений.

Дано: $E_A = 200 \text{ В}$; $T = 0,015 \text{ с}^{-1}$; $L = 22,32 \text{ мГн}$; $C_1 = 276 \text{ мкФ}$;

$R_1 = 4,33 \text{ Ом}$; $R_2 = 8,66 \text{ Ом}$

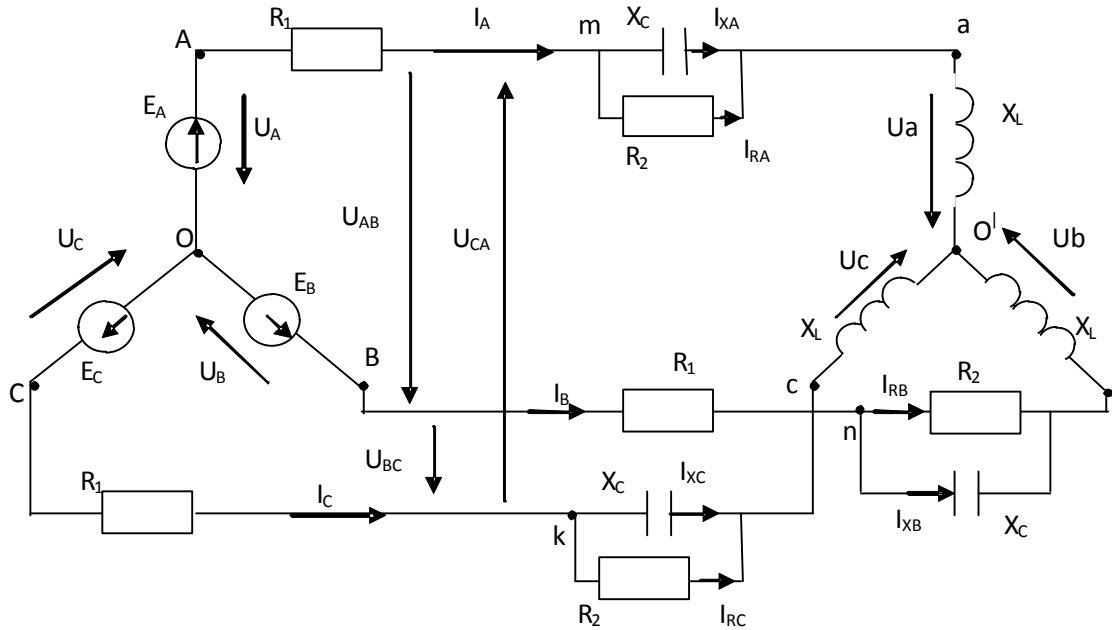


Рисунок 3.1 – Трехфазная симметричная система

3.1 Расчет токов в трехфазной цепи

3.1.1 Для определения токов сначала необходимо найти сопротивления реактивных элементов. Определяются:

- угловая частота: $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \frac{2 \cdot 314}{0,015} = 418,7 \text{ c}^{-1}$;

- индуктивное сопротивление: $x_L = \omega \cdot L = 418,7 \cdot 22,32 \cdot 10^{-3} = 9,35 \text{ Ом}$;

- емкостное сопротивление: $x_{c1} = \frac{1}{\omega \cdot c_1} = \frac{10^6}{418,7 \cdot 276} = 8,65 \text{ Ом}$.

3.1.2 Комплексные значения напряжений источника питания

а) фазные напряжения генератора рассчитываются из соотношения

$$U_{\phi} = E_A \quad (3.1)$$

Тогда фазные напряжения генератора

$$\dot{U}_A = U_{\phi} e^{j0} = 200 \cdot e^{j0} \text{ В}$$

$$\dot{U}_B = U_{\phi} e^{-j120} = 200 \cdot e^{-j120} \text{ В}$$

$$\dot{U}_C = U_{\phi} e^{j120} = 200 \cdot e^{j120} \text{ В}$$

б) линейные напряжения генератора рассчитываются из соотношения

$$U_{\text{л}} = U_{\phi} \sqrt{3} \quad (3.2)$$

Значение модуля линейного напряжения в данной задаче равно

$U_{\text{л}} = U_{\phi} \sqrt{3} = 200\sqrt{3} = 346,4 \text{ В}$, отсюда комплексные значения линейных напряжений генератора будет иметь вид

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = U_{\text{л}} e^{j30} = 346,4 e^{j30} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = U_{\text{л}} e^{-j90} = 346,4 e^{-j90} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = U_{\text{л}} e^{j150} = 346,4 e^{j150} \text{ В}.$$

3.1.3 При симметричной нагрузке сопротивления фаз равны между собой

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = jx_L = j9,35 = 9,35 e^{j90} \hat{\text{н}}.$$

3.1.4 Сопротивление линейного провода рассчитывается с учетом того, что с параллельно соединенными конденсатором X_{C1} и резистором R_2 , последовательно включен резистор R_1 (рис.3.1):

$$\underline{Z}_{\text{л}} = R_1 + \frac{x_{c1} e^{-j90} \cdot R_2}{-jx_{c1} + R_2} = 4,33 + \frac{8,65 e^{-j90} \cdot 8,66}{-j8,65 + 8,66} = 4,33 + \frac{74,91 e^{-j90}}{12,24 e^{-j45}} = 4,33 + 6,12 e^{-j45} = 4,33 + 4,33 -$$

$$-j4,33 = 8,66 - j4,33 = 9,68 e^{-j26,6} \text{ Ом}.$$

3.1.5 Сопротивление каждой фазы с учетом сопротивления в линейном проводе $\underline{Z}_{\text{л}}$ при симметричной нагрузке равно

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_{\text{л}} + \underline{Z}_a = 8,66 - j4,33 + j9,35 = 8,66 + j5,02 = 10 e^{j30} \text{ Ом}.$$

3.1.6 Токи в фазах приемника определяются по закону Ома (рис.3.1). Так как соединение трехфазной цепи имеет вид «звезда – звезда», то значение токов фаз рассчитывается из соотношения $I_{\text{л}} = I_{\phi}$

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{200 e^{j0}}{10 e^{j30}} = 20 e^{-j30} = (17,32 - j10) \text{ А}$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{200 e^{-j120}}{20 e^{j30}} = 20 e^{-j150} = (17,32 - j10) \text{ А}$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{200e^{j120}}{10e^{j30}} = 20e^{j90} = j20 \text{ A}$$

В исходной схеме (рис.3.1) в линейных проводах имеется параллельное соединение резистора и конденсатора емкости. При построении векторной диаграммы токов необходимо это учесть. Поэтому вычисляется величина токов, протекающих через резистор R_2 (активная составляющая тока) и конденсатор с сопротивлением X_{C2} (реактивная составляющая тока) для всех фаз трехфазной цепи.

Для фазы «а»: на активном элементе – $\dot{I}_{RA} = \frac{\dot{U}_{ma}}{R_2} = \frac{\underline{Z}_{am} \cdot \dot{I}_A}{R_2} = \frac{122,4e^{-j75}}{8,66} = 14,2e^{-j75} \text{ A};$

на реактивном элементе (конденсаторе) – $\dot{I}_{xA} = \frac{\dot{U}_{ma}}{-jX_C} = \frac{122,4e^{-j75}}{8,65e^{-j90}} = 14,2e^{j15} \text{ A}.$

Для фазы «в»: на активном элементе – $\dot{I}_{RB} = \dot{I}_{RA} e^{-j120} = 14,2e^{-j75} \cdot e^{-j120} = 14,2e^{-j195} \text{ A};$

на реактивном элементе – $\dot{I}_{xB} = \dot{I}_{xA} \cdot e^{-j120} = 14,2e^{-j105} \text{ A}.$

Для фазы «с»: на активном элементе – $\dot{I}_{RC} = \dot{I}_{RA} \cdot e^{j120} = 14,2e^{j45} \text{ A};$

на реактивном элементе – $\dot{I}_{xC} = \dot{I}_{xA} \cdot e^{j120} = 14,2e^{j135} \text{ A}.$

3.2 Определение напряжений на отдельных участках цепи

3.2.1 Для построения топографической диаграммы напряжений необходимо рассчитать падение напряжения на фазах потребителя (нагрузки):

$$\dot{U}_a = \underline{Z}_a \cdot \dot{I}_A = 9,35e^{j90} \cdot 20e^{-j30} = 187e^{j60} = (93,5 + j161,9) \text{ В},$$

$$\dot{U}_b = \underline{Z}_b \cdot \dot{I}_B = 9,35e^{j90} \cdot 20e^{-j150} = 187e^{-j60} = (93,5 - j161,9) \text{ В},$$

$$\dot{U}_c = \underline{Z}_c \cdot \dot{I}_C = 9,35e^{j90} \cdot 20e^{j90} = 187e^{j180} = -187 \text{ В}.$$

3.2.2 Падение напряжения в линейных проводах определяют для каждой фазы трехфазной цепи

Для фазы «а»: $\dot{U}_{Am} = R_1 \cdot \dot{I}_A = 4,33 \cdot 20e^{-j30} = 86,6e^{-j30} \text{ В},$

$$\dot{U}_{ma} = \underline{Z}_{ma} \cdot \dot{I}_A = 6,12e^{-j45} \cdot 20e^{-j30} = 122,4e^{-j75} \text{ В};$$

$$\text{Для фазы «в»}: \dot{U}_{Bn} = R_1 \cdot \dot{I}_B = 4,33 \cdot 20e^{-j150} = 86,6e^{-j150} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{ns} = \underline{Z}_{ns} \cdot \dot{I}_B = 6,12e^{-j45} \cdot 20e^{-j150} = 122,4e^{-j195} \text{ В};$$

$$\text{Для фазы «с»}: \dot{U}_{ck} = R_1 \cdot \dot{I}_c = 4,33 \cdot 20e^{j90} = 86,6e^{j90} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{kc} = \underline{Z}_{kc} \cdot \dot{I}_c = 6,12e^{-j45} \cdot 20e^{j90} = 122,4e^{j45} \text{ В}.$$

3.2.3 Совмещенная векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений представлена на рисунке 3.2.

3.3 Активная мощность симметричной трехфазной системы

Так как трехфазная цепь представляет собой совокупность трех однофазных электрических цепей, то ее активную мощность можно представить в виде суммы мощностей всех трех фаз

$$P = P_A + P_B + P_C \quad (3.3)$$

При симметричной нагрузке, независимо от схемы соединения активную мощность при симметричной нагрузке можно рассчитать следующим образом

$$P = P_A + P_B + P_C = 3 \cdot P_A = 3 \cdot U_A \cdot I_A \cdot \cos \varphi_A = 3 \cdot 200 \cdot 20 \cdot \cos(0 - (-30^\circ)) = 10392,3 \text{ Вт}$$

3.4 Построение совмещенной векторной диаграммы токов и топографической диаграммы напряжений

Построение векторной диаграммы токов и топографической диаграммы напряжений начинается с построения звезды напряжений генератора в масштабе $m_U = 40 \text{ В/см}$. Вектор напряжения U_A откладывается по вещественной оси (-1; +1) из начала координат (O, O'). От вектора U_A на 120° развернуты вектор напряжения U_B и U_C при чем вектор U_B отстает от U_A , а U_C опережает. Полученные точки А, В, С образуют треугольник, состоящий из линейных

напряжений генератора U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} . Фазное напряжение приемника U_a откладывается относительно вещественной оси на $\varphi = 60^\circ$. Относительно вектора U_a развернуты U_b на $\varphi = -120^\circ$ и U_c на $\varphi = 120^\circ$. При соединении точек a, b , собразуется треугольник линейных напряжений приемника. Вектора падения напряжений на линейных проводах строятся по расчетам пункта 3.2.2.

Векторная диаграмма токов строится с учетом расчета пункта 3.1.6. Вектор I_A из начала координат относительно вещественной оси, смещенный относительно нее на угол $\varphi_A = -30^\circ$, вектор I_B отстает от U_B на угол $\varphi_B = -30^\circ$; I_C отстает от U_C на угол $\varphi_C = -30^\circ$. Токи на участке разветвления в линейном проводе строятся с помощью расчетов в пункте 3.1.6. При чем, (для фазы А) относительно напряжения на участке разветвления линейного провода U_{ma} ток на резисторе I_{RA} будет строиться параллельно ему, а ток на конденсаторе I_{XA} - опережает напряжение на $\varphi = 90^\circ$.

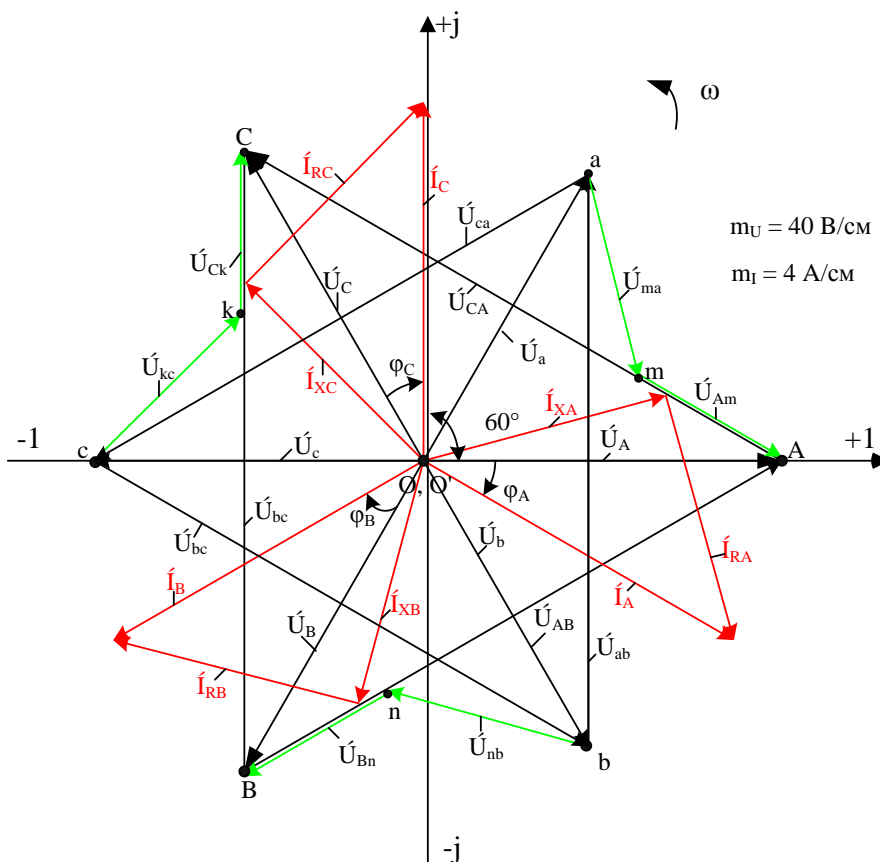


Рисунок 3.2 – Совмещенная векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжения

Варианты для задачи 3

Для схемы, соответствующей вашему варианту, изображенной на рис.3.1 - 3.20 необходимо выполнить следующие расчеты

- 1) рассчитать токи схемы;
- 2) найти напряжения на отдельных участках цепи;
- 3) определить активную мощность трехфазной системы;
- 4) построить совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений.

Примечание: начальную фазу ЭДС E_A принять нулевой, сопротивления обмоток генератора полагать равными нулю; для вариантов, в которых нагрузка соединена треугольником, при расчете преобразовать ее в соединение звездой, но векторную диаграмму построить для исходной схемы.

Таблица 3.1

Вариант	Рисунок	$E_A,$ В	$T,$ с	$L,$ мГн	$C_1,$ мкФ	$C_2,$ мкФ	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3.9	30	0,015	23,92	478,5	—	17,32	—
2	3.10	10	0,015	35,88	210,9	138	17,32	—
3	3.14	60	0,015	4,78	398	—	7,66	2
4	3.16	180	0,015	107,6	119,6	—	26	—
5	3.17	140	0,015	41,4	175,1	—	17,32	—
6	3.18	100	0,015	8,75	138	—	17,32	—
7	3.19	60	0,015	23,92	478,5	—	17,32	—
8	3.7	70	0,02	55,16	233,1	—	17,32	—
9	3.11	200	0,02	29,71	367,5	—	4,33	8,66
10	3.12	160	0,02	24,39	796,2	183,8	—	17,32
11	3.1	100	0,025	37,32	461,6	-	4,33	8,66
12	3.3	60	0,025	8	666	—	7,66	2

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
13	3.4	40	0,025	60	200	—	25,98	—
14	3.6	90	0,025	180	200	—	8,66	—
15	3.9	30	0,025	40	800	—	17,32	—
16	3.10	10	0,025	60	352,7	230,8	17,32	—
17	3.11	200	0,025	37,32	461,6	—	4,33	8,66
18	3.14	80	0,025	60	66,7	—	26	—
19	3.16	180	0,025	180	200	—	26	—
20	3.17	140	0,025	69,28	292,8	—	17,32	—
21	3.18	100	0,025	14,64	230,8	—	17,32	—
22	3.2	80	0,02	24,39	796,2	183,8	—	17,32
23	3.3	60	0,04	12,738	1061	—	7,66	2
24	3.4	40	0,04	95,5	318,4	—	25,98	—
25	3.6	90	0,04	286,6	318	—	8,66	—
26	3.7	70	0,04	110,32	466,3	—	17,32	—
27	3.12	160	0,04	48,78	1592,3	368	—	17,32
28	3.19	60	0,04	63,69	1273,9	—	17,32	—
29	3.1	100	0,01	14,86	183,8	—	4,33	8,66
30	3.3	60	0,01	3,18	265,2	—	7,66	2
31	3.9	30	0,01	15,92	318,4	—	17,32	—
32	3.10	10	0,01	23,8	140,4	91,9	17,32	—
33	3.11	200	0,01	14,86	183,8	—	4,33	8,66
34	3.12	160	0,01	12,19	398	91,9	—	17,32
35	3.14	80	0,01	23,8	26,5	—	26	—
36	3.16	180	0,01	71,65	79,6	—	26	—
37	3.17	140	0,01	27,58	116,5	—	17,32	—
38	3.18	100	0,01	5,82	91,8	—	17,32	—
39	3.19	60	0,01	15,92	318,4	—	17,32	—
40	3.3	60	0,015	4,78	398	—	7,66	2

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
41	3.4	40	0,015	35,88	119,6	—	25,98	—
42	3.6	90	0,015	107,6	119,6	—	8,66	—
43	3.7	70	0,015	41,4	175,1	—	17,32	—
44	3.11	200	0,015	22,32	276	—	4,33	8,66
45	3.1	100	0,02	29,71	367,5	—	4,33	8,66
46	3.3	60	0,02	6,36	530	—	7,66	2
47	3.18	100	0,02	11,65	183,8	—	17,32	—
48	3.18	60	0,02	31,85	636,9	—	17,32	—
49	3.20	20	0,02	47,7	280,8	183,7	17,32	—
50	3.7	70	0,025	69,28	292,8	—	17,32	—

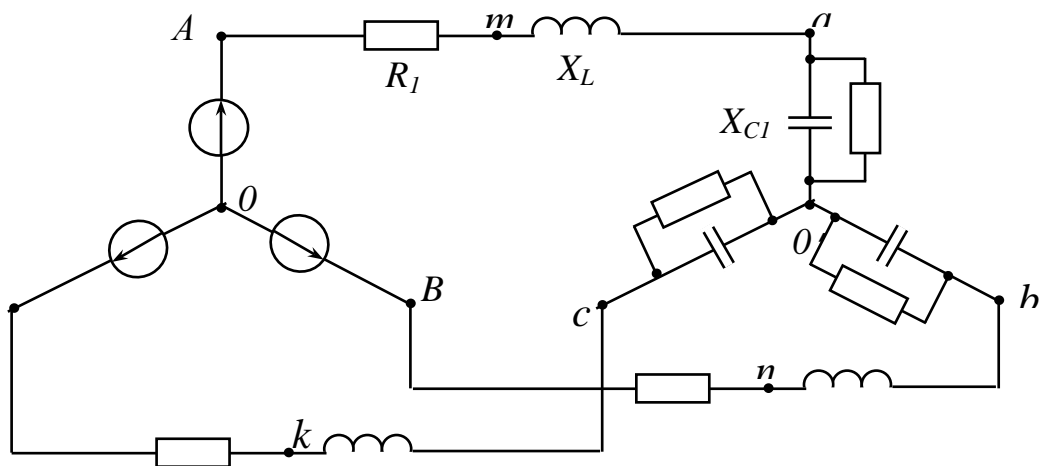


Рисунок 3.1

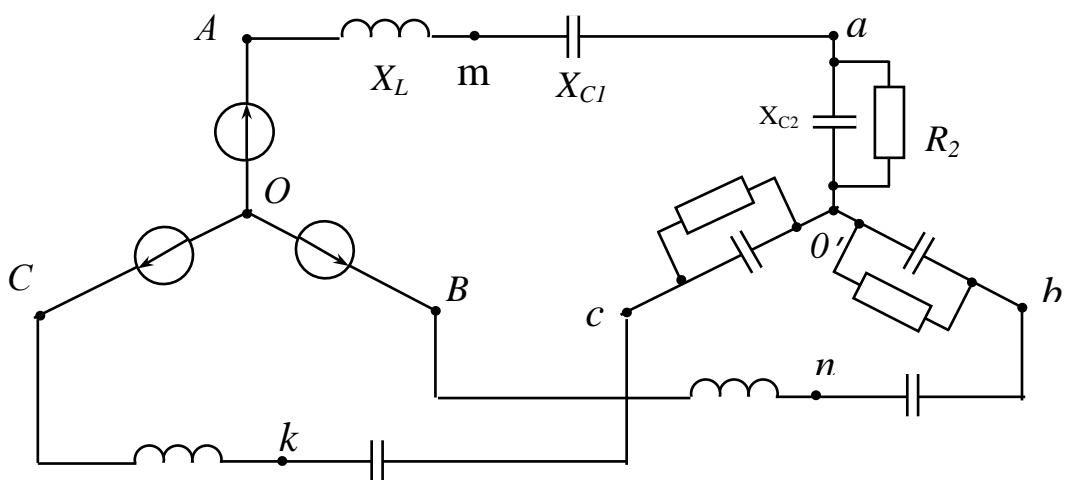


Рисунок 3.2

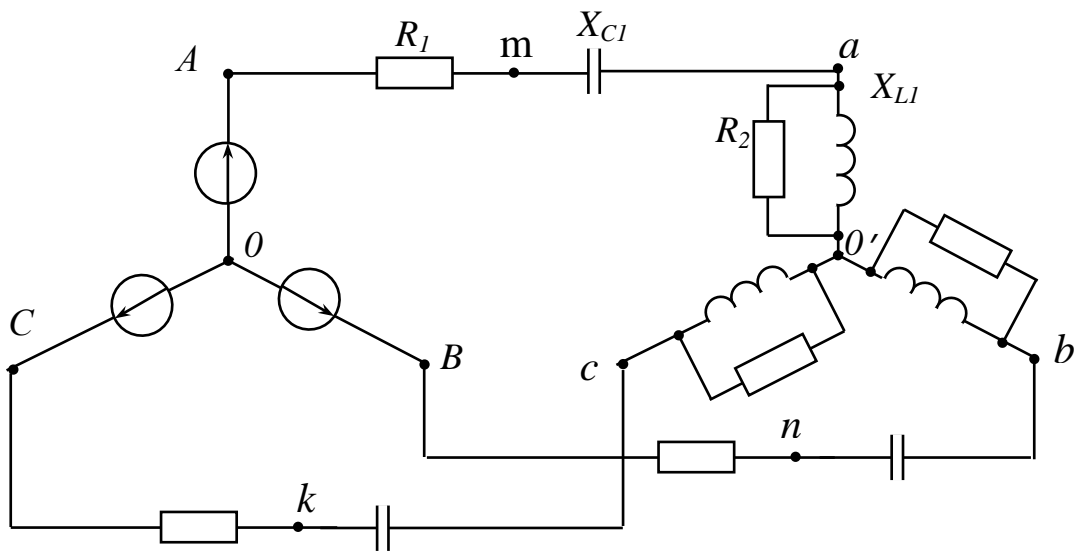


Рисунок 3.3

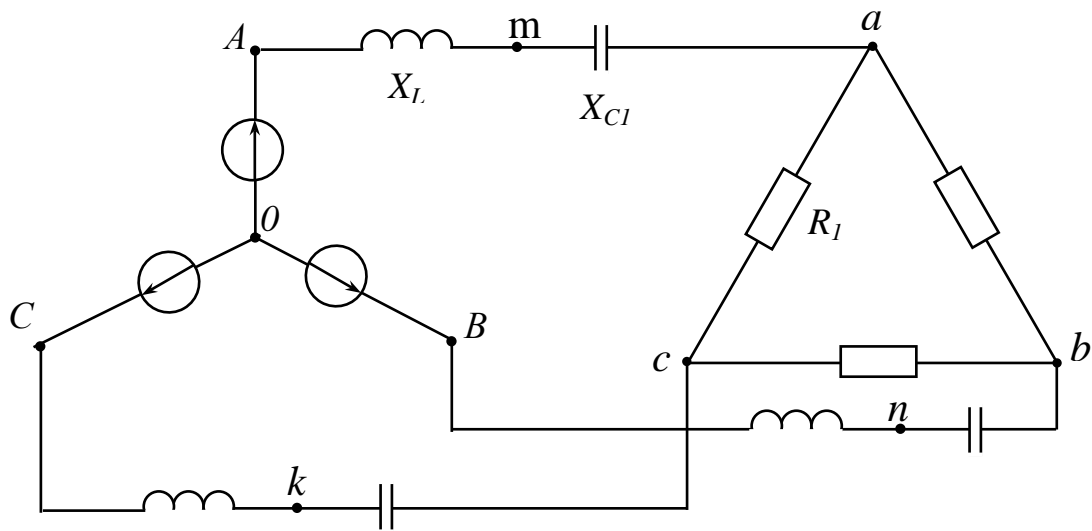


Рисунок 3.4

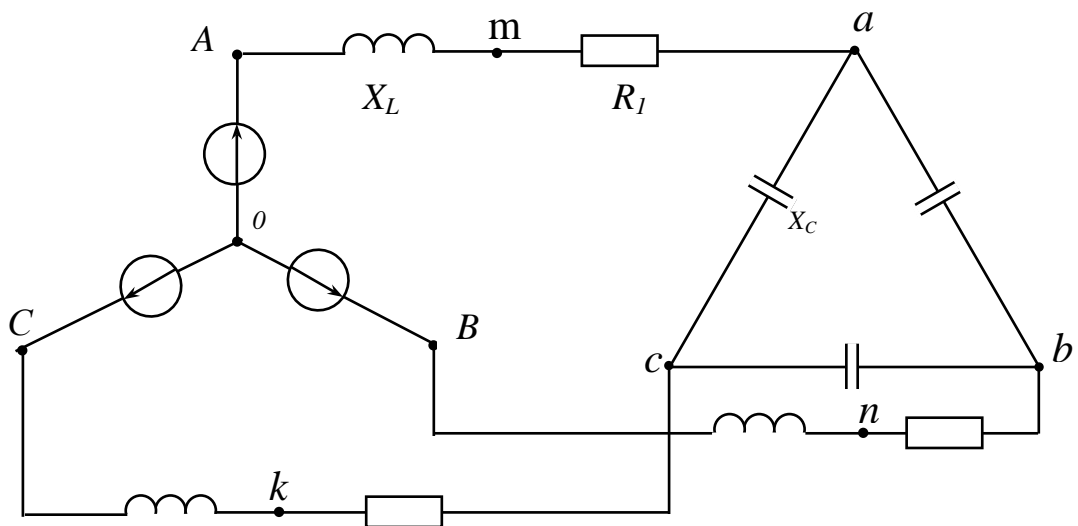


Рисунок 3.5

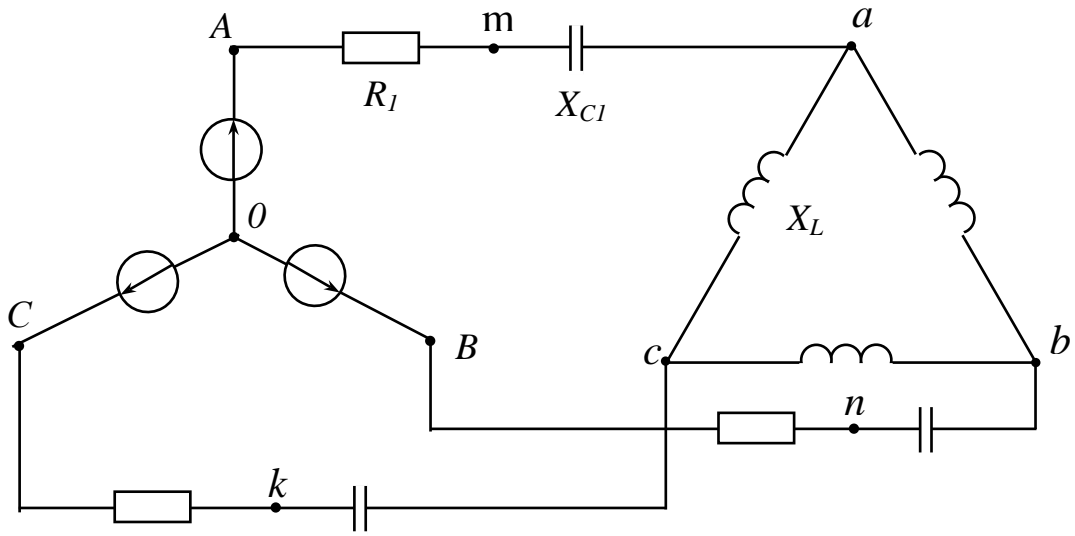


Рисунок 3.6

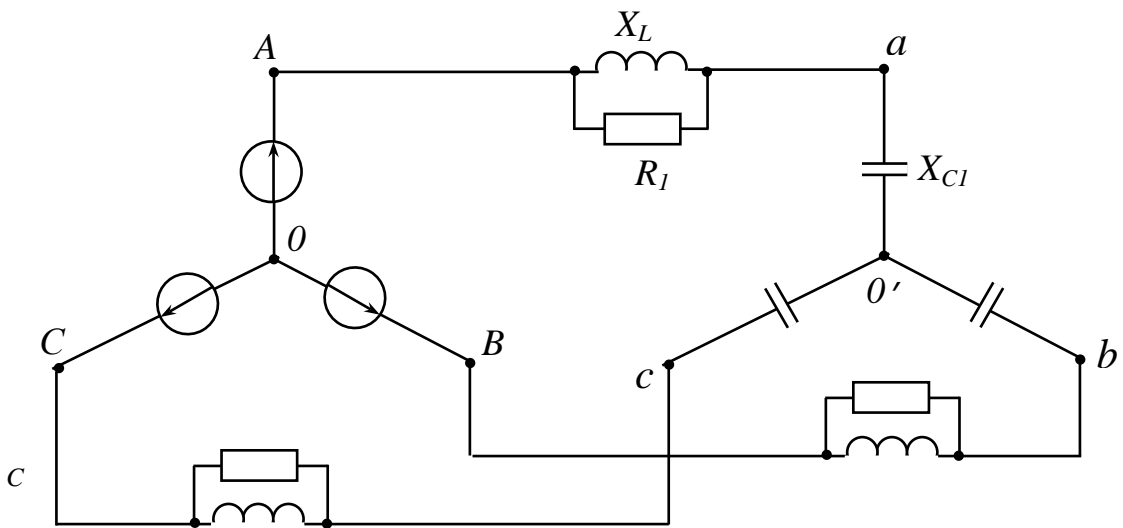


Рисунок 3.7

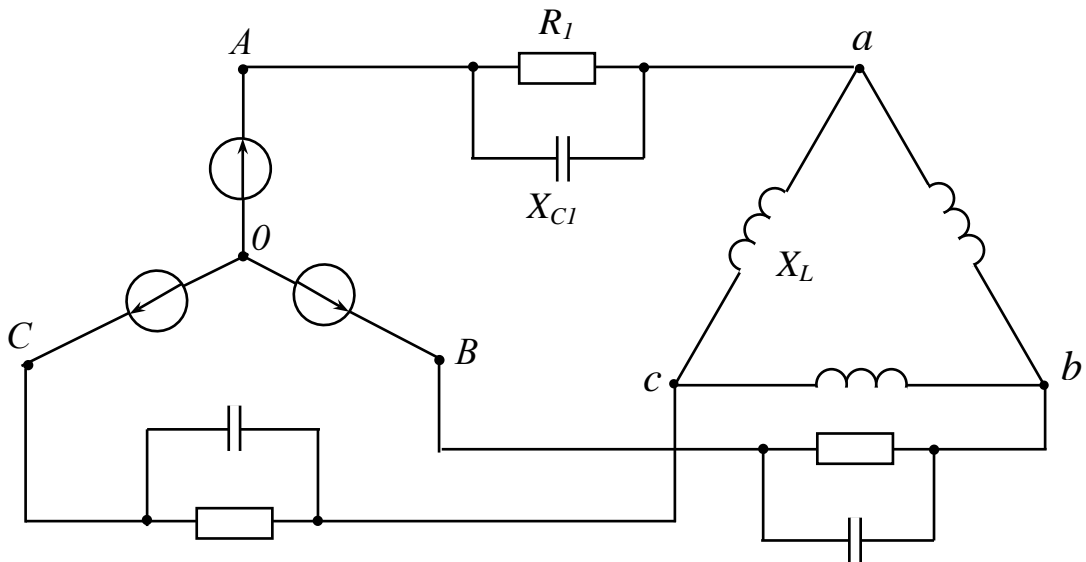


Рисунок 3.8

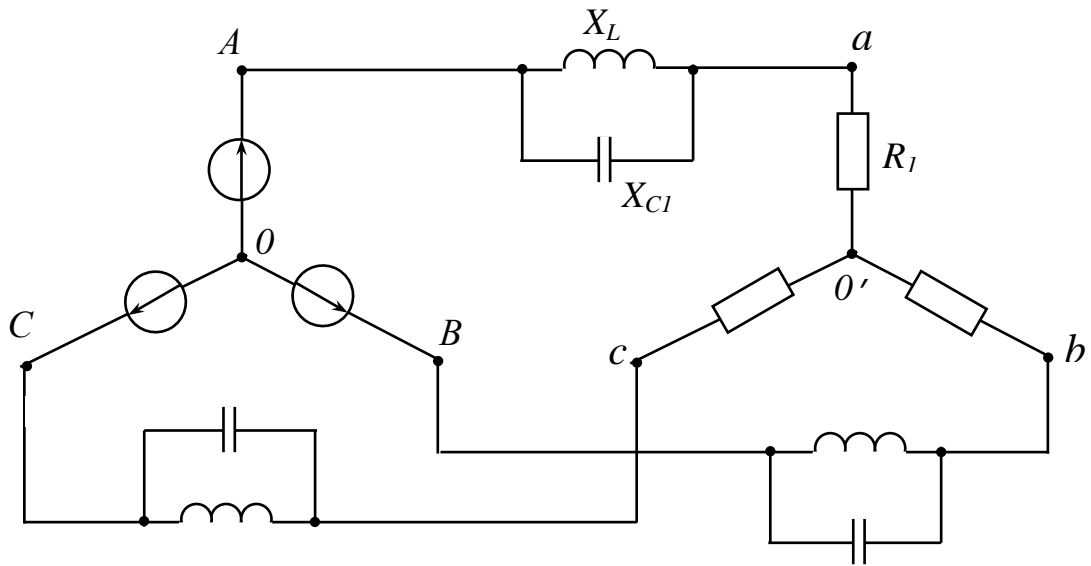


Рисунок 3.9

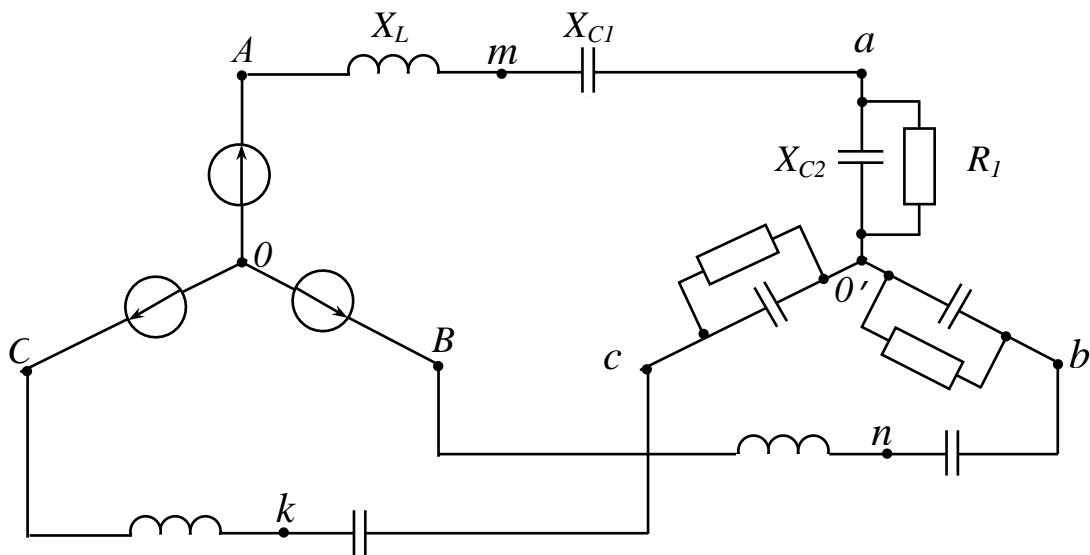


Рисунок 3.10

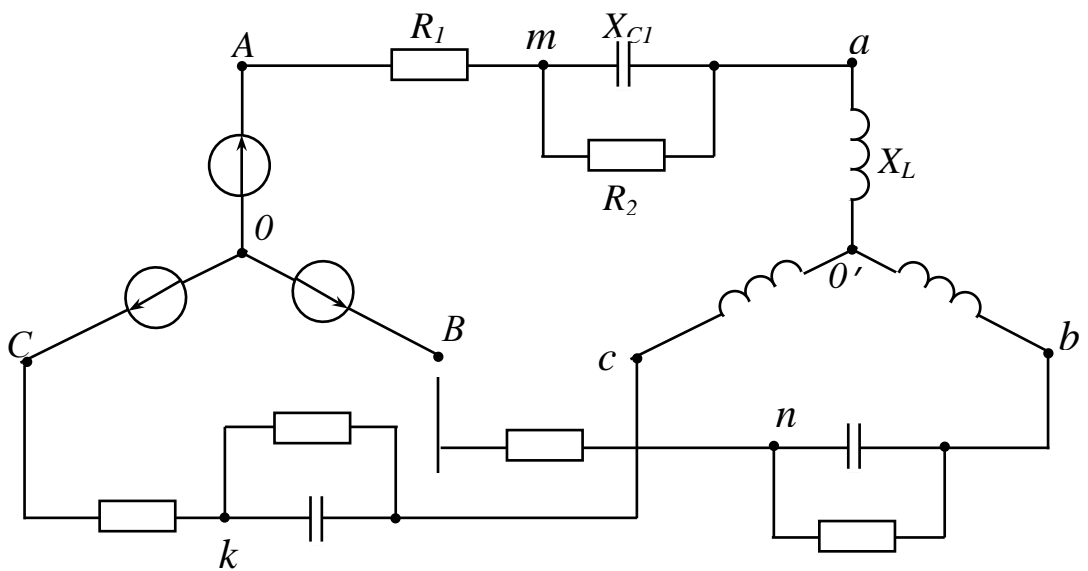


Рисунок 3.11

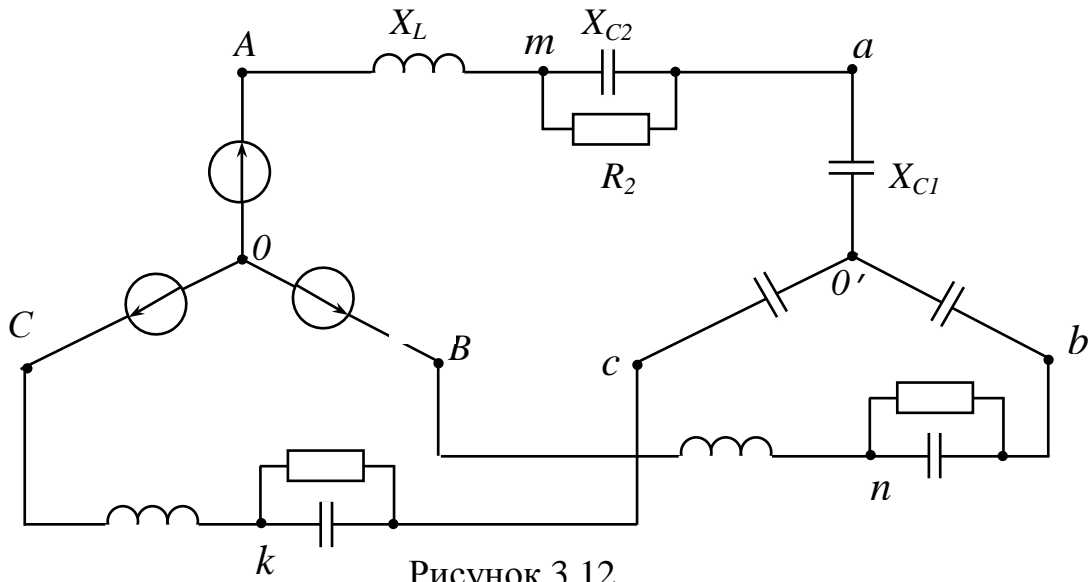


Рисунок 3.12

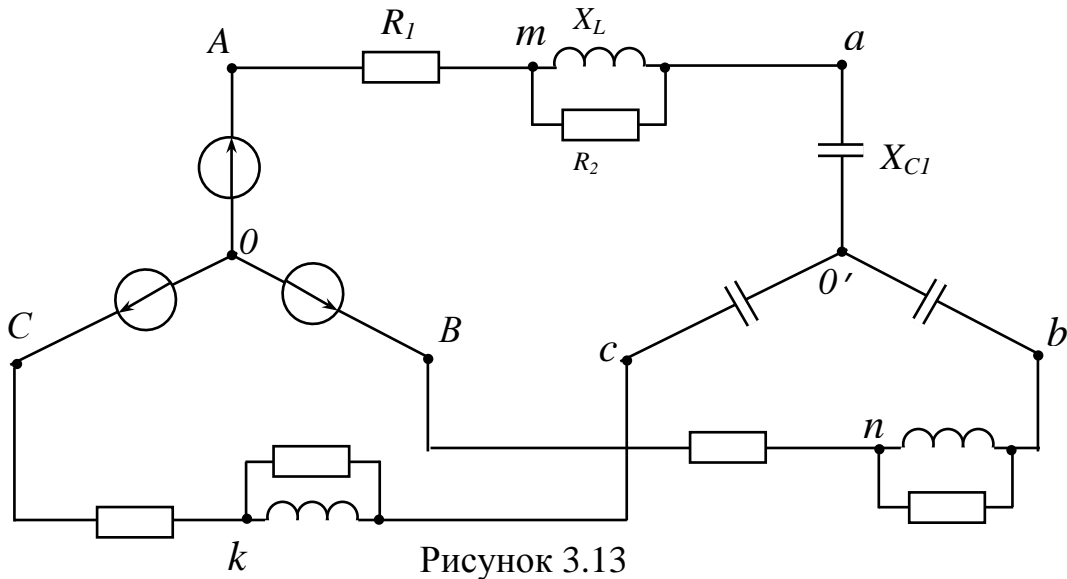


Рисунок 3.13

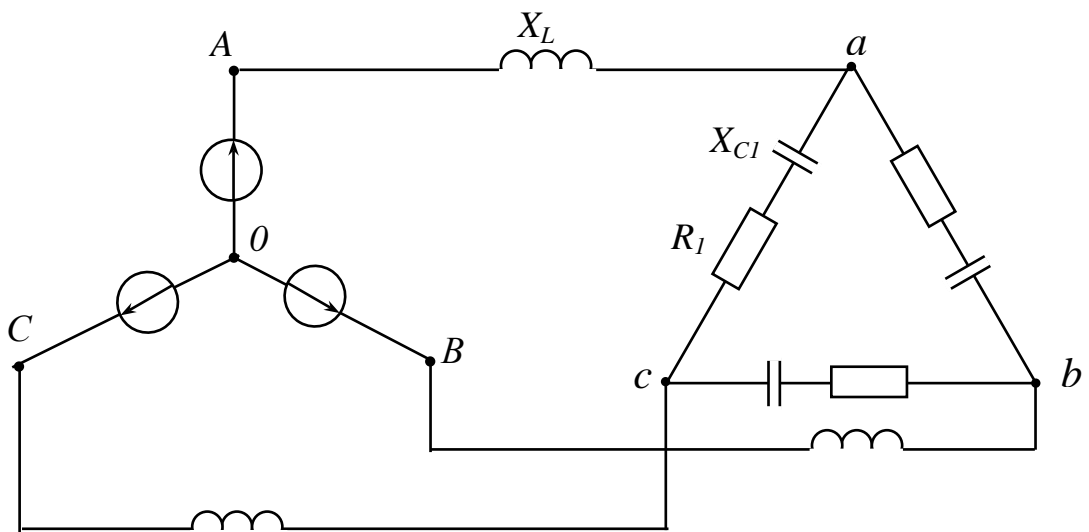


Рисунок 3.14

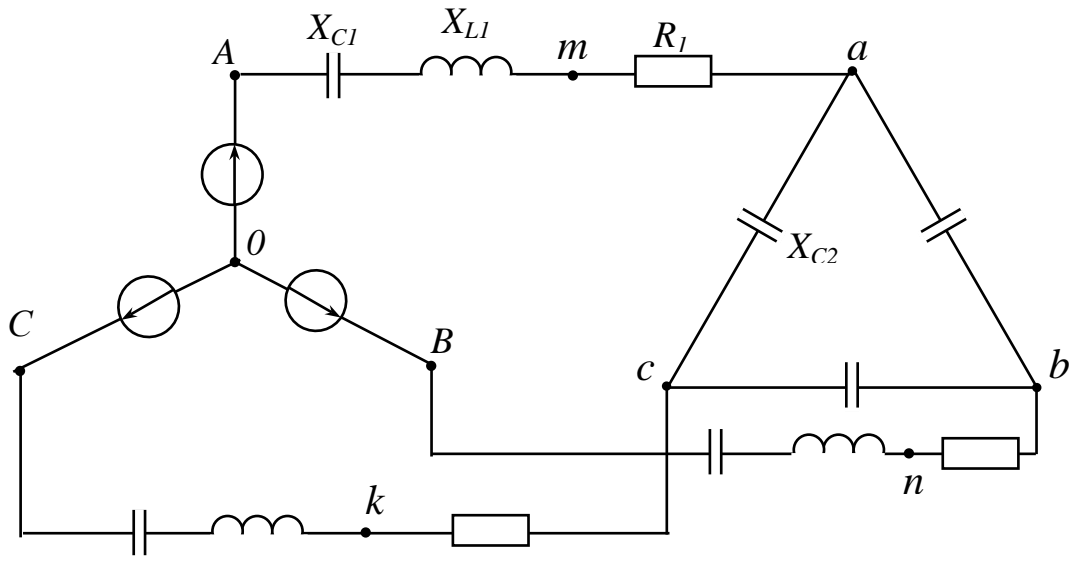


Рисунок 3.15

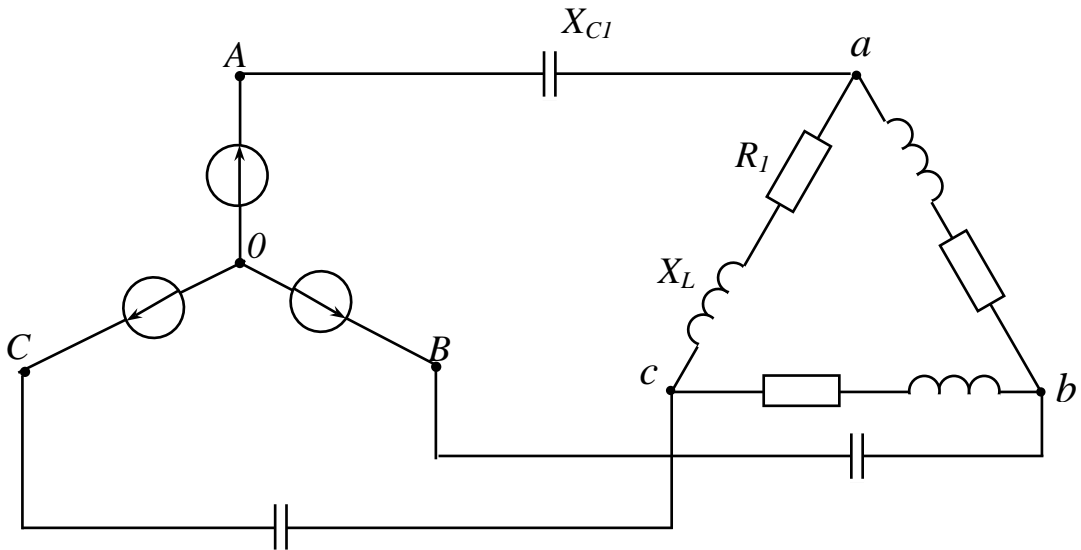


Рисунок 3.16

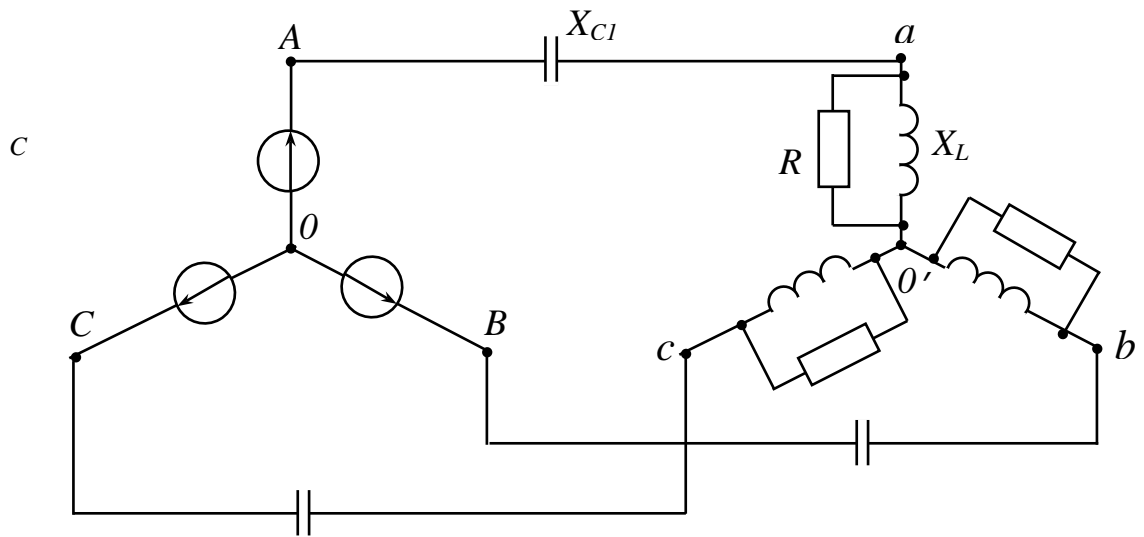


Рисунок 3.17

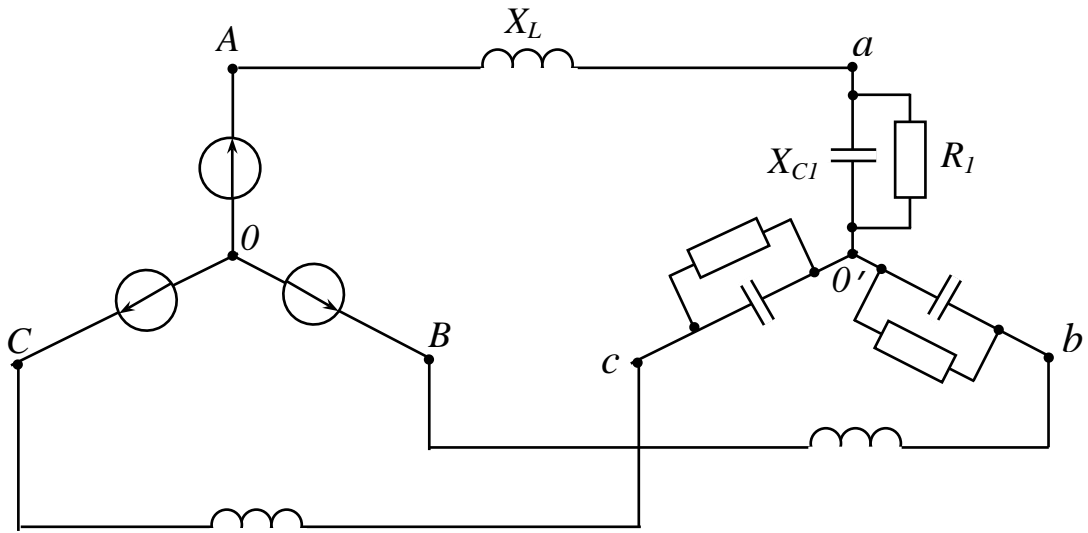


Рисунок 3.18

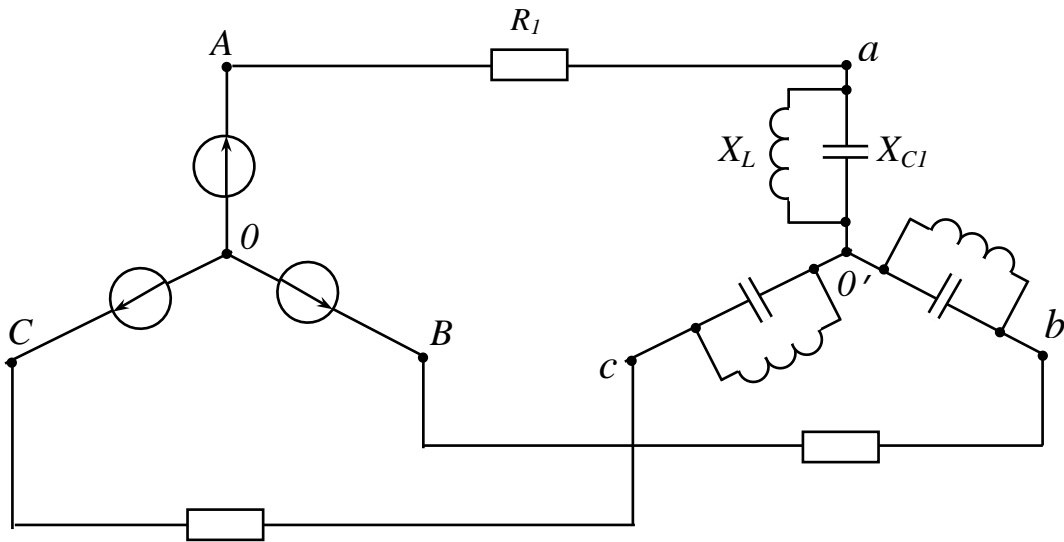


Рисунок 3.19

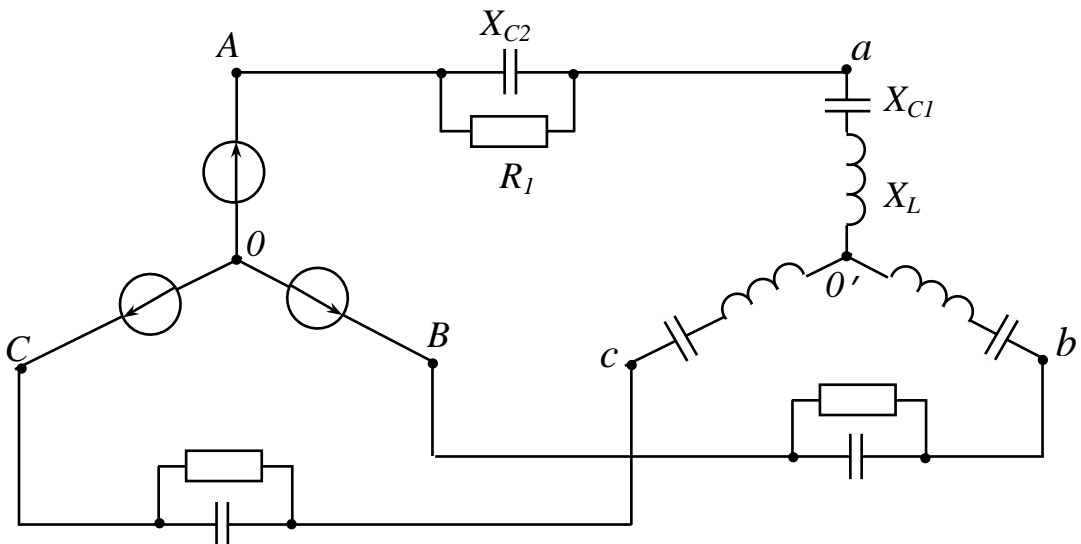


Рисунок 3.20

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №2

ЗАДАЧА 4. Расчет параметров трехфазного трансформатора по каталожным данным

В данной задаче необходимо рассчитать параметры трехфазного трансформатора.

4.1 Общие положения и формулы для расчета трехфазного трансформатора

1. Из маркировки трансформатора определяем тип охлаждения, номинальную мощность трансформатора и напряжение первичной обмотки высшего напряжения (ВН), необходимые для расчета трансформатора.

2. Определяем фазные, линейные значения напряжений и токов при работе трансформатора в номинальном режиме, фазный и линейный коэффициенты трансформации и число витков первичной обмотки W_1 по формулам

При соединении обмоток: звезда/ звезда – Y/Y

После определения потерь в стали P_o находим активную и реактивную составляющие тока холостого хода по формуле

По расчетным данным строим зависимости $I_0 = f(U_1)$, $P_0 = f(U_1)$, $\cos\varphi_0 = f(U_1)$ в единой системе координат.

4. Рассчитываем КПД при изменении коэффициента нагрузки $\beta = (0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2)$ при $\cos\varphi_H = 1$ и $\cos\varphi_H = 0,8$ по формулам

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{кн}}{\beta S_H \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{кн}}; \beta = \frac{I_2}{I_{2H}}; \quad (4.8)$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 4.2

Таблица 4.2
Зависимость КПД (η) от коэффициента нагрузки (β)

β	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
$\eta(\cos\varphi = 0,8)$						
$\eta(\cos\varphi = 1)$						

По расчетным данным таблицы строим графики зависимости $\eta = f(\beta)$ для $\cos\varphi_2 = 1$ и для $\cos\varphi_2 = 0,8$.

Определяем оптимальный коэффициент нагрузки β_{opt} , соответствующий максимальному значению КПД.

$$\beta_{opt} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{кн}}} \quad (4.9)$$

Определяем максимальное значение КПД

$$\eta_{max} = 1 - \frac{2 \cdot P_0}{\beta_{opt} \cdot S_H \cdot \cos\varphi_H + 2 \cdot P_0} \quad (4.10)$$

Варианты для задачи 4

Дано: трехфазный понижающий трансформатор, параметры приведены в таблице 5.4, соответствующие заданному варианту

В данной задаче необходимо выполнить следующее:

1. Расшифровать маркировку трансформатора, определить номинальную мощность трансформатора и напряжение первичной обмотки высшего напряжения (ВН), необходимые для расчета трансформатора.

2. Определить фазные и линейные значения напряжений и токов трансформатора в номинальном режиме работы, фазный и линейный коэффициенты трансформации и число витков первичной обмотки W_1 .

3. Определить максимальное значение магнитного потока Φ_m , потери холостого хода (в стали), P_0 ; средние (для трех фаз), значения токов холостого хода, I_0 и коэффициент мощности холостого хода, $\cos\varphi_0$ для значений напряжений: $U_1 = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25) U_{1H}$. По расчетным данным построить зависимости $I_0 = f(U_1)$, $P_0 = f(U_1)$, $\cos\varphi_0 = f(U_1)$ в общей системе координат.

4. Рассчитать и построить кривые КПД $\eta = f(\beta)$ при $\cos\varphi_H = 1$ и $\cos\varphi_H = 0,8$, где $\beta = I_2 / I_{2H}$.

Расчеты произвести при коэффициенте нагрузки $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25)$. Определить коэффициент нагрузки β_{opt} , соответствующий максимальному значению КПД η_{max} .

Таблица 4.3

№ варианта	Тип трансформатора	Номинальное низшее напряжение (НН) $U_{2Н}$, кВ	Напряжение короткого замыкания U_K , %	Номинальные потери короткого замыкания $P_{КН}$, кВт	Диаметр стержня D_C , м	Активное сечение стержня S_C , м ²	Расстояние между осями стержней L , м	Активное сечение яра $S_я$, м ²	Высота стержня H_C , м	Высота яра $H_я$, м	Число витков обмотки НН W_2	Соединение обмоток
1	ТМ – 25/6	0,23	4,2	0,66	0,3	0,0097	0,8	0,006	0,7	0,3	44	Y/Y-0
2	ТМЦ – 25/10	0,4	4,3	0,69	0,32	0,0098	0,82	0,0065	0,72	0,32	74	Δ/ Y-11
3	ТД – 25/6	0,23	4,2	0,65	0,35	0,0145	0,85	0,007	0,75	0,35	88	Y/Δ-11
4	ТДЦ – 25/10	0,43	4,3	0,7	0,34	0,0168	0,84	0,0075	0,74	0,34	48	Δ/ Y-0
5	ТМ – 25/6	0,24	4,2	0,72	0,35	0,014	0,85	0,008	0,75	0,35	120	Y/Δ-11
6	ТМЦ – 25/10	0,42	4,3	0,74	0,3	0,0132	0,8	0,009	0,7	0,3	32	Y/Y-0
7	ТМ – 25/6,3	0,24	4,4	0,73	0,25	0,019	0,85	0,01	0,75	0,25	534	Y/Δ-11
8	ТДЦ – 25/10,5	0,45	4,5	0,76	0,35	0,0184	0,85	0,0101	0,75	0,35	90	Y/Δ-11
9	ТМ – 25/6,3	0,23	4,4	0,78	0,4	0,0205	0,8	0,0102	0,7	0,4	546	Y/Y-0
10	ТД – 25/10,5	0,42	4,5	0,68	0,35	0,021	0,85	0,0103	0,75	0,35	78	Y/Δ-11
11	ТМ – 40/6	0,23	4,3	0,82	0,4	0,031	0,8	0,0104	0,7	0,4	24	Y/Y-0
12	ТМЦ – 40/6,3	0,25	4,4	0,85	0,42	0,0308	0,82	0,0109	0,72	0,42	54	Δ/Δ-0
13	ТМ – 40/10	0,45	4,3	0,88	0,45	0,0318	0,85	0,0175	0,75	0,45	320	Y/Δ-11
14	ТДЦ – 40/10,5	0,44	4,2	0,91	0,4	0,0395	0,8	0,018	0,7	0,4	286	Y/Y-0
15	ТМ – 40/6	0,24	4,5	0,92	0,35	0,04	0,85	0,0148	0,75	0,35	42	Y/Δ-11
16	ТЦ – 40/6,3	0,42	4,4	0,95	0,42	0,0402	0,82	0,0145	0,72	0,42	248	Y/Δ-11
17	ТМ – 40/10	0,4	4,5	0,93	0,35	0,061	0,85	0,021	0,75	0,35	358	Y/Δ-11
18	ТД – 40/10,5	0,25	4,6	0,98	0,36	0,058	0,86	0,0206	0,76	0,36	170	Y/Δ-11
19	ТМ – 40/6	0,4	4,3	1,0	0,44	0,077	0,84	0,022	0,74	0,44	258	Y/Δ-11
20	ТД – 40/10	0,25	4,4	1,1	0,4	0,0742	0,84	0,021	0,74	0,4	266	Y/Δ-11
21	ТМ – 63/6	0,23	4,5	1,2	0,46	0,0754	0,86	0,023	0,76	0,46	268	Y/Δ-11
22	ТМЦ – 63/6,3	0,4	4,4	1,25	0,48	0,073	0,88	0,024	0,78	0,48	256	Y/Y-0
23	ТДЦ – 63/10	0,25	4,3	1,28	0,46	0,078	0,86	0,021	0,76	0,46	264	Δ/Δ-0
24	ТД – 63/20	0,4	4,3	1,32	0,42	0,079	0,82	0,022	0,72	0,42	268	Y/Δ-11
25	ТМ – 63/20	0,23	4,5	1,3	0,43	0,077	0,83	0,025	0,73	0,43	272	Y/Y-0

Продолжение таблицы 4.3

№ варианта	Тип трансформатора	Номинальное низшее напряжение (НН) $U_{2Н}$, кВ	Напряжение короткого замыкания U_K , %	Номинальные потери короткого замыкания $P_{кз}$, кВт	Диаметр стержня D_C , м	Активное сечение стержня S_C , м ²	Расстояние между осями стержней L , м	Активное сечение яра $S_я$, м ²	Высота стержня H_C , м	Высота яра $H_я$, м	Число витков обмотки НН W_2	Соединение обмоток
26	ТСЗ – 10/6	0,23	4,1	0,45	0,19	0,0088	0,38	0,0098	0,7	0,16	124	Y/Y-0
27	ТСГ – 16/6,3	0,26	4,2	0,49	0,21	0,0078	0,42	0,0088	0,72	0,18	134	Δ/Y-11
28	ТС – 25/6	0,24	4,3	0,65	0,14	0,0078	0,28	0,0085	0,75	0,12	118	Y/Δ-11
29	ТСД – 40/6,3	0,23	4,2	0,76	0,18	0,0076	0,36	0,0086	0,74	0,16	128	Y/Y-0
30	ТС – 63/6	0,24	4,4	1,21	0,21	0,0082	0,42	0,0092	0,75	0,19	120	Y/Δ-11
31	ТСГ – 100/10	0,25	4,5	1,34	0,23	0,0095	0,46	0,0098	0,82	0,21	182	Y/Y-0
32	ТСЗ – 160/6,3	0,24	4,4	1,58	0,22	0,0094	0,44	0,0099	0,85	0,22	124	Y/Δ-11
33	ТС – 160/10	0,45	4,5	1,86	0,23	0,0097	0,46	0,0112	0,95	0,22	190	Y/Δ-11
34	ТСГ – 160/6	0,43	4,7	1,88	0,26	0,0096	0,52	0,0113	0,97	0,23	126	Y/Y-0
35	ТСД – 250/10	0,46	4,6	2,82	0,28	0,0098	0,56	0,0114	0,95	0,24	198	Y/Δ-11
36	ТС – 250/6	0,23	4,8	2,86	0,29	0,0099	0,58	0,0115	0,97	0,25	122	Y/Y-0
37	ТСЗ – 400/10	0,45	5,2	4,25	0,31	0,0114	0,62	0,0118	0,98	0,26	194	Δ/Δ-0
38	ТС – 400/6	0,24	5,3	4,58	0,32	0,0112	0,64	0,0122	0,96	0,27	120	Y/Δ-11
39	ТСЗ – 630/10	0,45	5,5	5,68	0,33	0,0116	0,66	0,0126	0,97	0,28	196	Y/Y-0
40	ТСГ – 630/6	0,25	5,5	5,82	0,34	0,0117	0,68	0,0137	0,95	0,29	132	Y/Δ-11
41	ТСД – 1000/10	0,46	5,4	8,84	0,33	0,0386	0,66	0,0398	0,94	0,31	218	Δ/ Y-11
42	ТС – 1000/10,5	0,24	5,5	8,85	0,32	0,0388	0,64	0,0396	0,95	0,32	124	Y/Δ-11
43	ТСЗ – 1000/6	0,25	5,4	8,86	0,31	0,0391	0,62	0,0412	0,96	0,31	120	Y/Δ-11
44	ТСГ – 1000/10	0,4	5,7	9,0	0,33	0,0397	0,66	0,0414	0,94	0,32	214	Y/Δ-11
45	ТСД – 1600/10	0,42	5,8	11,2	0,34	0,0412	0,68	0,0485	0,97	0,31	210	Δ/ Y-11
46	ТС – 1600/10,5	0,23	5,9	11,5	0,35	0,0414	0,71	0,0424	0,96	0,33	128	Y/Δ-11
47	ТСЗ – 10/6	0,24	4,2	0,45	0,16	0,0097	0,32	0,0125	0,68	0,19	126	Y/Y-0
48	ТСГ – 25/6	0,25	4,2	0,68	0,17	0,0099	0,34	0,0126	0,66	0,16	124	Δ/Δ-0
49	ТСД – 40/6,3	0,24	4,3	0,82	0,18	0,0096	0,36	0,0124	0,62	0,15	128	Y/Δ-11
50	ТС – 63/6	0,23	4,5	0,83	0,19	0,0098	0,38	0,0128	0,63	0,16	122	Y/Y-0

ЗАДАЧА 5. Расчет трехфазного асинхронного электродвигателя

Расчет трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором питающегося от промышленной сети переменного тока 380/220В при 50 Гц марки 4А1000S2УЗ начинается с определения номинальных параметров: мощность на валу P_{2H} ; номинальную частота вращения ротора n_H ; коэффициент мощности обмоток статора $\cos\varphi$; КПД η_H . Кроме этого даны перегрузочная способность электродвигателя $\lambda = \frac{M_{\max}}{M_H}$; кратность пускового момента

$$K_{II} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_H}; \text{ кратность пускового тока } K_I = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_H}.$$

Дано: $P_H = 4$ кВт, $n_H = 2880$ мин⁻¹; $\eta_H = 86,5$ %; $\cos\varphi = 0,89$; $\frac{M_{\max}}{M_H} = 2,2$;

$$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_H} = 2; \frac{M_{\min}}{M_H} = 1,2; \frac{I_{\text{пуск}}}{I_H} = 7,5.$$

5.1 Расчет трехфазного асинхронного электродвигателя

1) номинальное значение скольжения (с учетом стандартных значений синхронной частоты вращения)

$$S_n = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (5.1)$$

где n_1 – частота вращения магнитного поля, мин⁻¹ (при $n_H = 2880$ мин⁻¹ (исходные данные) эта величина выбирается большей близкой к стандартному значению синхронной частоты вращения 3000 мин⁻¹); n_H – частота вращения ротора, мин⁻¹ (таблица 1 – $n_{2H} = 2880$ мин⁻¹)

$$S_n = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{3000 - 2880}{3000} = 0,04$$

2) мощность, потребляемая двигателем из сети

$$P_1 = \frac{P_{2H}}{\eta}, \quad (5.2)$$

где P_{2H} – номинальная мощность двигателя, Вт;

η – КПД двигателя.

$$P_1 = \frac{P_{2H}}{\eta} = \frac{4 \cdot 10^3}{0,865} = 4624,3 \text{ Вт}.$$

3) моменты двигателя:

а) номинальный вращающий момент двигателя

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{2H}}{n_H} = 9,55 \cdot \frac{4000}{2880} = 13,26 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

б) минимальный вращающий момент двигателя связан с номинальным моментом

$$M_{min} = \frac{M_{min}}{M_{ном}} \cdot M_{ном} = K_{min} \cdot M_{ном}, \quad (5.3)$$

где $\frac{M_{min}}{M_{ном}} = K_{min}$ – недогрузочная способность;

$M_{ном}$ – номинальный вращающий момент двигателя.

$$M_{min} = \frac{M_{min}}{M_{ном}} \cdot M_{ном} = 1,2 \cdot 13,26 = 15,91 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

в) максимальный вращающий момент двигателя связан с номинальным моментом

$$M_{max} = \frac{M_{max}}{M_{ном}} \cdot M_{ном} = \lambda \cdot M_{ном}, \quad (5.4)$$

где $\frac{M_{max}}{M_{ном}} = \lambda$ – перегрузочная способность двигателя.

$$M_{max} = \lambda \cdot M_{ном} = 2,2 \cdot 13,26 = 29,17 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

г) пусковой вращающий момент двигателя связан с номинальным моментом

$$M_{пуск} = \frac{M_{пуск}}{M_{ном}} \cdot M_{ном} = K_{пуск} \cdot M_{ном},$$

(5.5)

где $\frac{M_{пуск}}{M_{ном}} = K_{II}$ – кратность пускового момента.

$$M_{II} = K_{II} \cdot M_{ном} = 2 \cdot 13,26 = 26,52 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

4) фазный ток в обмотке статора, линейный и пусковой токи

Для определения фазных, линейных и пусковых токов (фазными токами являются токи в обмотках статора, линейными – токи в подводящих проводах) нужно учесть, что если двигатель рассчитан на работу от сети переменного тока с напряжением 220/380 В, то это значит, что каждая фаза обмотки статора рассчитана на напряжение 220В. Обмотку необходимо включить по схеме «треугольник», если в сети линейное напряжение $U = 220 \text{ В}$, и по схеме «звезда», если в сети линейное напряжение $U = 380 \text{ В}$.

а) определим фазные, линейные и пусковые токи при соединении обмотки статора по схеме «треугольник» - линейное напряжение $U = 220 \text{ В}$.

- фазный ток в обмотке статора

$$I_{\phi} = \frac{P_1}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi}, \quad (5.6)$$

где $\cos \varphi$ – коэффициент мощности обмоток статора.

$$I_{\phi} = \frac{P_1}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi} = \frac{4624,3}{3 \cdot 220 \cdot 0,89} = 7,87 \text{ А}$$

- линейный ток

$$I_{л} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi} = 1,73 \cdot 7,87 = 13,62 \text{ А}$$

- пусковой ток

$$I_{п} = K_I \cdot I_{л} = 7,5 \cdot 13,62 = 102,15 \text{ А}$$

а) фазные, линейные и пусковые токи при соединении обмотки статора по схеме «звезда» - линейное напряжение $U = 380 \text{ В}$.

- фазный ток в обмотке статора

Значение фазного тока находится из формулы мощностей для линейных значений токов и напряжений

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л} \cdot \cos \varphi \quad (5.7)$$

При соединении обмоток в звезду линейный ток равен фазному значению

$$I_{\phi} = I_{л} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \cos \varphi} = \frac{4624,3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,89} = 7,9 \text{ А}$$

- линейный ток

$$I_l = I_\phi = 7,9 \text{ A}$$

- пусковой ток

$$I_{II} = K_I \cdot I_l = 7,5 \cdot 7,9 = 59,25 \text{ A}$$

5) пусковой момент при снижении напряжения сети на 10%

Для определения возможности пуска в ход двигателя, находящегося под номинальной нагрузкой и пониженным напряжением, необходимо определить пусковой вращающий момент при пониженном напряжении.

В соответствии с формулой $M = CU^2$ вращающий момент двигателя пропорционален квадрату подводимого напряжения. При понижении напряжения на 10% вращающий момент

$$M' = CU_{ном}^2 = C \cdot (0,9 \cdot U_{ном})^2 = 0,81 \cdot M_{ном} = 0,81 \cdot 13,26 = 10,74 \text{ H} \cdot \text{м}$$

Отсюда пусковой момент рассчитывается

$$M'_{II} = K_{II} \cdot M' = 2 \cdot 10,74 = 21,48 \text{ H} \cdot \text{м}$$

Так как $M'_{II} = 21,48 \text{ H} \cdot \text{м}$ больше тормозного момента на валу на $8,22 \text{ H} \cdot \text{м}$, то есть пуск возможен. ($M_{ном} = 13,26 \text{ H} \cdot \text{м}$)

б) критическое скольжение.

Критическое скольжение – это скольжение, при котором асинхронная машина развивает максимальный вращающий момент

$$S_{кр} = S_n \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}), \quad (5.8)$$

где $\lambda = \frac{M_{max}}{M_{ном}}$ – коэффициент, определяющий перегрузочную

способность двигателя;

S_n – скольжение при номинальной нагрузке.

$$S_{кр} = S_n \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,04 \cdot (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,166.$$

7) значения моментов, соответствующим значениям скольжения рассчитываются по формуле

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{S/S_{кр} + S_{кр}/S} \dots\dots\dots(5.9)$$

Рассчитаем значения момента для скольжения $S = 0,1$

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{S/S_{кр} + S_{кр}/S} = \frac{2 \cdot 29,17}{0,1/0,166 + 0,166/0,1} = 25,77 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Все остальные значения рассчитываются аналогично, все расчеты сводятся в таблицу 5.1.

Значения моментов при критическом скольжении $S_{кр} = 0,166$ и номинальном скольжении $S_H = 0,04$ рассчитываются по формуле (9) и равны

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{S_{кр}/S_{кр} + S_{кр}/S_{кр}} = \frac{2 \cdot 29,18}{0,166/0,166 + 0,166/0,166} = \frac{2 \cdot 29,17}{2} = 29,17 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{S_H/S_{кр} + S_{кр}/S_H} = \frac{2 \cdot 29,18}{0,04/0,166 + 0,166/0,04} = 29,17 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Расчеты сводятся в таблицу 5.1.

5.2 Построение механической характеристики АД

Зависимость вращающего момента на валу двигателя M от скольжения S называется механической характеристикой.

Для построения механической характеристики АД необходимо учесть значения частоты вращения ротора

$$n = n_1 \cdot (1 - S), \quad (5.10)$$

где n_1 – частота вращения магнитного поля, мин^{-1} ;

S – скольжение заданных значений.

$$n_{при S=0,1} = n_1 \cdot (1 - S) = 3000 \cdot (1 - 0,1) = 2700 \text{ мин}^{-1}.$$

Остальные значения рассчитываются аналогично, расчеты сводятся в таблицу 5.1.

Следует отметить, что диапазон ($0 \div S_{кр}$) соответствует рабочему участку механической характеристики. На этом участке увеличение нагрузки на валу

приводит к снижению числа оборотов и, следовательно, к увеличению вращающего момента, т.е. равновесие тормозного и вращающего моментов восстанавливается. На рабочем участке возможна устойчивая работа двигателя и здесь же выбирается точка номинального момента, т.е. такого вращающего момента, который двигатель способен развивать длительное время, не перегреваясь.

Диапазон ($S_{кр} \div 1$) соответствует неустойчивому участку работы асинхронного двигателя. В этом случае при увеличении нагрузки вращающий момент уменьшается, что приводит к «опрокидыванию» двигателя.

Построение механической характеристики при номинальном режиме работы трехфазного АД производится по рассчитанным значениям пункта 7 (табл. 5.1).

Механическая характеристика АД при падении напряжения на 10% производится по формулам, приведенным в пункте 5 для заданных значений скольжений.

$$M'_{при S=0,1} = C \cdot (0,9 \cdot U_{ном})^2 = 0,81 \cdot M = 0,81 \cdot 25,77 = 20,87 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Расчеты представлены в таблице 2.

Таблица 5.1

Величины для построения механических характеристик

S	0	0,04	0,1	0,166	0,2	0,4	0,6	0,8	1
n , мин ⁻¹	3000	2999	2700	2502	2400	1800	1200	600	0
M , Н·м	0	13,26	25,77	29,17	28,69	20,69	15,03	11,64	9,45
M' , Н·м	0	10,74	20,87	23,63	23,24	16,76	12,17	9,43	7,65

По значениям таблицы 5.1 строятся механические характеристики АД, которые представлены на рисунке 1.

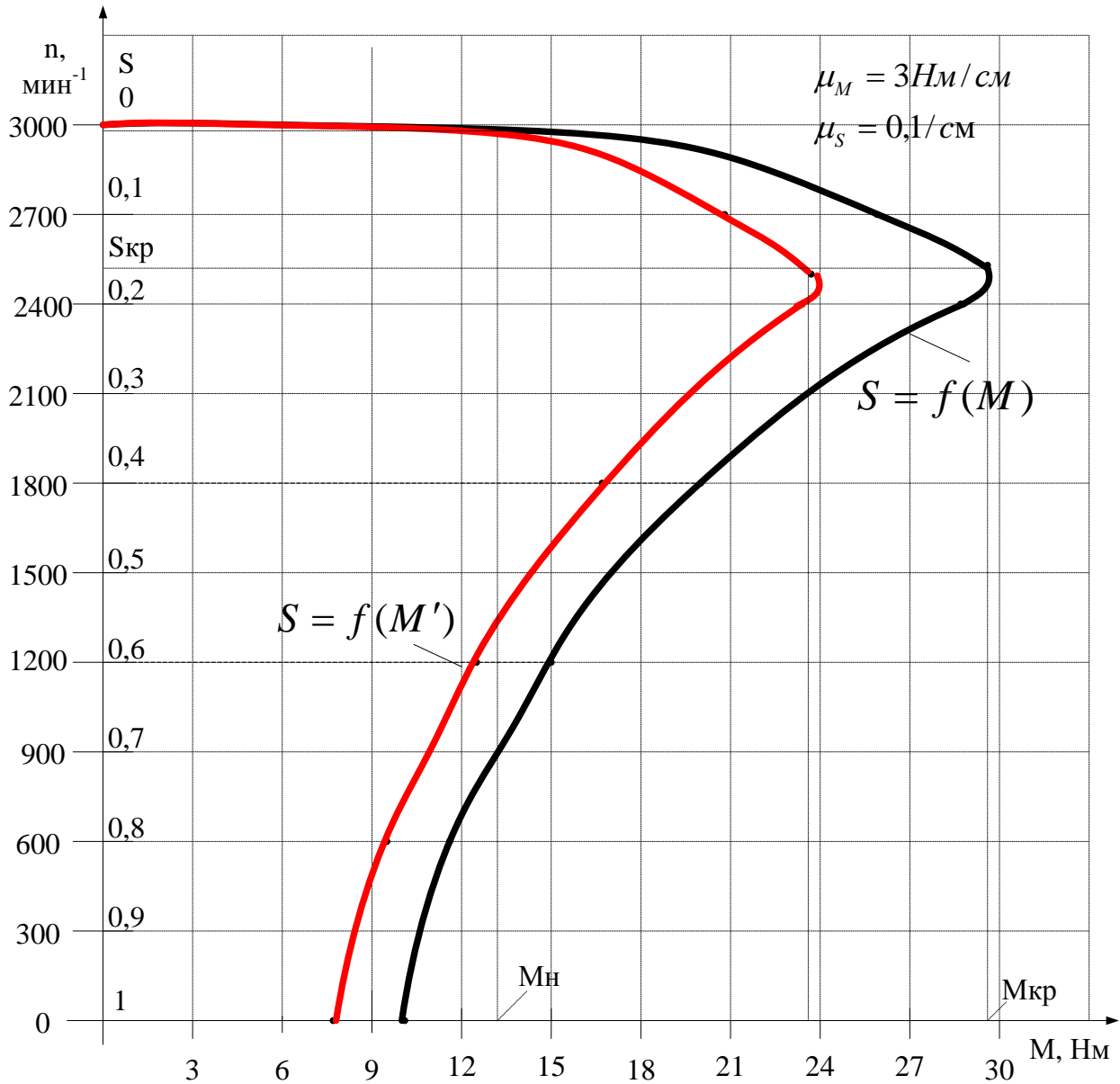


Рисунок 1 – Механические характеристики асинхронного двигателя

Варианты для задачи 5

Трехфазный асинхронный двигатель, с короткозамкнутым ротором питающийся от сети с напряжением 380 В, при частоте тока 50 Гц, при соединении обмоток статора «звездой». Исходные данные с учетом варианта выполняемой задачи 5 приведены в таблице 5.1.

В данной задаче необходимо выполнить следующее:

- 1) найти номинальное значение скольжения (с учетом стандартных значений синхронной частоты вращения);
- 2) определить мощность, потребляемую двигателем из сети;
- 3) рассчитать номинальный, минимальный, максимальный и пусковой вращающие моменты двигателя;
- 4) определить фазный ток в обмотке статора, линейный и пусковой токи;
- 5) определить пусковой момент при снижении напряжения сети на 10%;
- 6) определить критическое скольжение по формуле $s_{кр} = s_n \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$;
- 7) определить значения моментов, используя формулу $M = \frac{2 \cdot M_{max}}{s/s_{кр} + s_{кр}/s}$ для значений скольжения 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 и для s_n и $s_{кр}$;
- 8) построить механическую характеристику при номинальном режиме работы трехфазного АД и механическую характеристику АД при падении напряжения на 10%; сравнить характеристики сделать выводы.

Таблица 5.2

Вариант	Тип асинхронного электродвигателя	Вариант	Тип асинхронного электродвигателя	Вариант	Тип асинхронного электродвигателя
1	2	3	4	5	6
Синхронная частота вращения 3000 мин ⁻¹					
1	4AA50A2Y3	18	4A63A2Y3	35	4A80A2Y3
2	4AA50B2Y3	19	4A63B2Y3	36	4A80B2Y3
3	4AA56A2Y3	20	4A71A2Y3	37	4A90L2Y3
4	4AA56B2Y3	21	4A71B2Y3	38	4A100S2Y3

Продолжение таблицы 5.2

Синхронная частота вращения 1500 мин ⁻¹					
1	2	3	4	5	6
5	4AA50A4Y3	22	4A63B4Y3	39	4A90L4Y3
6	4AA50B4Y3	23	4A71A4Y3	40	4A100S4Y3
7	4AA56A4Y3	24	4A71B4Y3	41	4A100L4Y3
8	4AA56B4Y3	25	4A80A4Y3	42	4A112M4Y3
9	4AA63A4Y3	26	4A80B4Y3	43	4A132S4Y3
Синхронная частота вращения 1000 мин ⁻¹					
10	4AA63A6Y3	27	4A90L6Y3	44	4A132S6Y3
11	42A63B6Y3	28	4A100L6Y3	45	4A132M6Y3
12	4A71B6Y3	29	4A112MA6Y3	46	4A160S6Y3
13	4A80B6Y3	30	4A112MB6Y3	47	4A160M6Y3
Синхронная частота вращения 750 мин ⁻¹					
14	4A71B8Y3	31	4A90LB8Y3	48	4A132S8Y3
15	4A80A8Y3	32	4A100L83	49	4A132M8Y3
16	4A80B8Y3	33	4A112MA8Y3	50	4A160S8Y3
17	4A90LA8Y3	34	4A112MB8Y3	51	4A160M8Y3

ЗАДАЧА 6. Описание принципа работы электронного устройства и составление электронной схемы

В данной задаче необходимо: дать краткое описание принципа работы электронного устройства; составить схему двухкаскадного усилителя с резистивно-емкостной связью между каскадами на биполярных транзисторах; объяснить назначение элементов схемы; определить коэффициенты усиления по току, напряжению, и мощности, а также входное сопротивление усилителя, выполненного на транзисторе с общим эмиттером.

6.1 Основные параметры (уравнения) и схемы включения биполярных транзисторов

Биполярный транзистор (БТ) – это полупроводниковая структура, состоящая из двух p-n переходов, сформированных в одном монокристалле.

На рисунке 6.1, а) показана условная структура p-n-p транзистора, а на рисунке 6.1, б) приведены обозначения *p-n-p* и *n-p-n* - транзисторов.

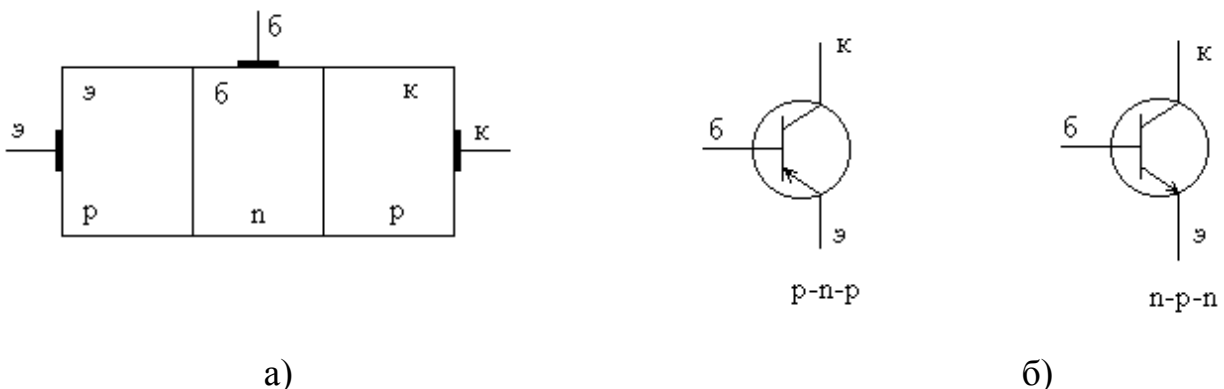


Рисунок 6.1 – Структура *p-n-p* транзистора:

а) – структура биполярного транзистора (*p-n-p*);

б) – условные графические изображения биполярного транзистора

Как видно из рисунка 6.1, а), биполярный транзистор содержит два р-п-перехода: эмиттерно-базовый (эмиттерный) и коллекторно-базовый (коллекторный). Буквами «э», «б» и «к» обозначены области эмиттера, базы и коллектора, а также одноименные электроды (внешние выводы) БТ.

Один и тот же транзистор может быть включен различными способами. Основные параметры (характеристики) схем включения различны.

К основным параметрам транзисторных усилителей относятся: коэффициент усиления тока K_i ; коэффициент усиления напряжения K_u ; коэффициент усиления по мощности $K_p (K_p = K_u K_i)$; входное сопротивление (по переменному току); выходное сопротивление (по переменному току); частотные свойства (обычно частотные свойства транзистора выражаются его предельной частотой, то есть частотой, при которой модуль коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером стремится к единице).

Выбор схемы включения транзистора осуществляется по критерию оптимальности его параметров: коэффициента усиления, входного и выходного сопротивлений и амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

6.1.1 Схема с общей базой (ОБ)

При составлении электрических схем общепринято так располагать элементы схем, чтобы сигнал «направлялся» слева направо. Напряжения на переходах транзистора обычно обозначают двумя подстрочными символами, а ток через электрод транзистора – одним подстрочным символом. Стрелка на изображении БТ (рис. 6.1) указывает условное (положительное) направление тока эмиттера.

Базовый вывод транзистора в схеме с ОБ является общим выводом для входного и выходного сигналов. Входной сигнал подают на эмиттер, а выходной снимают с коллектора.

На рисунке 6.2, а) приведена упрощенная схема включения БТ по схеме ОБ.

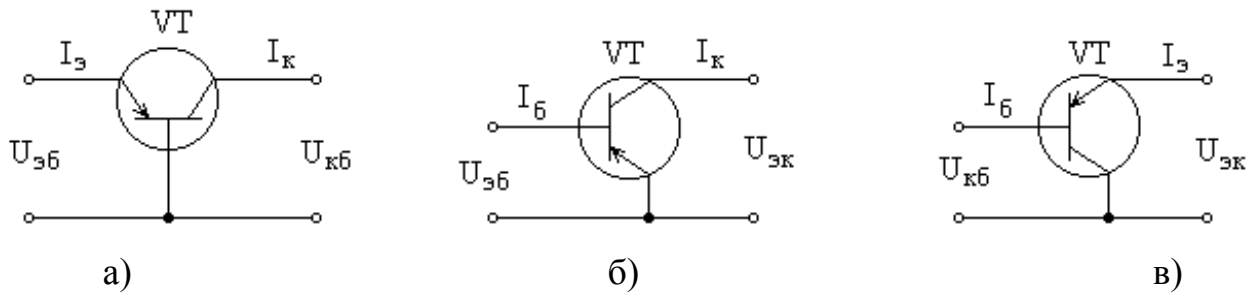


Рисунок 6.2 – Схемы включения БТ:

а) по схеме ОБ; б) по схеме ОЭ; в) по схеме ОК

Определим коэффициент передачи тока $K_{iб}$ для схемы ОБ (коэффициентом передачи тока называют отношение выходного тока к входному, а коэффициентом передачи – отношение выходной величины к входной)

$$K_{iб} = \frac{I_к}{I_э} = \alpha < 1. \quad (\alpha \approx 0,95 \dots 0,99 \approx 1) \quad (6.1)$$

Таким образом, схема с ОБ не обеспечивает усиление по току (схема с ОБ обеспечивает усиление по напряжению). Достоинства схемы ОБ – хорошие частотные характеристики.

6.1.2 Схема с общим эмиттером (ОЭ)

На рисунке 6.2, б) приведена упрощенная схема включения транзистора по схеме ОЭ. Общим выводом в ней является эмиттер: входной сигнал подается между базой и эмиттером, а выходной сигнал снимается между коллектором и эмиттером.

Определим коэффициент передачи тока $K_{iэ}$ для схемы ОЭ

$$K_{i_3} = \frac{I_k}{I_6} = \frac{I_3 \alpha}{(1-\alpha)I_3} = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta. \quad (6.2)$$

Так как схема ОЭ используется наиболее часто, то коэффициенту K_{i_3} присвоено собственное обозначение β (величина β обычно находится в диапазоне от десятков до сотен, а в супер β - транзисторах величина этого коэффициента доходит до тысячи). Достоинство этой схемы включения БТ состоит и в том, что она позволяет усиливать напряжение в десятки раз (то есть коэффициент K_u схемы ОЭ достигает несколько десятков). Таким образом, для схемы включения транзистора ОЭ коэффициент усиления по мощности K_p наибольший по сравнению с соответствующими коэффициентами других схем включения (ОБ и ОК). Недостатком схемы ОЭ является то, что ее частотные свойства хуже, чем у других схем включения БТ.

Свойства транзисторов можно описать с помощью входных и выходных статических характеристик, а также с применением, так называемых h -параметров, связывающих входное напряжение и ток с выходным напряжением и током, действующими в эквивалентном транзистору четырехполюснике (то есть электрической схеме, имеющей четыре клеммы – полюса).

В общем случае изменение напряжения базы и тока коллектора в зависимости от изменения входного тока и коллекторного напряжения транзистора с общим эмиттером можно записать в виде

$$\begin{aligned} dU_{6-3} &= h_{11} \cdot dI_6 + h_{12} \cdot dU_{к-3}, \\ dI_к &= h_{21} \cdot dI_6 + h_{22} \cdot dU_{к-3}, \end{aligned} \quad (6.3)$$

где h -параметры имеют следующий физический смысл:

$h_{11} = R_{6-3}$ – входное сопротивление;

h_{12} – коэффициент обратной передачи (малая величина, на практике принимают равной нулю);

$h_{21} = \beta$ – коэффициент усиления по току;

$h_{22} = \frac{1}{R_{к-э}}$ – выходная проводимость.

Коэффициенты по току, напряжению и мощности определяют через h -параметры транзистора и параметры элементов цепи по формулам

$$K_i = \frac{h_{21}}{1 + h_{22} \cdot R_H},$$

$$K_u = \frac{h_{21} \cdot R_H}{h_{11} \cdot (1 + h_{22} \cdot R_H) - h_{12} \cdot h_{21} \cdot R_H}, \quad (6.4)$$

$$K_p = K_i \cdot K_u.$$

Входное сопротивление находят как

$$R_{вх} = \frac{h_{11} \cdot \left(h_{22} + \frac{1}{R_H} \right) - h_{12} \cdot h_{21}}{h_{22} + \frac{1}{R_H}} \quad (6.5)$$

Формулы (6.4) и (6.5) являются точными. Коэффициенты усиления и значения входного сопротивления можно определить по приближенным формулам

$$K_i = h_{21}; \quad R_{вх} = h_{11}; \quad K_u = \frac{h_{21} \cdot R_H}{h_{11}}; \quad K_p = K_i \cdot K_u \quad (6.6)$$

6.1.3 Схема с общим коллектором (ОК)

На рисунке 6.2, в) приведена упрощенная схема включения транзистора по схеме ОК. В этой схеме общим выводом для входного и выходного сигналов является коллектор. Входной сигнал подают на базу.

Определим коэффициент передачи тока $K_{ик}$ для схемы ОК

$$K_{ик} = \frac{I_э}{I_б} = \frac{I_э}{(1-\alpha)I_э} = \frac{1}{1-\alpha} = \beta + 1. \quad (6.7)$$

Из выражения (6.7) следует, что коэффициент усиления по току в данной схеме является максимально возможной величиной. Коэффициент передачи напряжения $K_{v,к}$ схемы ОК меньше и примерно равен единице ($K_{v,к} \approx 1$).

Схему ОК часто называют *эмиттерным повторителем*, так как в ней сигнал на выходе повторяет входной сигнал по напряжению.

6.2 Пример описания принципа работы электронного устройства

Мультиплексор (MS) — коммутатор цифровых сигналов, представляющий собой комбинационное устройство (КУ) с m информационными, n управляющими входами и одним выходом. Функционально MS состоит из m элементов конъюнкции, выходы которых объединены дизъюнктивно с помощью элемента "ИЛИ", имеющего m входов. На одни входы всех элементов конъюнкции подаются информационные сигналы, а другие входы этих элементов соединены с соответствующими выходами дешифратора с n входами.

Количество управляющих (адресных) и информационных входов мультиплексора связаны простым соотношением

$$m = 2^n. \quad (6.8)$$

Обозначают мультиплексор $m \rightarrow 1$ ($2 \rightarrow 1$, $4 \rightarrow 1$, $8 \rightarrow 1$), учитывая, что мультиплексор является КУ, коммутирующим m входных каналов с одним выходным. Функциональная схема мультиплексора приведена на рисунке 6.3.

Из рисунка 6.3 следует, что мультиплексор содержит дешифратор на соответствующее число выходов (число выходов дешифратора определяется числом информационных входов мультиплексора), элементы конъюнкции на два или на три входа каждый и элемент дизъюнкции с числом входов, равным количеству информационных линий $D_0 \dots D_m$. Число входов элементов "И" может быть равным двум, однако, во многих случаях возникает необходимость

стробирования выходного сигнала мультиплексора импульсами независимого источника.

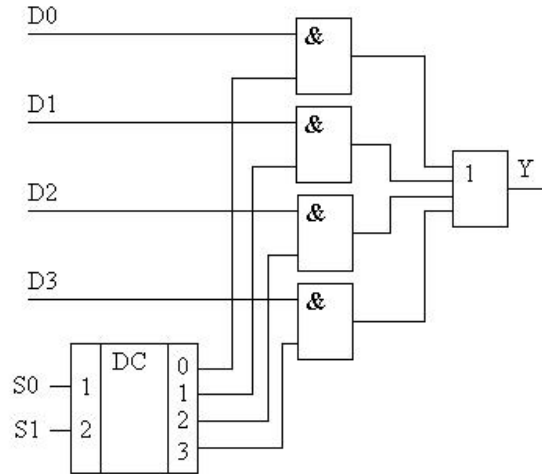


Рисунок 6.3 — Функциональная схема мультиплексора 4→1

В таких случаях в структуре мультиплексора используются элементы "И" с тремя входами. Одни из входов всех элементов конъюнкции, в последнем случае, объединяются, и по этой линии подается сигнал разрешения работы мультиплексора (стробирующий сигнал). Наличие дополнительного управляющего входа расширяет функциональные возможности мультиплексора.

На рисунке 6.4 показано условное графическое обозначение мультиплексора на принципиальных и функциональных электрических схемах.

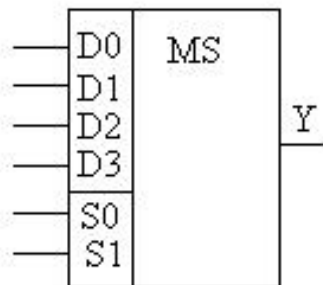


Рисунок 6.4 — Условное графическое обозначение мультиплексора 4→1

Уравнение функционирования мультиплексора $4 \rightarrow 1$ можно записать в следующем виде

$$Y = D0 \overline{S1} \overline{S0} + D1 \overline{S1} S0 + D2 S1 \overline{S0} + D3 S1 S0 \quad (6.9)$$

Из уравнения (6.9) видно, что на выход мультиплексора будет передаваться сигнал только с одного входа, номер которого совпадает с числом, соответствующим кодовой комбинации $S0$ и $S1$. Если $S0 = S1 = 0$, на выход мультиплексора будет передаваться сигнал с входа $D0$. Когда на адресных (управляющих) входах $S0 = 1$ и $S1 = 0$, то на выход будет передаваться сигнал с входа $D1$ и т.д.

Мультиплексоры нашли широкое применение в вычислительной технике в качестве коммутаторов цифровых сигналов. Они используются в компьютерах и микропроцессорных контроллерах для коммутации адресных входов динамических оперативных запоминающих устройств, в узлах объединения или разветвления шин и т.д. На базе мультиплексоров можно построить различные КУ с минимальным числом дополнительных элементов логики.

6.3 Пример составления электронной схемы усилителя

Схема усилителя, представленная на рисунке 6.5, двухкаскадная, то есть входное напряжение усиливается два раза: сначала транзистором VT_1 , а затем транзистором VT_2 .

Оба транзистора включены по схеме с общим эмиттером. В каждом каскаде эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепей, а резисторы $R_{к1}$ и $R_{к2}$, с помощью которых создается выходное напряжение, включаются в коллекторные цепи транзисторов. Полярность источника питания с э. д. с. E_k по отношению к коллекторной цепи зависит от типа транзистора.

На рисунке 6.5 полярность источника питания соответствует усилительным каскадам с транзисторами типа $p-n-p$. Резисторы $R_{б1}$ и $R_{б2}$,

включенные в цепи базы транзисторов, обеспечивают их работу в режиме покоя, то есть в отсутствие входного сигнала.

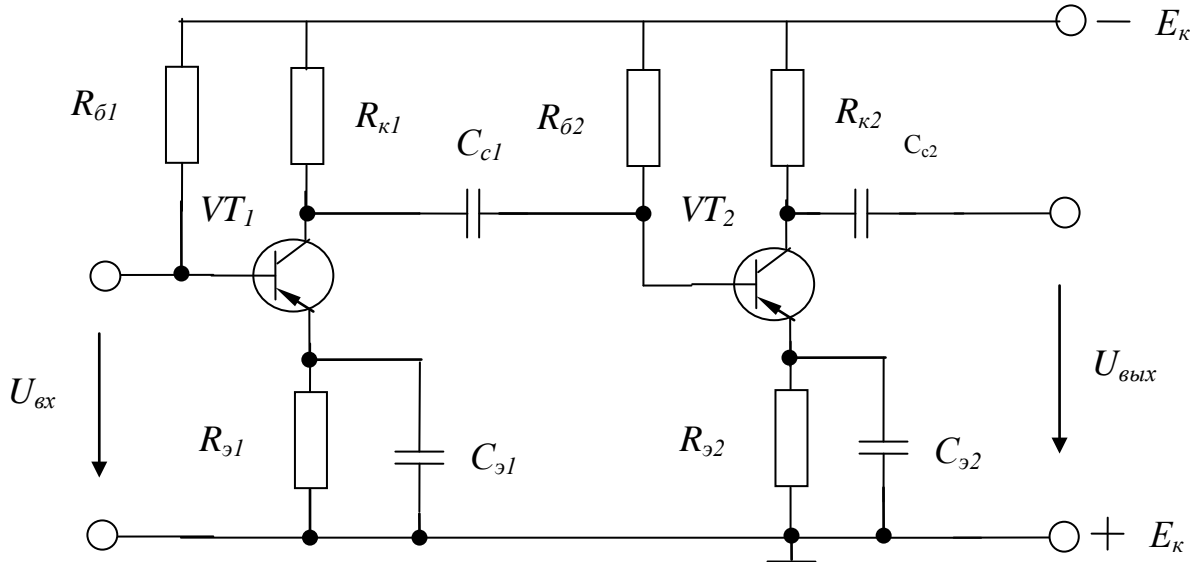


Рисунок 6.5 – Схема усилителя

Благодаря этим резисторам можно получить оптимальные значения тока базы I_b и напряжения между базой и эмиттером $U_{бэ}$, соответствующие середине линейного участка нагрузочной характеристики.

Конденсатор $C_{с1}$ не пропускает постоянную составляющую коллекторного напряжения транзистора VT_1 в базовую цепь транзистора VT_2 . Конденсатор связи $C_{с2}$ не пропускает постоянную составляющую коллекторного напряжения транзистора VT_2 в нагрузку на выходе второго каскада. В каждом усилительном каскаде применена эмиттерная температурная стабилизация, обеспечиваемая резисторами $R_{б1}$ и $R_{б2}$ и конденсаторами $C_{э1}$ и $C_{э2}$.

Коэффициентом усиления одного каскада по напряжению называют отношение напряжения на выходе к напряжению на входе

$$K_v = U_{вых} / U_{вх} \quad (6.10)$$

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления отдельных усилительных каскадов

$$K = K_{v1} \cdot K_{v2} .$$

(6.11)

Варианты для задачи 6

В данной задаче выполнить следующие задания:

1) дать краткое описание принципа работы электронного устройства.

Тип электронного устройства с учетом варианта выполняемой задачи приведен в таблице 6.1;

2) составить схему двухкаскадного усилителя с резистивно-емкостной связью между каскадами на биполярных транзисторах из элементов, указанных на рисунке 6.6;

Для вариантов (1–10, 20–30) схема включения транзисторов – **с общей базой** (ОБ), для вариантов (21–29, 31–40) схема включения транзисторов – **с общим эмиттером** (ОЭ), для вариантов (41–50) схема включения транзисторов – **с общим коллектором** (ОК).

3) объяснить назначение элементов схемы;

4) по заданным в таблице 6.2 параметрам $h_{11Э}$, $h_{21Э}$ и $h_{22Э}$ транзистора и нагрузочном сопротивлении R_H , определить коэффициенты усиления по току, напряжению, мощности и входное сопротивление усилителя, выполненного на транзисторе с общим эмиттером. Расчеты выполнить по точным и приближенным формулам, результаты расчетов сравнить и сделать вывод.

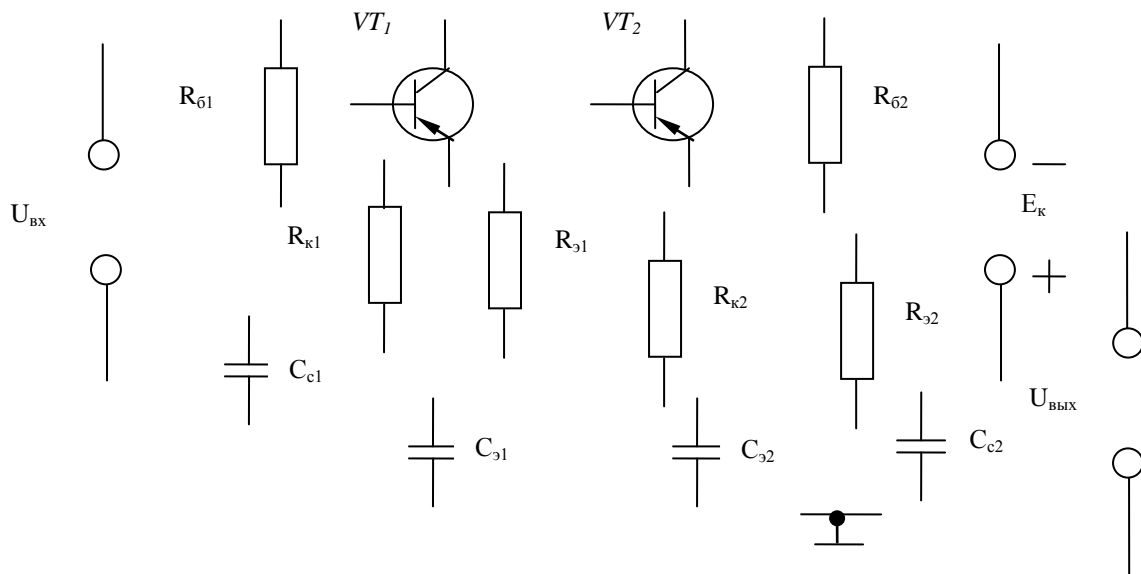


Рисунок 6.6 – Элементы схемы

Таблица 6.1
Тип электронного устройства

Вариант	Тип электронного устройства
1	2
1	Логический элемент «ИЛИ»
2	Трёхфазная схема выпрямления
3	Логический элемент «И-НЕ»
4	Регистры
5	Биполярный транзистор с общим эмиттером
6	JK- триггер
7	Цифровой дешифратор
8	Импульсный диод и стабилитрон
9	Тиристор
10	Усилительные каскады на полевых транзисторах
11	Варистор
12	Биполярный транзистор с общей базой
13	Операционный усилитель
14	Полевой транзистор с общим истоком
15	Однофазное одно- и двухполупериодное выпрямление
16	Микропроцессор
17	Логический элемент «И»
18	Тиристор
19	Дешифратор
20	Биполярный транзистор с общим эмиттером
21	Цифровой дешифратор

Продолжение таблицы 6.1

1	2
22	Постоянное запоминающее устройство
23	Сумматор аналоговый
24	Варистор
25	Аналого-цифровой преобразователь
26	Тиристор
27	Мультивибратор
28	Операционный усилитель
29	Полевой транзистор с общим истоком
30	Цифро-аналоговый преобразователь
31	Постоянное запоминающее устройство
32	RC-генератор
33	Сумматор аналоговый
34	Стабилитрон
35	T-триггер, выполненный на базе D – триггера
36	Микропроцессор
37	Аналого-цифровой преобразователь
38	Варистор
39	Полупроводниковый диод
40	Биполярный транзистор с общей базой
41	Импульсный диод и стабилитрон
42	Трехфазная схема выпрямления
43	Логический элемент «И-ИЛИ»
44	Электронный ключ
45	Усилительные каскады на полевых транзисторах
46	Мультивибратор
47	JK- триггер
48	Счетчик импульсов
49	Полупроводниковый диод
50	Цифровой шифратор

Таблица 6.2

Вариант	$h_{119},$ Ом	h_{219}	$h_{229},$ Ом ⁻¹	$R_H,$ кОм	Вариант	$h_{119},$ Ом	h_{219}	$h_{229},$ Ом ⁻¹	$R_H,$ кОм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	700	40	$4 \cdot 10^{-5}$	8	26	750	40	$6 \cdot 10^{-5}$	8
2	1100	85	$6 \cdot 10^{-5}$	5,5	27	1000	95	$8 \cdot 10^{-5}$	6,5
3	550	200	$7 \cdot 10^{-5}$	4,8	28	550	920	$9 \cdot 10^{-5}$	4
4	640	55	$12 \cdot 10^{-5}$	6	29	860	75	$12 \cdot 10^{-5}$	3
5	980	80	$8 \cdot 10^{-5}$	3	30	640	60	$8 \cdot 10^{-5}$	3
6	860	120	$5 \cdot 10^{-5}$	5	31	860	120	$5 \cdot 10^{-5}$	5
7	1000	90	$9 \cdot 10^{-5}$	4	32	1100	90	$9 \cdot 10^{-5}$	6
8	540	100	$4 \cdot 10^{-5}$	3,5	33	660	100	$4 \cdot 10^{-5}$	3,5
9	950	60	$11 \cdot 10^{-5}$	6	34	750	60	$9 \cdot 10^{-5}$	6
10	880	110	$7 \cdot 10^{-5}$	3,8	35	880	110	$4 \cdot 10^{-5}$	4,6
11	660	75	$6 \cdot 10^{-5}$	4,6	36	950	75	$6 \cdot 10^{-5}$	4,6
12	750	45	$4 \cdot 10^{-5}$	50	37	750	55	$9 \cdot 10^{-5}$	18
13	920	60	$9 \cdot 10^{-5}$	14	38	1020	60	$4 \cdot 10^{-5}$	4
14	800	85	$7 \cdot 10^{-5}$	18	39	840	45	$9 \cdot 10^{-5}$	14
15	680	130	$8 \cdot 10^{-5}$	4,5	40	600	150	$9 \cdot 10^{-5}$	5,5
16	1050	50	$5 \cdot 10^{-5}$	33	41	1060	60	$6 \cdot 10^{-5}$	30
17	660	80	$4 \cdot 10^{-5}$	8	42	1000	100	$5 \cdot 10^{-5}$	8
18	750	120	$9 \cdot 10^{-5}$	6,5	43	540	60	$9 \cdot 10^{-5}$	5,5
19	880	90	$7 \cdot 10^{-5}$	4	44	950	110	$4 \cdot 10^{-5}$	4,8
20	950	100	$8 \cdot 10^{-5}$	3	45	880	75	$9 \cdot 10^{-5}$	6
21	950	60	$4 \cdot 10^{-5}$	3	46	660	45	$4 \cdot 10^{-5}$	3
22	750	110	$6 \cdot 10^{-5}$	5	47	700	50	$12 \cdot 10^{-5}$	5
23	1020	75	$7 \cdot 10^{-5}$	6	48	1100	80	$8 \cdot 10^{-5}$	4
24	840	45	$12 \cdot 10^{-5}$	3,5	49	550	120	$5 \cdot 10^{-5}$	3,5
25	600	60	$8 \cdot 10^{-5}$	6	50	640	90	$9 \cdot 10^{-5}$	6

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев, И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: Учеб. пособие для вузов / И.И.Алиев.– 3-е изд., испр.– М.: Высш. шк., 2002.– 255 с., ил.
2. Данилов И.А. Общая электротехника: учебн. пособие/ И.А. Данилов – М.: «Высшее образование», 2009. – 673 с.
3. Иванов, И.И. Электротехника: учебник/ И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.С. Радовников: 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2006. – 496 с.
4. Жаворонков, М.А., Кузин, А.В. Электротехника и электроника: Учеб. пособие для вузов / М.А.Жаворонков, А.В.Кузин. – М.: Изд. центр «Академия», –2005, – 400 с.
5. Касаткин, А.С., Немцов, М.В. Электротехника /А.С.Касаткин, М.В.Немцов. – М.: Академия, 2006. – 535 с.
6. Копылов, И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов / И.П.Копылов.– 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002 –607 с.
7. Рекус, Г.Г., Белоусов, А.И. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники / Г.Г.Рекус, А.И.Белоусов. – М.: Высш. шк., - 2001. – 416 с.

Приложение 1*(Справочное)**Пример оформления титульного листа*

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВПО «ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО
ХОЗЯЙСТВА
КАФЕДРА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТАпо дисциплине «**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**»**Вариант №_____**

Выполнил(а): (_____)

(и.о. фамилия,
номер группы)

Проверил: (_____)

(и.о. фамилия,
должность,
ученая степень)

Благовещенск, 2012

Приложение 2

Таблица 2.1 - Удельные потери стали P_c и P_y и в зоне шихтованного стыка P_{cm} для холоднокатанной стали марок 3404 и 3405 по ГОСТ 21427-83 при различных индукциях и $f = 50$ Гц.

B , Тл	P_c, P_y , Вт/кг			P_{cm} , Вт/м ²	
	3404 0,35мм	3404 0,30 мм	3405 0,30 мм	Одна пластина	Две пластины
0,20	0,028	0,025	0,023	25	30
0,40	0,093	0,090	0,085	50	70
0,60	0,190	0,185	0,130	100	125
0,80	0,320	0,300	0,280	170	215
1,00	0,475	0,450	0,425	265	345
1,20	0,675	0,635	0,610	375	515
1,22	0,697	0,659	0,631	387	536
1,24	0,719	0,683	0,652	399	557
1,26	0,741	0,707	0,673	411	578
1,28	0,763	0,731	0,694	423	589
1,30	0,785	0,755	0,715	435	620
1,32	0,814	0,779	0,739	448	642
1,34	0,843	0,803	0,763	461	664
1,36	0,872	0,827	0,787	474	686
1,38	0,901	0,851	0,811	497	708
1,40	0,930	0,875	0,835	500	730
1,42	0,964	0,906	0,860	514	754
1,44	0,998	0,937	0,869	526	778
1,46	1,032	0,968	0,916	542	802
1,48	1,066	0,999	0,943	556	826
1,50	1,100	1,030	0,970	570	850
1,52	1,134	1,070	1,004	585	878

1,54	1,168	1,110	1,038	600	906
1,56	1,207	1,150	1,074	615	934
1,58	1,251	1,190	1,112	630	962
1,60	1,295	1,230	1,150	645	990
1,62	1,353	1,278	1,194	661	1017
1,64	1,411	1,326	1,238	677	1044
1,66	1,472	1,380	1,288	695	1071
1,68	1,536	1,440	1,344	709	1098
1,70	1,600	1,500	1,400	725	1125
1,72	1,672	1,560	1,460	741	1155
1,74	1,744	1,620	1,520	757	1185
1,76	1,824	1,692	1,588	773	1215
1,78	1,912	1,776	1,664	789	1245
1,80	2,000	1,860	1,740	805	1275
1,82	2,090	1,950	1,815	828	1305
1,84	2,180	2,040	1,890	839	1335
1,86	2,270	2,130	1,970	856	1365
1,88	2,360	2,220	2,060	873	1395
1,90	2,450	2,300	2,150	890	1425
1,95	2,700	2,530	2,390	930	1500
2,00	3,000	2,820	2,630	970	1580

Примечания:

1. Удельные потери для стали марки 3405 толщиной 0,35 мм принимать по графе для стали 3404 толщиной 0,30 мм.

2. В двух последних графах приведены удельные потери $P_{см}$, в зоне шихтованного стыка при шихтовке слоями в одну и две пластины одинаковые для всех марок.

Таблица 2.2 - Полная удельная намагничивающая мощность в стали $P_{с\text{ нам}}, P_{я\text{ нам}}$ и в зоне шихтованного стыка $P_{ст\text{ нам}}$ для холоднокатаной стали марок 3404 и 3405 при различных индукциях и $f=50$ Гц.

B, Тл	Марки стали и ее толщина $P_{с\text{ нам}}, P_{я\text{ нам}}$				$P_{ст\text{ нам}}, B^*A/m^2$	
	3404 0,35мм	3404 0,30 мм	3405 0,35 мм	3405 0,30 мм	3404	3405
0,20	0,040	0,040	0,039	0,038	40	40
0,40	0,120	0,117	0,117	0,115	80	80
0,60	0,234	0,230	0,227	0,223	140	140
0,80	0,375	0,371	0,366	0,362	280	280
1,00	0,548	0,540	0,533	0,525	1000	900
1,20	0,752	0,742	0,732	0,722	4000	3700
1,22	0,782	0,768	0,758	0,748	4680	4160
1,24	0,811	0,793	0,783	0,773	5360	4620
1,26	0,841	0,819	0,809	0,799	6040	5080
1,28	0,870	0,844	0,834	0,824	6720	5540
1,30	0,900	0,870	0,860	0,850	7400	6000
1,32	0,932	0,904	0,892	0,880	8200	6640
1,34	0,964	0,938	0,924	0,910	9000	7280
1,36	0,996	0,972	0,956	0,940	9800	7920
1,38	1,028	1,006	0,988	0,970	10600	8560
1,40	1,060	1,040	1,020	1,000	11400	9200
1,42	1,114	1,089	1,065	1,041	12440	10120
1,44	1,168	1,139	1,110	1,082	13480	11040
1,46	1,222	1,188	1,156	1,123	14520	11960
1,48	1,276	1,238	1,210	1,161	15560	12880
1,50	1,330	1,289	1,246	1,205	16600	13800
1,52	1,408	1,360	1,311	1,263	17960	14760

1,54	1,486	1,431	1,376	1,321	19320	15720
1,56	1,575	1,511	1,447	1,383	20700	16800
1,58	1,675	1,600	1,524	1,449	22100	18000
1,60	1,775	1,688	1,602	1,526	23500	19200
1,62	1,958	1,850	1,748	1,645	25100	20480
1,64	2,131	2,012	1,894	1,775	26700	21760
1,66	2,556	2,289	2,123	1,956	28600	23160
1,68	3,028	2,681	2,435	2,188	30800	24680
1,70	3,400	3,073	2,747	2,420	33000	27000
1,72	4,480	4,013	3,547	3,080	35400	28520
1,74	5,560	4,953	4,347	3,740	37800	30840
1,76	7,180	6,364	5,551	4,736	40800	33000
1,78	9,340	8,247	7,161	6,068	44400	35000
1,80	11,500	10,130	8,770	7,400	48000	37000
1,82	20,240	17,670	15,110	12,540	52000	39800
1,84	28,980	25,210	21,450	17,680	56000	43600
1,86	37,720	32,750	27,790	22,820	60000	47400
1,88	46,460	40,290	34,130	27,960	64000	51200
1,90	55,200	47,830	40,740	33,100	68000	55000
1,95	89,600	82,900	76,900	70,800	80000	65000
2,00	250,000	215,000	180,000	145,000	110000	75000

Примечание. В двух последних графах приведена удельная намагничивающая мощность $p_{ст\ нам}$, в зоне шихтованного стыка при шихтовке слоями в две пластины. При шихтовке в одну пластину данные $p_{ст\ нам}$, полученные из таблицы, умножить на 0,82 для стали марки 3404 и на 0,78 для стали марки 3405.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
I РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ № 1	5
1 Задача 1 Расчет линейных электрических цепей постоянного тока	5
1.1 Применение законов Кирхгофа	5
1.2 Метод контурных токов	7
1.3 Метод узлового напряжения	10
1.4 Баланс мощностей в электрических цепях	11
1.5 Построение потенциальной диаграммы	12
Варианты для задачи 1	15
2.Задача 2 Расчет линейных электрических цепей синусоидального тока	20
2.1 Расчет токов в ветвях электрической цепи	21
2.2 Баланс мощностей	23
2.3 Показание ваттметра	24
2.4 Построение совмещенной векторной диаграммы токов и топографической диаграммы напряжений	25
Варианты для задачи 2	26
3 Задача 3 Расчет трехфазной симметричной электрической цепи	31
3.1 Расчет токов в трехфазной цепи	32
3.2 Определение напряжений на отдельных участках цепи	34
3.3 Активная мощность симметричной трехфазной системы	35
3.4 Построение совмещенной векторной диаграммы токов и топографической диаграммы напряжений	35
Варианты для задачи 3	37
II РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №2	46
4. Задача 4 Расчет параметров трехфазного трансформатора по каталожным данным	46
4.1 Общие положения и формулы для расчета трехфазного	

трансформатора	46
Варианты для задачи 4	49
Задача 5 Расчет трехфазного асинхронного электродвигателя	53
5.1 Расчет параметров двигателя	53
5.2 Построение механической характеристики асинхронного двигателя	57
Варианты для задачи 5	59
6 Задача 6 Описание принципа работы электронного устройства и составление электронной схемы	62
6.1 Основные параметры (уравнения) и схемы включения биполярных транзисторов	62
6.1.1 Схема с общей базой	63
6.1.2 Схема с общим эмиттером	64
6.1.3 Схема с общим коллектором	66
6.2 Пример описания принципа работы электронного устройства	67
6.3 Пример составления электронной схемы усилителя	69
Варианты для задачи 6	71
Список рекомендуемой литературы	75
Приложение	76
Содержание	81