МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ, НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

Теоретические основы электротехники

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

Зерноград
2024

Об издании – *1*
Содержание

УДК 621.3

Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие по выполнению расчетно-графических работ по дисциплине для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника и 35.03.06 Агроинженерия профиль Электрооборудование и электротехнологии / Сост. О.Б. Забродина, А.М. Исупова, О.В. Кобзистый. – Электрон. дан. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024. – 101 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

Утверждено методической комиссией по направлениям подготовки 13.03.02 и 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.

Утверждено методической комиссией по направлениям подготовки 35.03.06 и 35.04.06 Агроинженерия. направленности Электрооборудование и электротехнологии.

Рецензент: к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Эксплуатация энергетического оборудования и электрические машины» Гуляев П.В.

© Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ 4
2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ 4
3 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ РАБОТЫ № 1 НА ТЕМУ ***«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА»*** 6
4 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ РАБОТЫ № 2 НА ТЕМУ ***«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА»*** 21
5 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ РАБОТЫ № 3 НА ТЕМУ ***«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА»*** 33
6 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ РАБОТЫ № 4 НА ТЕМУ «***ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ***» 47
ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИМ РАБОТАМ 74
ЗДАНИЯ К РАСЧЕТНОЙ РАБОТЕ № 1 ***«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА»*** 74
ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНОЙ РАБОТЕ № 2 ***«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА»*** 79
ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНОЙ РАБОТЕ № 3 ***«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА»*** 85
ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНОЙ РАБОТЕ № 4 «***ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ***» 94
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 101

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

«Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) являются основной теоретической дисциплиной в системе общепрофессиональной подготовки студентов энергетического факультета. Содержание её основывается на знаниях, полученных студентами в результате изучения высшей математики, физики и информатики. Целью дисциплины является обеспечение комплексной подготовки будущего специалиста – профессиональную подготовку, развитие творческих способностей, умение формулировать и решать проблемы изучаемой специальности, умение применять и самостоятельно повышать свои знания.

Важная роль в структуре ТОЭ отводится самостоятельной работе, одним из видов которой является выполнение индивидуальных работ. Помощь в организации данного вида обучения и должно оказывать данное учебно-методическое пособие.

Настоящее учебно-методическое пособие содержит комментарии к выполнению индивидуальных работ, примеры их решения и в конце пособия приведены варианты заданий к каждой расчетной работе.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

К выполнению расчетной работы следует приступать только после изучения теоретического материала по соответствующему разделу, изложенному в учебниках, приведенных в списке рекомендуемой литературы, полезно также просмотреть задачники, в которых приводится решение подобных задач, а также настоящее учебно-методическое пособие.

Решение должно сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями. При необходимых преобразованиях следует вычертить все промежуточные схемы.

Индивидуальная работа выполняется на листах формата А4, страница текстом заполняется только с одной стороны. Текст, формулы и числовые выкладки должны быть написаны четко и аккуратно, обозначения в схемах и по ходу изложения соответствовать ГОСТам, а все величины выражаться в единицах СИ. Схемы, векторные диаграммы и графики вычерчиваться с помощью чертежных принадлежностей.

При решении задачи разными методами все напряжения и токи должны сохранять свои буквенные обозначения и направления. Расчеты производить до третьей значащей цифры.

В конце работы следует расписаться, поставить дату, указать используемую литературу.

Каждый студент получает задание по расчетной работе. Сдавая на кафедру работу, студент обязан на первой странице привести индивидуальное задание с указанием его номера. Индивидуальные работы, выполненные не по своему заданию, не зачитываются, а студенту выдается новое задание.

Если работа не зачтена, то студент все исправления выполняет в той же работе на оборотной стороне листов бумаги формата А4 или добавляет необходимое число листов. Какие-либо исправления в тексте, уже проверенном преподавателем, не допускаются.

Работы, выполненные с нарушением этих правил, не зачитываются, как и работы, содержащие серьезные ошибки.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ РАБОТЫ № 1 НА ТЕМУ *«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА»*

Целью выполнения данной расчетной работы является получение навыка расчета разветвленных электрических цепей постоянного тока с несколькими источниками ЭДС, изучение методов расчета и анализа электрических цепей.

Согласно заданию в сложной электрической цепи постоянного тока необходимо несколькими методами рассчитать токи в ветвях, сравнить полученные результаты, проверить энергетический баланс цепи и построить потенциальную диаграмму.

Вариант задания расчетной работы, выполняемой по данной теме, выбирается из приложения к данному учебному пособию либо выдается преподавателем. Варианты отличатся либо значениями исходных данных, либо схемой электрической цепи (ЭЦ).

Прежде, чем приступить к расчетам, необходимо изучить соответствующий раздел курса теоретических основ электротехники и ответить на контрольные вопросы.

Вопросы для самоконтроля

– Что называется электрической цепью и какие элементы может она содержать?

– Сформулируйте основные законы электрических цепей.

– Что такое ветвь, узел, контур электрической цепи?

– Какое соединение сопротивлений называется последовательным (параллельным, смешанным)?

– Как определить эквивалентное сопротивление последовательного (параллельного) соединения двух (трех) сопротивлений?

– Сформулируйте законы Ома и Кирхгофа для цепи постоянного тока.

– Сколько независимых уравнений может быть составлено по первому закону Кирхгофа?

– Как вычислить напряжение на одном из последовательно включенных сопротивлений, если известно общее напряжение?

– Как вычислить ток в одном из параллельно включенных сопротивлений, если известен общий ток?

– Порядок расчета цепи методом узловых напряжений.

– Порядок расчета цепи методом контурных токов.

– Порядок расчета цепи методом активного двухполюсника (эквивалентного генератора).

– Как определить токи ветвей по известным контурным токам?

– Что такое баланс мощностей (энергии) в электрической цепи?

– Что такое потенциальная диаграмма электрической цепи, каков порядок ее построения?

– На каких законах основывается метод узловых потенциалов?

– Какие условия должны быть выполнены при преобразовании треугольника сопротивлений в звезду сопротивлений?

– При последовательном соединении двух резисторов их эквивалентное сопротивление равно 10 Ом, а при параллельном – 2,4 Ом. Определите значения сопротивлений каждого резистора.

– Какова область применения различных методов расчета?

При выполнении расчетов может понадобиться преобразование электрических цепей. При этом надо помнить следующее.

Эквивалентное сопротивление ЭЦ при последовательном включении приемников электроэнергии равно сумме их сопротивлений:

$$R_{экв} = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots \ .$$

При параллельном включении приемников электроэнергии складывают не сопротивления, а проводимости параллельных ветвей:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \ldots$$

или в виде

$$\frac{1}{R_{экв}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots \ ,$$

затем определяют $R_{экв}$.

При включении двух параллельных сопротивлений удобно сразу определять эквивалентное сопротивление по выражению

$$R_{экв} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Для трех сопротивлений прямое вычисление сопротивлений уже усложняется:

$$R_{экв} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_3 R_2} \ .$$

При смешанном соединении сопротивлений эквивалентное сопротивление определяется из анализа цепи.

В задаче следует определить токи ветвей методами контурных токов и узловых потенциалов.

Метод контурных токов (метод Максвелла) Метод позволяет уменьшить число уравнений, необходимых для расчета электрической цепи, до числа $k = N_в - N_y + 1 - N_m$, где $N_в$ – число ветвей; N_y – число узлов; N_m – число источников тока, что соответствует *числу независимых контуров* в электрической цепи.

Область применения. Метод используется, если число независимых контуров в электрической цепи меньше $N_y - 1$, то есть числа узлов минус один.

Сущность метода заключается в том, что ток в любой ветви ЭЦ представляется в виде алгебраической суммы независимых контурных токов, протекающих по этой ветви.

Порядок расчета:

- Произвольно задают направления токов в ветвях ЭЦ и обозначают их на схеме ЭЦ.
- Предполагают, что в каждом независимом контуре ЭЦ протекают независимые контурные токи, обозначают их на схеме ЭЦ – $I_{11}, I_{22}, \ldots, I_{kk}$. Причем всем контурным токам задается одно и то же положительное направление, например, по часовой стрелке.

- Составляется система уравнений вида:

$$\begin{cases} R_{11}\cdot I_{11} + R_{12}\cdot I_{22} + R_{13}\cdot I_{33} + \ldots + R_{1k}\cdot I_{kk} = E_{11}; \\ R_{21}\cdot I_{11} + R_{22}\cdot I_{22} + R_{23}\cdot I_{33} + \ldots + R_{2k}\cdot I_{kk} = E_{22}; \\ R_{31}\cdot I_{11} + R_{32}\cdot I_{22} + R_{33}\cdot I_{33} + \ldots + R_{3k}\cdot I_{kk} = E_{33}; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ R_{k1}\cdot I_{11} + R_{k2}\cdot I_{22} + R_{k3}\cdot I_{33} + \ldots + R_{kk}\cdot I_{kk} = E_{kk}; \end{cases}$$

где R_{11}, R_{22}, R_{33}, ..., R_{kk} – соответственно сумма сопротивлений первого, второго, третьего, …, k-го контуров;

$R_{12} = R_{21}$ – сопротивление ветви, общей для первого и второго контуров, взятое с отрицательным знаком;

$R_{13} = R_{31}$ – сопротивление ветви, общей для первого и третьего контуров, взятое с отрицательным знаком и т.д.;

E_{11}, E_{22}, E_{33}, ..., E_{kk} – контурные ЭДС, равные взятой по направлению обхода алгебраической сумме ЭДС источников, входящих в соответствующий контур.

- Методом Краммера решается система уравнений и определяются контурные токи, для этого составляются определители:

главный

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \ldots & R_{1k} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & \ldots & R_{2k} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & \ldots & R_{3k} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ R_{k1} & R_{k2} & R_{k3} & \ldots & R_{kk} \end{vmatrix} = \ldots$$

и дополнительные

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} E_{11} & R_{12} & R_{13} & \ldots & R_{1k} \\ E_{22} & R_{22} & R_{23} & \ldots & R_{2k} \\ E_{33} & R_{32} & R_{33} & \ldots & R_{3k} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ E_{kk} & R_{k2} & R_{k3} & \ldots & R_{kk} \end{vmatrix} = \ldots ; \qquad \Delta_{22} = \begin{vmatrix} R_{11} & E_{11} & R_{13} & \ldots & R_{1k} \\ R_{21} & E_{22} & R_{23} & \ldots & R_{2k} \\ R_{31} & E_{33} & R_{33} & \ldots & R_{3k} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ R_{k1} & E_{kk} & R_{k3} & \ldots & R_{kk} \end{vmatrix} = \ldots$$ и т.д., затем вычисляются токи:

$$I_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta}; \quad I_{22} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta}; \; I_{33} = \frac{\Delta_{33}}{\Delta}; \; \ldots; \; I_{kk} = \frac{\Delta_{kk}}{\Delta}.$$

- Действительные токи во внешних ветвях равны соответствующим контурным токам. При совпадении контурного тока с выбранным направлением тока в ветви его записывают со знаком плюс. В противном случае – со знаком минус.

- Действительные токи общих ветвей соседних контуров определяются как разность их контурных токов.

Метод узловых потенциалов. Данный метод позволяет уменьшить число уравнений, необходимых для расчета электрической цепи, до значения k = Ny – 1, где Ny – число узлов. Если в ЭЦ некоторые узлы соединяются источниками ЭДС непосредственно (внутреннее сопротивление принимается равным нулю), то необходимое для расчета число уравнений уменьшается до k = Ny – 1 - NЭДС, где NЭДС – число ветвей, содержащих только источники ЭДС.

Область применения. Метод используется, когда число уравнений будет меньше, чем в методе контурных токов, обычно при небольшом числе узлов в электрической цепи.

Сущность метода заключается в том, что путем решения системы уравнений определяются потенциалы узлов, затем по закону Ома вычисляются токи в ветвях.

Порядок расчета:

- Один из узлов ЭЦ (обычно тот, в котором сходится наибольшее число ветвей) принимается за опорный и ему присваивается потенциал, равный нулю.

- Составляют систему уравнений вида (для ЭЦ постоянного тока):

$$\begin{cases} G_{11} \cdot \varphi_1 + G_{12} \cdot \varphi_2 + G_{13} \cdot \varphi_3 + \ldots + G_{1k} \cdot \varphi_k = I_{11}; \\ G_{21} \cdot \varphi_1 + G_{22} \cdot \varphi_2 + G_{23} \cdot \varphi_3 + \ldots + G_{2k} \cdot \varphi_k = I_{22}; \\ G_{31} \cdot \varphi_1 + G_{32} \cdot \varphi_2 + G_{33} \cdot \varphi_3 + \ldots + G_{3k} \cdot \varphi_k = I_{33}; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ G_{k1} \cdot \varphi_1 + G_{k2} \cdot \varphi_2 + G_{k3} \cdot \varphi_3 + \ldots + G_{kk} \cdot \varphi_k = I_{kk}, \end{cases}$$

где φ_1, φ_2 , φ_3 , ... , φ_k – потенциалы узлов;

G_{11} , G_{22} , G_{33} , ..., G_{kk} – собственные узловые проводимости первого, второго, третьего, …, *k*-го узлов (сумма проводимостей ветвей, присоединенных к соответствующему узлу);

$G_{12} = G_{21}$ – общая узловая проводимость, равная сумме проводимостей ветвей, соединяющих первый и второй узлы, взятая с отрицательным знаком;

$G_{13} = G_{31}$ – сумма проводимостей ветвей, соединяющих первый и третий узлы, взятая с отрицательным знаком и т.д.;

I_{11}, I_{22} , I_{33} , ..., I_{kk} – узловые токи соответствующих узлов.

Узловым током называется алгебраическая сумма произведений ЭДС ветвей на их проводимости:

$$I_{kk} = \sum_{n=1}^{n} E_n \cdot G_n .$$

При этом произведение $E_n \cdot G_n$ принимается с положительным знаком, если ЭДС направлена к узлу, и с отрицательным - в противном случае.

• Методом Краммера решается система уравнений и определяются потенциалы узлов, для этого составляются определители аналогично описанному выше и вычисляются потенциалы узлов:

$$\varphi_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad \varphi_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad \varphi_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta}; \quad \ldots; \quad \varphi_k = \frac{\Delta_k}{\Delta}.$$

• Действительные токи определяются по закону Ома с учетом известных уже потенциалов на зажимах каждой ветви.

Метод эквивалентного генератора (или метод активного двухполюсника, или метод холостого хода и короткого замыкания).

Область применения. Метод применяют, если необходимо определить ток в какой-либо одной ветви сложной электрической цепи.

Сущность метода заключается в том, что по отношению к выделенной ветви с сопротивлением $R_н$, ток в которой необходимо рассчитать, остальная

часть ЭЦ мысленно заменяется эквивалентным генератором (активным двухполюсником), например, источником ЭДС $E_Э$ с внутренним сопротивлением $R_Э$, при этом ЭДС эквивалентного генератора определяется как напряжение на его зажимах на холостом ходе $E_Э = U_{\underline{xx}}$, а его внутреннее сопротивление $R_Э$ равно входному сопротивлению $R_{вх}$ (относительно тех же зажимов) двухполюсника при отсутствии ЭДС источников напряжения и внутренних токов источников тока. Порядок расчета следующий:

- Выбирают направление искомого тока в ветви электрической цепи и обозначают его на схеме.
- Мысленно выносят ветвь с искомым током за условные пределы схемы ЭЦ.
- Остальную часть ЭЦ с источниками ЭДС и другими сопротивлениями заменяют активным двухполюсником, внутри которого расположен эквивалентный генератор $E_э$ с внутренним сопротивлением $R_{вх}$ (направление ЭДС задать по направлению тока). Входные зажимы двухполюсника обозначают, например, *ав*.
- Размыкают ветвь с искомым током (создают режим холостого хода эквивалентного генератора – нагрузка отключена) и известными методами находят напряжение на зажимах разомкнутой ветви *ав*, то есть напряжение $U_{ав\,xx}$.
- В активном двухполюснике на холостом ходу закорачивают все внутренние источники ЭДС и вычисляют его входное сопротивление $R_{вх}$ относительно зажимов *ав*.
- Рассчитывают искомый ток:

$$I = \frac{U_{ав\,xx}}{R_н + R_{вх}}.$$

Энергетический баланс в электрических цепях постоянного тока рассчитывается на основании закона сохранения энергии. Количество теплоты, выделяющейся на сопротивлениях ЭЦ в единицу времени, равно энергии, гене-

рируемой за этот же период времени источниками питания на основании соотношения:

$$\sum_{k=1}^{n} P_{uk} = \sum_{k=1}^{m} P_{нk} ,$$

где P_{uk} – мощность k-го источника энергии ЭДС;

n – число источников энергии в электрической цепи;

$P_{нk}$ – мощность, потребляемая k-ым приемником;

m – число приемников в ЭЦ.

Для источников ЭДС – $P_{uk} = E_k \cdot I_k$, причем, если ток направлен навстречу ЭДС, то мощность будет иметь отрицательный знак – источник ЭДС потребляет энергию (например, заряжается аккумулятор).

Для источников тока – $P_{Ик} = U_{abk} \cdot I_k$, где U_{abk} напряжение на зажимах источника тока.

Мощность, выделяемая на участках электрической цепи, определяется как $P_{нk} = R_k \cdot I_k^2$, где R_k – сопротивление k- го участка.

Потенциальной диаграммой называют графическое изображение распределения потенциалов вдоль замкнутого контура электрической цепи.

Для ее построения предварительно вычисляют значения токов на участках. Затем маркируют все точки контура, для которого строится потенциальная диаграмма, и одну из точек контура мысленно заземляют, то есть ей присваивают потенциал, равный нулю, если такой точки с потенциалом равным нулю в электрической цепи еще нет. Выбирают направление обхода контура и последовательно, начиная от точки с потенциалом равным нулю, обходят контур, вычисляя потенциалы всех точек контура. Потенциальная диаграмма строится в координатах, где по оси абсцисс откладывают последовательно значения сопротивлений контура по выбранному направлению его обхода, а по оси ординат - значения потенциалов, соответствующих потенциалам точек контура.

Пример выполнения расчетной работы № 1

Исходные данные:

E_1, В	E_2, В	E_3, В
100	120	40
E_4, В	E_5, В	E_6, В
60	80	50
R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом
8	10	4
R_4, Ом	R_5, Ом	R_6, Ом
5	8	12

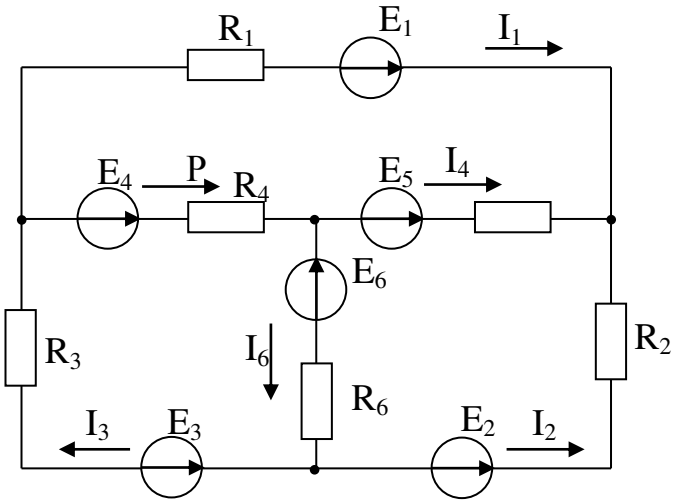


Рисунок 1

РЕШЕНИЕ:

На заданной схеме электрической цепи, приведенной на рисунке 1, проставим произвольно положительные направления токов ветвей. Выберем направления обхода контуров и составим систему уравнений по законам Кирхгофа:

$$\begin{cases} -I_1 - I_4 + I_3 = 0; \\ I_4 - I_5 - I_6 = 0; \\ I_6 - I_3 - I_2 = 0; \\ I_6R_6 + I_3R_3 + I_4R_4 = E_4 - E_6 - E_3; \\ I_1R_1 - I_5R_5 - I_4R_4 = E_1 - E_5 - E_4; \\ I_5R_5 - I_2R_2 - I_6R_6 = E_5 - E_2 + E_6. \end{cases}$$

Три первых уравнения составлены для узлов 1, 2 и 4 соответственно.

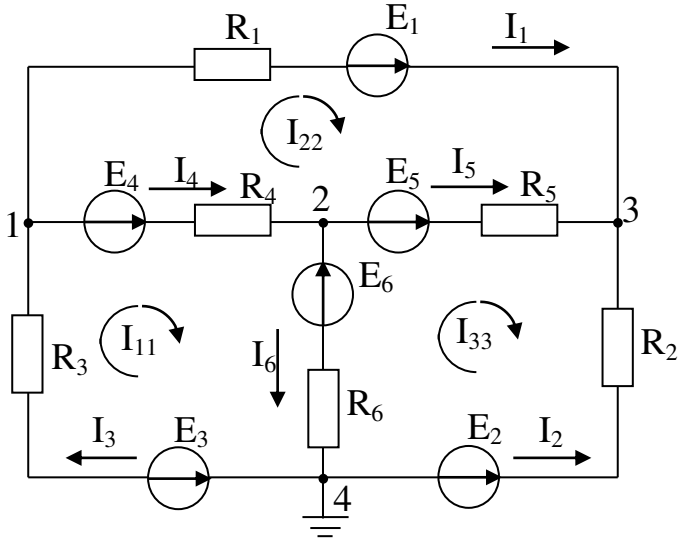


Рисунок 2

Метод контурных токов.

Нанесем на схеме электрической цепи контурные токи одного направления (рисунок 2). Составим систему уравнений согласно приведенному выше алгоритму.

$$\begin{cases} I_{11}(R_4+R_3+R_6)-I_{22}R_4-I_{33}R_6=E_4-E_6-E_3; \\ -I_{11}R_4+I_{22}(R_5+R_1+R_4)-I_{33}R_5=E_1-E_5-E_4; \\ -I_{11}R_6-I_{22}R_5+I_{33}(R_5+R_2+R_6)=E_5-E_2+E_6. \end{cases}$$

Распишем определители и найдем их численные значения:

$$\Delta=\begin{vmatrix} R_4+R_3+R_6 & -R_4 & -R_6 \\ -R_4 & R_5+R_1+R_4 & -R_5 \\ -R_6 & -R_5 & R_5+R_2+R_6 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_{11}=\begin{vmatrix} E_4-E_6-E_3 & -R_4 & -R_6 \\ E_1-E_5-E_4 & R_5+R_1+R_4 & -R_5 \\ E_5-E_2+E_6 & -R_5 & R_5+R_2+R_6 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_{22}=\begin{vmatrix} R_4+R_3+R_6 & E_4-E_6-E_3 & -R_6 \\ -R_4 & E_1-E_5-E_4 & -R_5 \\ -R_6 & E_5-E_2+E_6 & R_5+R_2+R_6 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_{33}=\begin{vmatrix} R_4+R_3+R_6 & -R_4 & E_4-E_6-E_3 \\ -R_4 & R_5+R_1+R_4 & E_1-E_5-E_4 \\ -R_6 & -R_5 & E_5-E_2+E_6 \end{vmatrix};$$

подставив значения сопротивлений, получим: $\Delta = 7152$; $\Delta_{11} = -23900$; $\Delta_{22} = 24540$; $\Delta_{33} = -13720$.

Тогда контурные токи будут равны: I_{11} = - 3,34 А; I_{22} = - 3,43 А; I_{33} = - 1,92 А.

По найденным значениям контурных токов определим токи ветвей. Токи в крайних ветвях равны контурным токам с учетом их направления, а токи в смежных ветвях равны разности соответствующих контурных токов.

$I_1 = I_{22} = -3{,}43$ А; $I_2 = -I_{33} = 1{,}92$ А; $I_3 = I_{11} = -3{,}34$ А;

$I_4 = I_{11} - I_{22} = 0{,}089$ А; $I_5 = I_{33} - I_{22} = 1{,}513$ А; $I_6 = I_{11} - I_{33} = -1{,}423$ А.

Метод узловых потенциалов.

На схеме электрической цепи промаркируем узлы (рисунок 3).

Узел 4 заземлим, то есть присвоим ему потенциал равный нулю. Согласно описанному выше алгоритму составим систему уравнений:

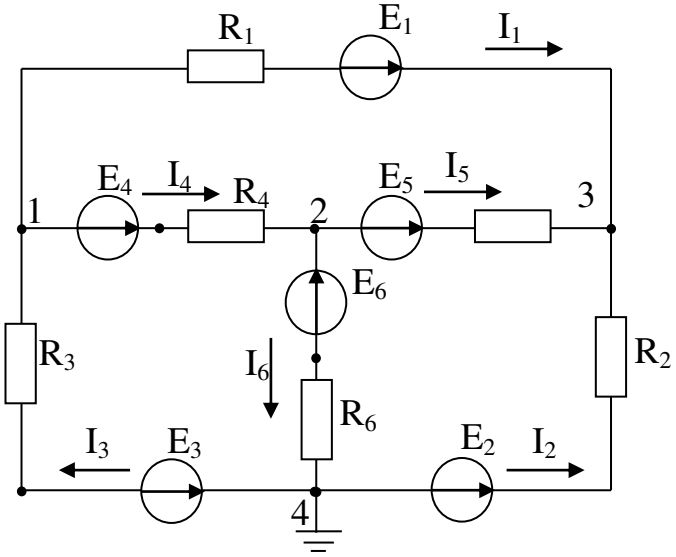


Рисунок 3

$$\begin{cases} (G_1 + G_4 + G_3)\varphi_1 - G_4\varphi_2 - G_1\varphi_3 = -E_4G_4 - E \\ -G_4\varphi_1 + (G_5 + G_6 + G_4)\varphi_2 - G_5\varphi_3 = E_4G_4 + E_6G_6 - E_5G_5; \\ -G_1\varphi_1 - G_5\varphi_2 + (G_5 + G_2 + G_1)\varphi_3 = E_2G_2 + E_5G_5 + E_1G_1. \end{cases}$$

Распишем определители:

$$\Delta = \begin{vmatrix} G_1 + G_4 + G_3 & -G_4 & -G_1 \\ -G_4 & G_5 + G_6 + G_4 & -G_5 \\ -G_1 & -G_5 & G_5 + G_2 + G_1 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -E_4G_4 - E_1G_1 - E_3G_3 & -G_4 & -G_1 \\ E_4G_4 + E_6G_6 - E_5G_5 & G_5 + G_6 + G_4 & -G_5 \\ E_2G_2 + E_5G_5 + E_1G_1 & -G_5 & G_5 + G_2 + G_1 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} G_1 + G_4 + G_3 & -E_4G_4 - E_1G_1 - E_3G_3 & -G_1 \\ -G_4 & E_4G_4 + E_6G_6 - E_5G_5 & -G_5 \\ -G_1 & E_2G_2 + E_5G_5 + E_1G_1 & G_5 + G_2 + G_1 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} G_1 + G_4 + G_3 & -G_4 & -E_4G_4 - E_1G_1 - E_3G_3 \\ -G_4 & G_5 + G_6 + G_4 & E_4G_4 + E_6G_6 - E_5G_5 \\ -G_1 & -G_5 & E_2G_2 + E_5G_5 + E_1G_1 \end{vmatrix}$$

и найдем их численные значения: $\Delta = 0{,}047$; $\Delta_1 = -1{,}24$; $\Delta_2 = 1{,}533$; $\Delta_3 = -4{,}694$.

Тогда $\varphi_1 = -26{,}6$ В; $\varphi_2 = 32{,}9$ В; $\varphi_3 = 100{,}8$ В.

Рассчитаем токи в ветвях:

$$I_1 = \frac{E_1 - \varphi_3 + \varphi_1}{R_1} = -3{,}431\ A\ ;\ I_2 = \frac{E_2 - \varphi_3}{R_2} = 1{,}92\ A\ ;$$

$$I_3 = \frac{-E_3 - \varphi_1}{R_3} = -3{,}34\ A\ ; I_4 = \frac{E_4 + \varphi_1 - \varphi_2}{R_4} = 0{,}089\ A\ ;$$

$$I_5 = \frac{E_5 + \varphi_2 - \varphi_3}{R_5} = 1{,}51\ A\ ;\ I_6 = \frac{-E_6 + \varphi_2}{R_6} = -1{,}42\ A\ .$$

Метод эквивалентного генератора. Для решения задачи разорвем ветвь 4, в которой необходимо определить ток. На холостом ходу электрическая цепь будет выглядеть так, как это представлено на рисунке 4.

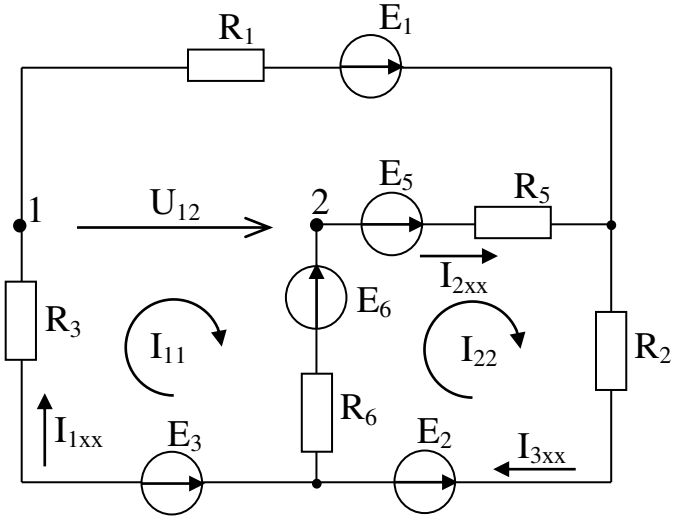


Рисунок 4

Для определения напряжения на холостом ходу между зажимами разорванной ветви U_{12} рассчитаем токи холостого хода в ветвях: решим поставленную задачу методом контурных токов, согласно описанному выше, но уже для двух контуров.

$$\begin{cases} I_{11}(R_1 + R_3 + R_5 + R_6) - I_{22}(R_5 + R_6) = E_1 - E_6 - E_3 - E_5; \\ -I_{11}(R_5 + R_6) + I_{22}(R_5 + R_6 + R_2) = E_6 + E_5 - E_2. \end{cases}$$

Для этого, аналогично описанному выше, найдем значения контурных токов, подставив численные значения сопротивлений и ЭДС в систему уравнений.

Полученные значения контурных токов и токов холостого хода:

I_{11} = - 3,39 А; I_{22} = - 1,93 А; I_{1xx} = - 3,39 А; ; I_{2xx} = 1,46 А.

Напряжение U_{ab} на холостом ходу определим по второму закону Кирхгофа:

$$U_{12} = -E_6 - E_3 - I_{1xx}R_3 + I_{2xx}R_6 = 58{,}8\ B;$$

а затем и ток в ветви 4:

$$I_4 = \frac{U_{12} + E_4}{R_4 + R_{вх}}.$$

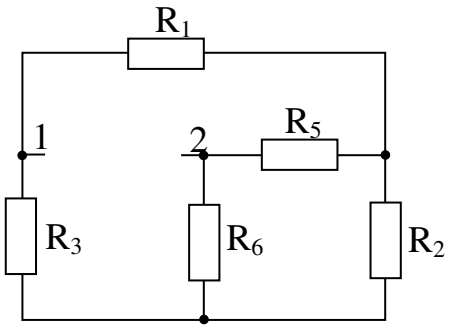


Рисунок 5

Для определения входного сопротивления активного двухполюсника (эквивалентного генератора) закоротим внутренние ЭДС цепи на холостом ходу (рисунок 5). Для определения входного сопротивления полученной цепи относительно зажимов *ав* выполним преобразования треугольника сопротивлений R_5, R_6, R_2 в звезду сопротивлений.

В результате получим упрощенную схему электрической цепи (рисунок 6) для вычисления входного сопротивления активного двухполюсника, где сопротивления эквивалентной звезды равны:

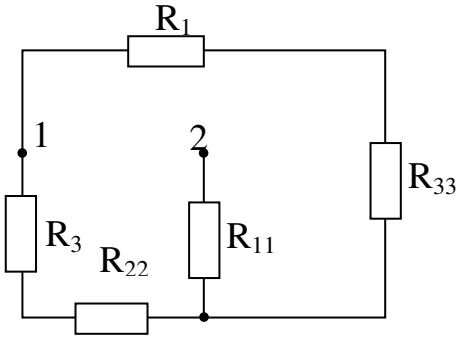


Рисунок 6

$$R_{11} = \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6 + R_2} = 3{,}2 \quad Ом; \qquad R_{22} = \frac{R_2 R_6}{R_5 + R_6 + R_2} = 4 \quad Ом;$$

$$R_{33} = \frac{R_5 R_2}{R_5 + R_6 + R_2} = 2{,}6 \quad Ом.$$

Тогда для схемы рис. 6 входное сопротивление относительно зажимов *ab* будет равно:

$$R_{вх} = R_{11} + \frac{(R_{22} + R_3)(R_1 + R_{33})}{R_{22} + R_3 + R_1 + R_{33}} = 7{,}77 \quad Ом.$$

Вычислим искомый ток I_4:

$$I_4 = \frac{-58{,}8 + 60}{5 + 7{,}77} = 0{,}089 \ A.$$

Все токи, рассчитанные тремя методами, сведем в таблицу:

Метод расчета	I_1, A	I_2, A	I_3, A	I_4, A	I_5, A	I_6, A
Контурных токов	-3,43	1,92	-3,34	0,089	1,513	-1,42
Узловых потенциалов	-3,43	1,92	-3,34	0,089	1,513	-1,42
Эквивалентного генератора	-	-	-	0,089	-	-

Составим баланс мощностей согласно выражению:

$$\sum_{k=1}^{n} P_{uk} = \sum_{k=1}^{m} P_{нk} \ .$$

$$\sum_{k=1}^{n} P_{Иk} = E_1 I_1 + E_2 I_2 - E_3 I_3 + E_4 I_4 + E_5 I_5 - E_6 I_6 = 218 \ Вт;$$

$$\sum_{k=1}^{m} P_{нk} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2 = 218 \ Вт.$$

Равенство полученных выражений подтверждает правильность расчетов.

Для построения потенциальной диаграммы на схеме электрической цепи промаркируем все участки одного из контуров (рисунок 7), потенциал узла 4 примем равным нулю (заземлим) и найдем значения потенциалов:

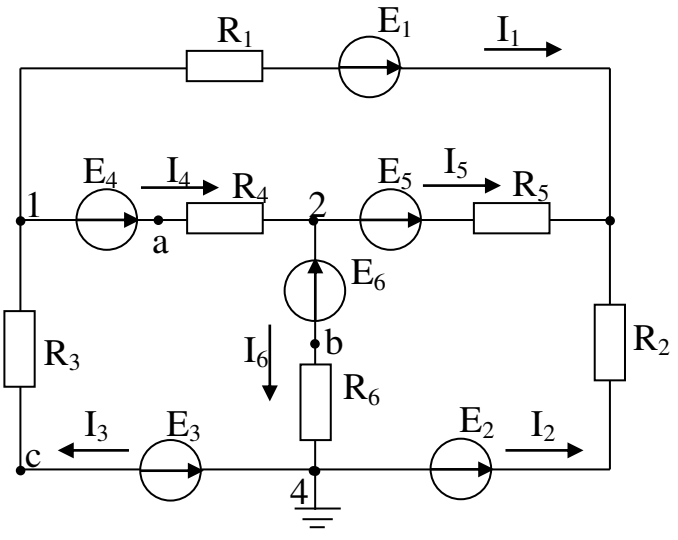


Рисунок 7

$$U_{c4} = \varphi_c - \varphi_4 = -E_3; \qquad \varphi_c = -E_3 = -40 \ \ B;$$

$$U_{1c} = \varphi_1 - \varphi_c = -I_3 R_3; \qquad \varphi_1 = \varphi_c - I_3 R_3 = -40 + 13{,}368 = -26{,}632 \ \ B;$$

$$U_{a1} = \varphi_a - \varphi_1 = E_4; \qquad \varphi_a = \varphi_1 + E_4 = -26{,}632 + 60 = 33{,}368 \ \ B;$$

$$U_{2a} = \varphi_2 - \varphi_a = -I_4 R_4; \qquad \varphi_2 = \varphi_a - I_4 R_4 = 33{,}468 - 0{,}445 = 32{,}923 \ \ B;$$

$$U_{b2} = \varphi_b - \varphi_2 = -E_6; \qquad \varphi_b = \varphi_2 - E_6 = 32{,}923 - 50 = -17{,}077 \ \ B;$$

$$U_{4b} = \varphi_4 - \varphi_b = -I_6 R_6; \quad \varphi_4 = \varphi_b - I_6 R_6 = -17{,}077 - 17{,}077 = 0 \ \ B.$$

Потенциал узла 4 получился равным нулю, следовательно, расчет проведен верно.

По результатам расчета построим потенциальную диаграмму (рисунок 8).

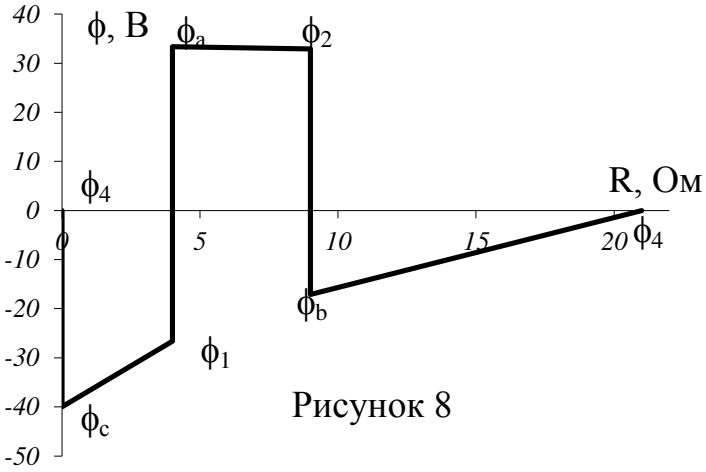


Рисунок 8

4 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ РАБОТЫ № 2 НА ТЕМУ *«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА»*

Целью выполнения данной работы является получение навыка расчета разветвленных линейных электрических цепей переменного синусоидального тока с несколькими источниками ЭДС, изучение методов расчета и анализа электрических цепей переменного тока. В результате студент должен закрепить навыки расчета электрических цепей символическим методом.

Согласно заданию в двухконтурной электрической цепи переменного синусоидального тока необходимо несколькими методами рассчитать токи в ветвях, сравнить полученные результаты, рассчитать мощности, определить показания ваттметра и построить топографическую диаграмму цепи.

Вариант задания расчетной работы, выполняемой по данной теме, выбирается из приложения к данному учебному пособию либо выдается преподавателем. Каждый вариант отличатся от другого либо значениями исходных данных, либо схемой электрической цепи (ЭЦ).

Прежде чем приступить к расчетам, необходимо изучить соответствующий раздел курса теоретических основ электротехники и ответить на контрольные вопросы.

Вопросы для самоконтроля

- Что такое период, угловая частота, частота, фаза, начальная фаза? Единицы их измерения.
- Что называется мгновенным, действующим и средним значением переменного тока?
- Как сложить гармонические колебания одинаковых частот (разных частот)?
- Как представить гармонические колебания с помощью векторов?
- Как определить разность фаз между напряжением и током на зажимах R, L и C элементов?
- Как определить разность фаз между напряжением и током на зажимах последовательных и параллельных RL, RC и RLC- цепей?

- Как представить синусоидальные токи, напряжения и ЭДС комплексными числами?
- Как используют векторные диаграммы при расчетах электрических цепей?
- Что такое комплексное сопротивление, комплексная проводимость электрической цепи? Как они вычисляются?
- Как от показательной формы представления комплексного числа перейти к алгебраической форме и обратно?
- Какова последовательность расчета простых разветвленных и неразветвленных цепей синусоидального тока символическим методом?
- Поясните принцип действия генератора переменного тока.
- Каков физический смысл понятий активной, реактивной, полной мощности? Единицы измерений.
- Что такое резонанс напряжений? Условия его возникновения и физические явления, его сопровождающие.
- Что такое резонанс токов? Условия его возникновения и физические явления, его сопровождающие.
- Для чего и как повышают коэффициент мощности в цепях переменного тока?
- Как рассчитать емкость конденсатора для компенсации реактивной мощности?

Согласно заданию требуется рассчитать токи и напряжения в цепи методом контурных токов, двух узлов и методом эквивалентного генератора, а также построить круговую диаграмму тока одной из ветвей.

При расчете цепи **методом контурных токов** методика расчета остается прежней, как и для цепи постоянного тока, но параметры цепи, токи и напряжения записываются в комплексной форме. Система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{11}\cdot\underline{I}_{11} + \underline{Z}_{12}\cdot\underline{I}_{22} + \underline{Z}_{13}\cdot\underline{I}_{33} + \ldots + \underline{Z}_{1k}\cdot\underline{I}_{kk} = \underline{E}_{11}; \\ \underline{Z}_{21}\cdot\underline{I}_{11} + \underline{Z}_{22}\cdot\underline{I}_{22} + \underline{Z}_{23}\cdot\underline{I}_{33} + \ldots + \underline{Z}_{2k}\cdot\underline{I}_{kk} = \underline{E}_{22}; \\ \underline{Z}_{31}\cdot\underline{I}_{11} + \underline{Z}_{32}\cdot\underline{I}_{22} + \underline{Z}_{33}\cdot\underline{I}_{33} + \ldots + \underline{Z}_{3k}\cdot\underline{I}_{kk} = \underline{E}_{33}; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \underline{Z}_{k1}\cdot\underline{I}_{11} + \underline{Z}_{k2}\cdot\underline{I}_{22} + \underline{Z}_{k3}\cdot\underline{I}_{33} + \ldots + \underline{Z}_{kk}\cdot\underline{I}_{kk} = \underline{E}_{kk}. \end{cases}$$

Метод двух узлов. Метод является частным случаем метода узловых потенциалов. Для расчета составляется только одно уравнение.

Область применения. Метод используется, когда ЭЦ имеет несколько параллельных ветвей и только два узла.

Сущность метода заключается в том, что при расчете определяют разность потенциалов между двумя узлами, затем по закону Ома вычисляют токи в ветвях. Порядок расчета следующий:

- Напряжение между двумя узлами вычисляется по формуле

$$\underline{U}_{ав} = \frac{\sum_{n=1}^{m} \underline{E}_n \cdot \underline{Y}_n}{\sum_{n=1}^{n} \underline{Y}_n},$$

где $\underline{E}_n$ – комплекс ЭДС n-ой ветви (если направлена к узлу «а», то имеет знак плюс, если от узла – то знак минус);

$\underline{Y}_n$ – комплексная проводимость n-ой ветви;

n – число параллельных ветвей;

m – число ветвей, содержащих ЭДС.

- Токи в ветвях определяют по закону Ома с учетом известного уже напряжения на зажимах каждой ветви.

Методом эквивалентного генератора задача решается также, как описано выше на странице 12, при расчете все токи напряжения и сопротивления подставляются в комплексной форме.

Для определения **показаний ваттметра**, установленного в электрической цепи, следует помнить, что он показывает скаляр, равный произведению трех величин:

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\psi_u - \psi_i),$$

где U – действующее значение напряжения на обмотке напряжения ваттметра;

I – действующее значение тока в токовой обмотке ваттметра;

ψ_u – начальная фаза напряжения U;

ψ_i – начальная фаза тока I.

Для построения **топографической диаграммы** предварительно определяют комплексные значения всех токов электрической цепи. Найденные комплексные токи откладывают на комплексной плоскости в выбранном масштабе.

Маркируют все точки электрической цепи, одну из них условно заземляют, то есть присваивают ей потенциал, равный нулю. Эта точка будет располагаться в начале координат комплексной плоскости. Рассчитывают потенциалы каждой точки электрической цепи. Выбирают масштаб потенциалов и каждую точку цепи наносят на комплексную плоскость. Точки, имеющие прямую электрическую связь, соединяют прямыми линиями.

Таким образом, каждой точке электрической цепи будет соответствовать точка на комплексной плоскости. Разность потенциалов между двумя любыми точками электрической цепи может быть определена по топографической диаграмме. Для этого следует соединить вектором соответствующие точки на комплексной плоскости.

Пример выполнения расчетной работы № 2

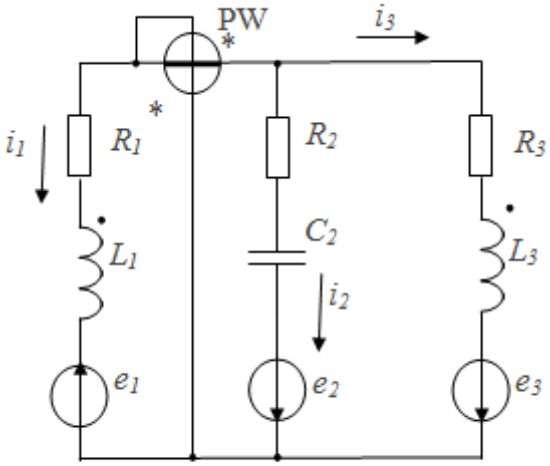


Рисунок 9 – Схема электрической цепи

Исходные данные:

$e_1 = 100\sqrt{2}\sin(314t + 30°)$ В; $R_1 = 20$ *Ом*;

$L_1 = 63{,}6$ *мГн* ;

$e_2 = 50\sqrt{2}\sin(314t - 120°)$ В; $R_2 = 25$ *Ом*,

$C_2 = 159$ *мкФ* ,

$e_3 = 120\sqrt{2}\sin(314t + 90°)$ В,

$R_3 = 30$ *Ом*, $L_3 = 79{,}6$ *мГн*.

L_1 **-** переменный параметр.

РЕШЕНИЕ

1. Система уравнений по первому и второму законам Кирхгофа:

- в дифференциальной форме:

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 = 0, \\ -u_{L_1} - u_{R_1} + u_{R_2} + u_{C_2} = e_2 + e_1, \\ -u_{C_2} - u_{R_2} + u_{R_3} + u_{L_3} = e_3 - e_2. \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 = 0, \\ -L_1 \dfrac{di_1}{dt} - i_1 R_1 + i_2 R_2 + \dfrac{1}{C_2} \int i_2 dt = e_2 + e_1, \\ -\dfrac{1}{C_2} \int i_2 dt - i_2 R_2 + i_3 R_3 + L_3 \dfrac{di_3}{dt} = e_3 - e_2. \end{cases}$$

2. Заданная схема электрической цепи с изображением всех параметров, ЭДС и токов в символической форме показана на рисунке 10. Запишем для этой схемы систему уравнений по первому и второму законам Кирхгофа:

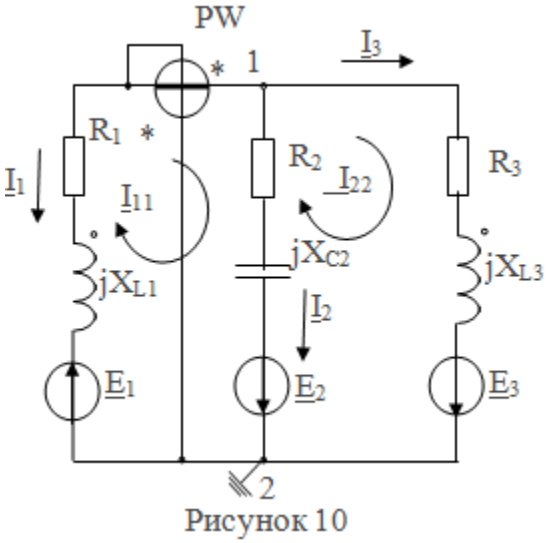


Рисунок 10

$$\begin{cases} \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \ , \\ -\underline{U}_{L_1} - \underline{U}_{R_1} + \underline{U}_{R_2} + \underline{U}_{C_2} = \underline{E}_2 + \underline{E}_1 \ , \\ -\underline{U}_{C_2} - \underline{U}_{R_2} + \underline{U}_{R_3} + \underline{U}_{L_3} = \underline{E}_3 - \underline{E}_2 \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \ , \\ -\underline{I}_1 jX_{L_1} - \underline{I}_1 R_1 + \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_2 \left(-jX_{C_2}\right) = \underline{E}_2 + \underline{E}_1, \\ -\underline{I}_2 \left(-jX_{C_2}\right) - \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_3 R_3 + \underline{I}_3 jX_{L_3} = \underline{E}_3 - \underline{E}_2. \end{cases}$$

3. Рассчитаем сопротивления и проводимости в символической форме:

$$X_{L_1} = \omega L_1 = 314 \cdot 63{,}6 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ Ом} ; \qquad X_{C_2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{314 \cdot 159 \cdot 10^{-6}} = 20 \text{ Ом} ;$$

$$X_{L_3} = \omega L_3 = 314 \cdot 79{,}6 \cdot 10^{-3} = 25 \text{ Ом} ; \qquad \underline{Z}_1 = R_1 + jX_{L_1} = 20 + j20 = 28{,}3e^{j45^\circ} \text{Ом} ;$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - jX_{C_2} = 25 - j20 = 32e^{-j39^\circ} \text{Ом} ; \qquad \underline{Z}_3 = R_3 + jX_{L_3} = 30 + j25 = 39{,}1e^{j40^\circ} \text{Ом} ;$$

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{28{,}3e^{j45^\circ}} = 0{,}0353e^{-j45^\circ} \text{См} ; \qquad \underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{32e^{-j39^\circ}} = 0{,}0313e^{j39^\circ} \text{См} ;$$

$$\underline{Y}_3 = \frac{1}{\underline{Z}_3} = \frac{1}{39{,}1e^{j40^\circ}} = 0{,}0256e^{-j40^\circ} \text{См}.$$

4. Определяем комплексы действующих значений токов $\underline{I}_{11}$ и $\underline{I}_{22}$ в ветвях двумя методами: методом контурных токов и методом двух узлов.

Метод контурных токов

На схеме электрической цепи наносим контурные токи одного направления I_{11}, I_{22} , I_{33} и составляем систему уравнений вида:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{11}\underline{I}_{11} + \underline{Z}_{12}\underline{I}_{22} = \underline{E}_{11}; \\ \underline{Z}_{21}\underline{I}_{11} + \underline{Z}_{22}\underline{I}_{22} = \underline{E}_{22}. \end{cases}$$

В системе уравнений

$$\underline{Z}_{11} = jX_{L_1} + R_1 + R_2 - jX_{C_2} = j20 + 20 + 25 - j20 = 45 \text{ Ом}.$$

$$\underline{Z}_{22} = -jX_{C_2} + R_2 + R_3 + jX_{L_3} = -j20 + 25 + 30 + j25 = 55 + j5 = 55{,}2e^{j5^\circ} \text{Ом}.$$

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = -R_2 + jX_{C_2} = -25 + j20 = 32e^{j141{,}3^\circ} \text{Ом}.$$

$$\underline{E}_{11} = \underline{E}_1 + \underline{E}_2 .$$

Представим заданные ЭДС в символическом виде:

$$\underline{E}_1 = 100e^{j30^\circ} = 86{,}6 + j50 \text{ В};$$

$$\underline{E}_2 = 50e^{-j120^\circ} = -25 - j43{,}3 \text{ В};$$

$$\underline{E}_3 = 120e^{j90^\circ} = j120 \text{ В}.$$

Тогда

$$\underline{E}_{11} = 86{,}6 + j50 - 25 - j43{,}3 = 61{,}6 + j6{,}7 = 62e^{j6{,}2^\circ}\ B;$$

$$\underline{E}_{22} = \underline{E}_3 - \underline{E}_2 = j120 + 25 + j43{,}3 = 25 + j163{,}3 = 165e^{j81{,}3^\circ} B.$$

Подставив значения коэффициентов в систему уравнений, получим

$$\begin{cases} 45\underline{I}_{11} + (-25 + j20)\underline{I}_{22} = 61{,}6 + j6{,}7; \\ (-25 + j20)\underline{I}_{11} + (55 + j5)\underline{I}_{22} = 25 + j163{,}3. \end{cases}$$

Решим систему уравнений:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 45 & -25 + j20 \\ -25 + j20 & 55 + j5 \end{vmatrix} = 2475 + j225 - \left(625 - j500 - j500 + j^2 400\right) = 2475 +$$

$$+ j225 - 625 + j500 + j500 + 400 = 2250 + j1225 = 2562e^{j28{,}6^\circ},$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} 61{,}6 + j6{,}7 & -25 + j20 \\ 25 + j163{,}3 & 55 + j5 \end{vmatrix} = 3388 + j368{,}5 + j308 + j^2 33{,}5 -$$

$$-\left(-625 + j500 - j4083 + j^2 3260\right) = 3388 + j368{,}5 + j308 - 33{,}5 +$$

$$+ 625 - j500 + + j4083 + 3260 = 7240 + j4260 = 8400e^{j30{,}5^\circ},$$

$$\Delta_{22} = \begin{vmatrix} 45 & 61{,}6 + j6{,}7 \\ -25 + j20 & 25 + j163, \end{vmatrix} = 1125 + j7335 -$$

$$-\left(-1540 - j168 + j1232 + j^2 134\right) = 1125 + j7335 +$$

$$+ 1540 + j168 - j1232 + 134 = 2799 + j6271 = 6867e^{j65{,}9^\circ}.$$

Значения контурных токов:

$$\underline{I}_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = \frac{8400e^{j30{,}5^\circ}}{2562e^{j28{,}6^\circ}} = 3{,}28e^{j1{,}9^\circ} A, \qquad \underline{I}_{22} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta} = \frac{6867e^{j65{,}9^\circ}}{2562e^{j28{,}6^\circ}} = 2{,}68e^{j37{,}3^\circ} A.$$

Действительные комплексы токов в ветвях электрической цепи будут равны:

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}_{11} = -3.28e^{-j178{,}1^\circ} A,$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_{22} = 2.68e^{j37{,}3^\circ} A,$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{11} - \underline{I}_{22} = 3.28e^{j1,9^\circ} - 2.68e^{j37,3^\circ} = 3.28 + j0.11 - 2.13 - j1.62 =$$
$$= 1.15 - j1.51 = 1.9e^{-j52,7^\circ} A.$$

Метод двух узлов

Определим напряжение между узлами 1 и 2:

$$\underline{U}_{12} = \frac{\underline{E}_1\underline{Y}_1 - \underline{E}_2\underline{Y}_2 - \underline{E}_3\underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} = \frac{100e^{j30^\circ}\cdot 0{,}0353e^{-j45^\circ} - 50e^{-j120^\circ}\cdot 0{,}0313e^{j39^\circ} -}{0{,}0353e^{-j45^\circ} + 0{,}0313e^{j39^\circ} +}$$
$$\frac{-120e^{j90^\circ}\cdot 0{,}0256e^{-j40^\circ}}{+0{,}0256e^{-j40^\circ}} = \frac{3{,}53e^{-j15^\circ} - 1{,}57e^{-j81^\circ} - 3{,}07e^{j50^\circ}}{0{,}025 - j0{,}025 + 0{,}0243 + j0{,}0197 + 0{,}0197 - j0{,}0165} =$$

$$= \frac{3{,}41 - j0{,}91 - 0{,}246 + j1{,}55 - 1{,}97 - j2{,}35}{0{,}069 - j0{,}0218} = \frac{1{,}194 - j1{,}71}{0{,}0724e^{-j17,5^\circ}} = \frac{2{,}09e^{-j5,5^\circ}}{0{,}0724e^{-j17,5^\circ}} =$$
$$= 28{,}9e^{-j37,5^\circ} B = 22{,}9 - j17{,}6 \ \ B.$$

Составим уравнения по второму закону Кирхгофа для каждой ветви, замкнутой напряжением U_{12}:

- для первой ветви:

$$-\underline{I}_1\underline{Z}_1 + \underline{U}_{12} = \underline{E}_1 \ ,$$

откуда

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{12} - \underline{E}_1}{\underline{Z}_1} = \frac{22{,}9 - j17{,}6 - 86{,}6 - j50}{28{,}3e^{j45^\circ}} = \frac{-63{,}7 - j67{,}6}{28{,}3e^{j45^\circ}} =$$
$$= \frac{92{,}9e^{-j133^\circ}}{28{,}3e^{j45^\circ}} = 3{,}28e^{-j178^\circ} A \ ;$$

- для второй ветви:

$$-\underline{I}_2\underline{Z}_2 + \underline{U}_{12} = -\underline{E}_2 ,$$

тогда

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{12} + \underline{E}_2}{\underline{Z}_2} = \frac{22{,}9 - j17{,}6 - 25 - 43{,}3}{32e^{-j39^\circ}} = \frac{-2{,}1 - j60{,}9}{32e^{-j39^\circ}} = 1{,}9e^{-j53^\circ} A;$$

- для третьей ветви:

$$-\underline{U}_{12} + \underline{I}_3\underline{Z}_3 = \underline{E}_3 ,$$

откуда

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{E}_3 + \underline{U}_{12}}{\underline{Z}_3} = \frac{j120 + 22{,}9 - j17{,}6}{39{,}1e^{j40^\circ}} = \frac{22{,}9 + j102{,}4}{39{,}1e^{j40^\circ}} = \frac{105e^{j77{,}4^\circ}}{39{,}1e^{j40^\circ}} = 2{,}68e^{j37{,}4^\circ}\ A\ .$$

5. Определим ток в ветви с переменным параметром L_1 методом активного двухполюсника (**эквивалентного генератора**) (рисунок 11). Схема для определения входного сопротивления показана на рисунке 12.

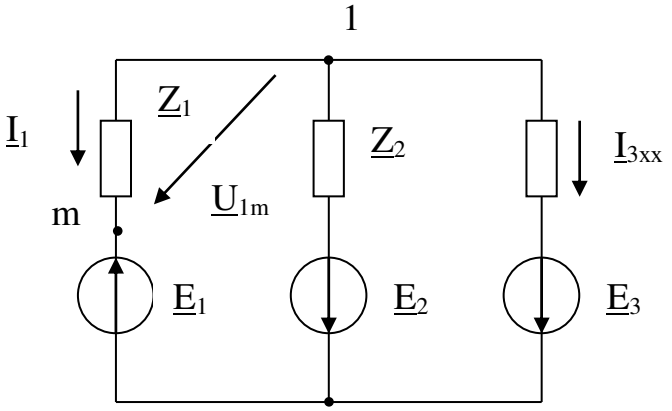


Рисунок 11

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_Э}{\underline{Z}_Э + \underline{Z}_1} = \frac{\underline{U}_{1mxx}}{\underline{Z}_{вх1m} + \underline{Z}_1}\ ;$$

$$\underline{Z}_3\underline{I}_{3xx} + \underline{I}_{3xx}\underline{Z}_2 = \underline{E}_3 - \underline{E}_2\ .$$

$$\underline{I}_{3xx} = \frac{\underline{E}_3 - \underline{E}_2}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2} = \frac{165e^{j81{,}3^\circ}}{30 + j25 + 25 - j20} = \frac{165e^{j81{,}3^\circ}}{55 + j5} = \frac{165e^{j81{,}3^\circ}}{55{,}2e^{j5^\circ}} = 2{,}99e^{j67{,}3^\circ}\ A.$$

$$\underline{U}_{1mxx} + \underline{I}_{3xx}\underline{Z}_2 = -\underline{E}_2 - \underline{E}_1\ .$$

$$\underline{U}_{1mxx} = -\underline{E}_2 - \underline{E}_1 - \underline{I}_{3xx}\underline{Z}_2 = -(\underline{E}_2 + \underline{E}_1) - \underline{I}_{3xx}\underline{Z}_2 = -61{,}6 - j6{,}7 - (0{,}71 + j2{,}91)\times$$
$$\times(25 - j20) = -61{,}6 - j6{,}7 - (17{,}75 - j14{,}2 + j72{,}75 - j^2 58{,}2) =$$
$$-61{,}6 - j6{,}7 - 17{,}75 + j14{,}2 - j72{,}75 - 58{,}2 = -137{,}55 - j65{,}25 = 152e^{-j155^\circ}\ B\ ,$$

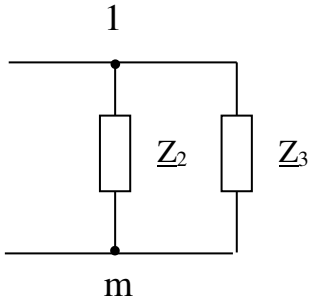


Рисунок 12

$$\underline{Z}_{вх1m} = \underline{Z}_{23} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{39{,}1e^{j40^\circ} \cdot 32e^{-j39^\circ}}{25 - j20 + 30 + j25} =$$
$$= \frac{1251e^{j1^\circ}}{55{,}2e^{j5^\circ}} = 22{,}7e^{-j4^\circ} = 22{,}6 - j1{,}58\ \ Ом\ .$$

$$\underline{I}_1 = \frac{152e^{-j155^\circ}}{22{,}6 - j1{,}58 + 20 + j20} = 3{,}28e^{-j178{,}4^\circ}\ A.$$

6. Значения всех токов, определенных разными методами, занести в таблицу и сравнить их.

Метод	$\underline{I}_1$,A	$\underline{I}_2$,A	$\underline{I}_3$,A
Метод контурных токов	$3{,}28e^{-j178{,}1^\circ}$	$1{,}9e^{-j52{,}7^\circ}$	$2{,}68e^{j37{,}3^\circ}$
Метод двух узлов	$3{,}28e^{-j178^\circ}$	$1{,}9e^{-j53^\circ}$	$2{,}68e^{j37{,}4^\circ}$
Метод активного двухполюсника	$3{,}28e^{-j178{,}4^\circ}$	———	———

Значения токов, полученные разными методами, приблизительно одинаковы. Небольшие несоответствия можно объяснить погрешностью расчетов. Использование того или иного метода выбирается исходя из условия задачи и поставленной конечной цели.

7. Определить показание ваттметра.

$$P_w = I_1 U_{21} \cos\left(\underline{I}_1 \overset{\wedge}{,} \underline{U}_{21}\right).$$

$$\underline{U}_{21} = -\underline{U}_{12} = -28{,}9e^{-j37{,}5^\circ} = 28{,}9e^{j142{,}.5^\circ}\,B.$$

$$\underline{I}_1 = 3{,}28e^{-j178^\circ}\,A.$$

$$P_w = 3{,}28 \cdot 28{,}9\cos(-39{,}5^\circ) = 73{,}14\ \ Bm.$$

8. **Построить топографическую диаграмму напряжений**, совмещенную с векторной диаграммой токов. Заземлим узел 2, то есть присвоим ему потенциал, равный нулю. Рассчитываются потенциалы всех точек электрической цепи (обозначены на рисунке 13).

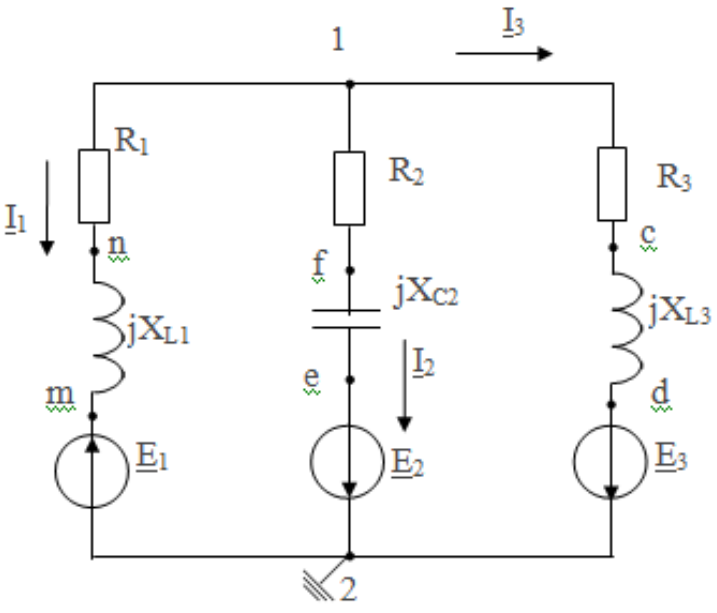


Рисунок 13

Пусть $\underline{\varphi}_2 = 0$. Тогда $\underline{\varphi}_m = \underline{\varphi}_2 + \underline{E}_1 = 100e^{j30^\circ} = 86{,}6 + 50\ B$;

$$\underline{\varphi}_n = \underline{\varphi}_m + \underline{I}_1 jX_{L_1} = 86{,}6 + 50 + 3{,}28e^{-j178^\circ} \cdot j20 = 88{,}5 - j15{,}4 = 90e^{-j9{,}9^\circ} B;$$

$$\underline{\varphi}_1 = \underline{\varphi}_n + \underline{I}_1 R_1 = 88{,}5 - j15{,}4 + 3{,}28e^{-j178^\circ} \cdot 20 = 22{,}9 - j17{,}6 = 28{,}9e^{-j37.5^\circ} B;$$

$$\underline{\varphi}_e = \underline{\varphi}_2 - \underline{E}_2 = +25 + j43{,}3\ B\ ;$$

$$\underline{\varphi}_f = \underline{\varphi}_e + \underline{I}_2\left(-jX_{C_2}\right) = 25 + j43{,}3 + 1{,}9e^{-j53^\circ} \cdot \left(-j20\right) = -5{,}7 + j20{,}3 = 21{,}1e^{j106^\circ} B;$$

$$\underline{\varphi}_1 = \underline{\varphi}_f + \underline{I}_2 R_2 = -5{,}7 + j20{,}3 + 1{,}9e^{-j53^\circ} \cdot 25 = -5{,}7 + j20{,}3 +$$

$$+ 28{,}6 - j37{,}9 = 22{,}9 - j17{,}6\ B\ ;$$

$$\underline{\varphi}_d = \underline{\varphi}_2 - \underline{E}_3 = -j120\ B\ ;$$

$$\underline{\varphi}_c = \underline{\varphi}_d + \underline{I}_3 jX_{L_3} = -j120 + 2{,}68e^{j37.4^\circ} \cdot j25 = -41 - j66{,}4 = 78e^{-j122^\circ} B;$$

$$\underline{\varphi}_1 = \underline{\varphi}_c + \underline{I}_3 R_3 = -41 - j66{,}4 + 2{,}68e^{j37{,}4^\circ} \cdot 30 = 22{,}9 - j17{,}6\ B\ .$$

Примем масштаб напряжений и токов равный: $m_u = 20\dfrac{B}{см}$; $m_i = 1\dfrac{A}{см}$.

Отложим на комплексной плоскости значения потенциалов и соединим их отрезками. Напряжение между любыми двумя точками можно определить по топографической диаграмме. Топографическая диаграмма показана на рисунке 14.

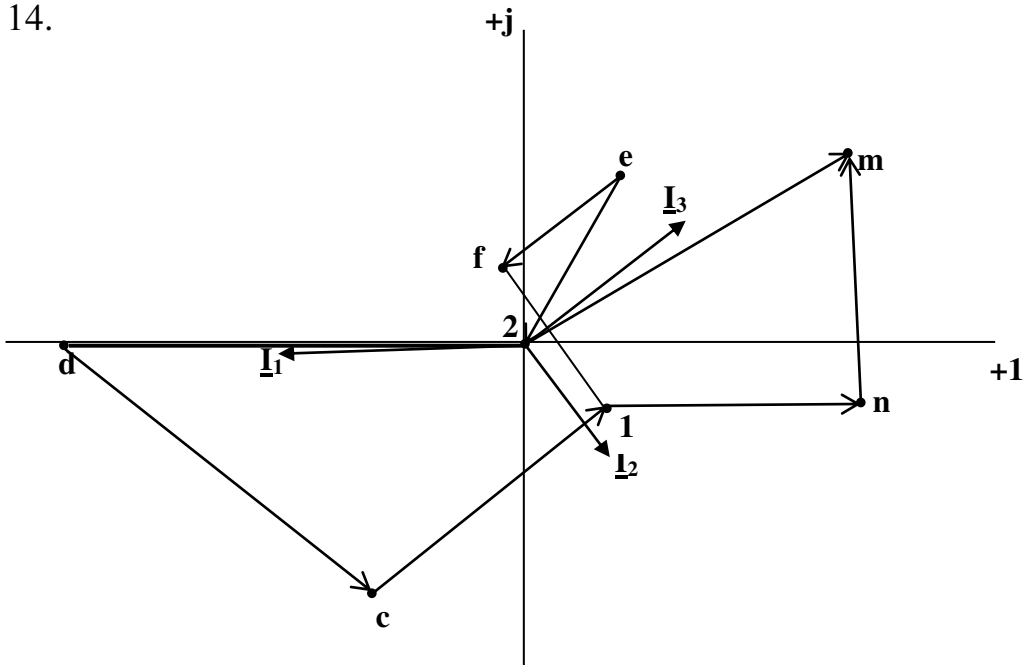


Рисунок 14

9. Составим систему уравнений по законам Кирхгофа в дифференциальной и символической форме с учетом магнитной связи между катушками индуктивности (начало обмоток выбрать произвольно см. рисунок 10).

В дифференциальной форме:

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 = 0 \ ; \\ -L_1 \dfrac{di_1}{dt} - M \dfrac{di_3}{dt} - i_1 R_1 + i_2 R_2 + \dfrac{1}{C_2} \int i_2 dt = e_2 + e_1 \ ; \\ -\dfrac{1}{C_2} \int i_2 dt - i_2 R_2 + i_3 R_3 + L_3 \dfrac{di_3}{dt} + M \dfrac{di_1}{dt} = e_3 - e_2 \ . \end{cases}$$

В символической форме:

$$\begin{cases} \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \ ; \\ -\underline{I}_1 jX_{L_1} - \underline{I}_3 jX_M - \underline{I}_1 R_1 + \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_2 \left(- jX_{C_2}\right) = \underline{E}_2 + \underline{E}_1 \ ; \\ -\underline{I}_2 \left(- jX_{C_2}\right) - \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_3 R_3 + \underline{I}_3 jX_{L_3} + \underline{I}_1 jX_M = \underline{E}_3 - \underline{E}_2 \ . \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \ ; \\ -\underline{I}_1 j\omega L_1 - \underline{I}_3 j\omega M - \underline{I}_1 R_1 + \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_2 \left(- j \dfrac{1}{\omega C_2}\right) = \underline{E}_2 + \underline{E}_1 \ ; \\ -\underline{I}_2 \left(- j \dfrac{1}{\omega C_2}\right) - \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_3 R_3 + \underline{I}_3 j\omega L_3 + \underline{I}_1 j\omega M = \underline{E}_3 - \underline{E}_2 \ . \end{cases}$$

5 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ РАБОТЫ № 3 НА ТЕМУ *«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА»*

Целью выполнения данной расчетной работы является получение навыка расчета сложных трехфазных симметричных и несимметричных электрических цепей переменного тока, а также разложения несимметричной трехфазной системы векторов тока на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Варианты задания расчетной работы, выполняемой по данной теме, отличаются значениями исходных данных.

Прежде, чем приступить к расчетам, необходимо изучить соответствующий раздел курса теоретических основ электротехники и ответить на контрольные вопросы.

Вопросы для самоконтроля

- Какое соединение сопротивлений называется звездой сопротивлений, какое - треугольником сопротивлений?
- Как преобразовать треугольник сопротивлений в звезду сопротивлений и наоборот?
- Фазные напряжения трехфазной системы, графики их мгновенных значений и векторные диаграммы.
- Понятие о связанных и несвязанных трехфазных цепях.
- Назовите и изобразите графически способы соединения обмоток трехфазного генератора и трехфазной нагрузки.
- Линейные и фазные напряжения и токи, соотношения между ними при соединении нагрузки по схеме «звезда» с нулевым проводом.
- Линейные и фазные напряжения и токи, соотношения между ними при соединении нагрузки по схеме «звезда» без нулевого провода.
- Линейные и фазные напряжения и токи, соотношения между ними при соединении нагрузки по схеме «треугольник».
- Как рассчитать мощность трехфазной симметричной и несимметричной цепи?
- Как измерить мощность трехфазной симметричной и несимметричной цепи?
- Эффективность передачи электроэнергии по трехфазным цепям.

- Что такое симметричные составляющие нулевой, прямой и обратной последовательности?
- Как аналитически определяют симметричные составляющие нулевой (прямой, обратной) последовательности?
- Суть метода симметричных составляющих.

При изучении материала необходимо обратить внимание на связь между фазными и линейными токами, а также между фазными и линейными напряжениями при различных соединениях обмоток генератора и нагрузки. Характер этой зависимости может быть различный при симметричной и несимметричной системе питания и несимметрии нагрузки. Поэтому при расчете токов и напряжений на участках трехфазной цепи следует в самом начале расчета четко установить, к какого рода цепям, симметричным или же несимметричным, она относится.

Это важно, поскольку в случае симметрии системы напряжений и нагрузки можно вести расчет токов и напряжений для одной фазы, а затем путем разворота векторов токов и напряжений на $\pm 120^0$ определить соответствующие токи и напряжения других фаз.

Расчет несимметричной трехфазной сети ведется для каждой фазы в отдельности. При расчете трехфазной несимметричной системы полезно строить топографические диаграммы напряжений, совмещенные с векторными диаграммами токов электрических цепей, которые дают наглядное представление о соотношениях напряжений и токов на различных участках электрической цепи.

Выбранный метод расчета зависит от схемы соединений обмоток генератора и сопротивлений нагрузки.

При изучении метода симметричных составляющих необходимо твердо усвоить метод аналитического разложения заданной несимметричной системы векторов напряжений (токов) на симметричные составляющие нулевой, прямой и обратной последовательностей.

При этом полезно предварительно проанализировать схемы соединения обмоток генератора и нагрузки с тем, чтобы, установив, на каких участках возможны токи и напряжения нулевой последовательности, упростить расчеты.

Симметричные составляющие нулевой последовательности по известной системе несимметричных трехфазных векторов токов или напряжений $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ вычисляются следующим образом:

$$\underline{A}_0 = \underline{B}_0 = \underline{C}_0 = \frac{\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}}{3} \qquad (1)$$

и представляют систему трех векторов, совпадающих по фазе.

Симметричные составляющие прямой последовательности по известной системе несимметричных трехфазных векторов токов или напряжений $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ вычисляют так:

$$\underline{A}_1 = \frac{\underline{A} + a\underline{B} + a^2\underline{C}}{3}; \qquad \underline{B}_1 = \underline{A}_1 e^{-j120^o}; \qquad \underline{C}_1 = \underline{A}_1 e^{j120^o} \qquad (2)$$

и представляют систему трех векторов, сдвинутых один относительно другого на 120^0 и вращающихся против часовой стрелки, причем за вектором $\underline{A}_1$ следует вектор $\underline{B}_1$, а за ним – вектор $\underline{C}_1$. Заметим, что:

$$a = e^{j120^o}; \qquad a^2 = e^{-j120^o}.$$

Симметричные составляющие обратной последовательности по известной системе несимметричных трехфазных векторов токов или напряжений $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ определяются по выражениям:

$$\underline{A}_2 = \frac{\underline{A} + a^2\underline{B} + a\underline{C}}{3}; \qquad \underline{B}_2 = \underline{A}_2 e^{j120^o}; \qquad \underline{C}_2 = \underline{A}_2 e^{-j120^o}. \qquad (3)$$

Они представляют систему трех векторов, сдвинутых один относительно другого на 120^0 и вращающихся против часовой стрелки, причем за вектором $\underline{A}_2$ следует вектор $\underline{C}_2$, а за ним – вектор $\underline{B}_2$.

Графически симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей находят согласно приведенным выше выражениям. Для

этого при умножении вектора на множитель *a* вектор поворачивают на комплексной плоскости на угол 120^0, а при умножении на a^2 – на угол *минус* 120^0.

Пример выполнения расчетной работы № 3

Исходные данные:

Сопротивления:

$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = 45 + j60$ Ом;

$\underline{Z}'_a = \underline{Z}'_b = \underline{Z}'_c = 25 - j25$ Ом;

$\underline{Z}_л = 3 + j4\ \underline{U}_B = 220e^{-j120}$ Ом.

Фазные и линейные напряжения:

$\underline{U}_A = 220B$; $\underline{U}_{AB} = 380e^{j30}$ В;

$\underline{U}_B = 220e^{-j120}$ В; $\underline{U}_{BC} = 380e^{-j90}B$;

$\underline{U}_C = 220e^{j120}B$; $\underline{U}_{CA} = 380e^{j150}B$.

Паспортные данные электродвигателя: U = 380\220 В; мощность на валу P_2 =1,7 кВт; $cos\varphi$=0,86; КПД - 0,82. Заданная точка обрыва трехфазной цепи -5.

РЕШЕНИЕ

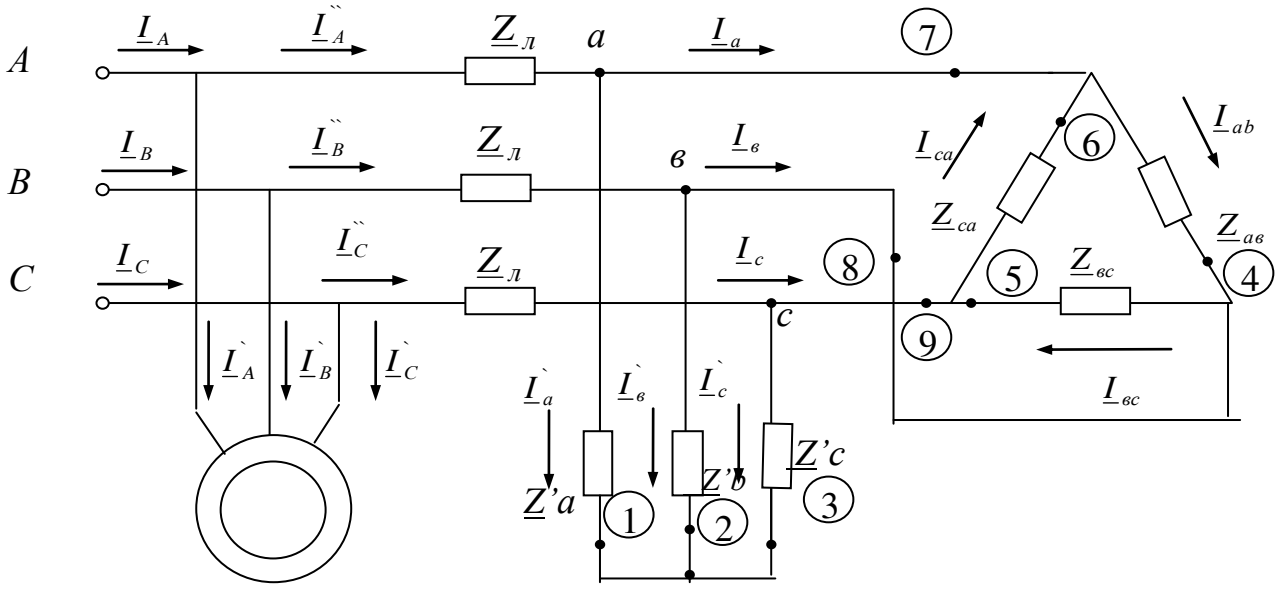


Рисунок 15

1. Выбираем схему соединения электродвигателя.

Обмотки двигателя следует соединить звездой, так как фазное напряжение сети соответствует напряжению на фазе двигателя.

Вычертим схему подключения потребителей (рисунок 15).

2. Определяем фазные и линейные токи потребителей и ток в начале линии.

Определим токи двигателя. Ток в фазе А:

$$\underline{I}'_A = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_Л \cdot \cos\varphi \cdot\cdot \eta} = \frac{1700}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}86 \cdot 0{,}82} = 3{,}67A .$$

Этот ток будет отставать по фазе от фазного напряжения $\underline{U}_A = 220B$ на угол $\varphi = arccos(0{,}86) = 31^0$. Поэтому в комплексной форме этот ток и токи других фаз запишутся следующим образом:

$$\underline{I}'_A = 3{,}67e^{-j31^0} A;$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}'_A \cdot e^{-j120^0} = 3{,}67e^{-j151^0} A;$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}'_A \cdot e^{j120^0} = 3{,}67e^{j89^0} A .$$

Рассчитаем токи статической нагрузки. Так как статическая нагрузка представляет собой соединение сопротивлений звездой и треугольником, то следует преобразовать либо треугольник в эквивалентную звезду, либо звезду в эквивалентный треугольник. В данном случае можно использовать любой способ, так как и треугольник и звезда - симметричны.

Преобразуем треугольник в эквивалентную звезду (рисунок 16):

$$\underline{Z}_Y = \underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_\Delta}{3};$$

$$\underline{Z}_Y = \frac{45 + j60}{3} = 15 + j20 = 25e^{j53^0} \text{ Ом.}$$

Потенциалы точек N/ и N одинаковы, следовательно, две параллельные звезды можно объединить в одну, последовательно соединенную с сопротивлениями линии. Тогда

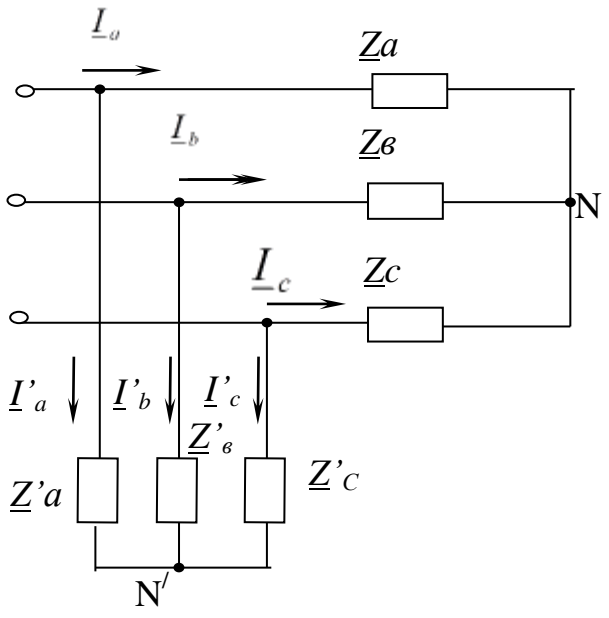


Рисунок 16

схема электрической цепи примет вид, показанный на рисунке 17.

Сопротивление фазы

$$\underline{Z}_{ф} = \underline{Z}_{л} + \frac{\underline{Z}_a \cdot \underline{Z}'_a}{\underline{Z}_a + \underline{Z}'_a} = 3 + j4 + \frac{25e^{j53^0} \cdot 25\sqrt{2}e^{-j45^0}}{15 + j20 + 25 - j25} =$$

$$3 + j4 + \frac{625 \cdot 1{,}41e^{j8^0}}{40 - j5} = 3 + j4 + 21{,}9e^{j15^0} = 26e^{j22^0}\ Ом.$$

Определим токи $\underline{I}''_A, \underline{I}''_B, \underline{I}''_C$. Эквивалентная схема статической нагрузки изображена на рисунке 18.

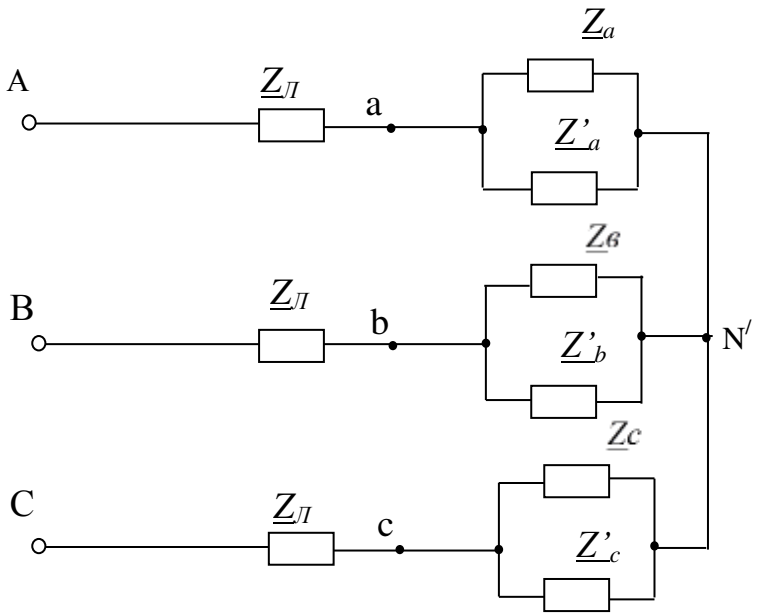


Рисунок 17

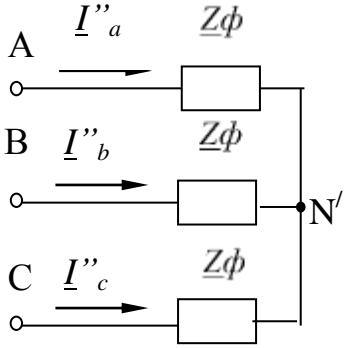


Рисунок 18

$$\underline{I}''_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_Ф} = \frac{220}{26e^{j22^0}} = 8{,}46e^{-j22^0}\ \text{А};$$

$$\underline{I}''_B = \underline{I}''_A \cdot e^{-j120^0} = 8{,}46e^{-j142^0}\ \text{А};$$

$$\underline{I}''_C = \underline{I}''_A \cdot e^{j120^0} = 8{,}46e^{j98^0}\ \text{А}.$$

Определяем фазные напряжения на нагрузке $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$.

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{I}''_A \cdot \underline{Z}л = 220 - 8{,}46e^{-j22^0} \cdot 5e^{j53^0} = 185e^{-j6{,}8^0}\ B;$$

$$\underline{U}_b = 185e^{-j126{,}8^0}\ B;$$

$$\underline{U}_c = 185e^{j113{,}2^0}\ B.$$

Определим токи: $\underline{I}'_a, \underline{I}'_b, \underline{I}'_c$.

$$\underline{I}'_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}'_a} = \frac{185e^{-j6{,}8^0}}{25\sqrt{2}e^{-j45^0}} = 5{,}25e^{j38{,}2^0}\ \text{А};$$

$$\underline{I}'_b = \underline{I}'_a \cdot e^{-j120^0} = 5{,}25e^{-j81{,}8^0}\ A;$$

$$\underline{I}'_c = \underline{I}'_a \cdot e^{j120^0} = 5{,}25e^{j158{,}2^0}\ A.$$

Определим токи $\underline{I}_a$, $\underline{I}_b$, $\underline{I}_c$, которые являются линейными токами треугольника нагрузки:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{185e^{-j6{,}8^0}}{25e^{j53^0}} = 7{,}4e^{-j59{,}8^0}\ \text{А};$$

$$\underline{I}_b = \underline{I}_a \cdot e^{-j120^0} = 7{,}4e^{-j179^0}\ A;$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_a \cdot e^{j120^0} = 7{,}4e^{j60{,}2^0}\ A.$$

Определим фазные токи треугольника $\underline{I}_{ab}$, $\underline{I}_{bc}$ и $\underline{I}_{ca}$. В симметричном треугольнике линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз и отстает от соответствующего фазного тока на угол 30^0, то есть $\underline{I}_a = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ab} e^{-j30^0}$, отсюда:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{I}_a}{\sqrt{3}} \cdot e^{j30^0} = \frac{7,4}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j59,8^0} \cdot e^{j30^0} = 4,28e^{-j29,8^0} \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ab} \cdot e^{-j120^0} = 4,28e^{-j149,8^0} \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{ca} = \underline{I}_{ab} \cdot e^{j120^0} = 4,28e^{j90,2^0} \text{ А .}$$

Определим токи в начале линии:

$$\underline{I}_A = \underline{I}'_A + \underline{I}''_A = 3,67e^{-j31^0} + 8,46e^{-j22^0} = 3,14 - j1,89 + 7,84 - j3,17 = 12e^{-j24,7^0} A;$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_A \cdot e^{-j120^0} = 12e^{-j144,7^0} \text{ А;}$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_A \cdot e^{j120^0} = 12e^{j95,3^0} \text{ А .}$$

3. Определим КПД линии электропередачи. Поскольку электрическая цепь симметричная, КПД линии можно определить для одной фазы:

$$\eta = \frac{P_{ф.н.}}{P_{ф.}},$$

где $P_{ф.н.}$— активная мощность в нагрузке, Вт;

$P_{ф.}$— полная активная мощность фазы, Вт.

$$P_{ф.} = U_A \cdot I''_A \cdot \cos\varphi = 220 \cdot 8,46 \cdot \cos 22^\circ = 1726 \ Вт;$$

$$P_{ф.н.} = U_a \cdot I''_A \cdot \cos\varphi = 185 \cdot 8,46 \cdot \cos 15^\circ = 1512 \ Вт;$$

$$\eta = \frac{1512}{1726} = 0,87 .$$

4. Топографическая диаграмма напряжений, совмещенная с векторной диаграммой токов, показана на рисунке 19. Для ее построения выбирают масштабы токов и напряжений.

5. Определить токи в начале линии при обрыве провода в точке (5) и разложить их аналитически и графически на симметричные составляющие.

Схема электрической цепи после обрыва представлена на рисунке 20.

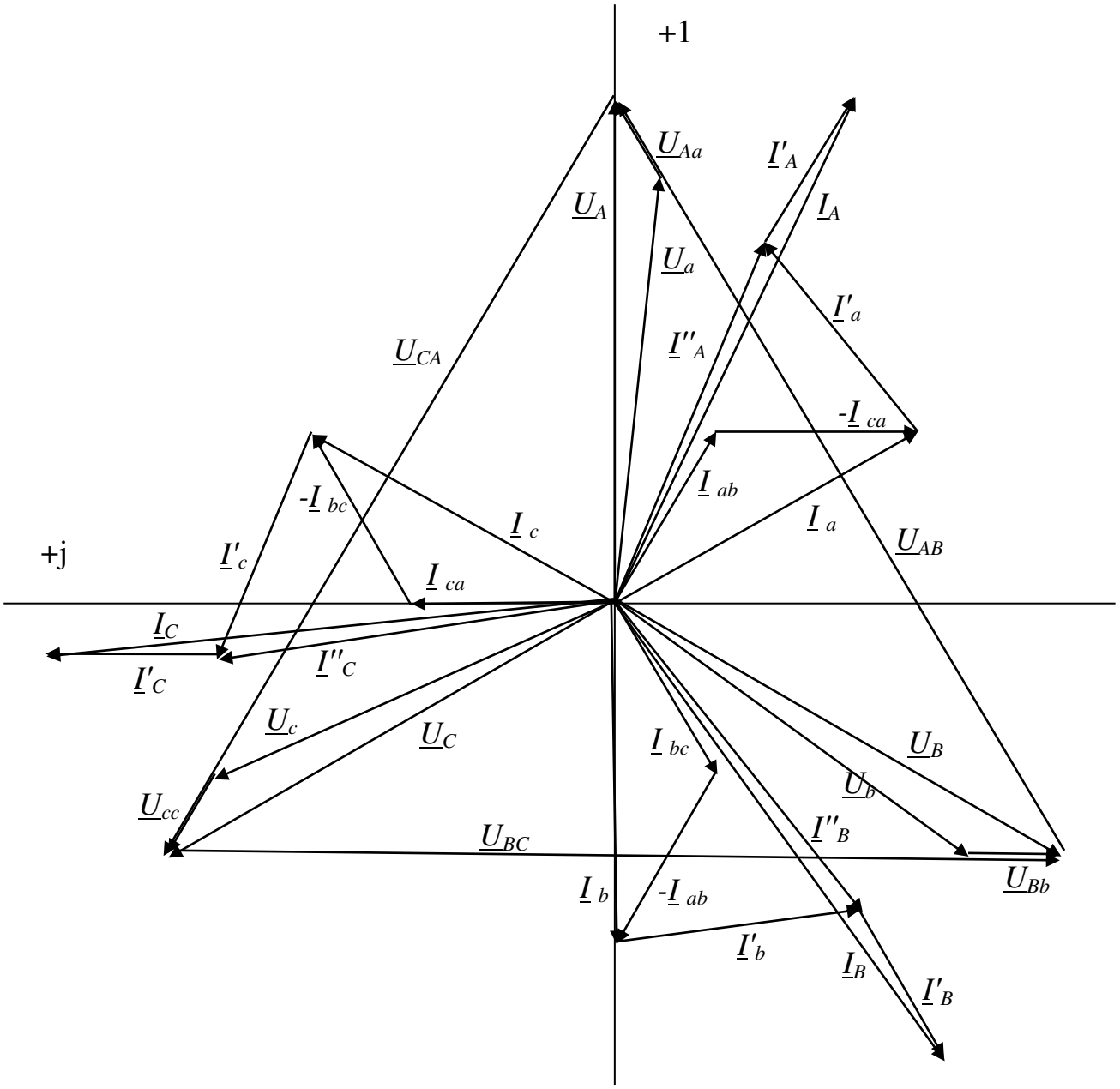


Рисунок 19

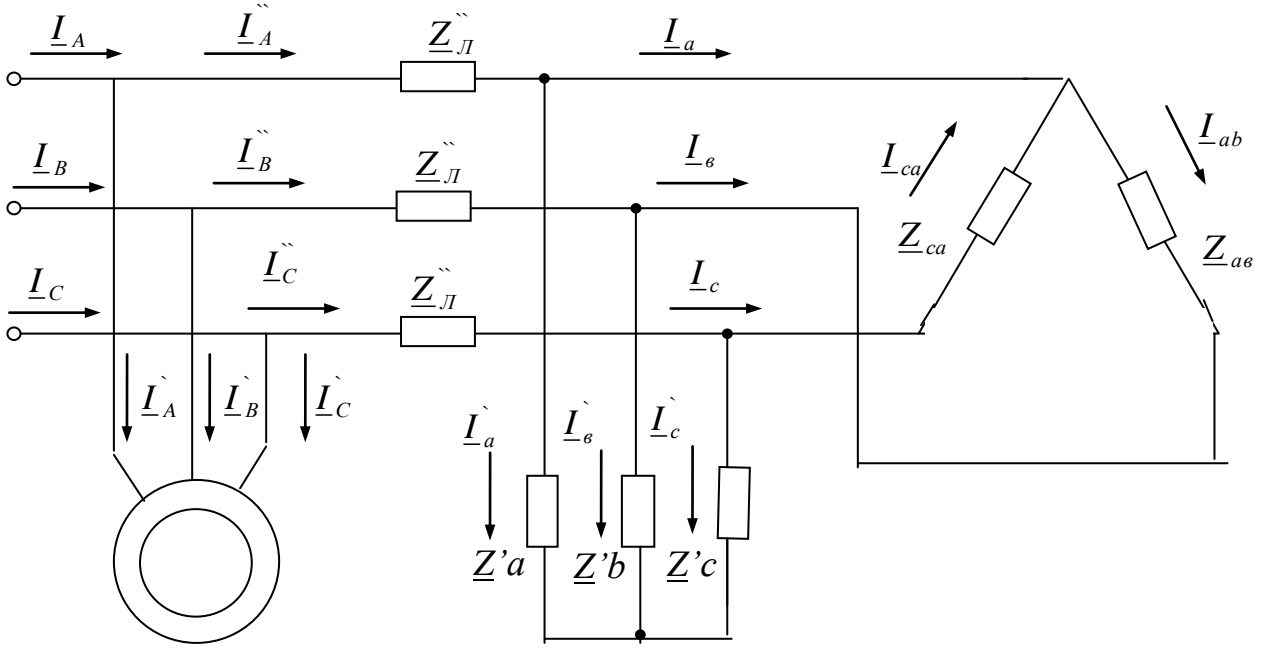


Рисунок 20

Токи $\underline{I}'_A, \underline{I}'_B, \underline{I}'_c$ не зависят от изменения статической нагрузки и изменяться не будут. Ток $\underline{I}_в = -\underline{I}_{ав}$, $\underline{I}_c = \underline{I}_{ca}$.

Для расчетов токов преобразуем звезду в эквивалентный треугольник

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \frac{\underline{Z}_a \cdot \underline{Z}_b}{\underline{Z}_c},$$

так как $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}c = \underline{Z}_Y$; $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = 3\underline{Z}_Y$;

$$\underline{Z}'_{ab} = \underline{Z}'_{bc} = \underline{Z}'_{ca} = 3(25 - j25) = 105{,}7e^{-j95^\circ}\ Ом.$$

Полученная в результате преобразований схема электрической цепи показана на рисунке 21. Сопротивление $\underline{Z}_{ab}$ включено параллельно сопротивлению $\underline{Z}'_{ab}$, а сопротивление $\underline{Z}_{ca}$ параллельно сопротивлению $\underline{Z}'_{ca}$.

$$\underline{Z}_{CA} = \underline{Z}_{AB} = \frac{\underline{Z}'_{ab} \cdot \underline{Z}_{ab}}{\underline{Z}'_{ab} + \underline{Z}_{ab}} = \frac{75e^{j53^0} \cdot 106e^{-j45^0}}{45 + j60 + 75 - j75} = 65{,}78e^{j15^0}\ Ом,$$

$$\underline{Z}_{BC} = 106e^{-j45^0}\ Ом.$$

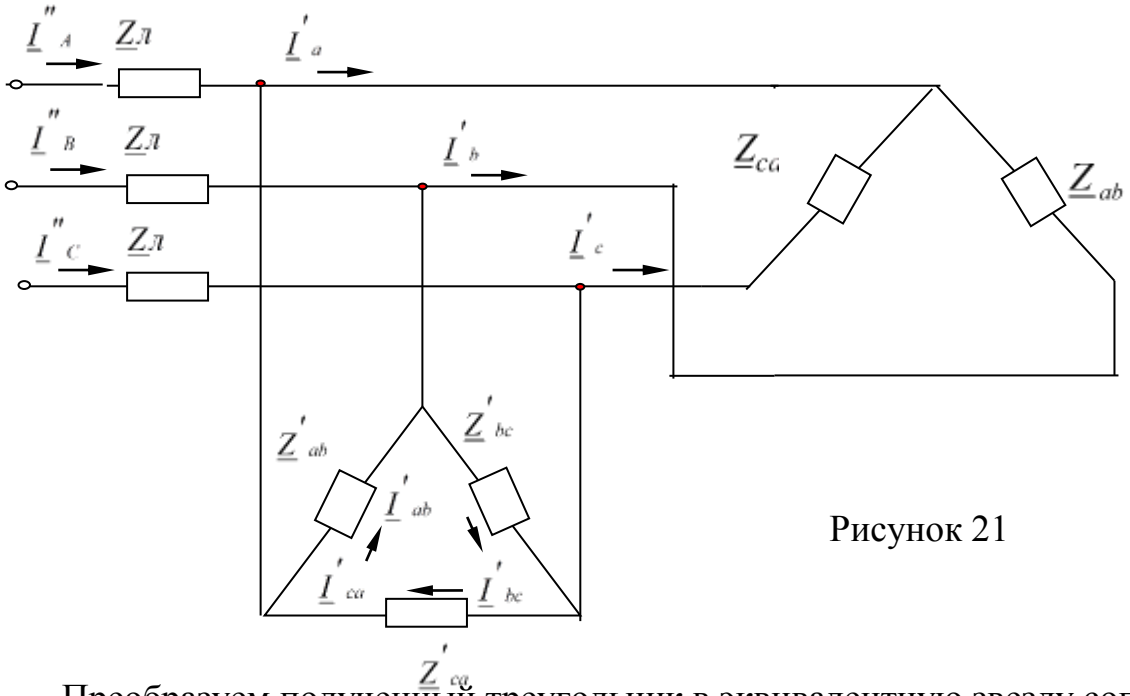


Рисунок 21

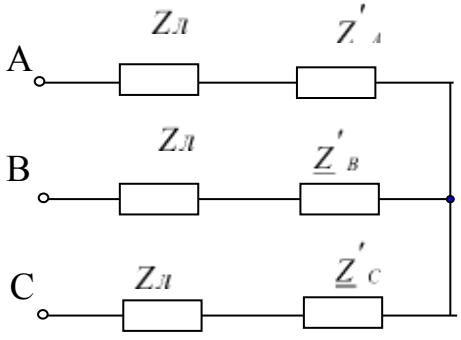
Преобразуем полученный треугольник в эквивалентную звезду сопротивлений:

$$\underline{Z}'_A = \frac{\underline{Z}_{AB} \cdot \underline{Z}_{CA}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}} = \frac{65{,}78e^{j15^0} \cdot 65{,}78e^{j15^0}}{2 \cdot 65{,}78e^{j15_0} + 106e^{-j45^0}} = 20{,}8e^{j41{,}6^0}\ Ом;$$

$$\underline{Z}'_B = \frac{\underline{Z}_{BC} \cdot \underline{Z}_{AB}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}} = \frac{106e^{j4^05} \cdot 65{,}78e^{j15^0}}{205{,}46e^{-j11{,}6^0}} = 33{,}94e^{-j18{,}4^0}\ Ом;$$

$$\underline{Z}'_C = \frac{\underline{Z}_{CA} \cdot \underline{Z}_{BC}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}} = \frac{65{,}78e^{j15^0} \cdot 106e^{-j45^0}}{205{,}46e^{j15^0}} = 33{,}94e^{-j18{,}4^0}\ Ом.$$

Упрощенная схема электрической цепи показана на рисунке 22. Определяем сопротивления и проводимости фаз : $\underline{Z}_A = \underline{Z}_л + \underline{Z}'_A =$



$$= 3 + j4 + 20{,}8e^{j41{,}6^0} = 25{,}71e^{43{,}^08}\ Ом,$$

$$\underline{Z}_B = \underline{Z}_л + \underline{Z}'_B = 3 + j4 + 33{,}94e^{-j18{,}4} =$$

$$= 35{,}83e^{-j10{,}71^0}\ Ом,$$

$$\underline{Z}_C = 3 + j4 + 33{,}94e^{-j18{,}4^0} = 35{,}83e^{-j10{,}79^0}\ Ом.$$

$$\underline{Y}_A = 0{,}039e^{-j43{,}8^0}\ См; \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = 0{,}028e^{j11}\ См.$$

Рисунок 22

Определяем токи $\underline{I}''_A; \underline{I}''_B; \underline{I}''_C$.

$$\underline{I}''_A = \frac{\underline{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_B - \underline{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \cdot \underline{Y}_A =$$

$$= \frac{380e^{j30^0} \cdot 0{,}028e^{j11^0} - 380e^{j150^0} \cdot 0{,}028e^{j11^0}}{2 \cdot 0{,}028e^{j11^0} + 0{,}039e^{-j43{,}8^0}} \cdot 0{,}039e^{-j43{,}8^0} = 8{,}56e^{-j21{,}8^0} A.$$

Аналогично рассчитаем:

$$\underline{I}''_B = \frac{\underline{U}_{BC} \cdot \underline{Y}_C - \underline{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_A}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \cdot \underline{Y}_B =$$

$$= \frac{380e^{-j90^0} \cdot 0{,}028e^{j11^0} - 380e^{j30^0}}{0{,}084e^{-j11^0}} \cdot 0{,}028e^{j11^0} = 4{,}85e^{-j129{,}6^0} A;$$

$$\underline{I}''_C = \frac{\underline{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_A - \underline{U}_{BC} \cdot \underline{Y}_B}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \cdot \underline{Y}_C =$$

$$= \frac{380e^{j150^0} \cdot 0{,}039e^{-j43{,}8^0} - 380e^{-j30^0} \cdot 0{,}028e^{j11^0}}{0{,}084e^{-j11^0}} \cdot 0{,}028e^{j11^0} = 8{,}48e^{j126^0} A.$$

Итак, фазные токи:

$$\underline{I}_A = \underline{I}'_A + \underline{I}''_A = 3{,}67e^{-j31^0} + 8{,}56e^{-j21{,}8^0} = 12{,}2e^{-j24{,}^0 5} A;$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}'_B + \underline{I}''_B = 3{,}67e^{-j151} + 4{,}85e^{-j126{,}6} = 8{,}39e^{-j138{,}7} A;$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}'_C + \underline{I}''_C = 3{,}67e^{j89^0} + 8{,}48e^{j126^0} = 11{,}67e^{j115{,}6^0} A.$$

$$\underline{I}_A = 12{,}2e^{-j24{,}5^0} A; \qquad \underline{I}_B = 8{,}39e^{-j138{,}7^0} A; \qquad \underline{I}_C = 11{,}67e^{j115{,}6^0} A.$$

6. Разложение на симметричные составляющие.

а) Аналитический способ.

Токи нулевой последовательности:

$\underline{I}_{A(0)} = \underline{I}_{B(0)} = \underline{I}_{C(0)} = \frac{\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C}{3} = \frac{11{,}1 - j5{,}07 - 6{,}3 - j5{,}54 - 5{,}04 + j10{,}53}{3} = \frac{0{,}06 - j0{,}08}{3} = 0A$. Токи прямой последовательности:

$$\underline{I}_{A(1)} = \frac{\underline{I}_A + a\underline{I}_B + a^2\underline{I}_C}{3} =$$

$$= \frac{12{,}2e^{-j24{,}5^0} + e^{j120^0} \cdot 8{,}39e^{-j138{,}7^0} + e^{-j120^0} \cdot 11{,}67e^{115{,}6^0}}{3} = 10{,}62e^{-j15{,}7^0}\ A.$$

Тогда $\underline{I}_{B(1)} = 10{,}62e^{-j15{,}7^0} e^{-j120^0} = 10{,}62e^{-j135{,}7^0}\ A;$

$$\underline{I}_{C(1)} = 10{,}62e^{-j15{,}7^0} e^{j120^0} = 10{,}62e^{j104{,}3^0}\ A.$$

Токи обратной последовательности:

$$\underline{I}_{A(2)} = \frac{\underline{I}_A + a^2\underline{I}_B + a\underline{I}_C}{3} =$$

$$= \frac{12{,}2e^{-j24{,}5^0} + e^{-j120^0} \cdot 8{,}39e^{-j138{,}7^0} + e^{j120^0} \cdot 11{,}67e^{115{,}6^0}}{3} = 2{,}35e^{-j69{,}2^0}\ A;$$

$\underline{I}_{B(2)} = 2{,}35e^{-j69{,}2^0} e^{j120^0} = 2{,}36e^{j50{,}8^0}\ A;\ \underline{I}_{C(2)} = 2{,}35e^{-j69{,}2^0} e^{-j120^0} = 2{,}36e^{j170{,}8^0}\ A.$

б) Графический способ.

Выберем масштаб токов m_i=2A/cm и выполним построения согласно уравнениям (1), (2), (3) (стр. 35).

Получение симметричных составляющих токов нулевой последовательности графическим способом с помощью уравнения (1) показано на рисунке 23.

Симметричные составляющие токов прямой и обратной последовательностей, полученные графически, приведены соответственно на рисунках 24 и 25.

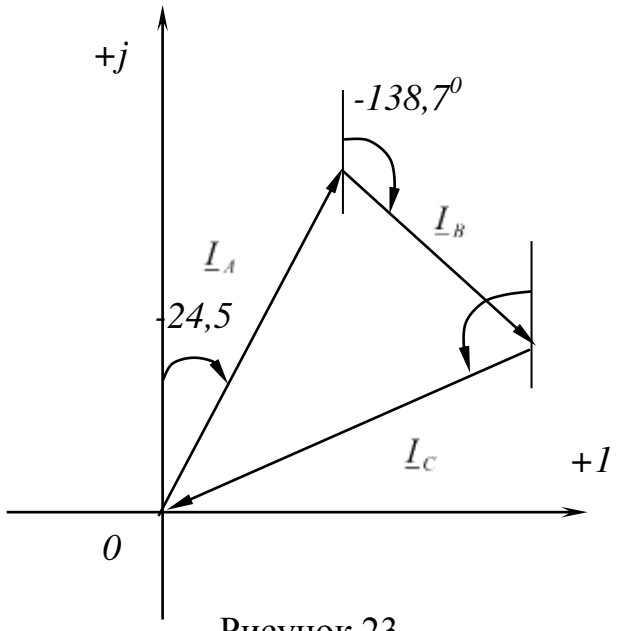


Рисунок 23

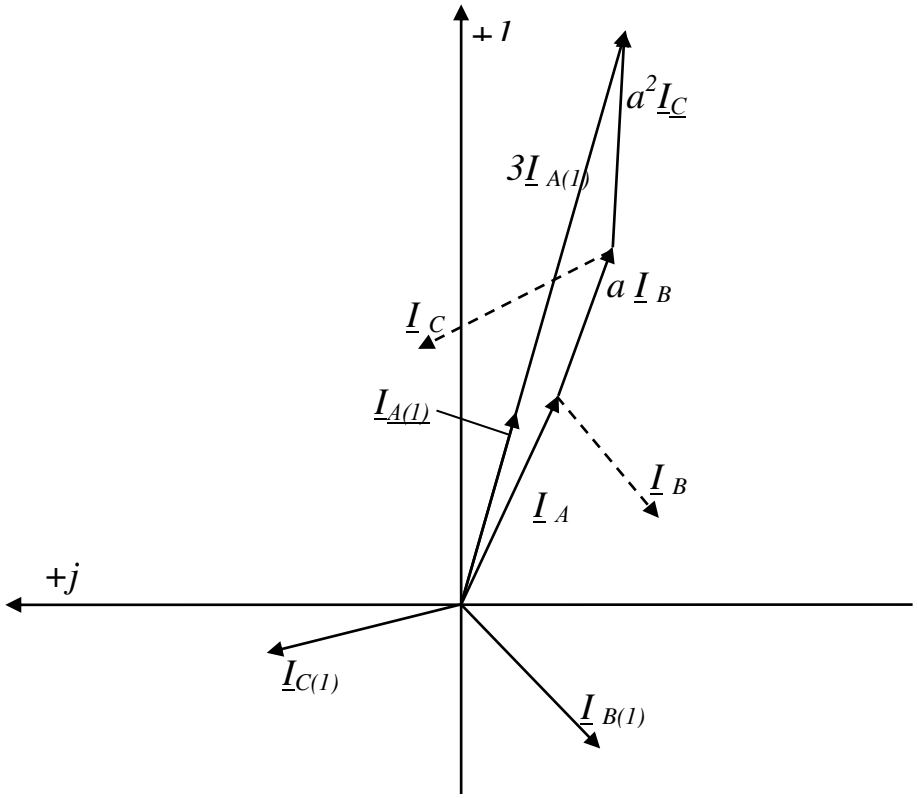


Рисунок 24

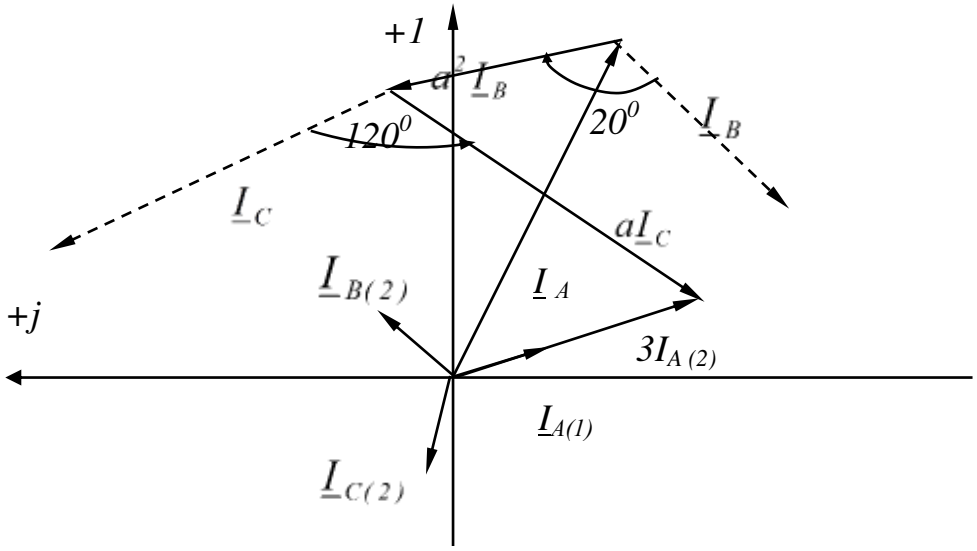


Рисунок 25

6 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ РАБОТЫ № 4 НА ТЕМУ «*ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ*»

Целью расчетов является приобретение навыков расчета переходных процессов в разветвленных линейных электрических цепях с сосредоточенными параметрами *R, L* и *C* классическим и операторным методами.

Вариант задания на расчетную работу выдается преподавателем. Каждый вариант отличатся от другого либо значениями исходных данных, схемой электрической цепи, либо искомой переходной величиной.

В каждом варианте задана схема электрической разветвленной линейной цепи с постоянной ЭДС и ее параметры, значения которых выбирают из таблицы в зависимости от номера варианта.

Требуется определить закон изменения во времени тока в одной из ветвей электрической цепи или напряжения на одном из ее элементов после коммутации (замыкании или размыкании ключа).

Задачу необходимо решить двумя методами: классическим и операторным.

Прежде, чем приступить к расчетам, необходимо изучить соответствующий раздел курса теоретических основ электротехники, пользуясь литературой, указанной в конце данных методических указаний и ответить на контрольные вопросы.

Вопросы для самоконтроля

- Что называется переходным процессом в электрической цепи?
- Как формулируются законы коммутации?
- Что понимают под начальными условиями при расчетах переходных процессов?
- Какие начальные условия называют независимыми? Как их определяют?
- Какие начальные условия называют зависимыми? Как их определяют?

- Что понимают под принужденным значением переходной величины?
- Что понимают под свободным током (свободным напряжением)?
- Каков порядок расчета переходных процессов в линейных электрических цепях классическим методом?
- Что такое характеристическое уравнение, для чего его составляют при расчете переходных процессов?
- Какова связь свободной составляющей переходного процесса с корнями характеристического уравнения?
- Как определяют постоянные интегрирования при решении дифференциального уравнения?
- Каков порядок расчета переходных процессов операторным методом?
- Что такое операторная схема замещения и как она составляется?
- Какими элементами в операторной схеме замещения обозначаются индуктивность, емкость, постоянная ЭДС?
- Для чего и как пользуются формулой разложения?
- Какие разновидности формулы разложения вы знаете? Как они связаны с корнями характеристического уравнения?
- Как перейти от изображения искомой величины к ее оригиналу?
- Как проверить правильность полученного аналитического выражения для переходного тока или напряжения, полученного в результате расчетов?
- Как построить временную диаграмму переходной величины?

Переходные процессы происходят при любых изменениях режима электрической цепи – включениях, выключениях, коротком замыкании и так далее. Эти процессы не могут протекать мгновенно, так как невозможны мгновенные изменения энергии, запасенной или запасаемой в электромагнитном поле цепи.

В общем случае, переходным называется процесс, возникающий в электрической цепи при переходе от одного установившегося режима к другому.

Под установившемся режимом следует понимать такой режим, при котором ток или напряжение постоянны во времени (цепи постоянного тока) или меняются периодически (цепи синусоидального тока).

Процесс включения и отключения всей цепи или отдельных ее участков, изменения ее параметров называется коммутацией. Сам процесс коммутации происходит в момент времени $t = 0$, то есть практически мгновенно.

В электрических цепях индуктивности и емкости способны накапливать энергию электромагнитного поля

$$W_L = \frac{L \cdot i^2}{2} \quad \text{и} \quad W_C = \frac{C \cdot u^2}{2}.$$

Это накопление или отдача энергии скачком произойти не может. На основании этого можно сформулировать два закона коммутации, которые лежат в основе расчета переходных процессов.

Первый закон коммутации.

В любой ветви с индуктивностью ток или магнитный поток в момент времени, непосредственно после коммутации, сохраняют то же значение, которое они имели непосредственно перед коммутацией, то есть ток в индуктивности скачком измениться не может

$$i_L(0_-) = i_L(0) = i_L(0_+) \text{ или короче } i_L(0_-) = i_L(0_+),$$

где $t = 0_-$ - время непосредственно перед коммутацией;

$t = 0_+$- время непосредственно после коммутации.

Второй закон коммутации.

В любой ветви напряжение и заряд на емкости сохраняют в момент времени, непосредственно после коммутации, те же значения, которые они имели непосредственно перед коммутацией, то есть напряжение и заряд на емкости скачком измениться не могут

$$u_C(0_-) = u_C(0_+).$$

Токи и напряжения, которые не подчиняются законам коммутации, могут изменяться скачком.

Классический метод расчета переходного процесса

Этот метод основан на интегрировании дифференциального уравнения, составленного относительно искомой величины.

Пусть задана неразветвленная цепь, схема которой изображена на рисунке 26, состоящая из *R, L, C* и ЭДС *e*.

Записываем для данной цепи уравнение по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений. Это уравнение будет справедливо для любого момента времени

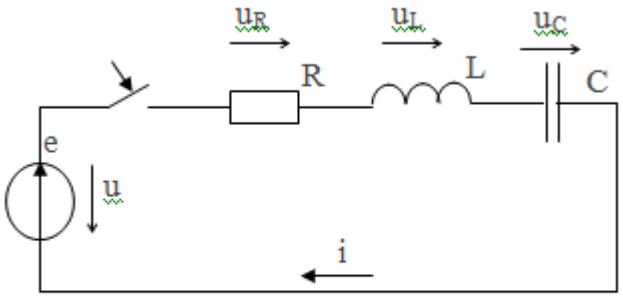


Рисунок 26

$$L\frac{di}{dt} + iR + \frac{1}{C}\int i\,dt = e,$$

где i - ток переходного процесса или просто переходной ток.

Продифференцируем полученное дифференциально-интегральное уравнение

$$L\frac{d^2i}{dt^2} + R\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}i = \frac{de}{dt}$$

и получим дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами.

Как известно, решение линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами представляет собой сумму двух решений - частного решения неоднородного уравнения и общего решения однородного уравнения.

Частное решение неоднородного уравнения определяет принужденный или установившейся режим.

Суть принужденного режима заключается в том, что процесс рассматривается в послекоммутационной цепи в установившемся режиме, то есть когда переходной процесс практически закончился. В этом случае токи и напряжения на участках цепи не изменяются и определяются только величиной ЭДС или подведенного на вход цепи напряжения. В этом случае уравнение принимает вид:

$$L\frac{d^2i_{пр}}{dt^2} + R\frac{di_{пр}}{dt} + \frac{1}{C}i_{пр} = \frac{de}{dt}.$$

Однородное уравнение получим из основного путем приравнивания его к нулю, то есть при отсутствии напряжения на входе. Общее решение этого уравнения определяет свободный режим

$$L\frac{d^2 i_{св}}{dt^2} + R\frac{di_{св}}{dt} + \frac{1}{C} i_{св} = 0 .$$

То есть в данном случае ток в цепи протекает за счет электромагнитного поля, запасенного в реактивных элементах. Этот ток (напряжение на отдельном участке) не зависит от действующей в цепи ЭДС или от подведенного напряжения и поэтому называется свободным. Так как запасенная в цепи энергия при отсутствии внешних источников будет постепенно расходоваться, свободная составляющая с течением времени уменьшается до нуля. Математически это соответствует отрицательным вещественным корням или отрицательным вещественным частям комплексных корней $p_к$ характеристического уравнения, что определяются убывающей во времени функцией вида $A_к e^{p_к t}$.

Итак, переходной процесс можно рассматривать состоящим из двух накладывающихся друг на друга процессов – принужденного, который как бы наступит сразу, мгновенно и свободного, который затухает с течением времени по мере перехода процесса в установившейся режим

$$i(t) = i_{пр} + i_{св} \quad \text{или} \quad i(t) = i_{пр} + Ae^{pt},$$

где p - корень характеристического уравнения;

A - постоянная интегрирования.

Принужденная составляющая определяется как частное решение неоднородного уравнения.

Для определения постоянных интегрирования необходимо определить начальные условия. Под начальными условиями подразумеваются значения токов и напряжений в цепи при $t = 0$. Они подразделяются на независимые, зависимые и нулевые.

Независимые начальные условия.

К независимым начальным условиям относятся те величины, которые подчиняются законам коммутации, а именно ток в индуктивности и напряжение на емкости. Независимые начальные условия определяются из докоммутационной цепи.

Зависимые начальные условия.

К зависимым начальным условиям относятся токи и напряжения, которые не подчиняются законам коммутации, а также все производные. Они определяются для момента времени непосредственно после коммутации $t = 0_+$ из послекоммутационной цепи по законам Кирхгофа и использованием полученных независимых начальных условий.

Нулевые начальные условия.

Нулевые начальные условия имеют место в том случае, когда к началу переходного процесса непосредственно перед коммутацией все напряжения и токи в пассивных элементах цепи равны нулю.

Расчет переходного процесса классическим методом следует проводить в следующей последовательности:

1. Выбрать положительные направления токов и составить систему уравнений по законам Кирхгофа в интегрально-дифференциальной форме для послекоммутационной цепи.

2. Решить систему относительно искомой переходной величины.

3. Определить принужденную составляющую переходной величины, либо как частное решение неоднородного уравнения, либо непосредственно из послекоммутационной цепи.

4. Определить свободные составляющие переходной величины. Для чего:

а) составить характеристическое уравнение и определить корни;

б) составить систему уравнений для определения постоянных интегрирования;

в) определить начальные условия;

г) определить постоянные интегрирования.

5. Записать окончательное уравнение искомой величины.

6. Построить временную диаграмму искомой переходной величины.

Рассмотрим расчет переходного процесса на примере определения тока $i_1(t)$ в цепи, представленной схемой на рисунке 27.

Задано: E, L, R, C. Определить ток $i_1(t)$ и построить для него временную диаграмму.

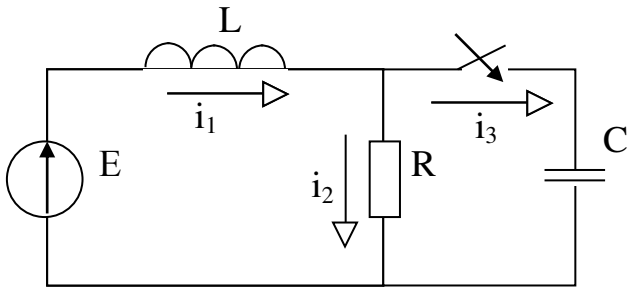


Рисунок 27

1. Выбираем направление токов. Составляем систему уравнений

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0; & (4) \\ L\dfrac{di_1}{dt} + i_2 R = E; & (5) \\ L\dfrac{di_1}{dt} + \dfrac{1}{C}\int i_3 = E. & (6) \end{cases}$$

Выбор контуров следует делать так, чтобы в каждое контурное уравнение входила искомая величина, в данном случае ток i_1.

2. Решаем систему уравнений относительно тока i_1.

Из уравнения (5) $\quad i_2 = \dfrac{E}{R} - \dfrac{L}{R}\dfrac{di_1}{dt}$.

Продифференцируем уравнение (6) и выразим из него ток i_3

$$L\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{1}{C} i_3 = 0, \qquad i_3 = -LC\frac{d^2 i_1}{dt^2}.$$

Подставим ток i_2 и i_3 в уравнение (4)

$$i_1 - \frac{E}{R} + \frac{L}{R}\frac{di_1}{dt} + LC\frac{d^2 i_1}{dt^2} = 0$$

и приведем уравнение к нормальному виду:

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{1}{RC}\frac{di_1}{dt} + \frac{1}{LC} i_1 = \frac{E}{RLC}. \qquad (7)$$

В общем случае уравнение имеет вид:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + b\frac{di}{dt} + ci = d\ .$$

3. Определяем принужденную составляющую тока $i_1(t)$.

Из уравнения (7) $\frac{1}{LC} i_{1np} = \frac{E}{RLC}$, $i_{1np} = \frac{E}{R}$.

То же значение i_{1np} можно получить непосредственно из схемы (рисунок 27).

4. Определяем свободную составляющую.

Искомый ток $i(t) = i_{np} + i_{св}$.

Свободная составляющая является общим решением уравнения

$$\frac{d^2i}{dt^2} + b\frac{di}{dt} + ci = 0\ .$$

Решение имеет вид $i(t) = i_{np} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$,

где p_1 и p_2 – корни характеристического уравнения,

A_1 и A_2 – постоянные интегрирования.

Составим и решим характеристическое уравнение

$$p^2 + bp + c = 0\ ,$$

$$p_{1,2} = -\frac{b}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 - c}\ .$$

Уравнение второго порядка может иметь:

1. Два вещественных различных отрицательных корня $p_1 \neq p_2$ имеют место, если $\left(\frac{b}{2}\right)^2 > c$.
2. Два вещественных равных отрицательных корня $p_1 = p_2$ имеют место, если $\left(\frac{b}{2}\right)^2 = c$.
3. Два комплексных сопряженных с отрицательной вещественной частью $p_1 = -\delta + j\omega_0$, $p_1 = -\delta - j\omega_0$ имеют место, если $\left(\frac{b}{2}\right)^2 < c$.

В зависимости от вида корней уравнения переходной величины имеет вид:

1. Если $p_1 \neq p_2$ $\quad i(t) = i_{пр} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$.

2. Если $p_1 = p_2$ $\quad i(t) = i_{пр} + (A_1 + A_2 t) e^{pt}$.

3. Если $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_0$ $\quad i(t) = i_{пр} + A e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \nu)$,

где $-\delta$ – коэффициент затухания;

ω_0 – собственная частота контура;

ν – начальная фаза;

A – постоянная интегрирования.

Допустим, что в данном случае имеют место два различных вещественных корня. Для определения постоянных интегрирования A_1 и A_2 требуется система из двух уравнений.

Первым уравнением является уравнение искомого тока

$$i_1(t) = i_{1пр} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

Вторым уравнением является уравнение, полученное путем дифференцирования первого уравнения по времени

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{di_{1пр}}{dt} + p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}.$$

Поскольку эти уравнения справедливы для любого момента времени, возьмем время $t = 0$, тогда уравнение будет иметь вид

$$i_1(0) = i_{1пр} + A_1 + A_2 \qquad (8)$$

$$\left.\frac{di_1}{dt}\right|_{t=0+} = \left.\frac{di_{1пр}}{dt}\right|_{t=0+} + p_1 A_1 + p_2 A_2. \qquad (9)$$

Левые части полученных уравнений определяются из начальных условий.

Независимые начальные условия (н.н.у.)

$$i_1(0-) = i_1(0+) = \frac{E}{R};$$

$$u_C(0-) = u_C(0+) = 0.$$

Зависимые начальные условия.

Из (3) $L\frac{di_1}{dt}\Big|_{t=0+} + u_C(0+) = E$, так как $u_C(0-) = u_C(0+) = 0$,то

$$\frac{di_1}{dt}\Big|_{t=0+} = \frac{E}{L}.$$

Подставляя значения $i_1(0+)$, i_{1np}, $\frac{di_1}{dt}\Big|_{t=0+}$, p_1 и p_2 в уравнения (8) и (9), вычислим A_1, A_2 и окончательно получим уравнение

$$i_1(t) = i_{1np} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

Рассмотрим случай, когда корни характеристического уравнения комплексные сопряженные $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_0$.

В этом случае $i_1(t) = i_{1np} + Ae^{-\delta t}\sin(\omega_0 t + \nu)$.

В уравнении два неизвестных – постоянная интегрирования A и начальная фаза ν. Для определения неизвестных составим систему уравнений

$$i_1(t) = i_{1np} + Ae^{-\delta t}\sin(\omega_0 t + \nu)$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{di_{1np}}{dt} - \delta A e^{-\delta e}\sin(\omega_0 t + \nu) + A\omega_0 e^{-\delta e}\cos(\omega_0 t + \nu).$$

При $t = 0$ система принимает вид

$$i_1(0) = i_{1np} + A\sin\nu \qquad (10)$$

$$\frac{di_1}{dt}\Big|_{t=0+} = -\delta A\sin\nu + A\omega_0\cos\nu. \qquad (11)$$

Разделив левую и правую часть уравнения (11) на соответствующую левую и правую часть уравнения (10) получим

$$\frac{\frac{di_1}{dt}\Big|_{t=0+}}{i_1(0) - i_{np}} = -\delta + \omega_0 ctg\,\nu,$$

откуда $\nu = \dfrac{arctg \dfrac{\left.\dfrac{di_1}{dt}\right|_{t=0+}}{i_1(0)-i_{np}} + \delta}{\omega_0}$, а постоянная интегрирования

$$A = \frac{i_1(0)-i_{np}}{\sin \nu}.$$

Методика построения временных диаграмм

а) Диаграмма для случая, когда корни вещественные и различные.

В данном случае диаграмма представляет собой сумму трех диаграмм - принужденной составляющей тока и двух свободных.

Так как рассматриваем цепь постоянного тока, временная диаграмма принужденной составляющей представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс. Свободные составляющие – экспоненты.

Для построения экспоненты вводят понятие о постоянной времени τ. Корень характеристического уравнения p имеет размерность [$с^{-1}$]. $-p = \delta$ - коэффициент затухания. Величина обратная коэффициенту затухания – постоянная времени

$$\tau = \left|\frac{1}{\delta}\right| \ [c].$$

Постоянная времени τ – это время, в течение которого свободная составляющая уменьшится в e раз.

$$i_{1св} = A_1 e^{-\delta_1 t} = A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}}; \qquad i_{2св} = A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}.$$

При $t_1 = 0$: $i_{1св} = A_1$, $i_{2св} = A_2$; Вычислим τ_1 и τ_2 и допустим, что

$t_2 = \tau_1$: $i_{1св} = \dfrac{A_1}{e}$, $i_{2св} = \dfrac{A_2}{e}$; $\tau_1 = 3\ \tau_2$

$t_2 = 2\tau_1$: $i_{1св} = \dfrac{A_1}{e^2}$, $i_{2св} = \dfrac{A_2}{e^2}$;

$t_2 = 3\tau_1$: $i_{1св} = \dfrac{A_1}{e^3}$, $i_{2св} = \dfrac{A_2}{e^3}$ и так далее.

Определив значения свободных токов для каждого момента времени, строим их экспоненты. Результирующая временная диаграмма $i_1(t)$ определяется для каждого момента времени как сумма ординат принужденной и свободных составляющих (рисунок 28).

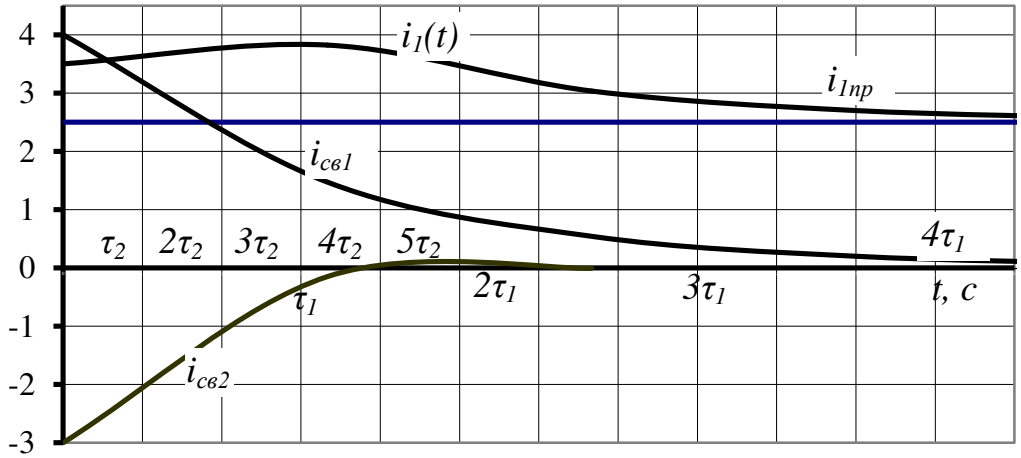


Рисунок 28

б) Диаграмма для случая, когда корни комплексные.

Уравнение имеет вид

$$i(t) = i_{пр} + Ae^{-\delta t}\ sin(\omega_0 t + \nu).$$

Свободную составляющую разбиваем на два сомножителя

$$A\,sin(\omega_0 t + \nu)\cdot e^{-\delta t}.$$

Первый сомножитель – синусоида, второй – экспонента.

1. Строим график принужденного тока, который представляет собой прямую линию, параллельную оси абсцисс, если на вход подано постоянное напряжение.
2. Разобьем ось абсцисс на отрезки, равные частям периода, который равен $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$.
3. Строим синусоиду, которая имеет начальную фазу υ. синусоида строится симметрично графику принужденного тока.

4. В том же масштабе времени откладываем на оси абсцисс отрезки, равные $\tau = \left|\frac{1}{\delta}\right|$, и строим экспоненту – множитель. По оси ординат откладываем единицу, которую можно взять в любом масштабе.
5. В любой момент времени амплитуду синусоиды умножим на соответствующий множитель и получаем точки искомой кривой (рисунок 29).

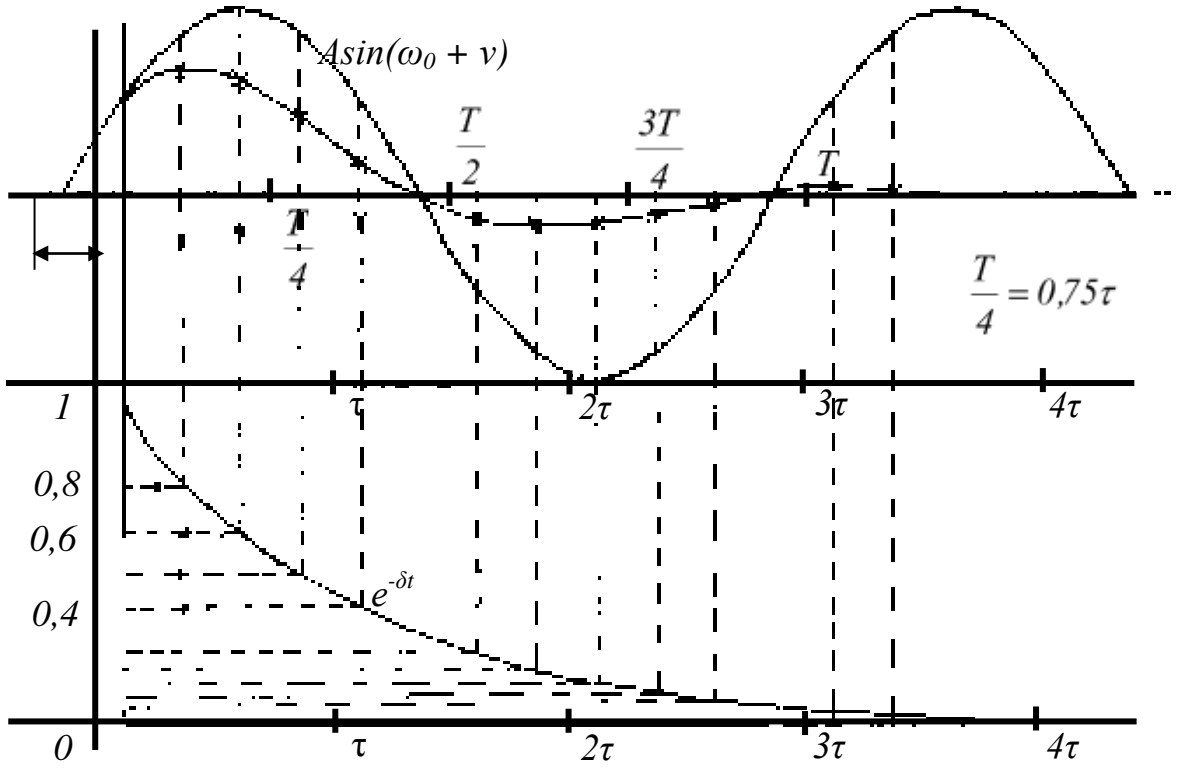


Рисунок 29

Операторный метод расчета переходных процессов

Суть операторного метода заключается в переходе от функций времени к функциям от комплексного переменного. Эта замена позволяет перейти от решения дифференциальных уравнений к решению алгебраических уравнений.

Порядок расчета:

1. Замена функций времени к функциям комплексного переменного. Классическая схема преобразуется в операторную.

2. Решение системы алгебраических уравнений.
3. Обратный переход от функций комплексного переменного к функциям времени.

Преобразование функций времени в функции от комплексного переменного производится с помощью преобразования Лапласа

$$F(p)=\int_0^{\infty} f(t)e^{-pt}dt,$$

где p - комплексное число.

Функцию *f(t)* или *i(t); u(t); e(t)* называют оригиналом, а функцию от комплексного переменного *F(p); I(p); U(p); e(p)* – ее изображением.

Следовательно, преобразование Лапласа позволяет перейти от оригинала к изображению, т.е. от функции времени *f(t)* к функции от комплексного переменного *F(p).*

Знак перехода $\doteq$ называется знаком соответствия

$$f(t)\doteq F(p)$$

$$i(t)\doteq I(p).$$

Примем без доказательства изображения постоянной, производной и интеграла, то есть E; iR; $L\frac{di}{dt}$; $\frac{1}{c}\int idt$.

Изображение постоянной

$$A\doteq\frac{A}{P} \quad \text{или} \quad E\doteq\frac{E}{P}.$$

Изображение напряжения на индуктивности

$$L\frac{di}{dt}\doteq LpI(p)-Li(0).$$

Изображение напряжения на емкости

$$\frac{1}{C}\int idt\doteq\frac{1}{pC}I(p)+\frac{U_C(0)}{p}.$$

Напряжения *Li(0)* и $\frac{U_C(0)}{p}$ представляют собой так называемые «внутренние» ЭДС индуктивности и емкости, которые обуславливаются не нулевыми начальными условиями, то есть определяются энергией электромагнитного поля, запасенной в индуктивности и емкости. Наличием этих ЭДС определяются независимые начальные условия.

Итак, все элементы электрической цепи изображаются в виде:

$$E(t) \bullet\!\!-\!\!\bullet E(p); \quad E \bullet\!\!-\!\!\bullet \frac{E}{P}; \; i(t) \bullet\!\!-\!\!\bullet I(p); \; U_L(t) = L\frac{di}{dt} \bullet\!\!-\!\!\bullet LpI(p) - Li(0);$$

$$U_C(t) = \frac{1}{C}\int i dt \bullet\!\!-\!\!\bullet \frac{1}{pC} I(p) + \frac{U_C(0)}{p}.$$

Из уравнений, составленных по законам Кирхгофа для мгновенных значений, вытекают соответствующие уравнения для изображений.

Уравнения для изображений по форме аналогичны уравнениям, составленным для такой же цепи символическим методом (рисунок 30).

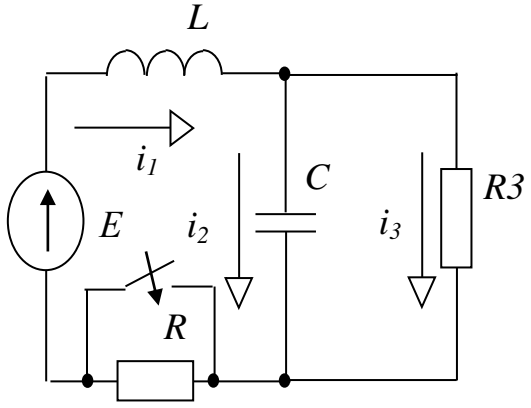


Рисунок 30

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0; \\ L\dfrac{di_1}{dt} = \dfrac{1}{c}\int i_2 dt = E; \\ L\dfrac{di_1}{dt} + i_3 R_3 = E. \end{cases} \qquad \begin{cases} \underline{I}_1 - \underline{I}_2 - \underline{I}_3 = 0; \\ j\omega L\underline{I}_1 - j\dfrac{1}{\omega c}\underline{I}_2 = E; \\ j\omega L\underline{I}_1 + R_3\underline{I}_3 = E. \end{cases}$$

для изображений:

$$I_1(p) - I_2(p) - I_3(p) = 0;$$

$$pLI_1(p) + \frac{1}{pC} I_2 p) = \frac{E}{p} + Li_1(0) - \frac{U_C(0)}{p};$$

$$pLI_1(p) + R_3 I_3 p) = \frac{E}{p} + Li_1(0).$$

По полученным уравнениям можно составить операторную схему. Операторная схема (рис. 31)составляется для послекоммутационной цепи с учетом «внутренних» ЭДС на индуктивности $Li_1(0)$ и емкости $\frac{U_c(0)}{p}$, если имеют место не нулевые начальные условия. Нужно помнить, что направление «внутренней» ЭДС индуктивности совпадает по направлению с током, а «внутренняя» ЭДС на емкости направлена против напряжения на емкости.

Определим ток $I_1(p)$.

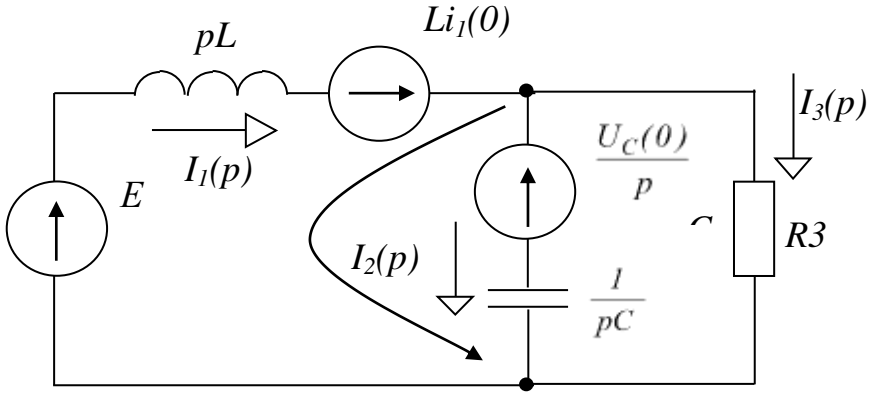


Рисунок 31

Используя схему (рисунок 31), задачу можно решить любым методом:

- методом двух узлов;
- методом контурных токов;
- методом эквивалентного генератора.

Решим задачу методом двух узлов:

$$U_{ab}(p)=\frac{\left[\frac{E}{p}+Li_1(0)\right]\frac{1}{pL}+\frac{U_c(0)}{p}\cdot pC}{\frac{1}{pL}+pC+\frac{1}{R}}=\frac{\frac{E}{p^2L}+\frac{Li_1(0)}{pL}+\frac{U_c(0)pC}{p}}{\frac{pL+R+p^2LCR}{pLR}}=$$

$$\frac{\frac{ER}{p}+\frac{pLi_1(0)}{p}+\frac{p^2LCU_o(0)}{p}}{\frac{p^2LCR+pL+R}{R}}=\frac{ER+PLRi_1(0)+P^2CLRU_c(0)}{p(p^2LCR+pL+R)}=\frac{F_1(p)}{F_2(p)}$$

Зная изображение $U_{ab}(p)$ можно определить изображение любого тока.

$$I_1(p)=\frac{\frac{E}{p}+Li_1(0)-U_{ab}(p)}{pL};\qquad I_2(p)=\frac{\frac{U_c(0)}{p}-U_{ab}(p)}{\frac{1}{pC}};\ I_3(p)=\frac{U_{ab}(p)}{R}$$

.

Во всех случаях получаются выражения в виде рациональных дробей. И во всех случаях степень числителя относительно *p* ниже степени знаменателя**.** Это позволяется нам при переходе от изображения к оригиналу воспользоваться **теоремой разложения.** Полученные изображения токов $I_1(p)$, $I_2(p)$ и $I_3(p)$ можно представить в виде рациональных дробей

$$I_1(p)=\frac{F_1(p)}{F_2(p)};\ I_2(p)=\frac{\Phi_1(p)}{\Phi_2(p)};\ \ I_3(p)=\frac{N_1(p)}{N_2(p)}.$$

ТЕОРЕМА РАЗЛОЖЕНИЯ

Если изображение тока *I(p)* или любой функции *F(p)* представлено в виде несократимой рациональной дроби $I(p)=\frac{F_1(p)}{F_2(p)}$,

где $F_1(p)$ и $F_2(p)$ - целые относительно p многочлены, причем степень многочлена $F_2(p)$ относительно p выше степени многочлена $F_1(p)$, то ток $i(t)$ определяется по формуле

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} \doteqdot i(p) = \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{F_2'(p_2)} e^{p_2 t} + \ldots + \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t} + \ldots = \sum_{k=1}^{n} \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t}$$

где n – степень знаменателя.

Используя теорему разложения, переход от изображения к оригиналу следует проводить в следующем порядке:

1. Определяем корни полинома $F_2(p)$ путем приравнивания его к нулю.
2. Если корни вещественные и различные, то оригинал определяется по выражению

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} = f(t) = \sum_{k=1}^{n} \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t} .$$

Это выражение пригодно для вычисления оригинала в любом случае.

3. Если знаменатель дроби имеет один корень равный нулю, т.е. $F_2(p) = p_o F_3(p)$, то оригинал проще определить по формуле

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} = \frac{F_1(p)}{p_o F_3(p)} = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + \frac{F_1(p_1)}{p_1 F_3'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{p_2 F_3'(p_2)} e^{p_2 t} + \ldots$$

4. Берем производную от $F_2'(p)$ или $F_3'(p)$.

$$f(t) = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + \frac{F_1(p_1)}{p_1 F_3'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{p_2 F_3'(p_2)} e^{p_2 t} + \ldots \frac{F_1(p_n)}{p_n F_3'(p_n)} e^{p_n t},$$

где $\frac{F_1(0)}{F_3(0)} = i_{np}$; $\frac{F_1(p_1)}{p_1 F_3'(p_1)} = A$; $\frac{F_1(p_2)}{p_2 F_3'(p_2)} = A_2$; $\ldots \frac{F_1(p_n)}{p_n F_3'(p_n)} = A_n$.

Если корни уравнения комплексно сопряженные $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_0$, то переход от изображения к оригиналу можно проводить из следующих соображений

$$f(t) = \frac{F_1(p_1)}{p_1 F_3'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{p_2 F_3'(p_2)} e^{p_2 t} .$$

Модули слагаемых исходного уравнения также будут представлять собой комплексные сопряженные числа и их можно представить в виде

$$\frac{F_1(p_1)}{p_1 F_3'(p_1)} = Ae^{j\alpha} \quad \text{и} \quad \frac{F_1(p_2)}{p_2 F_3'(p_2)} = Ae^{-j\alpha}.$$

Подставим их в исходное уравнение

$$f(t) = \frac{F_1(p_1)}{p_1 F_3'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{p_2 F_3'(p_2)} e^{p_2 t} = Ae^{j\alpha} e^{-\delta t} e^{j\omega_o t} + Ae^{-j\alpha} e^{-\delta t} e^{-j\omega_o t} =$$

$$= Ae^{-\delta t}\left[e^{j(\omega_o t+\alpha)} + e^{-j(\omega_o t+\alpha)}\right] = Ae^{-\delta t}\, 2\cos(\omega_o t + \alpha) = Ae^{-\delta t}\, 2\sin(\omega_o t + \alpha + \frac{\pi}{2}).$$

Графически сумму $\left(Ae^{j(\omega_o t+\alpha)} + Ae^{-j(\omega_o t+\alpha)}\right)$ можно рассматривать как сумму двух сопряженных комплексных чисел. Складывая их получим в сумме действительное число равное двум проекциям модуля A на действительную ось, то есть двум реальным частям вектора A, так как реальной частью любого вектора является его проекция на его вещественную ось (рисунок 32).

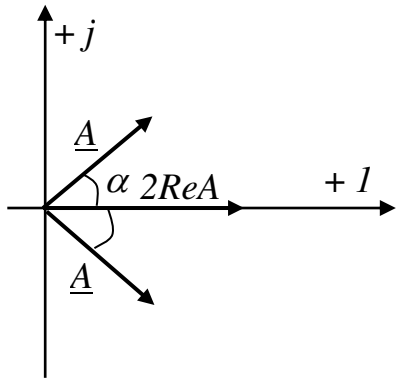


Рисунок 32

Итак, окончательно имеем

$$f(t) = \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{F_2'(p_2)} e^{p_2 t} = 2Ae^{-\delta t}\sin(\omega_o t + \alpha + \frac{\pi}{2}).$$

Пример выполнения расчетной работы № 4

Исходные данные:

E = 60 В;

L = 20 мГн;

C = 100 мкФ;

R_1 = 60 Ом;

R_2 = 20 Ом;

R_3 = 60 Ом.

Искомая величина i_1.

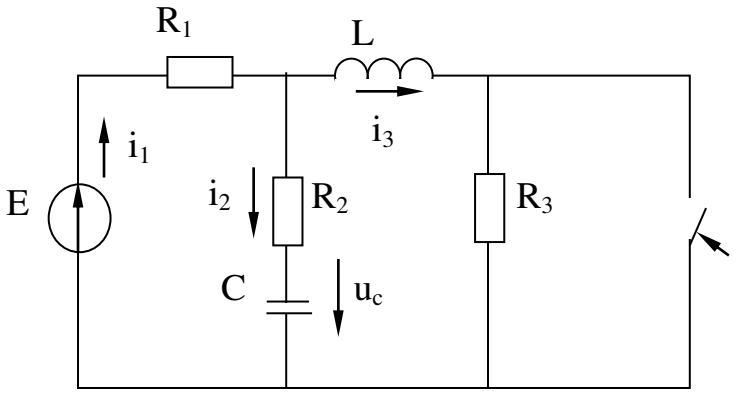


Рисунок 33

Классический метод расчета переходного тока i_1

Для электрической цепи на рисунке 33 составим систему уравнений по законам Кирхгофа:

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0; \tag{12}$$

$$i_1 R_1 + i_2 R_2 + \frac{1}{C}\int i_2 dt = E; \tag{13}$$

$$i_1 R_1 + L\frac{di_3}{dt} = E. \tag{14}$$

Дл упрощения дальнейших расчетов решаем систему относительно $u_C = \frac{1}{C}\int i_2 dt$, так как переходной процесс един для всей цепи.

Из уравнения (13) с учетом того, что $i_2 = C\frac{du_C}{dt}$, получим

$$i_1 R_1 + CR_2\frac{du_C}{dt} + u_C = E.$$

Решим это уравнение относительно тока i_1.

$$i_1 R_1 = E - CR_2\frac{du_C}{dt} - u_C,$$

$$i_1 = \frac{E}{R_1} - C\frac{R_2}{R_1}\frac{du_C}{dt} - \frac{u_C}{R_1}. \qquad (15)$$

Из уравнения (12) получим

$$i_3 = i_1 - i_2 = \frac{E}{R_1} - C\frac{R_2}{R_1}\frac{du_C}{dt} - \frac{u_C}{R_1} - C\frac{du_C}{dt}. \qquad (16)$$

Подставим (15) и (16) в уравнение (14)

$$E - CR_2\frac{du_C}{dt} - u_C - LC\frac{R_2}{R_1}\frac{d^2u_C}{dt^2} - \frac{L}{R_1}\frac{du_C}{dt} - LC\frac{d^2u_C}{dt^2} = E,$$

$$LC\left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)\frac{d^2u_C}{dt^2} + \left(CR_2 + \frac{L}{R_1}\right)\frac{du_C}{dt} + u_C = 0.$$

От полученного в результате преобразований последнего уравнения перейдем к характеристическому уравнению послекоммутационной цепи:

$$LC\left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)p^2 + \left(CR_2 + \frac{L}{R_1}\right)p + 1 = 0;$$

подставив значения параметров из условия задания, получим

$$2{,}66 \cdot 10^{-6}\, p^2 + 2{,}33 \cdot 10^{-3}\, p + 1 = 0.$$

Решив данное квадратное уравнение, найдем корни характеристического уравнения

$$p^2 + 876\,p + 376000 = 0$$

$$p_{1,2} = -438 \pm \sqrt{438^2 - 376000} = -438 \pm j429 \;\; c^{-1}.$$

Так как корни характеристического уравнения получились комплексными сопряженными, представим решение задачи в виде:

$$i_1(t) = i_{1пр} + i_{1св}$$

или

$$i_1(t) = i_{1пр} + Ae^{-\delta t}\, sin(\omega_0 t + \nu).$$

Здесь $i_{1пр} = \frac{E}{R_1} = \frac{60}{60} = 1$ А.

Для определения постоянных интегрирования составим систему уравнений:

$$\begin{cases} i_1(t) = i_{1пр} + Ae^{-\delta t}\ sin(\omega_0 t + \nu); \\ \dfrac{di_1}{dt} = -\delta A e^{-\delta t}\ sin(\omega_0 t + \nu) + \omega_0 A e^{-\delta t}\ cos(\omega_0 t + \nu). \end{cases}$$

При $t = 0$

$$\begin{cases} i_1(0) = i_{1пр} + A\sin\nu; \\ \left.\dfrac{di_1}{dt}\right|_{t=0+} = -\delta A \sin\nu + A\omega_0 \cos\nu. \end{cases}$$

Определим начальные условия:

1. Независимые начальные условия (Н.Н.У.):

$$i_1(0_-) = i_3(0_+) = \frac{E}{R_1 + R_3} = \frac{60}{120} = 0{,}5A;$$

$$u_C(0_-) = u_C(0_+) = i_3(0_-) \cdot R_3 = 30B.$$

2. Зависимые начальные условия (З.Н.У.):

$$i_2(0_+) = i_1(0_+) - i_3(0_+) = i_1(0_+) - 0{,}5,$$

из уравнения (13) получим

$$i_1(0_+)R_1 + [\,i_1(0_+) - 0{,}5\,]R_2 + u_C(0_+) = E;$$

$$60i_1(0_+) + 20i_1(0_+) - 10 + 30 = 60;$$

$$80i_1(0_+) = 40;$$

$$i_1(0_+) = 0{,}5\ A.$$

Продифференцируем уравнение (12)

$$\left.\frac{di_1}{dt}\right|_{t=0+} - \left.\frac{di_2}{dt}\right|_{t=0+} - \left.\frac{di_3}{dt}\right|_{t=0+} = 0;. \qquad (17)$$

Из (14) определим

$$\left.\frac{di_3}{dt}\right|_{t=0+} = \frac{E}{L} - \frac{i_1(0_+)R_1}{L}. \qquad (18)$$

Дифференцируем уравнение (13)

$$R_1 \left.\frac{di_1}{dt}\right|_{t=0+} + R_2 \left.\frac{di_2}{dt}\right|_{t=0+} + \frac{1}{C} i_2(0_+) = 0;$$

$$\left.\frac{di_2}{dt}\right|_{t=0+} = -\frac{R_1}{R_2} \left.\frac{di_1}{dt}\right|_{t=0+} - \frac{1}{CR_2} i_2(0_+). \qquad (19)$$

Подставляя (19) и (18) в (17), получим

$$\left.\frac{di_1}{dt}\right|_{t=0+} + \frac{R_1}{R_2} \left.\frac{di_1}{dt}\right|_{t=0+} + \frac{1}{CR_2} i_2(0_+) - \frac{E}{L} + \frac{i_1(0_+)R_1}{L} = 0;$$

$$\left.\frac{di_1}{dt}\right|_{t=0+} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + \frac{i_1(0_+)R_1}{L} = \frac{E}{L};$$

$$4 \left.\frac{di_1}{dt}\right|_{t=0+} = \frac{60}{0{,}02} - \frac{30}{0{,}02};$$

$$\left.\frac{di_1}{dt}\right|_{t=0+} = 375.$$

Таким образом, для момента коммутации цепи получим два уравнения:

$$\begin{cases} 0{,}5 = 1 + A\sin\nu; \\ 375 = -438A\sin\nu + 429A\cos\nu. \end{cases}$$

Решим систему, разделив второе уравнение на первое:

$$\frac{375}{-0{,}5} = -438 + 429ctg\,\nu,$$

$$ctg\,\nu = -\frac{312}{429} = -0{,}73,$$

$$\nu = arctg(-0{,}73) = -54^0 = 126^0.$$

Подставив значение ν в первое уравнение системы, получим:

$$A = \frac{-0.5}{\sin 126} = -0{,}6.$$

В итоге получаем значение искомого тока:

$$i_1(t) = 1 - 0{,}6e^{-438t}\sin\left(429t + 126^0\right)\ A.$$

Для построения временной диаграммы вычислим величину

$$\tau = \frac{1}{\delta} = 0{,}0023 \quad c.$$

Определим период колебания:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_o} = \frac{2 \cdot 3{,}14}{429} = 0{,}0146 \ c.$$

Построенная временная диаграмма приведена на рисунке 34.

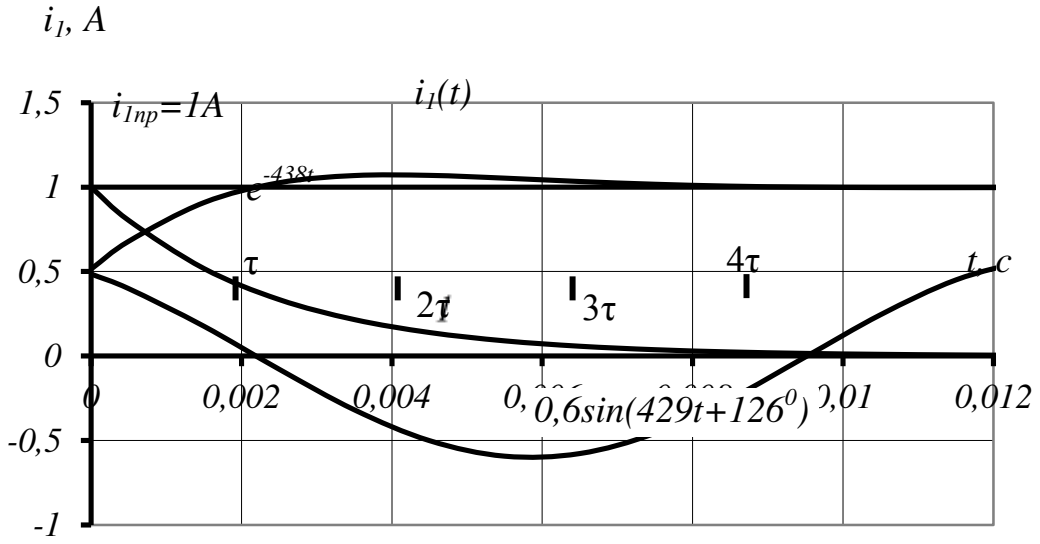


Рисунок 34

Операторный метод расчета переходного тока i_1

Составим операторную схему замещения электрической цепи (рисунок 35).

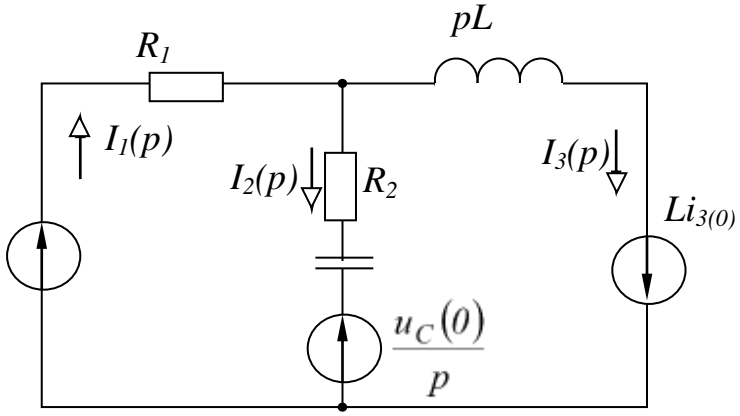


Рисунок 35

Определив эквивалентные ЭДС *Eэ(p)* и сопротивление *Zэ(p)* двух параллельных ветвей, упростим схему на рисунке 35 и получим схему на рисунке 36.

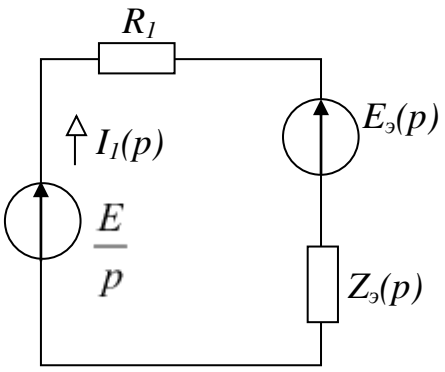


Рисунок 36

$$E_э(p)=\frac{\frac{Uc(0)}{p}\cdot\frac{pC}{RCR_2+1}-Li_3(0)\frac{1}{pC}}{\frac{pC}{RCR_2+1}+\frac{1}{pL}}=$$

$$=\frac{\frac{Uc(0)pLC-Li_3(0)(pCR_2+1)}{p(pCLR_2+L)}}{\frac{p^2LC+pCR_2+1}{pL(pCR_2+1)}}=$$

$$=\frac{[Uc(0)pLC-Li_3(0)(pCR_2+1)]\cdot p(pCLR_2+L)}{p(pCLR_2+L)(p^2LC+pCR_2+1)}=\frac{Uc(0)pLC-Li_3(0)(pCR_2+1)}{p^2LC+pCR_2+1}.$$

Эквивалентную проводимость ветвей и их эквивалентное сопротивление определим следующим образом:

$$g_э(p)=\frac{pC}{pCR_2+1}+\frac{1}{pL}=\frac{p^2CL+pCR_2+1}{p^2CLR_2+Lp};$$

$$R_э(p)=\frac{p^2CLR_2+Lp}{p^2CL+pCR_2+1}.$$

Тогда изображение искомого тока будет:

$$I_1(p)=\frac{\frac{E}{p}-E_э(p)}{R_1+R_э(p)}=\frac{\frac{E}{p}-\frac{Uc(0)pLC-Li_3(0)(pCR_2+1)}{p^2LC+pCR_2+1}}{R_1+\frac{p^2CLR_2+Lp}{p^2CL+pCR_2+1}}=$$

$$=\frac{\frac{Ep^2LC+EpCR_2+E-Uc(0)p^2LC+pLi_3(0)(pCR_2+1)}{p(p^2LC+pCR_2+1)}}{\frac{p^2CLR_1+pCR_2R_1+R_1+p^2CLR_2+L}{p^2CL+pCR_2+1}}=$$

$$= \frac{Ep^2LC + EpCR_2 + E - Uc(0)p^2LC + pLi_3(0)(pCR_2 + 1)}{p\left(p^2CLR_1 + pCR_2R_1 + R_1 + p^2CLR_2 + L\right)} = \frac{F_1(p)}{pF_3(p)}.$$

Приравняем знаменатель нулю и найдем его корни

$$p^2CLR_1 + pCR_2R_1 + R_1 + p^2CLR_2 + L = 0$$

$$p^2\,2\cdot 10^{-6}\cdot(60+20) + p(10^{-4}\cdot 20\cdot 60 + 0{,}02) + 60 = 16\cdot 10^{-5}\,p^2 + 0{,}14\,p + 60 = 0.$$

После преобразований получим: $p^2 + 875\,p + 375000 = 0$, откуда

$p_{1,2} = -437{,}5 \pm j428\ c^{-1}$.

Перейдем от изображения к оригиналу:

$$\frac{F_1(p)}{pF_3(p)} = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + \frac{F_1(p_1)}{p_1F_3'(p_1)}\cdot e^{jp_1t} + \frac{F_1(p_2)}{p_2F_3'(p_2)}\cdot e^{jp_2t}.$$

Здесь $\frac{F_1(0)}{F_3(0)} = \frac{E}{R_1} = \frac{60}{60} = 1$.

$$F_1(p_1) = Ep_1^2LC + Ep_1CR_2 + E - Uc(0)p_1^2LC + p_1Li_3(0)(p_1CR_2 + 1) =$$

$$= 60\cdot\left(612\cdot e^{j135{,}6^o}\right)^2\cdot 2\cdot 10^{-6} + 60\cdot 612\cdot e^{j135{,}6^o}\cdot 20\cdot 10^{-4} + 60 -$$

$$- 30\cdot\left(612\cdot e^{j135{,}6^o}\right)^2\cdot 2\cdot 10^{-6} + \left(612\cdot e^{j135{,}6^o}\right)^2\cdot 10^{-6}\cdot 2\cdot 20\cdot 0{,}5 +$$

$$+ 612\cdot e^{j135{,}6^o}\cdot 0{,}02\cdot 0{,}5 = 44{,}94\cdot e^{j271{,}2^o} + 73{,}44\cdot e^{j135{,}6^o} + 60 - 22{,}47\cdot e^{j271{,}2^o} +$$

$$+ 7{,}49\cdot e^{j271{,}2^o} + 6{,}12\cdot e^{j135{,}6^o} = 0{,}94 - j44{,}93 - 52{,}47 + j51{,}38 + 66 - 0{,}47 +$$

$$+ j22{,}46 + 0{,}16 - j7{,}49 - 4{,}37 + j4{,}28 = 3{,}79 + j25{,}7 = 25{,}99\cdot e^{j81^o}.$$

$$F_3'(p_1) = 2p_1CL(R_1 + R_2) + CR_2R_1 + L = 2\cdot 612\cdot e^{j135{,}6^o}\cdot 2\cdot 10^{-6}\cdot 80 +$$

$$+ 10^{-4}\cdot 20\cdot 60 + 0{,}02 = 0{,}137\cdot e^{j90^o}.$$

$$\frac{F_1(p_1)}{p_1F_3'(p_1)} = \frac{25{,}99\cdot e^{j81^o}}{612\cdot e^{j135{,}6^o}\cdot 0{,}137\cdot e^{j90^o}} = 0{,}3\cdot e^{-j144^o}.$$

Так как $\frac{F_1(p_1)}{p_1 F_3'(p_1)} = A \cdot e^{j\alpha}$, а $\frac{F_1(p_2)}{p_1 F_3'(p_2)} = A \cdot e^{-j\alpha}$, то

$$i_1(t) = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + Ae^{j\alpha} e^{-\delta t} e^{j\omega_0 t} + Ae^{-j\alpha} e^{-\delta t} e^{-j\omega_0 t} = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} +$$

$$+ Ae^{-\delta t} [\, e^{-j(\omega_0 t + \alpha)} + e^{j(\omega_0 t + \alpha)} \,] = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + Ae^{-\delta t} \cdot 2\cos(\omega_0 t + \alpha) =$$

$$= \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + Ae^{-\delta t} \cdot 2\sin(\omega_0 t + \alpha + \frac{\pi}{2}) = 1 + 2 \cdot 0{,}3 e^{-437{,}5t} \cos(428t - 144{,}6^0) =$$

$$1 + 0{,}6 e^{-437{,}5t} \sin(428t - 54{,}6^0) = 1 - 0{,}6 e^{-437{,}5t} \sin(428t + 125{,}4^0)\ A.$$

ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИМ РАБОТАМ

ЗДАНИЯ К РАСЧЕТНОЙ РАБОТЕ № 1 *«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА»*

Для заданной электрической схемы (рисунки 1-12):

1. Выбрать положительные направления токов в ветвях и составить систему уравнений по законам Кирхгофа.
2. Определить токи методом контурных токов и методом узловых потенциалов (напряжений).
3. Определить указанный в задании ток методом эквивалентного генератора (активного двухполюсника).
4. Результаты расчетов свести в таблицу и сравнить их.
5. Составить баланс мощностей.
6. Построить потенциальную диаграмму для контура, указанного в задании.

Примечание: Индекс тока в ветви принимать соответствующим индексу ЭДС (резистора).

Вариант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
№ схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Строка табл.1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1
Строка табл.2	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2
для п.5	I_1	I_1	I_1	I_1	I_1	I_1	I_1	I_1	I_1	I_1	I_1	I_1
для п.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Вариант	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
№ схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Строка табл.1	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5
Строка табл.2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4
для п.5	I_2	I_2	I_2	I_2	I_2	I_2	I_2	I_2	I_2	I_2	I_3	I_2
для п.8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Вариант	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**
№ схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Строка табл.1	5	5	5	1	1	1	1	1	2	2	2	2
Строка табл.2	5	1	2	1	2	3	4	5	1	2	3	4
для п.5	I_3	I_3	I_3	I_3	I_3	I_3	I_4	I_4	I_4	I_4	I_4	I_4
для п.8	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2

Вариант	**37**	**38**	**39**	**40**	**41**	**42**	**43**	**44**	**45**	**46**	**47**	**48**
№ схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Строка табл.1	2	3	4	5	5	5	5	5	1	1	1	1
Строка табл.2	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	2	3
для п.5	I_4	I_4	I_4	I_4	I_4	I_4	I_4	I_4	I_4	I_4	I_4	I_4
для п.8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Вариант	**49**	**50**	**51**	**52**	**53**	**54**	**55**	**56**	**57**	**58**	**59**	**60**
№ схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Строка табл.1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Строка табл.2	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3
для п.5	I_5	I_5	I_5	I_5	I_5	I_5	I_5	I_5	I_5	I_5	I_5	I_5
для п.8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Вариант	**61**	**62**	**63**	**64**	**65**	**66**	**67**	**68**	**69**	**70**	**71**	**72**
№ схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Строка табл.1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Строка табл.2	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
для п.5	I_6	I_6	I_6	I_6	I_6	I_6	I_6	I_6	I_6	I_6	I_6	I_6
для п.8	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Вариант	**73**	**74**	**75**	**76**	**77**	**78**	**79**	**80**	**81**	**82**	**83**	**84**
№ схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Строка табл.1	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5
Строка табл.2	3	4	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5
для п.5	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
для п.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Вариант	**85**	**86**	**87**	**88**	**89**	**90**	**91**	**92**	**93**	**94**	**95**	**96**
№ схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Строка табл.1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
Строка табл.2	2	3	4	5	1	1	2	3	4	5	2	3
для п.5	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
для п.8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Таблица *1* – Значения ЭДС

№ строки	ЭДС					
	E_1, В	E_2 В	E_3 В	E_4 В	E_5 В	E_6 В
1	40	50	60	80	100	120
2	50	60	80	100	120	40
3	60	80	100	120	40	50
4	120	40	50	60	80	100
5	120	40	50	60	80	100

Таблица 2 – Значения сопротивлений

№ строки	Резистор					
	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	R_4, Ом	R_5, Ом	R_6, Ом
1	4	5	6	8	10	12
2	5	6	8	10	12	10
3	6	8	10	6	12	8
4	8	10	4	5	8	12
5	4	6	10	8	10	12

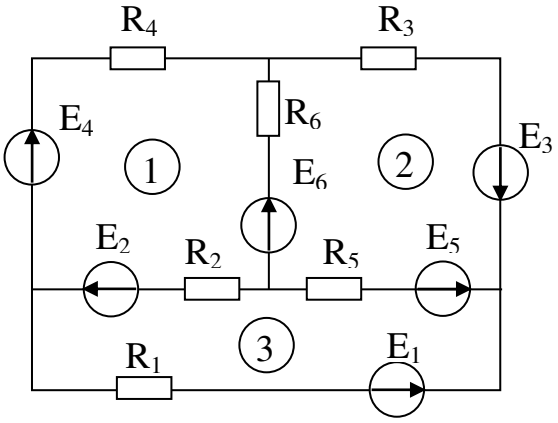


Рисунок1

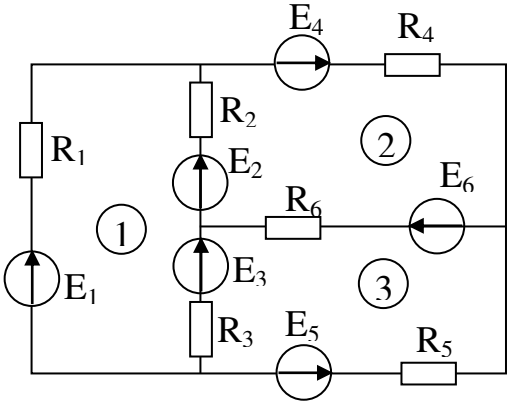


Рисунок 2

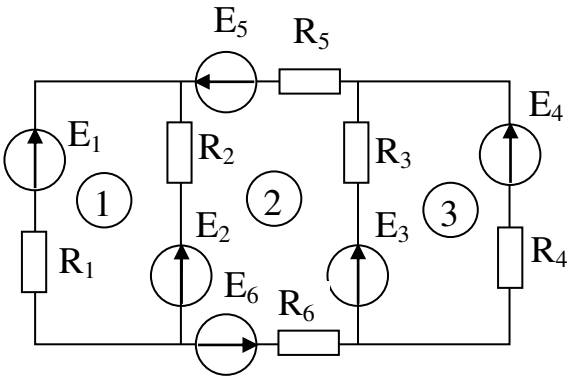


Рисунок 3

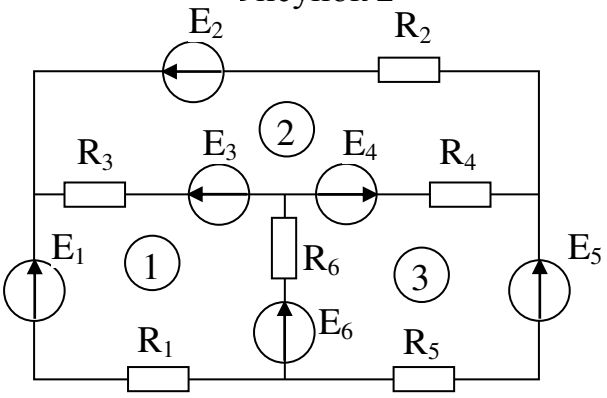


Рисунок 4

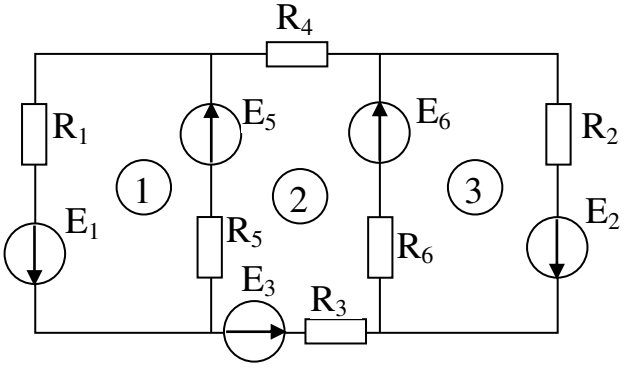


Рисунок 5

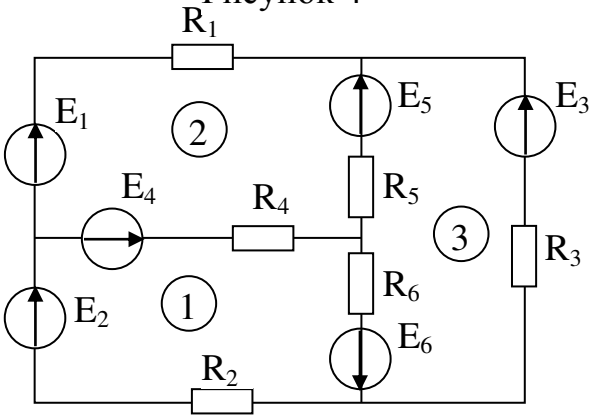


Рисунок 6

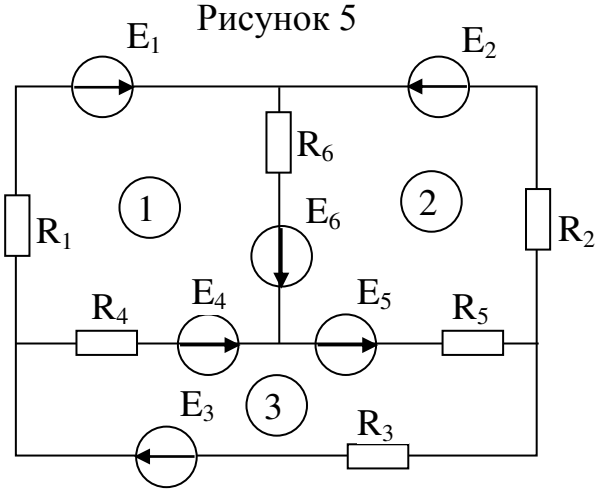


Рисунок 7

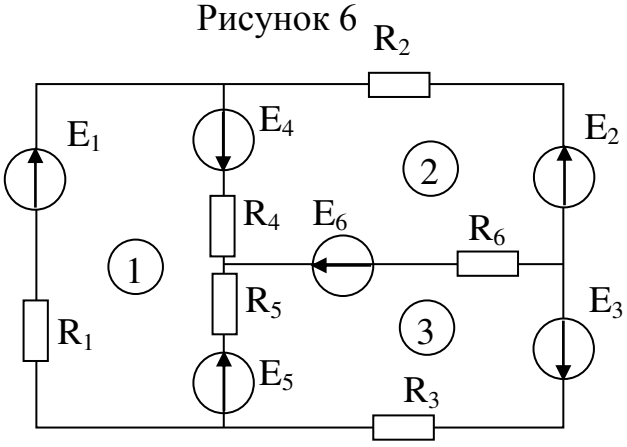


Рисунок 8

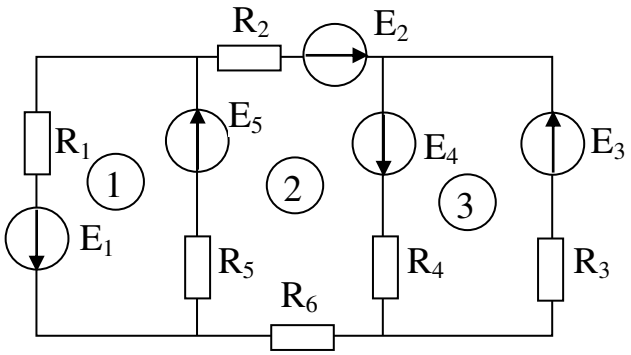


Рисунок 9

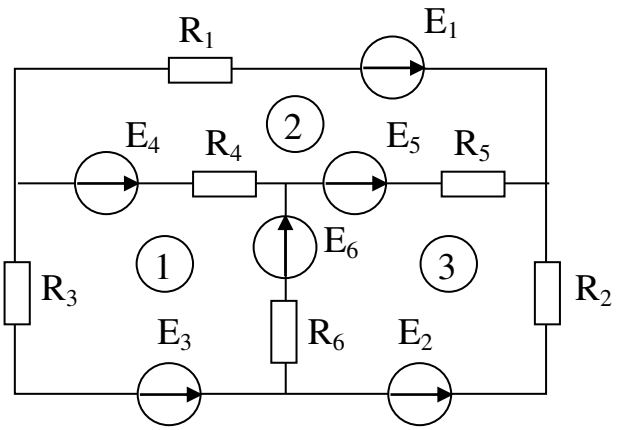


Рисунок 10

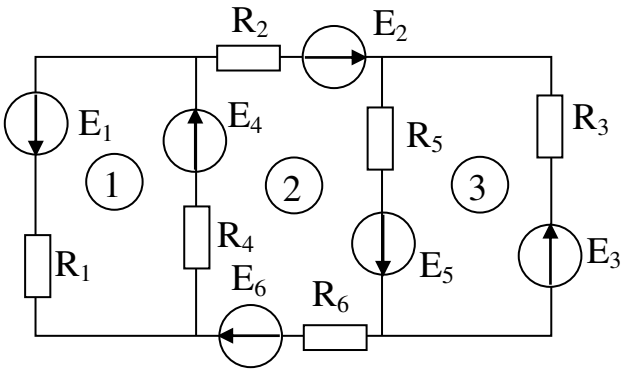


Рисунок 11

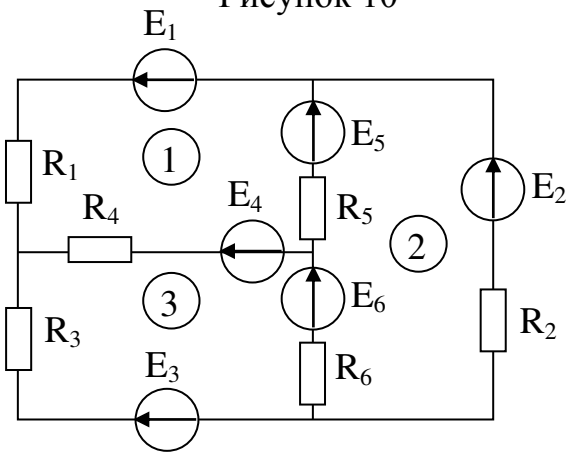


Рисунок 12

ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНОЙ РАБОТЕ № 2 *«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА»*

1. Для заданной электрической цепи составить системы уравнений по законам Кирхгофа в 2-х формах: дифференциальной и символической.
2. Рассчитать и записать сопротивления и проводимости ветвей в символической форме.
3. Начертить заданную схему с изображением всех параметров, ЭДС и токов в символической форме.
4. Определить комплексы действующих значений токов в ветвях двумя методами: методом контурных токов и методом двух узлов.
5. Определить ток в ветви с переменным параметром L_1 методом активного двухполюсника.
6. Значения всех токов, определенных разными методами, занести в таблицу и сравнить их.
7. Определить показание ваттметра, включенного, как показано на рисунке.
8. Построить топографическую диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов.
9. Составить систему уравнений по законам Кирхгофа в дифференциальной и символической формах с учётом магнитной связи между катушками индуктивности (начало обмоток выбирать произвольно).

Вариант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Рисунок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Строка табл.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Строка табл.2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2
Переменный параметр	R_1	R_2	R_3	L_1	L_2	L_3	R_1	R_2	R_3	C_1	C_3	C_2

Вариант	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
Рисунок	13	14	15	16	1	2	3	4	5	6	7	8
Строка табл.1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3
Строка табл.2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4
Переменный параметр	L_1	L_3	L_2	R_1	R_2	R_3	R_1	C_2	L_1	C_1	R_2	R_3

Вариант	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**
Рисунок	9	10	11	12	13	14	1	2	3	4	5	6
Строка табл.1	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4
Строка табл.2	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6
Переменный параметр	R_2	L_2	L_1	L_2	C_2	L_1	C_1	R_2	R_3	R_1	R_2	L_3

Вариант	**37**	**38**	**39**	**40**	**41**	**42**	**43**	**44**	**45**	**46**	**47**	**48**
Рисунок	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2
Строка табл.1	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5
Строка табл.2	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8
Переменный параметр	C_3	L_2	R_3	R_1	R_1	L_3	L_2	L_1	L_3	C_2	L_3	R_3

Вариант	**49**	**50**	**51**	**52**	**53**	**54**	**55**	**56**	**57**	**58**	**59**	**60**
Рисунок	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Строка табл.1	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Строка табл.2	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Переменный параметр	L_1	L_1	C_1	R_1	R_1	R_3	L_1	C_3	C_1	R_3	R_2	R_1

Вариант	**61**	**62**	**63**	**64**	**65**	**66**	**67**	**68**	**69**	**70**	**71**	**72**
Рисунок	13	14	15	16	1	2	3	4	5	6	7	8
Строка табл.1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8
Строка табл.2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2
Переменный параметр	R_3	R_2	R_1	L_1	C_2	L_2	L_2	R_2	R_2	R_1	L_3	L_2

Вариант	**73**	**74**	**75**	**76**	**77**	**78**	**79**	**80**	**81**	**82**	**83**	**84**
Рисунок	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	4
Строка табл.1	8	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9
Строка табл.2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4
Переменный параметр	L_3	R_2	R_1	R_3	R_2	R_1	R_3	L_2	L_3	C_3	L_3	R_3

Вариант	**85**	**86**	**87**	**88**	**89**	**90**	**91**	**92**	**93**	**94**	**95**	**96**
Рисунок	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Строка табл.1	9	9	9	9	9	9	10	10	10	10	10	10
Строка табл.2	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6
Переменный параметр	R_3	R_2	C_2	L_1	L_2	R_1	R_3	R_2	R_1	R_3	R_2	C_3

Таблица *1* – Значения ЭДС

№ строки	e_1, В	e_2, В	e_3, В
1	$100\sqrt{2}\sin(314t+30^0)$	$50\sqrt{2}\sin(314t-120^0)$	$120\sqrt{2}\sin(314t+90^0)$
2	$60\sqrt{2}\sin(314t+60^0)$	$80\sqrt{2}\sin(314t+120^0)$	$100\sqrt{2}\sin(314t-30^0)$
3	$120\sqrt{2}\sin(314t-120^0)$	$100\sqrt{2}\sin(314t-90^0)$	$50\sqrt{2}\sin(314t+60^0)$
4	$80\sqrt{2}\sin(314t+120^0)$	$60\sqrt{2}\sin(314t+30^0)$	$100\sqrt{2}\sin(314t-90^0)$
5	$50\sqrt{2}\sin(314t-30^0)$	$120\sqrt{2}\sin(314t+90^0)$	$80\sqrt{2}\sin(314t+150^0)$
6	$100\sqrt{2}\sin(314t-60^0)$	$100\sqrt{2}\sin(314t+60^0)$	$50\sqrt{2}\sin(314t+30^0)$
7	$80\sqrt{2}\sin(314t+150^0)$	$100\sqrt{2}\sin(314t+60^0)$	$60\sqrt{2}\sin(314t-30^0)$
8	$120\sqrt{2}\sin(314t+45^0)$	$80\sqrt{2}\sin(314t+120^0)$	$50\sqrt{2}\sin(314t-90^0)$
9	$50\sqrt{2}\sin(314t-45^0)$	$100\sqrt{2}\sin(314t+90^0)$	$80\sqrt{2}\sin(314t+120^0)$
10	$120\sqrt{2}\sin(314t+135^0)$	$80\sqrt{2}\sin(314t+45^0)$	$100\sqrt{2}\sin(314t+120^0)$

Таблица 2 – Значения параметров электрической цепи

№ строки	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	L1, мГн	L2, мГн	L3, мГн	C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ
1	20	30	40	95,5	159,2	127,2	159	127	78
2	30	25	20	127,2	63,6	95,5	64	159	127
3	40	20	30	159,2	95,5	63,6	127	78	64
4	25	30	40	79,6	159,2	95,5	78	64	159
5	40	20	25	63,6	159,2	95,5	127	64	78
6	30	25	40	79,6	63,6	159,2	159	64	78
7	40	20	30	159,2	95,5	63,6	64	127	159
8	20	25	30	63,6	159,2	79,6	78	159	64
9	30	40	25	127,2	79,6	159,2	159	78	127
10	25	20	30	63,6	95,5	63,6	127	64	78

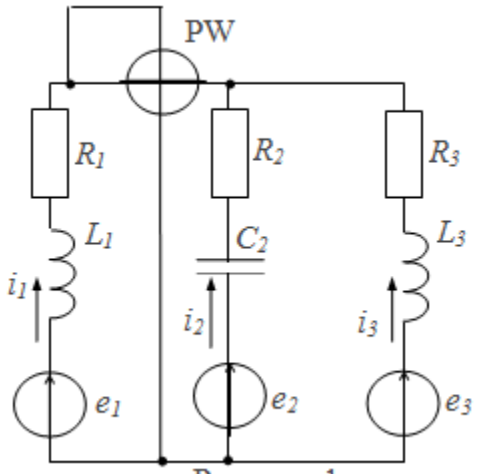


Рисунок 1

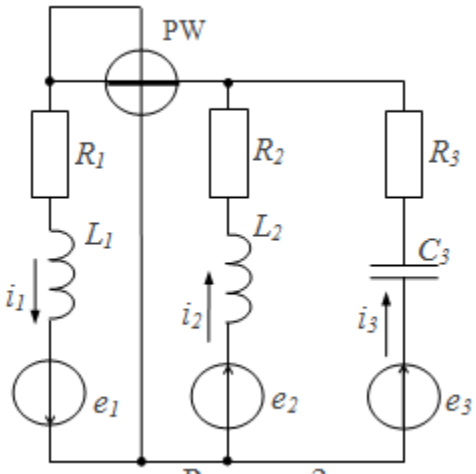


Рисунок 2

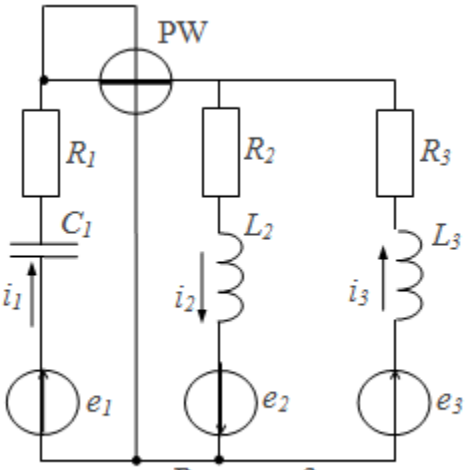


Рисунок 3

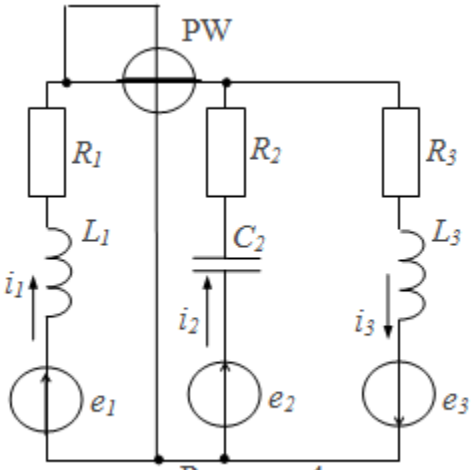


Рисунок 4

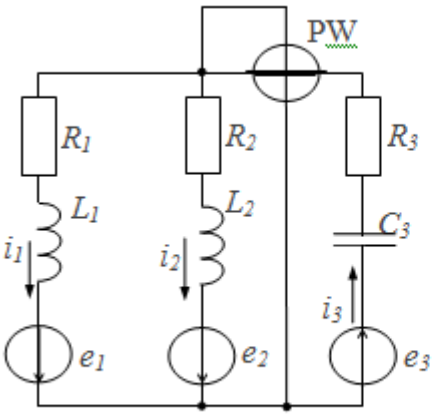


Рисунок 5

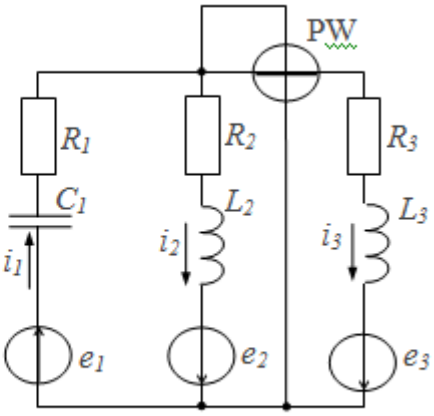


Рисунок 6

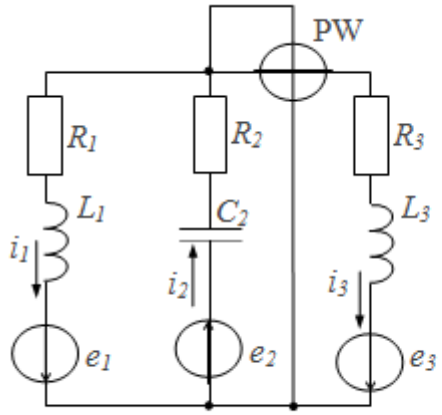


Рисунок 7

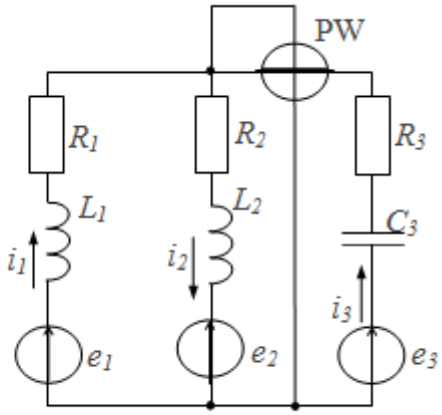


Рисунок 8

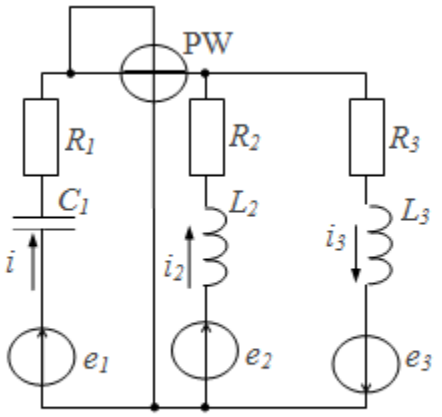


Рисунок 9

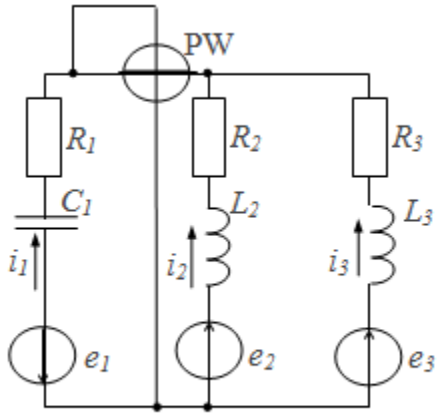


Рисунок 10

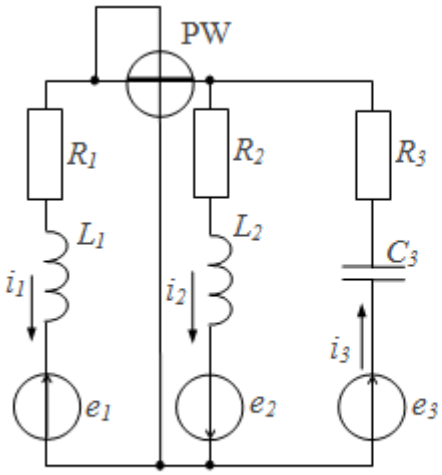


Рисунок 11

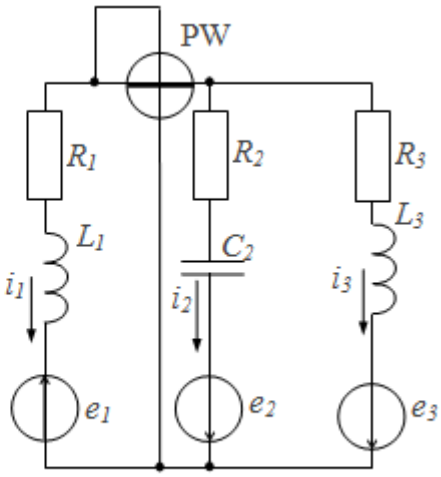


Рисунок 12

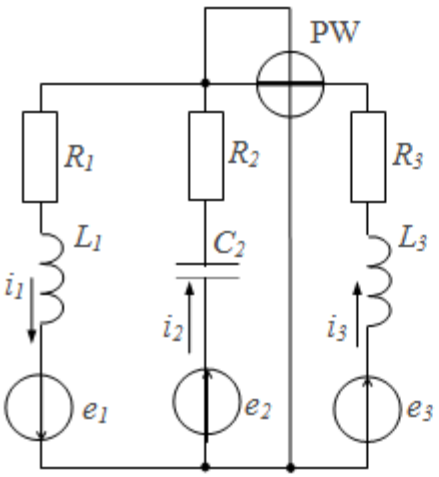


Рисунок 13

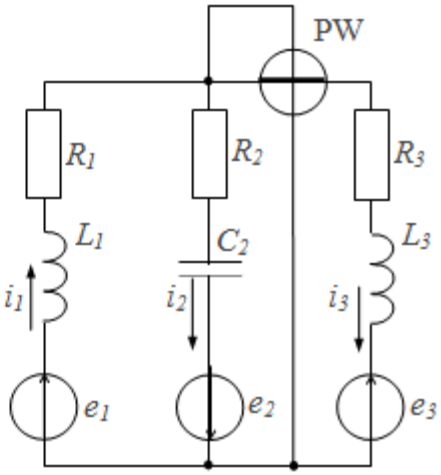


Рисунок 14

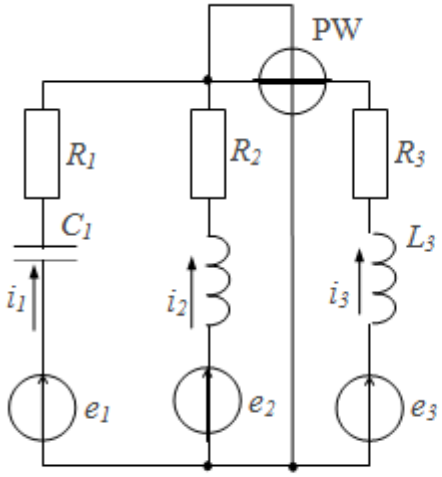


Рисунок 15

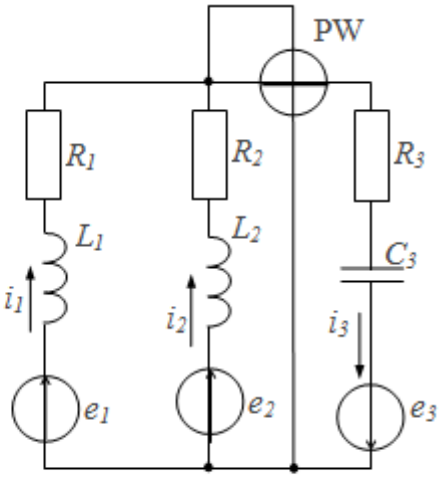
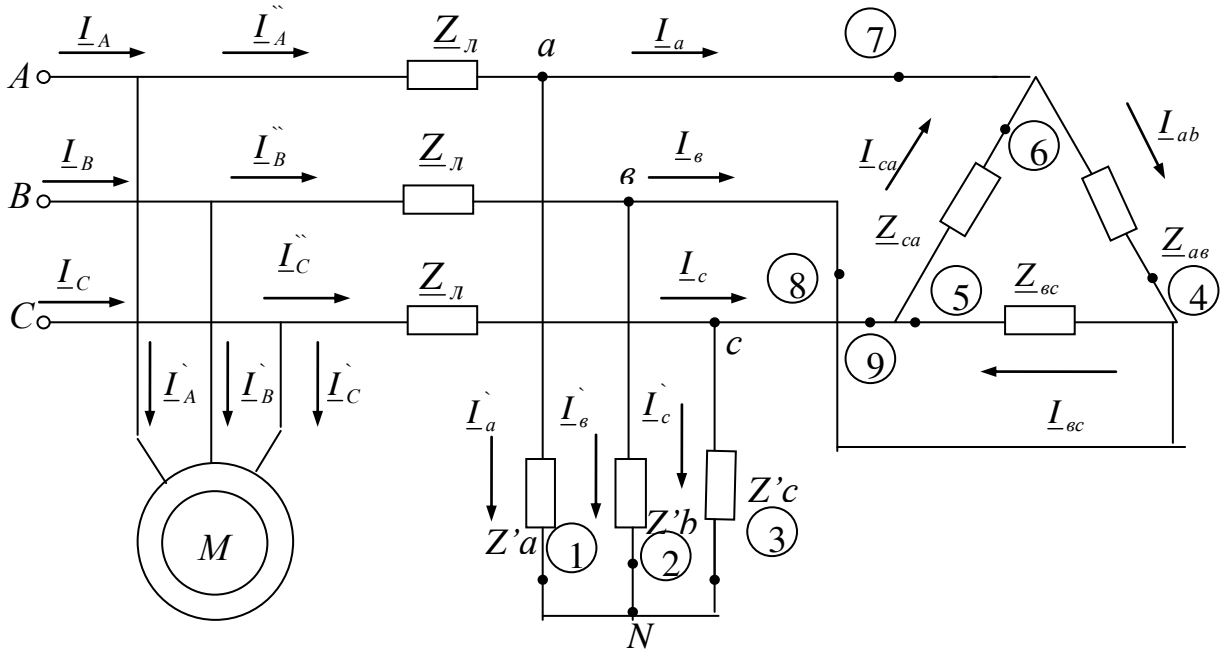


Рисунок 16

ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНОЙ РАБОТЕ № 3 *«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА»*

В начале трехфазной линии, подключенной к симметричной системе напряжений, включен трехфазный короткозамкнутый электродвигатель, а в конце – два приемника, как показано на рисунке.

Параметры линии и нагрузки приведены в таблице.



Требуется:

1. Выбрать схему соединения обмоток электродвигателя.
2. Определить фазные и линейные токи потребителей и ток в начале линии.
3. Определить КПД линии электропередачи.
4. Построить топографическую диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов.
5. Определить токи в начале линии при обрыве провода в указанной точке и разложить их аналитически и графически на симметричные составляющие.

Вариант / Исходные данные	1	2	3	4	5	6
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	27+j36	36+ j48	45+ j60	36+ j27	48+ j36	60+ j45
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	12+ j12	15+ j15	20+ j20	12- j12	15- j15	20- j20
$\underline{Z}_л$, Ом	4+ j6	2+ j3	2+ j4	2+ j5	2+ j6	3+ j4
$\underline{U}_ф$, В	$\underline{U}_A$ 127	$\underline{U}_A$ $127e^{-j30^o}$	$\underline{U}_A$ 220	$\underline{U}_A$ $220e^{-j30^o}$	-	-
$\underline{U}_л$, В	-	-	-	-	$\underline{U}_{AB}$ $220e^{j30^o}$	$\underline{U}_{AB}$ 220
U двигателя, В	220/127	220/127	380/220	380/220	380/220	380/220
P_2 на валу, кВт	1,0	1,0	1,2	1,2	1,7	1,7
cosφ	0,85	0,85	0,86	0,86	0,87	0,87
КПД двигателя	0,8	0,8	0,8	0,8	0,81	0,89
Точка обрыва	1	2	3	4	5	6

Вариант / Исходные данные	7	8	9	10	11	12
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	27- j48	36- j48	45- j60	36+ j48	45+ j60	36+ j27
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	18+ j18	16- j16	18- j18	20+ j20	12- j12	15- j15
$\underline{Z}_л$, Ом	3+ j5	3+ j6	3+ j4	2+ j4	4+ j3	2+ j5
$\underline{U}_ф$, В	-	-	$\underline{U}_B$ $127e^{-j120^o}$	$\underline{U}_C$ j127	$\underline{U}_B$ $220e^{-j120^o}$	$\underline{U}_C$ j220
$\underline{U}_л$, В	$\underline{U}_{AB}$ $380e^{j30^o}$	$\underline{U}_{AB}$ 380	-	-	-	-
U двигателя, В	380/220	380/220	220/127	220/127	380/220	380/220
P_2 на валу, кВт	2,8	2,8	0,6	0,6	1,0	1,0
cosφ	0,88	0,88	0,84	0,84	0,85	0,85
КПД двигателя	0,89	0,81	0,78	0,78	0,8	0,8
Точка обрыва	7	8	9	1	2	3

Вариант / Исходные данные	13	14	15	16	17	18
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	48+ j36	60+ j45	27- j36	36- j48	45- j60	27+ j36
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	20- j20	18+ j18	16- j16	18- j18	12+ j12	20+ j20
$\underline{Z}_л$, Ом	2+ j6	3+ j4	3+ j5	3+ j6	3+ j4	4+ j6
$\underline{U}_ф$, В	-	-	-	-	$\underline{U}_C$ J127	$\underline{U}_B$ $127e^{-j120^o}$
$\underline{U}_л$, В	$\underline{U}_{BC}$ -j220	$\underline{U}_{BC}$ $220e^{-j120^o}$	$\underline{U}_{BC}$ -j380	$\underline{U}_{BC}$ $380e^{-j120^o}$	-	-
U двигателя, В	220/127	220/127	380/220	380/220	380/220	380/220
P_2 на валу, кВт	0,6	0,6	4,5	4,5	1,2	1,2
cosφ	0,84	0,84	0,89	0,89	0,85	0,85
КПД двигателя	0,78	0,78	0,90	0,90	0,81	0,81
Точка обрыва	4	5	6	7	8	9

Вариант / Исходные данные	19	20	21	22	23	24
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	45+ j60	36+ j27	48+ j36	48+ j36	27-j36	36- j48
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	15- j15	20- j20	18+ j18	16+ j16	13+ j13	15+ j15
$\underline{Z}_л$, Ом	2+ j3	2+ j4	2+ j5	2+ j6	3+ j4	3+ j5
$\underline{U}_ф$, В	$\underline{U}_C$ j220	$\underline{U}_B$ $220e^{-j120^o}$	-	-	-	-
$\underline{U}_л$, В	-	-	$\underline{U}_{CA}$ 220	$\underline{U}_{CA}$ $220e^{j120^o}$	$\underline{U}_{CA}$ $380e^{j120^o}$	$\underline{U}_{CA}$ $380e^{j150^o}$
U двигателя, В	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220
P_2 на валу, кВт	2,8	2,8	4,5	4,5	4,5	1,7
cosφ	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,89
КПД двигателя	0,87	0,87	0,89	0,89	0,79	0,80
Точка обрыва	1	2	3	4	5	6

Вариант / Исходные данные	25	26	27	28	29	30
1	2	3	4	5	6	7
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	45- j60	27+ j 36	36+ j47	45+ j60	36+ j27	48+ j36
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	16+ j16	20- j20	12- j12	20- j20	18+ j18	16- j16
$\underline{Z}_л$, Ом	3+ j6	3+ j5	3+ j4	2+ j3	2+ j4	2+ j5
$\underline{U}_ф$, В	$\underline{U}_A$ $127e^{-j30^o}$	$\underline{U}_A$ 127	$\underline{U}_A$ $220e^{-j30^o}$	$\underline{U}_A$ 220	-	-
$\underline{U}_л$, В	-	-	-	-	$\underline{U}_{AB}$ 220	$\underline{U}_{AB}$ $220e^{j30^o}$
U двигателя, В	220/127	220/127	380/220	380/220	380/220	380/220
P_2 на валу, кВт	1,7	1,7	1,7	2,8	2,8	2,8
cosφ	0,89	0,85	0,86	0,82	0,84	0,81
1	2	3	4	5	6	7
КПД двигателя	0,85	0,86	0,80	0,78	0,86	0,86
Точка обрыва	7	8	9	1	2	3

Вариант / Исходные данные	31	32	33	34	35	36
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	60+ j45	27- j36	36- j48	40- j30	27+ j36	36+ j48
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	18- j18	12+ j12	15+ j15	20+ j20	12- j12	15- j15
$\underline{Z}_л$, Ом	2+ j6	2+ j3	3+ j4	3+ j5	2+ j4	2+ j3
$\underline{U}_ф$, В	-	-	$\underline{U}_A$ $127e^{-j120^o}$	$\underline{U}_B$ $127e^{-j150^o}$	$\underline{U}_B$ $220e^{-j120^o}$	$\underline{U}_B$ $220e^{-j150^o}$
$\underline{U}_л$, В	$\underline{U}_{AB}$ 380	$\underline{U}_{AB}$ $380e^{j30^o}$	-	-	-	-
U двигателя, В	380/220	380/220	220/127	220/127	380/220	380/220
P_2 на валу, кВт	2,8	2	2	1,0	1,0	1,2
cosφ	0,83	0,85	0,88	0,85	0,80	0,88
КПД двигателя	0,84	0,85	0,82	0,80	0,79	0,82
Точка обрыва	4	5	6	7	8	9

Вариант / Исходные данные	37	38	39	40	41	42
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	45+ j60	36+ j27	48+ j36	30+ j30	27+ j36	36+ j48
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	20- j20	18+ j18	16+ j16	60+ j45	12- j12	15- j15
$\underline{Z}_л$, Ом	3+ j5	2+ j3	2+ j4	2+ j5	2+ j3	2+ j4
$\underline{U}_ф$, В	-	-	-	-	$\underline{U}_C$ $127e^{j120^o}$	$\underline{U}_C$ j127
$\underline{U}_л$, В	$\underline{U}_{BC}$ -j220	$\underline{U}_{BC}$ $220e^{-j120^o}$	$\underline{U}_{BC}$ -j380	$\underline{U}_{BC}$ $380e^{-j150^o}$	-	-
U двигателя, В	$380/220$	$380/220$	$380/220$	$380/220$	$380/220$	$380/220$
P_2 на валу, кВт	1,7	1,2	1,7	2,8	0,6	1,2
$\cos\varphi$	0,86	0,82	0,84	0,83	0,88	0,86
КПД двигателя	0,86	0,85	0,80	0,84	0,82	0,84
Точка обрыва	1	2	3	4	5	6

Вариант / Исходные данные	43	44	45	46	47	48
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	45- j60	36- j48	27- j36	48+ j36	60+ j45	37- j36
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	20- j20	12- j12	15- j15	10+ j10	10+ j10	20+ j20
$\underline{Z}_л$, Ом	2+ j5	3+ j4	3+ j5	2+ j3	2+ j4	2+ j5
$\underline{U}_ф$, В	$\underline{U}_C$ $220e^{j120^o}$	$\underline{U}_C$ j220	-	-	-	-
$\underline{U}_л$, В	-	-	$\underline{U}_{CA}$ $220e^{j150^o}$	$\underline{U}_{CA}$ $220e^{j120^o}$	$\underline{U}_{CA}$ $220e^{j150^o}$	$\underline{U}_{CA}$ $380e^{j120^o}$
U двигателя, В	$380/220$	$380/220$	$380/220$	$380/220$	$220/127$	$380/220$
P_2 на валу, кВт	1,7	1,2	1,2	2,8	2,8	1,7
$\cos\varphi$	0,85	0,84	0,86	0,84	0,88	0,81
КПД двигателя	0,80	0,86	0,82	0,80	0,79	0,83
Точка обрыва	7	8	9	1	2	3

Вариант / Исходные данные	49	50	51	52	53	54
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	36- j48	27+ j36	27+ j36	36+ j48	45+ j60	36+ j27
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	18+ j18	12- j12	10- j10	15+ j15	20- j20	15- j15
$\underline{Z}_л$, Ом	3+ j4	2+ j4	4+ j3	3+ j5	2+ j3	4+ j5
$\underline{U}_ф$, В	$\underline{U}_A$ $127e^{-j30^o}$	$\underline{U}_A$ 127	$\underline{U}_A$ $220e^{-j30^o}$	$\underline{U}_A$ 220	-	-
$\underline{U}_л$, В	-	-	-	-	$\underline{U}_{AB}$ 220	$\underline{U}_{AB}$ $220e^{j30^o}$
U двигателя, В	$220/127$	$380/220$	$380/220$	$380/220$	$220/127$	$380/220$
P_2 на валу, кВт	1,5	1,0	2,5	1,2	1,7	2,0
cosφ	0,87	0,86	0,81	0,85	0,82	0,88
КПД двигателя	0,85	0,80	0,81	0,84	0,83	0,80
Точка обрыва	4	5	6	7	8	9

Вариант / Исходные данные	55	56	57	58	59	60
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	48+ j36	60+ j45	27- j36	36- j48	45- j60	54+ j72
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	10+ j10	12+ j12	15- j15	20+ j20	25- j25	10- j10
$\underline{Z}_л$, Ом	3+ j5	2+ j5	3+ j4	3+ j5	3+ j4	2+ j4
$\underline{U}_ф$, В	-	-	$\underline{U}_B$ $127e^{j120^o}$	$\underline{U}_B$ $127e^{-j150^o}$	$\underline{U}_B$ $220e^{-j120^o}$	$\underline{U}_B$ $220e^{-j150^o}$
$\underline{U}_л$, В	$\underline{U}_{AB}$ $380e^{j30^o}$	$\underline{U}_{AB}$ 380	-	-	-	-
U двигателя, В	$380/220$	$380/220$	$380/220$	$380/220$	$380/220$	$380/220$
P_2 на валу, кВт	1,6	2,8	2,5	2,4	1,7	4,5
cosφ	0,87	0,88	0,83	0,84	0,86	0,88
КПД двигателя	0,83	0,81	0,80	0,80	0,82	0,84
Точка обрыва	1	2	3	4	5	6

Вариант / Исходные данные	61	62	63	64	65	66
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	54- j72	54+ j72	72+ j54	54- j72	45- j60	36+ j48
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	15+ j15	12- j12	24- j24	18+ j18	30+ j30	10- j10
$\underline{Z}_л$, Ом	2+ j3	3+ j5	2+ j4	3+ j4	3+ j5	2+ j4
$\underline{U}_ф$, В	-	-	-	-	$\underline{U}_C$ $127e^{j135^o}$	$\underline{U}_C$ j127
$\underline{U}_л$, В	$\underline{U}_{BC}$ -j220	$\underline{U}_{BC}$ $220e^{-j120^o}$	$\underline{U}_{BC}$ -j380	$\underline{U}_{BC}$ $380e^{-j150^o}$	-	-
U двигателя, В	380/220	380/220	380/220	380/220	220/127	220/127
P_2 на валу, кВт	3,0	3,2	4,0	4,5	2,8	2,4
Cosφ	0,85	0,83	0,82	0,83	0,81	0,86
КПД двигателя	0,81	0,80	0,85	0,84	0,82	0,81
Точка обрыва	7	8	9	1	2	3

Вариант / Исходные данные	67	68	69	70	71	72
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	72- j54	54+ j72	27+ j36	36+ j48	54+ j72	54- j72
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	20+ j20	10- j10	15+ j15	18+ j18	16+ j16	10+ j10
$\underline{Z}_л$, Ом	3+ j5	3+ j6	3+ j4	2+ j3	2+ j4	2+ j5
$\underline{U}_ф$, В	$\underline{U}_C$ $220e^{j120^o}$	$\underline{U}_C$ j220	-	-	-	-
$\underline{U}_л$, В	-	-	$\underline{U}_{CA}$ $220e^{j150^o}$	$\underline{U}_{CA}$ $220e^{j120^o}$	$\underline{U}_{CA}$ $220e^{j150^o}$	$\underline{U}_{CA}$ $380e^{j120^o}$
U двигателя, В	380/220	380/220	380/220	220/127	380/220	380/220
P_2 на валу, кВт	2,8	1,7	1,5	1,2	1,4	1,2
cosφ	0,89	0,86	0,80	0,86	0,84	0,85
КПД двигателя	0,81	0,82	0,83	0,84	0,80	0,85
Точка обрыва	4	5	6	7	8	9

Вариант / Исходные данные	73	74	75	76	77	78
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	72+ j54	72- j54	54+ j72	54- j72	27+ j36	27+ j36
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	20- j20	18+ j18	15+ j15	16+ j18	20+ j20	16- j16
$\underline{Z}_л$, Ом	2+ j6	3+ j4	3+ j4	3+ j5	2+ j4	3+ j4
$\underline{U}_ф$, В	$\underline{U}_A$ 127	$\underline{U}_A$ $127e^{-j30^o}$	$\underline{U}_A$ 220	$\underline{U}_A$ $220e^{-j30^o}$	-	-
$\underline{U}_л$, В	-	-	-	-	$\underline{U}_{AB}$ $220e^{j30^o}$	$\underline{U}_{AB}$ 220
U двигателя, В	220/127	220/127	380/220	380/220	220/127	220/127
P_2 на валу, кВт	1,0	1,7	2,5	3,0	3,5	1,0
cosφ	0,89	0,88	0,87	0,84	0,83	0,82
КПД двигателя	0,84	0,82	0,81	0,83	0,82	0,79
Точка обрыва	1	2	3	4	5	6

Вариант / Исходные данные	79	80	81	82	83	84
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	12+ j54	72+ j54	27+ j36	36+ j48	45+ j60	54+ j72
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	20- j20	20+ j20	10+ j10	12- j12	12+ j12	16+ j16
$\underline{Z}_л$, Ом	3+ j5	2+ j4	2+ j6	3+ j6	3+ j4	2+ j5
$\underline{U}_ф$, В	-	-	$\underline{U}_B$ $127e^{j120^o}$	$\underline{U}_B$ $127e^{-j150^o}$	$\underline{U}_B$ $220e^{-j120^o}$	$\underline{U}_B$ $220e^{-j150^o}$
$\underline{U}_л$, В	$\underline{U}_{AB}$ $380e^{j30^o}$	$\underline{U}_{AB}$ 380	-	-	-	-
U двигателя, В	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220
P_2 на валу, кВт	1,7	2,4	4,5	3,6	2,4	3,2
cosφ	0,89	0,84	0,86	0,82	0,80	0,84
КПД двигателя	0,84	0,81	0,85	0,82	0,81	0,79
Точка обрыва	7	8	9	1	2	3

Вариант / Исходные данные	85	86	87	88	89	90
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	36+ j27	48+ j36	60+ j45	45- j60	27- j36	30- j48
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	18+ j18	15- j15	16- j16	12+ j12	8+ j8	10+ j10
$\underline{Z}_л$, Ом	3+ j6	4+ j5	2+ j3	4+ j6	2+ j4	2+ j5
$\underline{U}_ф$, В	-	-	-	-	$\underline{U}_C$ $127e^{j150^o}$	$\underline{U}_C$ j127
$\underline{U}_л$, В	$\underline{U}_{BC}$ -j220	$\underline{U}_{BC}$ $220e^{-j120^o}$	$\underline{U}_{BC}$ -j380	$\underline{U}_{BC}$ $380e^{-j120^o}$	-	-
U двигателя, В	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220
P_2 на валу, кВт	4,0	2,0	1,8	3,4	1,0	0,8
cosφ	0,81	0,88	0,86	0,85	0,88	0,89
КПД двигателя	0,83	0,85	0,81	0,84	0,78	0,81
Точка обрыва	4	5	6	7	8	9

Вариант / Исходные данные	91	92	93	94	95	96
$\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$, Ом	24+ j36	36+ j24	30+ j36	36+ j30	24- j36	36- j24
$\underline{Z'}_a$, $\underline{Z'}_b$, $\underline{Z'}_c$, Ом	15- j15	18+ j18	9- j9	8- j8	20+ j20	10- j10
$\underline{Z}_л$, Ом	2+ j3	3+ j6	3+ j4	3+ j5	2+ j6	2+ j4
$\underline{U}_ф$, В	$\underline{U}_C$ $220e^{j120^o}$	$\underline{U}_C$ j220	-	-	-	-
$\underline{U}_л$, В	-	-	$\underline{U}_{CA}$ $220e^{j150^o}$	$\underline{U}_{CA}$ $220e^{j120^o}$	$\underline{U}_{CA}$ $380e^{j120^o}$	$\underline{U}_{CA}$ $380e^{j150^o}$
U двигателя, В	380/220	380/220	380/220	220/127	380/220	380/220
P_2 на валу, кВт	1,2	2,0	2,4	3,0	1,8	3,5
cosφ	0,82	0,84	0,86	0,84	0,82	0,81
КПД двигателя	0,79	0,84	0,85	0,80	0,78	0,79
Точка обрыва	1	2	3	4	5	6

ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНОЙ РАБОТЕ № 4 «*ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ*»

Определить закон изменения во времени тока после коммутации в указанной ветви или напряжения на заданном элементе схемы. Задачу решить двумя методами: классическим и операторным.

На основании полученного аналитического выражения построить график изменения искомой величины в функции времени на интервале от $t=0$ до $t = 4\tau_{max}$.

№ Варианта.	E, В	L, мГн	C, мкФ	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	R_4, Ом	Искомая величина	№ схемы
1	100	100	200	20	25	5	-	i_3	12
2	70	200	1000	15	20	-	-	i_2	11
3	100	100	200	5	3	-	-	i_3	13
4	120	10	100	10	20	25	30	i_1	10
5	120	10	20	10	4	20	20	i_3	14
6	60	10	100	10	20	30	30	i_3	9
7	100	10	100	20	30	10	40	i_1	15
8	120	10	100	40	40	20	20	i_2	8
9	60	5	10	8	12	10	-	i_1	16
10	30	100	1000	8	10	12	12	i_2	7
11	40	20	100	20	5	25	-	u_C	17
12	40	5	10	5	15	20	-	i_1	6
13	24	5	5	12	14	6	-	u_L	18
14	100	10	100	10	20	30	-	i_1	5
15	100	10	100	-	10	15	-	i_2	19
16	100	100	10	50	35	15	-	u_C	4
17	40	20	40	5	15	10	-	i_1	20
18	100	100	1000	13	5	7	3	i_3	3
19	120	100	1000	12	8	10	20	u_L	21
20	20	200	200	10	30	20	-	u_C	2
21	100	2	8	20	30	20	-	i_2	22
22	80	200	2,5	20	30	10	20	i_1	1
23	100	10	100	10	30	15	15	u_L	23
24	100	10	100	20	10	30	50	i_1	24
25	100	10	100	5	20	20	-	i_2	20
26	60	20	100	40	60	20	20	i_1	10
27	40	10	20	10	10	30	40	i_1	24

№ Вар.	E, В	L, мГн	C, мкФ	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	R_4, Ом	Искомая величина	№ схемы
28	60	400	5	10	20	20	10	i_1	1
29	60	100	1000	6	4	5	10	u_L	21
30	100	1000	1000	20	30	20	-	u_C	2
31	100	100	1000	20	5	25	-	i_2	11
32	50	10	10	20	25	19	15	u_L	23
33	36	2	8	-	4	18	-	i_2	19
34	50	10	100	2	3	5	-	i_3	3
35	120	10	100	40	20	10	-	i_2	22
36	50	100	1000	10	12,5	2,5	-	i_3	12
37	120	100	1000	20	40	20	-	u_C	4
38	50	10	5	12	13	-	-	i_1	13
39	100	50	1000	15	5	30	30	i_3	9
40	36	20	40	18	20	4	-	u_L	18
41	50	5	50	5	15	10	-	i_1	5
42	100	10	20	12	8	10	10	i_3	14
43	100	5	10	10	20	20	20	i_2	8
44	80	20	40	16	24	5	5	i_1	15
45	40	5	20	20	20	8	60	i_2	7
46	200	100	1000	20	5	25	-	u_C	17
47	25	10	1000	2	3	8	-	i_1	6
48	30	100	200	4	6	5	-	i_1	16
49	100	1000	1000	5	25	20	-	i_3	12
50	50	80	10	100	10	5	30	i_1	24
51	100	300	8	20	10	30	40	i_1	1
52	100	1000	1000	5	20	25	-	i_2	11
53	24	10	100	12	20	10	8	i_1	10
54	20	20	40	6	14	-	-	i_1	13
55	50	10	100	40	25	30	30	u_L	23
56	50	10	100	15	5	25	5	i_3	9
57	40	5	10	8	12	2,5	2,5	i_1	15
58	30	1000	1000	5	10	10	-	u_C	2
59	80	20	40	10	30	20	-	i_2	22
60	30	20	100	10	20	6	-	i_3	3
61	45	200	1000	15	30	12	-	u_L	18
62	80	100	1000	40	20	20	-	i_1	6
63	30	10	20	6	4	5	10	u_L	21
64	30	10	50	5	10	5	-	u_C	4
65	48	4	10	-	6	14	-	i_2	19
66	120	10	100	20	20	12	40	i_2	7

№ Вар.	E, В	L, мГн	C, мкФ	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	R_4, Ом	Искомая величина	№ схемы
67	80	10	20	10	30	20	-	i_2	20
68	60	5	20	20	10	30	30	i_2	8
69	120	20	200	10	10	30	-	u_C	17
70	40	20	100	5	15	20	-	i_1	5
71	40	5	10	5	15	12	-	i_1	16
72	80	100	200	14	6	40	40	i_3	14
73	100	100	200	40	50	10	-	i_3	12
74	120	800	10	20	10	30	40	i_1	1
75	60	20	400	20	10	10	10	i_1	24
76	20	20	200	8	12	20	-	i_2	11
77	60	10	100	3	4	4	4	i_1	18
78	60	10	50	5	5	10	-	i_3	3
79	40	8	16	6	8	8	8	i_1	15
80	60	20	200	10	20	20	-	u_C	2
81	90	10	100	18	12	15	30	i_1	21
82	40	10	100	12	20	10	8	i_1	10
83	30	2	2	10	5	15	-	U_C	17
84	60	12	500	15	15	20	-	i_1	6
85	60	20	100	10	20	10	-	i_2	22
86	100	100	1000	50	25	25	-	u_C	4
87	60	20	400	20	10	10	10	u_L	23
88	60	10	200	20	10	30	-	i_1	5
89	24	10	100	-	12	8	-	i_2	19
90	120	100	1000	20	40	60	60	i_3	9
91	40	2	8	10	30	20	-	i_2	20
92	100	50	100	10	20	20	20	i_2	8
93	100	20	20	10	15	5	-	i_1	16
94	20	20	5	5	15	6	20	i_2	7
95	200	20	40	24	16	20	20	i_3	14
96	80	5	10	30	10	-	-	i_1	13
97	30	10	20	5	20	10	10	i_3	14
98	80	20	40	5	23	20	-	i_1	16
99	120	20	1000	20	40	60	-	i_1	5
100	80	20	100	20	12	8	-	u_C	17
101	40	10	100	8	12	12	20	i_2	8
102	120	10	100	15	45	30	-	i_2	20
103	50	20	40	10	10	8	5	i_2	7
104	50	20	1000	-	15	5	-	i_2	19
105	80	20	100	20	10	30	-	u_C	4

№ Вар.	E, В	L, мГн	C, мкФ	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	R_4, Ом	Искомая величина	№ схемы
106	120	100	1000	14	6	10	20	i_1	21
107	30	10	100	10	5	20	-	i_1	6
108	60	10	20	15	20	20	-	u_L	18
109	80	200	2000	30	12	10	-	i_3	3
110	50	100	1000	20	5	10	-	i_2	22
111	40	200	166,7	10	10	40	-	u_C	2
112	100	8	10	20	30	10	30	i_1	15
113	40	20	100	20	10	40	10	i_3	9
114	80	200	2,5	10	30	10	20	u_L	23
115	40	2	10	15	5	-	-	i_1	13
116	90	5	50	15	45	10	30	i_1	10
117	40	10	20	16	24	40	-	i_2	11
118	40	200	2,5	10	15	5	10	i_1	1
119	200	10	100	20	10	10	10	i_1	24
120	5	1000	1000	4	5	1	-	i_3	12
121	60	2	8	24	16	-	-	i_1	13
122	60	8	10	10	40	20	20	i_3	14
123	100	20	100	20	20	12	10	i_2	7
124	20	2	8	4	8	8	-	i_1	16
125	60	100	100	20	10	30	30	i_2	8
126	60	40	100	15	45	30	-	i_2	20
127	60	10	100	20	40	60	60	i_3	9
128	60	40	100	-	20	15	-	i_2	19
129	30	5	50	10	5	15	-	i_1	5
130	40	10	20	10	10	15	15	u_L	23
131	40	20	1000	10	15	5	-	u_C	4
132	40	10	50	12	8	10	-	i_2	22
133	100	5	20	35	15	20	-	i_1	6
134	50	8	10	10	15	25	-	u_C	17
135	80	20	1000	20	40	12	8	i_1	10
136	40	10	100	14	16	10	20	u_L	21
137	80	166,7	50	10	30	20	-	u_C	2
138	100	8	10	20	30	10	30	i_1	15
139	40	100	1000	30	10	10	-	i_3	3
140	80	100	1000	16	30	20	-	u_L	18
141	40	20	1000	10	15	5	-	u_C	4
142	30	2	10	20	20	5	5	i_1	24
143	80	100	4	10	20	5	15	i_1	1
144	80	100	200	12	20	8	-	i_3	12

№ Вар.	E, В	L, мГн	C, мкФ	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	R_4, Ом	Искомая величина	№ схемы
145	30	5	50	10	5	15	-	i_1	5
146	40	5	10	8	12	2,5	2,5	i_1	15
147	100	5	20	35	15	20	-	i_1	6
148	100	20	20	10	15	5	-	i_1	16
149	50	20	40	40	10	8	5	i_2	7
150	40	20	100	20	12	8	-	u_C	17

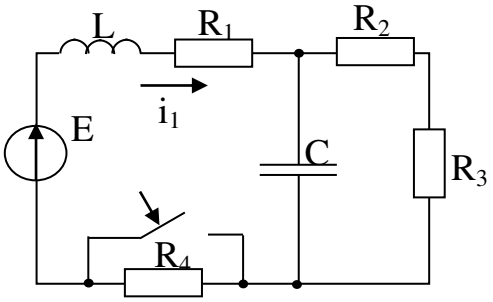


Рисунок 1

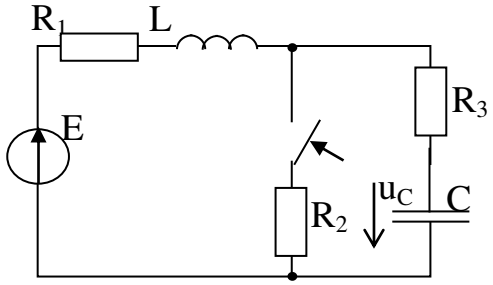


Рисунок 2

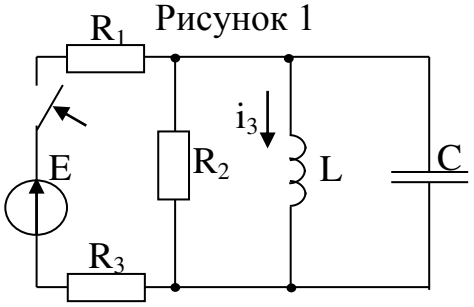


Рисунок 3

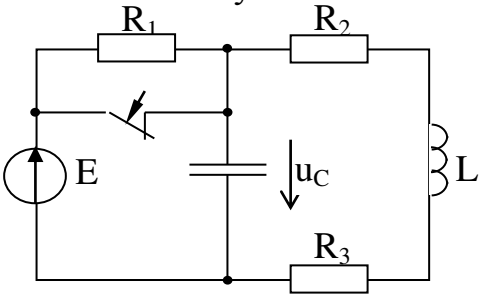


Рисунок 4

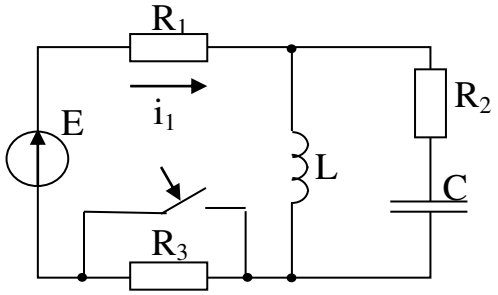


Рисунок 5

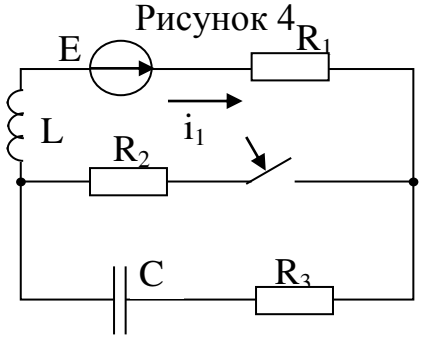


Рисунок 6

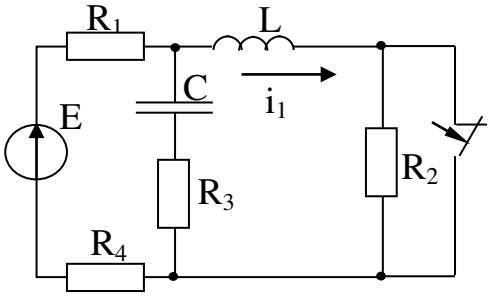


Рисунок 7

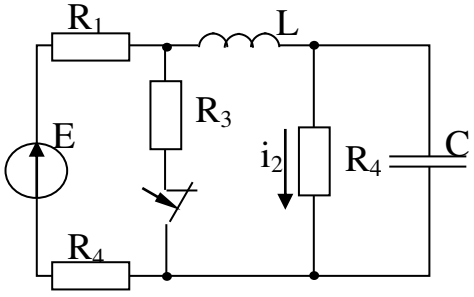


Рисунок 8

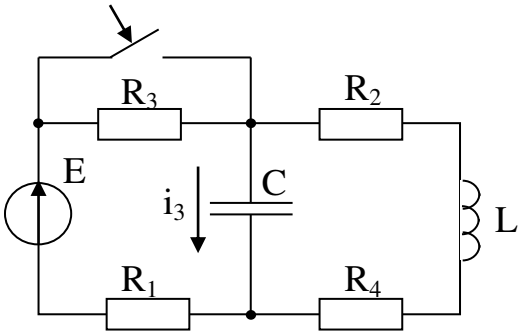


Рисунок 9

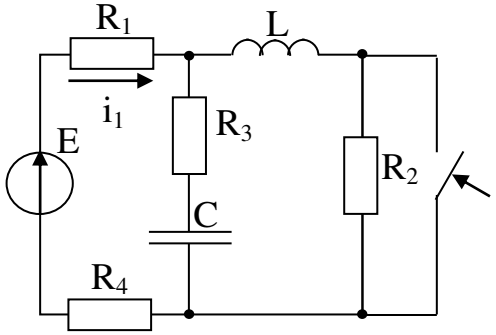


Рисунок10

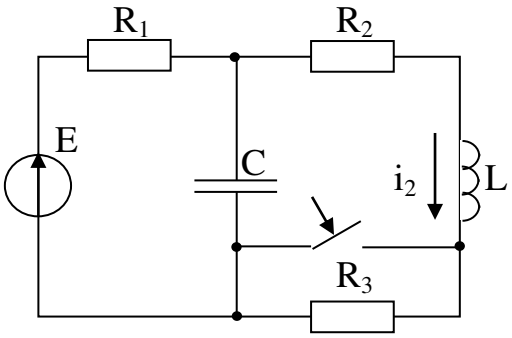


Рисунок11

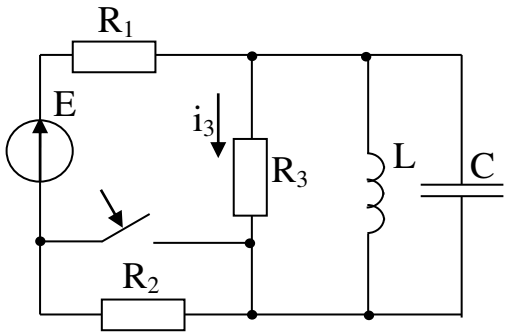


Рисунок12

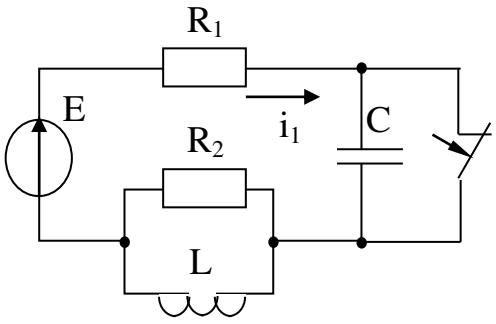


Рисунок13

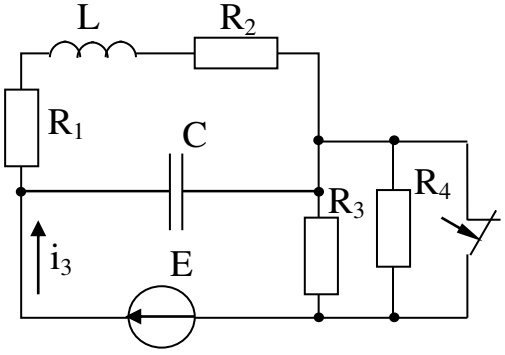


Рисунок14

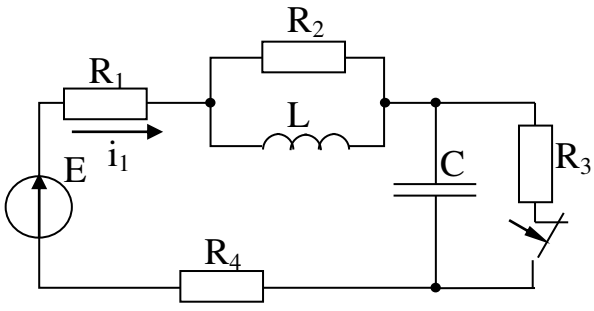


Рисунок15

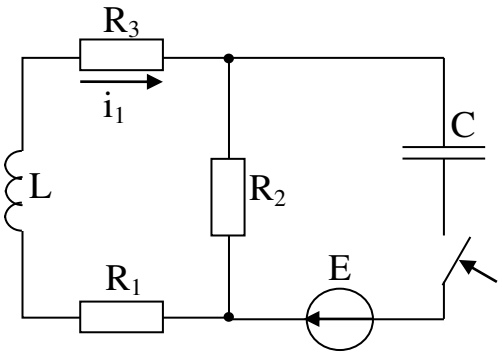


Рисунок16

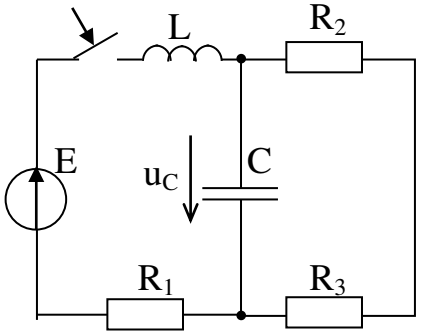


Рисунок17

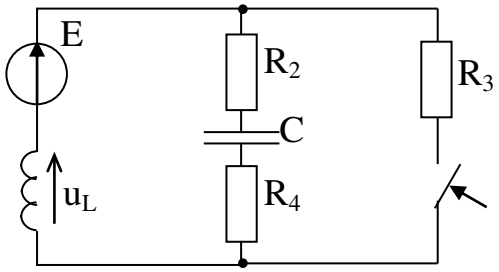


Рисунок18

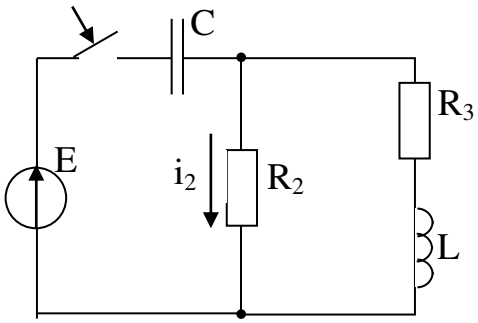


Рисунок19

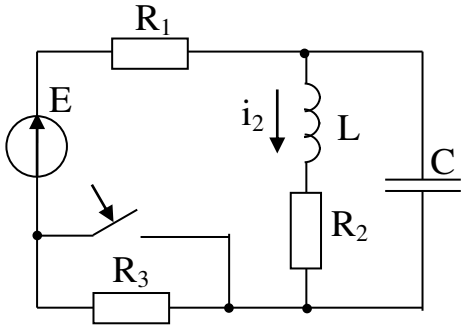


Рисунок20

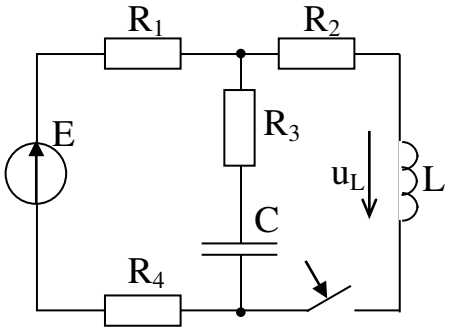


Рисунок21

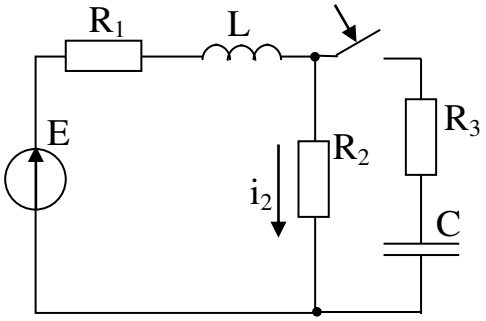


Рисунок22

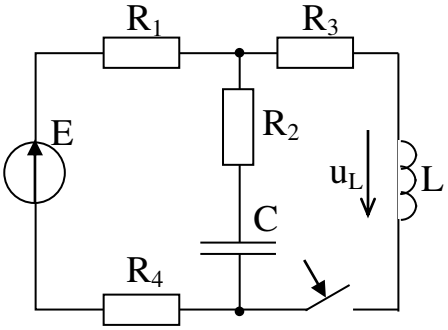


Рисунок23

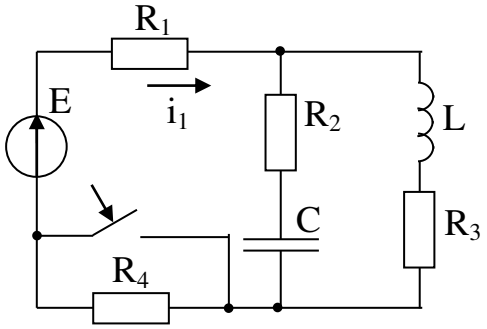


Рисунок24

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецкий А.Ф.Теория линейных электрических цепей [Электронный ресурс] : учебник - 3-е изд. Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 544 с. — ISBN 978-5-8114-0905-1. Лань : электронно-библиотечная система. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/91910

2. Башарин С..А.Теоретические основы электротехники : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / С. А. Башарин, В.В.Федоров. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 384 с. — (Сер. Бакалавриат).