

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
Б1.О.23 «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»

Направление: **13.03.01** – «Теплоэнергетика и теплотехника»
Направленность: «Энергообеспечение предприятий»
очная форма обучения

Год начала подготовки: 2019, 2020 г.



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»**
(ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)

Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина
Кафедра «Электроснабжения и электротехники»

УТВЕРЖДАЮ:

Начальник УМУ

« 20 » 03 20 20 г.



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПОВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.О.23 «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»

для подготовки бакалавров

Направление: 13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

Направленность: Энергообеспечение предприятий

Курс 2

Семестр 3,4

Форма обучения: очная

Москва, 2020

Разработчик Навроцкая Л.В., к.т.н., доцент
(ФИО, ученая степень, ученое звание)

(подпись)

Л.В. Навроцкая

« 20.03 » 2020 г.

Рецензент Андреев С.А., к.т.н., доцент
(ФИО, ученая степень, ученое звание)

(подпись)

С.А. Андреев

« 20.03 » 2020 г.

Методические указания обсуждены на заседании кафедры Электроснабжения и электротехники им. акад. И.А. Будзко
от « 23 » 03 2020 г. протокол № 6

Заведующий кафедрой Стушкина Н.А., к.т.н., доцент
(ФИО, ученая степень, ученое звание)

(подпись)

Н.А. Стушкина

« 23.03 » 2020 г.

И.о. директора института механики
и энергетики имени В.П. Горячкина Катаев Ю.В., к.т.н., доцент
(ФИО, ученая степень, ученое звание)

(подпись)

Ю.В. Катаев

« 20.03 » 2020 г.

Председатель учебно-методической
комиссии института механики и энергетики
имени В.П. Горячкина Парлюк Е.П., к.э.н., доцент
(ФИО, ученая степень, ученое звание)

(подпись)

Е.П. Парлюк

Протокол № « 21.03 » 2020 г.

Бумажный экземпляр и копия электронного варианта получены:
Методический отдел УМУ

« _____ » 20 г.

Аннотация

Курсовая работа разрабатывается в соответствии с требованиями ФГОС, ОПОП ВО и учебного плана. Она является одним из элементов самостоятельной работы студентов при изучении дисциплины «Электротехника и электроника», которая входит в обязательную часть учебного плана. Дисциплина формирует общепрофессиональные компетенции для дальнейшей профессиональной деятельности. Курсовая работа имеет и практический характер.

1. Цель и задачи курсовой работы

Курсовая работа позволяет решить следующие задачи:

- систематизировать и углубить теоретические знания в области электроэнергетики;
- применять теоретические знания при решении поставленных профессиональных задач;
- сформировать навыки использования справочной, нормативной и правовой документации;
- разработать мероприятия по решению профессиональных задач энергообеспечение предприятий.

2. Порядок выполнения курсовой работы

Примерная тематика курсовой работы по дисциплине «Электротехника и электроника» направлена на практическое закрепление знаний теоретических основ дисциплины «Электротехника и электроника» и увязана с современными требованиями в области электрооборудования и автоматизации и роботизация технологических процессов.

Для выполнения курсовой работы студенту следует изучить теоретический материал по литературе (учебникам и учебным пособиям) и конспектам лекций. Курсовую работу студенты выполняют во внеурочное время с использованием разнообразных информационных и программных материалов, оформляется работа в текстовом редакторе Microsoft Word и Microsoft Excel для составления таблиц, диаграмм, вычисления простых и сложных функций.

Студент самостоятельно выбирает тему курсовой работы из предлагаемого списка тем, или может предложить свою тему при условии обоснования им её целесообразности. Тема может быть уточнена по согласованию с руководителем курсовой работы.

Тема курсовой работы по дисциплине «Электротехника и электроника»:

«Расчёт электрических цепей постоянного, синусоидального и трёхфазного токов».

Тема курсовой работы и номер варианта указываются в журнале регистрации курсовых работ на кафедре.

3. Цепи постоянного тока

Задание на выполнение курсовой работы выдаётся за подписью руководителя, датируется днём выдачи и регистрируется на кафедре в журнале. Факт получения задания удостоверяется подписью студента в указанном журнале.

По заданной обобщенной схеме (рис.1) изобразить схему цепи, соответствующую вашему варианту (см. табл. 1), исключив источники ЭДС и источники тока, отсутствующие в таблице 1. После этого в цепи должны остаться два источника ЭДС и два источника тока.

Записать заданные в таблице 1 параметры вашей цепи.

Для заданной схемы составить уравнения по законам Кирхгофа.

Рассчитать токи во всех ветвях цепи методом контурных токов и методом узловых потенциалов.

Проверить выполнение 1-го закона Кирхгофа для четырёх узлов цепи и 2-го закона Кирхгофа для внешнего контура цепи.

Проверить выполнение баланса мощности в цепи.

Рассчитать и построить потенциальную диаграмму для внешнего контура цепи.

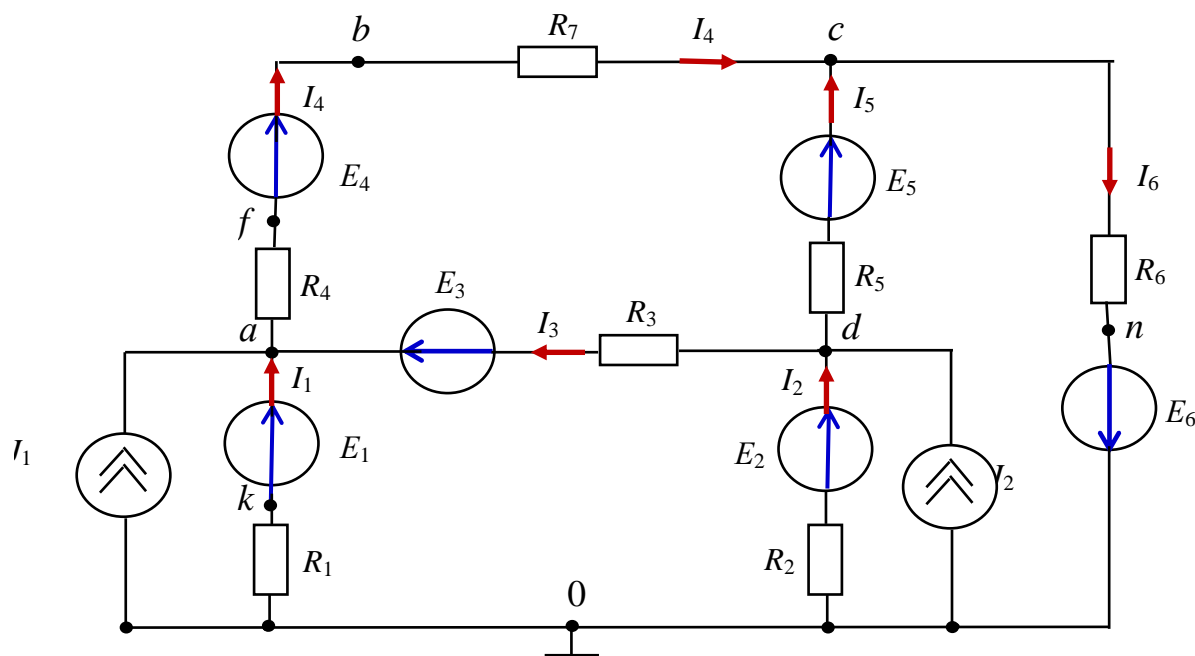


Рисунок 1 – Обобщенная схема цепи постоянного тока

Оформление работы осуществляется по единому образцу. Все электрические схемы вычерчиваются в соответствии с ГОСТ 2.701-76 устанавливает общие правила выполнения схем, типы схем. Допускается изображение схем на компьютере с помощью любого графического редактора при условии соблюдения размеров, близких к указанным в стандарте.

В задаче нужно заменить источник тока на источник Э.Д.С. Упрощаем схему, заменяя две ветви одной.

Произвольно выбираем направление токов в ветвях, но так, чтобы какие-то токи втекали в узел, а какие-то вытекали из него. Узел место соединения трёх и более проводов (ветвей). Ветвь это часть цепи от узла до узла и по цепи всегда протекает только один ток.

Произвольно выбираем направления обхода контуров.

Если направление обхода контура совпадает с направлением тока в цепи, то падение напряжения на сопротивлениях ($U_R = I \cdot R$) берётся со знаком **ПЛЮС**.

Если направление обхода контура совпадает с направлением Э.Д.С. (E-источник напряжения), то Э.Д.С. в уравнении берётся со знаком **ПЛЮС**.

Всего уравнений для расчёта цепи будет столько, сколько есть ветвей в этой цепи.

По первому закону Кирхгофа составляем количество уравнений равное числу узлов минус единица.

Таблица 1 – Исходные данные к курсовой работе

N	И с т о ч н и к и		Сопротивления резисторов, Ом							R ₇
	ЭДС, В	Тока, А	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆		
1	E ₁ = 150; E ₂ = - 50	J ₂ = - 4	70	20	10	30	90	80	10	10
2	E ₂ = - 200; E ₃ = 200	J ₂ = - 5	90	90	70	10	20	30	70	70
3	E ₁ = 350; E ₃ = - 50	J ₁ = - 6	10	60	30	90	50	10	30	30
4	E ₁ = 200; E ₅ = 300	J ₁ = 7	30	40	90	70	80	20	90	90
5	E ₁ = 400; E ₄ = 300	J ₁ = 8	60	20	60	60	10	30	60	60
6	E ₁ = 300; E ₅ = 150	J ₂ = 2	90	10	30	40	50	30	30	30
7	E ₂ = 100; E ₃ = - 80	J ₁ = - 1	30	30	70	30	80	20	70	70
8	E ₁ = - 150; E ₆ = 50	J ₁ = - 6	80	20	80	30	20	20	80	80
9	E ₂ = - 300; E ₃ = 50	J ₂ = - 7	30	90	80	30	50	20	80	80
10	E ₃ = - 80; E ₄ = 100	J ₁ = 5	40	20	70	40	20	10	70	70
11	E ₅ = 50; E ₆ = - 150	J ₂ = - 3	50	20	10	30	90	80	10	10
12	E ₁ = - 300; E ₆ = 100	J ₂ = - 3	90	70	70	10	20	30	70	70
13	E ₁ = 50; E ₂ = - 150	J ₂ = - 8	10	60	20	90	50	10	20	20
14	E ₂ = 100; E ₆ = 200	J ₂ = 5	30	40	90	50	80	20	90	90
15	E ₁ = 300; E ₃ = 200	J ₁ = 4	60	20	60	60	40	30	60	60
16	E ₃ = - 90; E ₄ = 100	J ₁ = 5	40	20	70	40	20	10	70	0
17	E ₃ = - 80; E ₅ = 100	J ₁ = 5	40	20	70	40	20	10	70	0
18	E ₃ = 250; E ₅ = - 50	J ₂ = - 3	50	20	10	30	90	80	10	0
19	E ₃ = - 300; E ₅ = 100	J ₂ = - 3	90	70	70	10	20	30	70	0
20	E ₃ = - 60; E ₆ = 100	J ₁ = 5	40	20	70	40	20	10	70	0
21	E ₄ = - 150; E ₅ = 50	J ₁ = - 6	80	20	80	30	20	20	80	0
22	E ₄ = - 300; E ₅ = 50	J ₂ = - 7	30	90	80	30	50	20	80	0
23	E ₄ = - 350; E ₅ = 80	J ₂ = 5	40	20	70	40	20	10	70	0
24	E ₄ = - 100; E ₆ = 300	J ₂ = - 5	90	40	70	10	20	30	70	0
25	E ₄ = 250; E ₆ = - 60	J ₁ = - 2	10	60	70	90	50	10	80	0
26	E ₄ = 300; E ₆ = 100	J ₂ = 4	30	40	90	50	80	20	80	0
27	E ₅ = 90; E ₆ = - 150	J ₁ = - 3	50	20	10	30	90	80	10	0
28	E ₂ = 200; E ₄ = 250	J ₂ = 3	90	10	30	40	50	10	0	0
29	E ₃ = 30; E ₆ = - 100	J ₁ = - 5	30	30	70	30	50	20	0	0
30	E ₁ = - 50; E ₄ = 150	J ₂ = - 4	80	20	80	60	20	20	0	0
31	E ₂ = 200; E ₄ = 50	J ₂ = 3	90	10	30	40	50	10	0	0
32	E ₃ = 300; E ₆ = - 80	J ₂ = - 5	30	30	70	30	50	20	0	0
33	E ₂ = - 50; E ₅ = 150	J ₁ = - 4	80	20	80	60	20	20	0	0
34	E ₂ = -200; E ₅ = 150	J ₂ = - 6	30	90	20	30	50	20	0	0
35	E ₃ = - 250; E ₄ = 70	J ₂ = 4	40	60	70	40	20	10	0	0
36	E ₂ = 250; E ₄ = - 50	J ₁ = - 3	50	20	10	30	90	80	0	0
37	E ₁ = - 100; E ₆ = 300	J ₂ = - 5	90	40	70	10	20	30	0	0
38	E ₁ = 250; E ₂ = - 50	J ₁ = - 2	10	60	70	90	50	10	0	0
39	E ₂ = 300; E ₆ = 100	J ₁ = 4	30	40	90	50	80	20	0	0
40	E ₁ = 300; E ₃ = 200	J ₂ = 5	60	20	60	60	40	30	0	0
41	E ₂ = 400; E ₄ = 50	J ₁ = 6	90	10	30	40	50	20	0	0
42	E ₃ = 30; E ₆ = - 200	J ₁ = - 7	70	30	70	30	80	20	60	0
43	E ₁ = - 50; E ₄ = 100	J ₂ = - 1	80	40	80	30	20	20	0	80
44	E ₂ = -200; E ₅ = 150	J ₁ = - 4	30	90	30	30	50	20	0	0
45	E ₅ = 50; E ₆ = - 150	J ₂ = 5	70	20	10	40	90	80	0	30
46	E ₃ = - 50; E ₄ = 100	J ₁ = 5	40	20	70	0	20	10	70	60
47	E ₂ = 400; E ₄ = 50	J ₂ = 6	90	10	0	40	50	20	10	20
48	E ₂ = 400; E ₄ = 50	J ₁ = 6	90	10	0	40	50	0	0	10
49	E ₁ = 300; E ₅ = 150	J ₂ = 2	90	10	30	40	50	30	0	0
50	E ₂ = - 200; E ₃ = 200	J ₂ = - 5	90	90	70	10	20	30	0	40

Замена источника тока источником Э.Д.С.

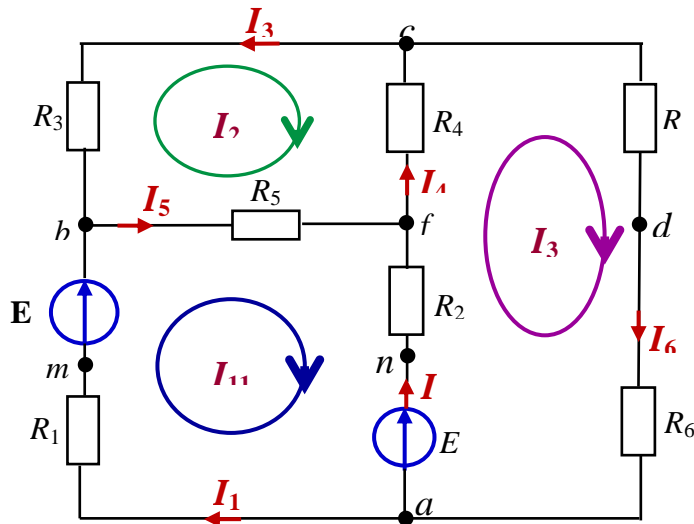
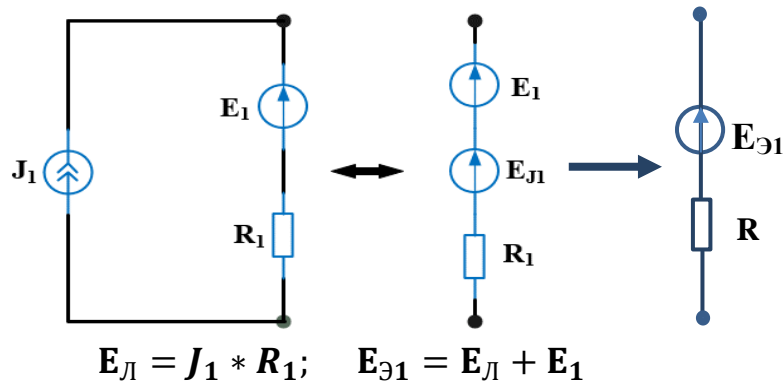


Рисунок 2— Схема цепи постоянного тока

Раздел 4. Расчёт цепей постоянного тока методом законов Кирхгофа

По второму закону Кирхгофа для контуров составляем количество уравнений равное разности числа ветвей и числа узлов.

В цепи шесть неизвестных токов, т. е. равно числу ветвей в цепи.

Составляем уравнения по первому закону Кирхгофа. Число их в общем случае на единицу меньше числа узлов (для рассматриваемой схемы с четырьмя узлами нужно составить три таких уравнения):

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

По второму закону необходимо составить три уравнения. Контур, для которых составляются уравнения, целесообразно выбрать так, чтобы каждый из них включал в себя хотя бы одну ветвь, не вошедшую в другие контуры. Контур, выбранные с соблюдением этого условия, принято называть *независимыми*. Таким образом, число уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа, будет равно числу независимых контуров. Выбираем произвольно направление обхода каждого контура цепи (например, по часовой стрелке) и составляем уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 + I_5 R_5 - I_2 R_2 &= E_{Э1} - E_2 \quad \text{— для контура } abda; \\ -I_5 R_5 - I_3 R_3 - I_4 R_4 &= 0 \quad \text{— для контура } dbcd; \\ I_2 R_2 + I_4 R_4 + I_6 (R_6 + R_7) &= E_2 \quad \text{— для контура } adca. \end{aligned}$$

В этих уравнениях все ЭДС и токи, совпадающие с направлением обхода, записываются со знаком плюс; ЭДС и токи, направленные на встречу обхода – со знаком минус.

Решив полученную систему из шести уравнений с шестью неизвестными, можно определить искомые токи. Если какой-либо ток в результате расчета получится отрицательным, то это означает, что его действительное направление выбрано не верно и его нужно изменить на противоположное, а знак тока меняют на плюс.

Рассмотренный метод расчета для достаточно сложных цепей является громоздким. Задача расчета сложной цепи значительно упрощается при использовании метода контурных токов и метода узловых потенциалов, в основу которых также положены уравнения Кирхгофа.

Раздел 5. Расчёт потенциалов внешнего контура и построение потенциальной диаграммы

Потенциальной диаграммой называют графическое изображение распределения потенциалов различных точек цепи.

Рассчитаем и построим потенциальную диаграмму по результатам расчета цепи для контура $dambcd$.

Принимаем потенциал одной из точек цепи (например, точки d) равным нулю. Откладываем по оси абсцисс последовательно все сопротивления резисторов контура $dcbmad$, двигаясь от точки d . Перемещаясь вдоль этого контура, подсчитаем потенциалы всех точек. Пройдя сопротивление R_7 и двигаясь навстречу току I_6 (от меньшего потенциала к большему), попадаем в точку c , потенциал которой равен:

$$\varphi_c = \varphi_d + I_6 R_7 = I_6 R_7 = 1,61 \cdot 6 = 9,66 \text{ В.}$$

Потенциал точки b будет меньше потенциала точки c :

$$\varphi_b = \varphi_c - I_3 R_3 = 9,66 - (-0,864 \cdot 8) = 16,57 \text{ В.}$$

Потенциал точки m будет ниже потенциала точки b на величину ЭДС E_2 :

$$\varphi_m = \varphi_b - E_2 = 16,57 - 32 = -15,43 \text{ В.}$$

Так как между точками b и m никакого сопротивления нет, то их абсциссы будут одинаковы.

Потенциалы остальных точек определяются аналогично:

$$\varphi_a = \varphi_m + I_1 R_1 = -15,43 + 1,05 \cdot 7 = -8,08 \text{ В;}$$

$$\varphi_d = \varphi_a + I_6 R_6 = -8,08 + 1,61 \cdot 5 \approx 0 \text{ В.}$$

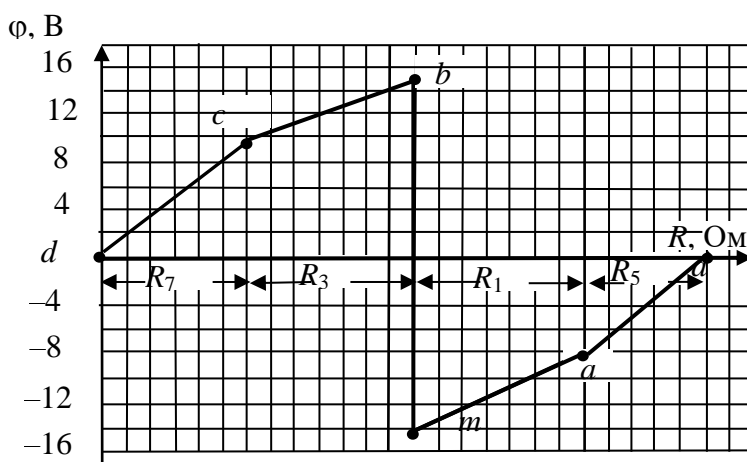


Рисунок 3 – Потенциальная диаграмма

По потенциальной диаграмме можно определить напряжение между любыми точками цепи, а также токи цепи, равные тангенсу угла наклона линий на диаграмме. Например, взяв отношение разности потенциалов $\varphi_a - \varphi_m$ к сопротивлению R_1 , получим

$$\text{значение тока } I_1 = \frac{\varphi_a - \varphi_m}{R_1} = \frac{-8,08 + 15,43}{7} = 1,05 \text{ А.}$$

Раздел 6. Проверка расчёта методом баланса мощностей

Для проверки правильности расчета токов цепи составляется уравнение баланса мощностей: алгебраическая сумма мощностей, вырабатываемых источниками электрической энергии, должна быть равна сумме потребляемых мощностей приемниками (резисторами).

Для рассматриваемой цепи уравнение баланса мощностей примет вид:

$$\begin{aligned} \sum EI &= E_3 I_1 + E_2 I_2 = 32 \cdot 1,05 + 25 \cdot 0,56 = 33,6 + 14 = 47,6 \text{ Вт;} \\ \sum I^2 R &= 1,05^2 \cdot 7 + 0,56^2 \cdot 5 + 0,864^2 \cdot 8 + 0,746^2 \cdot 6 + 0,186^2 \cdot 13 + 1,61^2 \cdot 11 = \\ &= 7,717 + 1,568 + 5,972 + 3,339 + 0,449 + 28,5 = 47,55. \end{aligned}$$

Мощность резисторов всегда положительна.

Раздел 7. Расчет схемы методом контурных токов

Метод контурных токов позволяет рассчитать цепь, составляя уравнения только по второму закону Кирхгофа. Значения истинных токов в ветвях определяются как алгебраическая сумма контурных токов, протекающих через данную ветвь.

Вводим для каждого контура свой контурный ток — I_{11} , I_{22} , I_{33} , выбирая произвольное направление каждого из них. Все контурные токи направлены по часовой стрелке. Истинные токи во всех ветвях схемы определяются из выражений как алгебраическая сумма контурных токов, замыкающихся через данную ветвь. Для заданной схемы найдем:

$$I_1 = I_{11}; \quad I_2 = I_{33} - I_{11}; \quad I_3 = -I_{22}; \quad I_4 = I_{33} - I_{22}; \quad I_5 = I_{11} - I_{22}; \quad I_6 = I_{33}.$$

Для определения контурных токов по второму закону Кирхгофа составляем три уравнения:

$$\begin{aligned} I_{11}(R_1 + R_5 + R_2) - I_{22}R_5 - I_{33}R_2 &= E_1 - E_2; \\ I_{22}(R_5 + R_3 + R_4) - I_{11}R_5 - I_{33}R_4 &= 0; \\ I_{33}(R_2 + R_4 + R_6 + R_7) - I_{11}R_2 - I_{22}R_4 &= E_2. \end{aligned}$$

Подставляя заданные числовые значения ЭДС и сопротивлений, получим:

$$\begin{aligned} 25I_{11} - 13I_{22} - 5I_{33} &= 7; \\ -13I_{11} + 27I_{22} - 6I_{33} &= 0; \\ -5I_{11} - 6I_{22} + 22I_{33} &= 25. \end{aligned}$$

Совместное решение этих уравнений дает следующие значения контурных токов:

$$I_{11} = 1,05 \text{ А}; \quad I_{22} = 0,864 \text{ А}; \quad I_{33} = 1,64 \text{ А.}$$

Определяем значения токов в ветвях цепи:

$$\begin{aligned} I_1 = I_{11} &= 1,05 \text{ А}; \quad I_2 = I_{33} - I_{11} = 0,56 \text{ А}; \quad I_3 = -I_{22} = -0,864 \text{ А}; \\ I_4 = I_{33} - I_{22} &= 0,746 \text{ А}; \quad I_5 = I_{11} - I_{22} = 0,186 \text{ А}; \quad I_6 = I_{33} = 1,61 \text{ А.} \end{aligned}$$

Раздел 8. Расчёт цепи методом узловых потенциалов

Метод узловых потенциалов позволяет рассчитать цепь на основе уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа. Так для узлов a , b и c уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} -I_1 - I_2 + I_6 &= 0; \\ I_1 - I_5 + I_3 &= 0; \\ I_4 - I_3 - I_6 &= 0. \end{aligned}$$

В соответствии с обобщенным законом Ома определим токи каждой ветви через потенциалы отдельных узлов. Так для рассматриваемой цепи найдем:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1 + U_{ab}}{R_1} = (E_1 + \varphi_a - \varphi_b) G_1; & I_2 &= \frac{E_2 + U_{ad}}{R_2} = (E_2 + \varphi_a - \varphi_d) G_2 \\ I_3 &= \frac{U_{cd}}{R_3} = (\varphi_c - \varphi_b) G_3; & I_4 &= \frac{U_{dc}}{R_4} = (\varphi_d - \varphi_c) G_4; \\ I_5 &= \frac{U_{bd}}{R_5} = (\varphi_b - \varphi_d) G_5; & I_6 &= \frac{U_{ca}}{R_6 + R_7} = (\varphi_c - \varphi_a) G_{67}, \end{aligned}$$

где проводимостей равны:

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{1}{R_1} = 0,143 \text{ СМ}; & G_2 &= \frac{1}{R_2} = 0,2 \text{ СМ}; & G_3 &= \frac{1}{R_3} = 0,125 \text{ СМ}; \\ G_4 &= \frac{1}{R_4} = 0,167 \text{ СМ}; & G_5 &= \frac{1}{R_5} = 0,077 \text{ СМ}; & G_{67} &= \frac{1}{(R_6 + R_7)} = 0,091 \text{ СМ}. \end{aligned}$$

Из этих соотношений видно, что токи в ветвях зависят от разностей потенциалов узлов, к которым эти ветви подсоединены. Это позволяет задать потенциалу одного из узлов любое числовое значение (например, ноль), сохранив неизменной разность потенциалов. Поэтому порядок расчета рассматриваемой цепи методом узловых потенциалов состоит в следующем.

Полагаем потенциал любого узла схемы (например, узла d) равным нулю: $\varphi_d = 0$.

Для всех остальных узлов составляем уравнения по первому закону Кирхгофа, выразив значения токов через потенциалы узлов: В этом случае уравнения для узлов a , b , c примут вид:

$$\begin{aligned} -(E_1 + \varphi_a - \varphi_b) G_1 - (E_2 + \varphi_a - \varphi_d) G_2 + (\varphi_c - \varphi_a) G_6 &= 0; \\ (E_1 + \varphi_a - \varphi_b) G_1 + (\varphi_d - \varphi_b) G_5 + (\varphi_c - \varphi_b) G_3 &= 0; \\ (\varphi_d - \varphi_c) G_4 - (\varphi_c - \varphi_b) G_3 - (\varphi_c - \varphi_a) G_{67} &= 0. \end{aligned}$$

Сгруппировав в левой части уравнений слагаемые, содержащие потенциалы узлов с проводимостями ветвей данного узла, а в правой части ЭДС с проводимостями ветвей, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \varphi_a (G_1 + G_2 + G_6) - \varphi_b G_1 - \varphi_c G_{67} &= -E_1 G_1 - E_2 G_2; \\ \varphi_b (G_1 + G_3 + G_5) - \varphi_a G_1 - \varphi_c G_3 &= E_1 \\ \varphi_c (G_3 + G_4 + G_{67}) - \varphi_a G_{67} - \varphi_b G_3 &= 0. \end{aligned}$$

Обратите внимание на следующие характерные особенности уравнений:

– слагаемые в левой части уравнений, содержащие произведения потенциала рассматриваемого узла на сумму проводимостей ветвей присоединенных к данному узлу, за-

писываются со знаком плюс, а все остальные слагаемые, определяемые произведением потенциалов узлов на проводимости ветвей, соединяющих узлы – со знаком минус;
 – в правой части уравнения ЭДС, направленные к узлу, для которого составляется уравнение, записываются со знаком плюс, а ЭДС, направленные от этого узла, – со знаком минус.

Подставим значения проводимостей в последнюю систему уравнений:

$$\begin{aligned} \varphi_a 0,434 - \varphi_b 0,143 - \varphi_c 0,091 &= -9,56; \\ -\varphi_a 0,143 + \varphi_b 0,345 - \varphi_c 0,125 &= 4,56; \\ -\varphi_a 0,091 - \varphi_b 0,125 + \varphi_c 0,383 &= 0. \end{aligned}$$

Совместное решение этих уравнений дает следующие значения узловых потенциалов:

$$\varphi_a = -22,1 \text{ В}; \varphi_b = 2,4 \text{ В}; \varphi_c = -4,5 \text{ В}.$$

Далее определяем токи в ветвях по закону Ома:

$$I_1 = 1,07 \text{ А}; I_2 = 0,58 \text{ А}; I_3 = -0,861 \text{ А}; I_4 = 0,751 \text{ А}; I_5 = 0,185 \text{ А}; I_6 = 1,6 \text{ А}.$$

9. Цепи синусоидального тока

По заданной обобщенной схеме составить и изобразить схему цепи, соответствующую вашему варианту, исключив источники ЭДС, отсутствующие в таблице 2. Записать заданные параметры цепи из таблицы.

Комплексные сопротивления на схеме изобразить в виде соответствующих элементов R , L и C .

Составить уравнения по законам Кирхгофа в дифференциальной и комплексной формах. Составить уравнения в комплексной форме по методу контурных токов и по методу узловых потенциалов. Рассчитать комплексные токи в цепи выбранным вами методом и записать мгновенные значения токов с частотой 50 Гц. Определить показания ваттметра.

Проверить выполнение 2-го закона Кирхгофа в комплексной форме для внешнего контура цепи. Рассчитать топографическую диаграмму внешнего контура цепи. Построить эту топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов.

Проверить выполнение баланса активной, реактивной и комплексной мощностей цепи.

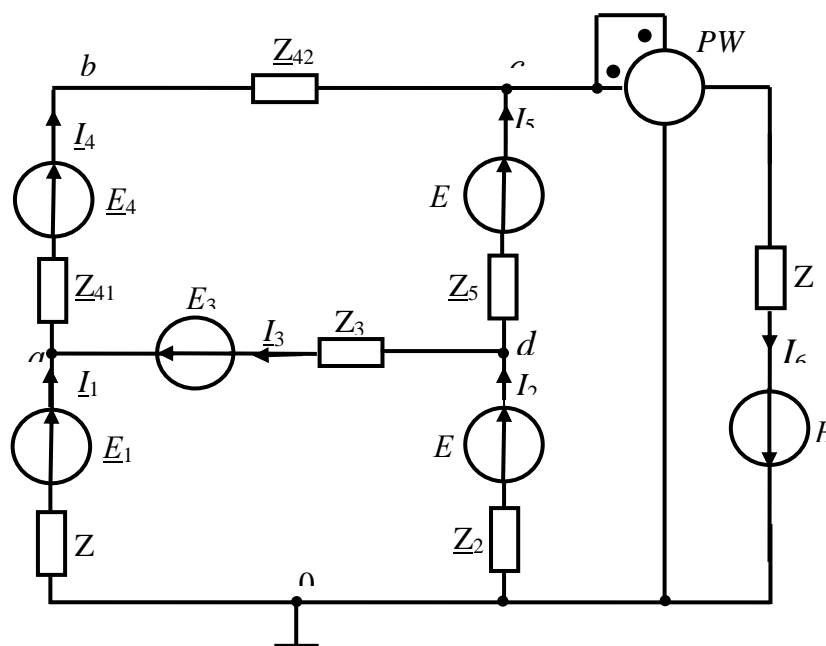


Рисунок 4– Обобщенная схема цепи синусоидального тока.

Таблица 2 – Исходные данные к курсовой работе

N	Источники: ЭДС, В; тока, А	Сопротивления нагрузки, Ом						
		$Z_1, \text{Ом}$	$Z_2, \text{Ом}$	$Z_3, \text{Ом}$	$Z_4, \text{Ом}$	$Z_5, \text{Ом}$	$Z_6, \text{Ом}$	$Z_7, \text{Ом}$
1	$E_1=30\angle-15^\circ$ $E_2=150\angle60^\circ$ $J_3=50\angle40^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle45^\circ$	$5\angle30^\circ$	$10\angle10^\circ$	$12\angle10^\circ$	$30\angle10^\circ$	$60\angle80^\circ$
2	$E_2=40\angle-20^\circ$ $E_3=150\angle60^\circ$ $J_2=160\angle72^\circ$	$15\angle-60^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle50^\circ$	$20\angle30^\circ$	$18\angle20^\circ$	$40\angle20^\circ$	$15\angle-90^\circ$
3	$E_1=170\angle42^\circ$ $E_3=80\angle-40^\circ$ $J_1=90\angle-45^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle30^\circ$	$15\angle60^\circ$	$25\angle40^\circ$	$19\angle25^\circ$	$45\angle25^\circ$	$10\angle90^\circ$
4	$E_1=90\angle-45^\circ$ $E_5=100\angle-50^\circ$ $J_1=110\angle-55^\circ$	$15\angle-30^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle70^\circ$	$30\angle45^\circ$	$21\angle30^\circ$	$50\angle30^\circ$	$10\angle60^\circ$
5	$E_1=120\angle-60^\circ$ $E_4=130\angle-65^\circ$ $J_1=140\angle-70^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle45^\circ$	$15\angle65^\circ$	$35\angle50^\circ$	$15\angle35^\circ$	$10\angle10^\circ$	$10\angle90^\circ$
6	$E_1=150\angle60^\circ$ $E_5=160\angle72^\circ$ $J_3=170\angle42^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle90^\circ$	$5\angle30^\circ$	$10\angle10^\circ$	$12\angle10^\circ$	$30\angle10^\circ$	$60\angle80^\circ$
7	$E_2=170\angle42^\circ$ $E_3=90\angle85^\circ$ $J_1=100\angle90^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle-60^\circ$	$40\angle-55^\circ$	$15\angle-40^\circ$	$15\angle20^\circ$	$10\angle-90^\circ$
8	$E_1=110\angle95^\circ$ $E_6=160\angle45^\circ$ $J_1=160\angle45^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle-60^\circ$	$40\angle-55^\circ$	$15\angle40^\circ$	$15\angle20^\circ$	$10\angle90^\circ$
9	$E_1=90\angle-45^\circ$ $E_5=100\angle-50^\circ$ $J_1=110\angle-55^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle-10^\circ$	$10\angle90^\circ$	$10\angle-30^\circ$	$15\angle70^\circ$	$15\angle30^\circ$
10	$E_1=120\angle-60^\circ$ $E_4=130\angle-65^\circ$ $J_1=140\angle-70^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle-50^\circ$	$50\angle65^\circ$	$18\angle60^\circ$	$10\angle30^\circ$	$10\angle90^\circ$
11	$E_1=150\angle60^\circ$ $E_5=160\angle72^\circ$ $J_3=170\angle42^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle90^\circ$	$5\angle30^\circ$	$10\angle-10^\circ$	$12\angle10^\circ$	$30\angle10^\circ$	60
12	$E_2=170\angle42^\circ$ $E_3=90\angle85^\circ$ $J_1=100\angle90^\circ$	$15\angle-90^\circ$	15	$15\angle50^\circ$	$20\angle-30^\circ$	$18\angle20^\circ$	$40\angle20^\circ$	$15\angle90^\circ$
13	$E_1=110\angle95^\circ$ $E_6=160\angle45^\circ$ $J_1=160\angle45^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle60^\circ$	25	$19\angle-25^\circ$	$45\angle25^\circ$	$10\angle90^\circ$
14	$E_1=30\angle-15^\circ$ $E_2=150\angle60^\circ$ $J_3=50\angle40^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle-50^\circ$	50	$18\angle60^\circ$	$10\angle30^\circ$	10
15	$E_1=160\angle155^\circ$ $E_2=170\angle160^\circ$ $J_2=150\angle60^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle-50^\circ$	50	$18\angle60^\circ$	$10\angle30^\circ$	$10\angle90^\circ$
16	$E_2=110\angle160^\circ$ $E_6=120\angle165^\circ$ $J_2=120\angle165^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$5\angle30^\circ$	10	$12\angle10^\circ$	$30\angle10^\circ$	60
17	$E_2=170\angle50^\circ$ $E_5=180\angle55^\circ$ $J_3=140\angle75^\circ$	$15\angle-90^\circ$	50	$15\angle50^\circ$	$20\angle30^\circ$	$18\angle20^\circ$	$40\angle20^\circ$	$15\angle90^\circ$
18	$E_1=110\angle95^\circ$ $E_6=60\angle45^\circ$ $J_1=160\angle45^\circ$	$15\angle90^\circ$	15	$15\angle40^\circ$	$60\angle80^\circ$	$12\angle30^\circ$	$15\angle60^\circ$	30

19	$E_1=30\angle 15^\circ$ $E_2=150\angle 60^\circ$ $J_3=50\angle 40^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$15\angle 35^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$15\angle -10^\circ$	$15\angle 50^\circ$	12
20	$E_1=60\angle 155^\circ$ $E_2=170\angle 160^\circ$ $J_2=50\angle 60^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$15\angle 30^\circ$	10	$15\angle 45^\circ$	$15\angle 60^\circ$	$15\angle 10^\circ$
21	$E_5=190\angle -30^\circ$ $E_6=200\angle 140^\circ$ $J_2=120\angle 30^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$5\angle 30^\circ$	10	$12\angle 10^\circ$	$30\angle 10^\circ$	$60\angle 80^\circ$
22	$E_1=130\angle 142^\circ$ $E_6=140\angle 45^\circ$ $J_3=150\angle 50^\circ$	$15\angle 90^\circ$	15	$15\angle 50^\circ$	$20\angle 30^\circ$	$18\angle 20^\circ$	$40\angle 20^\circ$	$15\angle -90^\circ$
23	$E_1=160\angle 155^\circ$ $E_2=170\angle 60^\circ$ $J_2=150\angle 60^\circ$	$15\angle 90^\circ$	15	$15\angle 50^\circ$	$20\angle -30^\circ$	$18\angle -30^\circ$	$40\angle 20^\circ$	40
24	$E_1=30\angle -15^\circ$ $E_2=150\angle 60^\circ$ $J_3=50\angle 40^\circ$	$15\angle 90^\circ$	15	$15\angle 35^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$15\angle 10^\circ$	$15\angle 50^\circ$	30
25	$E_2=40\angle -30^\circ$ $E_3=150\angle 60^\circ$ $J_2=160\angle 72^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$15\angle -30^\circ$	10	$15\angle 45^\circ$	$15\angle 60^\circ$	$15\angle 10^\circ$
26	$E_1=160\angle 155^\circ$ $E_2=170\angle 160^\circ$ $J_2=150\angle 60^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$15\angle 90^\circ$	15	$35\angle -60^\circ$	$30\angle 35^\circ$	$10\angle 10^\circ$	20
27	$E_1=170\angle 60^\circ$ $E_3=90\angle 85^\circ$ $J_1=100\angle 90^\circ$	$15\angle 90^\circ$	15	$45\angle -40^\circ$	$60\angle 80^\circ$	$12\angle 30^\circ$	$15\angle 60^\circ$	$10\angle 90^\circ$
28	$E_1=120\angle 60^\circ$ $E_4=130\angle 65^\circ$ $J_2=140\angle 70^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$15\angle 35^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$15\angle -10^\circ$	$15\angle 50^\circ$	30
29	$E_1=70\angle 160^\circ$ $E_3=200\angle 75^\circ$ $J_3=120\angle 80^\circ$	$15\angle -90^\circ$	15	$15\angle -30^\circ$	$10\angle 90^\circ$	15	$15\angle 60^\circ$	$15\angle -10^\circ$
30	$E_2=190\angle 120^\circ$ $E_6=200\angle 40^\circ$ $J_2=120\angle 30^\circ$	$15\angle -90^\circ$	15	$15\angle -50^\circ$	50	$18\angle 60^\circ$	$10\angle 30^\circ$	$10\angle 90^\circ$
31	$E_1=130\angle 42^\circ$ $E_6=140\angle 45^\circ$ $J_3=150\angle 50^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$15\angle 45^\circ$	$55\angle 75^\circ$	$15\angle 70^\circ$	15	50
32	$E_1=60\angle 155^\circ$ $E_5=70\angle 160^\circ$ $J_2=50\angle 60^\circ$	$15\angle -90^\circ$	15	$15\angle 40^\circ$	$60\angle 80^\circ$	$12\angle 10^\circ$	$15\angle 40^\circ$	$10\angle 90^\circ$
33	$E_2=60\angle 50^\circ$ $E_3=80\angle 55^\circ$ $J_1=-40\angle 75^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$15\angle -50^\circ$	50	$18\angle 60^\circ$	$10\angle 30^\circ$	$10\angle 90^\circ$
34	$E_3=50\angle 80^\circ$ $E_4=-60\angle 85^\circ$ $J_1=180\angle 60^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$5\angle 30^\circ$	10	$12\angle 10^\circ$	$30\angle 10^\circ$	60
35	$E_5=190\angle 130^\circ$ $E_6=200\angle 140^\circ$ $J_2=120\angle 115^\circ$	$15\angle -90^\circ$	50	$15\angle 50^\circ$	$20\angle 30^\circ$	$18\angle 20^\circ$	$40\angle 20^\circ$	$15\angle 90^\circ$
36	$E_1=110\angle 95^\circ$ $E_6=60\angle 45^\circ$ $J_1=160\angle 45^\circ$	$15\angle 90^\circ$	15	$15\angle 40^\circ$	$60\angle 80^\circ$	$12\angle 30^\circ$	$15\angle 60^\circ$	40
37	$E_1=30\angle 15^\circ$ $E_2=150\angle 60^\circ$ $J_3=50\angle 40^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$15\angle 35^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$15\angle -10^\circ$	$15\angle 50^\circ$	12
38	$E_1=60\angle 155^\circ$ $E_2=170\angle 160^\circ$ $J_2=50\angle 60^\circ$	$15\angle -90^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$15\angle -50^\circ$	$50\angle 65^\circ$	$18\angle 60^\circ$	$10\angle 30^\circ$	10

39	$\underline{E}_5=190\angle-30^\circ$ $\underline{E}_6=200\angle140^\circ$ $\underline{J}_2=120\angle30^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle45^\circ$	$55\angle-75^\circ$	15	$15\angle35^\circ$	100
40	$\underline{E}_1=130\angle142^\circ$ $\underline{E}_6=140\angle45^\circ$ $\underline{J}_3=150\angle50^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle90^\circ$	15	$60\angle80^\circ$	$12\angle10^\circ$	$15\angle40^\circ$	20
41	$\underline{E}_1=100\angle50^\circ$ $\underline{E}_4=180\angle55^\circ$ $\underline{J}_2=140\angle75^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$100\angle90^\circ$	$15\angle-50^\circ$	$50\angle65^\circ$	$18\angle60^\circ$	$100\angle30^\circ$	$10\angle90^\circ$
42	$\underline{E}_3=150\angle80^\circ$ $\underline{E}_4=160\angle85^\circ$ $\underline{J}_1=180\angle60^\circ$	$15\angle90^\circ$	15	$15\angle35^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle-10^\circ$	$15\angle50^\circ$	30
43	$\underline{E}_5=90\angle30^\circ$ $\underline{E}_6=200\angle40^\circ$ $\underline{J}_1=120\angle45^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle-30^\circ$	10	$15\angle45^\circ$	$15\angle-60^\circ$	$15\angle10^\circ$
44	$\underline{E}_2=170\angle50^\circ$ $\underline{E}_3=180\angle55^\circ$ $\underline{J}_3=140\angle75^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle60^\circ$	45	$35\angle-60^\circ$	$30\angle35^\circ$	$10\angle-10^\circ$	20
45	$\underline{E}_1=170\angle-60^\circ$ $\underline{E}_3=90\angle85^\circ$ $\underline{J}_1=100\angle90^\circ$	$15\angle90^\circ$	15	$15\angle-40^\circ$	$60\angle80^\circ$	$12\angle30^\circ$	$15\angle-60^\circ$	$10\angle90^\circ$
46	$\underline{E}_1=120\angle60^\circ$ $\underline{E}_5=130\angle65^\circ$ $\underline{J}_2=140\angle70^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle35^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle-10^\circ$	$15\angle50^\circ$	120
47	$\underline{E}_1=70\angle160^\circ$ $\underline{E}_3=200\angle75^\circ$ $\underline{J}_2=120\angle80^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$15\angle-30^\circ$	$10\angle90^\circ$	$15\angle-45^\circ$	$15\angle-60^\circ$	$15\angle10^\circ$
48	$\underline{E}_2=190\angle20^\circ$ $\underline{E}_6=200\angle-40^\circ$ $\underline{J}_2=120\angle30^\circ$	$15\angle-90^\circ$	100	$15\angle-50^\circ$	50	$18\angle-60^\circ$	$10\angle30^\circ$	$10\angle90^\circ$
49	$\underline{E}_2=130\angle42^\circ$ $\underline{E}_6=140\angle-45^\circ$ $\underline{J}_1=150\angle50^\circ$	$15\angle90^\circ$	$15\angle-90^\circ$	$100\angle45^\circ$	$55\angle75^\circ$	$15\angle-70^\circ$	15	20
50	$\underline{E}_1=60\angle50^\circ$ $\underline{E}_5=70\angle60^\circ$ $\underline{J}_2=50\angle60^\circ$	$15\angle-90^\circ$	15	$15\angle40^\circ$	$60\angle80^\circ$	$12\angle10^\circ$	$15\angle-40^\circ$	$10\angle90^\circ$

Изобразим схему соответствующую варианту

Рассчитаем значения элементов цепи:

$$R_2 = \operatorname{Re}(Z_2) = 15 \text{ Ом}; \quad R_3 = \operatorname{Re}(Z_3) = 12.287 \text{ Ом};$$

$$R_5 = \operatorname{Re}(Z_5) = 9.848 \text{ Ом}; \quad R_6 = \operatorname{Re}(Z_6) = 9.642 \text{ Ом};$$

$$R_7 = \operatorname{Re}(Z_7) = 10.392 \text{ Ом}; \quad X_{C1} = \operatorname{Im}(Z_1) = -15 \text{ Ом};$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f |X_{C1}|} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot |-15|} = 212.2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$X_{C4} = \operatorname{Im}(Z_4) = -10 \text{ Ом};$$

$$C_4 = \frac{1}{2\pi f |X_{C4}|} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot |-10|} = 318.3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$X_{C5} = \operatorname{Im}(Z_5) = -1.736 \text{ Ом};$$

$$C_5 = \frac{1}{2\pi f |X_{C5}|} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot |-1.736|} = 1833 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$X_{L3} = \operatorname{Im}(Z_3) = 8.604 \text{ Ом}; \quad L_3 = \frac{X_{L3}}{2\pi f} = \frac{8.604}{2\pi \cdot 50} = 0.027 \text{ Гн};$$

$$L_7 = \frac{X_{L7}}{2\pi f} = \frac{6}{2\pi \cdot 50} = 0.019 \text{ Гн}; \quad X_{L7} = \operatorname{Im}(Z_7) = 6 \text{ Ом};$$

$$X_{L6} = \operatorname{Im}(Z_6) = 11.491 \text{ Ом};$$

$$L_6 = \frac{X_{L6}}{2\pi f} = \frac{11.491}{2\pi \cdot 50} = 0.037 \text{ Гн}.$$

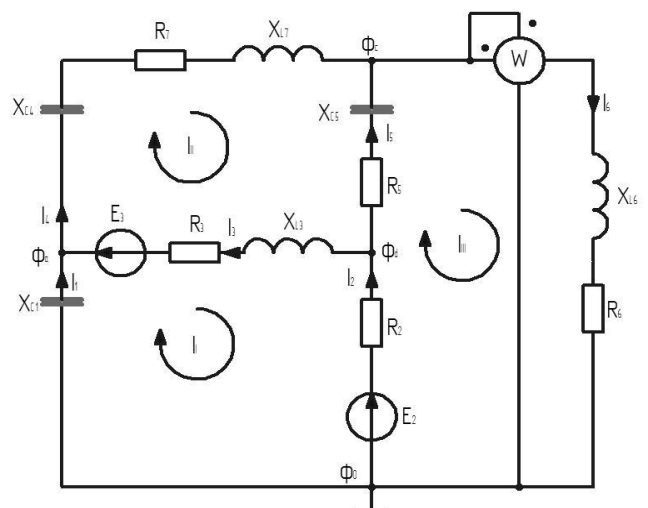


Рисунок 5— Схема цепи синусоидального тока

Расчет переменного тока методом законов Кирхгофа

Составим систему уравнений по законам Кирхгофа. Токов 6, узлов 4, уравнений по первому закону Кирхгофа $4-1=3$,
уравнений по второму закону Кирхгофа $6-3=3$

$$\begin{cases} I_1 + I_3 - I_4 = 0 \\ I_2 - I_3 - I_5 = 0 \\ I_4 + I_5 - I_6 = 0 \\ I_1 \cdot Z_1 - I_3 \cdot Z_3 - I_2 \cdot Z_2 = -E_2 - E_3 \\ I_3 \cdot Z_3 + I_4 \cdot (Z_4 + Z_7) - I_5 \cdot Z_5 = E_3 \\ I_2 \cdot Z_2 + I_5 \cdot Z_5 + I_6 \cdot Z_6 = E_2 \end{cases}$$

Расчет цепи переменного тока методом контурных токов.

Составим систему уравнений по методу контурных токов

$$\begin{cases} I_I \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_3) - I_{II} \cdot Z_3 - I_{III} \cdot Z_2 = -E_2 - E_3 \\ -I_I \cdot Z_3 + I_{II} \cdot (Z_3 + Z_4 + Z_7 + Z_5) - I_{III} \cdot Z_5 = E_3 \\ -I_I \cdot Z_2 - I_{II} \cdot Z_5 + I_{III} \cdot (Z_5 + Z_2 + Z_6) = E_2 \end{cases}$$

Расчет цепи переменного тока методом узловых потенциалов.

Составим систему уравнений по методу узловых напряжений

$$\begin{cases} \varphi_0 = 0 \\ \varphi_a \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_4 + Z_7} + \frac{1}{Z_3} \right) - \varphi_c \cdot \frac{1}{Z_4 + Z_7} - \varphi_d \cdot \frac{1}{Z_3} = \frac{E_3}{Z_3} \\ -\varphi_a \cdot \frac{1}{Z_4 + Z_7} + \varphi_c \cdot \left(\frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_4 + Z_7} + \frac{1}{Z_6} \right) - \varphi_d \cdot \frac{1}{Z_5} = 0 \\ -\varphi_a \cdot \frac{1}{Z_3} - \varphi_c \cdot \frac{1}{Z_5} + \varphi_d \cdot \left(\frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) = \frac{E_2}{Z_2} - \frac{E_3}{Z_3} \end{cases}$$

Решим систему матричным методом

$$M_g = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_4 + Z_7} + \frac{1}{Z_3} & -\frac{1}{Z_4 + Z_7} & -\frac{1}{Z_3} \\ -\frac{1}{Z_4 + Z_7} & \frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_4 + Z_7} + \frac{1}{Z_6} & -\frac{1}{Z_5} \\ -\frac{1}{Z_3} & -\frac{1}{Z_5} & \frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0.138 + 0.061j & -0.084 - 0.032j & -0.055 + 0.038j \\ -0.084 - 0.032j & 0.225 - 0.001j & -0.098 - 0.017j \\ -0.055 + 0.038j & -0.098 - 0.017j & 0.22 - 0.021j \end{bmatrix}$$

$$M_j = \begin{bmatrix} \frac{E_3}{Z_3} \\ 0 \\ \frac{E_2}{Z_2} - \frac{E_3}{Z_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.857 + 4.596j \\ 0 \\ 4.566 + 2.987j \end{bmatrix}$$

$$M_\varphi = M_g^{-1} \cdot M_j = \begin{bmatrix} 104.013 + 21.064j \\ 64.869 + 42.761j \\ 72.945 + 31.946j \end{bmatrix}$$

Потенциалы узлов

$$\varphi_a = 104.013 + 21.064j = 106.124 \cdot e^{j11.448^\circ} \text{ В}$$

$$\varphi_c = 64.869 + 42.761j = 77.695 \cdot e^{j33.392^\circ} \text{ В}$$

$$\varphi_d = 72.945 + 31.946j = 79.634 \cdot e^{j23.651^\circ} \text{ В}$$

Токи ветвей

$$I_1 = \frac{\varphi_o - \varphi_a}{Z_1} = \frac{0 - (104.013 + 21.064j)}{-15j} = 1.404 - 6.934j = 7.075 \cdot e^{-j78.552^\circ} \text{ A};$$

$$I_2 = \frac{\varphi_o - \varphi_d + E_2}{Z_2} = \frac{0 - (72.945 + 31.946j) + 126.335 + 113.752j}{15} = 3.559 + 5.454j \\ = 6.512 \cdot e^{j56.87^\circ} \text{ A};$$

$$I_3 = \frac{\varphi_d - \varphi_a + E_3}{Z_3} = \frac{72.945 + 31.946j - (104.013 + 21.064j) + 7.844 + 89.658j}{12.287 + 8.604j} = \\ = 2.576 + 6.379j = 6.879 \cdot e^{j68.007^\circ} \text{ A};$$

$$I_4 = \frac{\varphi_a - \varphi_c}{Z_4 + Z_7} = \frac{104.013 + 21.064j - (64.869 + 42.761j)}{-10j + 10.392 + 6j} = 3.98 - 0.556j = \\ = 4.019 \cdot e^{-j7.947^\circ} \text{ A};$$

$$I_5 = \frac{\varphi_d - \varphi_c}{Z_5} = \frac{72.945 + 31.946j - (64.869 + 42.761j)}{9.848 - 1.736j} = 0.983 - 0.925j = \\ = 1.35 \cdot e^{-j43.249^\circ} \text{ A};$$

$$I_6 = \frac{\varphi_c - \varphi_o}{Z_6} = \frac{64.869 + 42.761j - 0}{Z_6 9.642 + 11.491j} = 4.964 - 1.48j = 5.18 \cdot e^{-j16.608^\circ} \text{ A}.$$

Мгновенные значения токов цепи:

$$i_1 = |I_1| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi ft + \arg(I_1)) = 10.006 \cdot \sin(314t - 78.552^\circ)$$

$$i_2 = |I_2| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi ft + \arg(I_2)) = 9.21 \cdot \sin(314t + 56.87^\circ)$$

$$i_3 = |I_3| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi ft + \arg(I_3)) = 9.729 \cdot \sin(314t + 68.007^\circ)$$

$$i_4 = |I_4| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi ft + \arg(I_4)) = 5.684 \cdot \sin(314t - 7.947^\circ)$$

$$i_5 = |I_5| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi ft + \arg(I_5)) = 1.909 \cdot \sin(314t - 43.249^\circ)$$

$$i_6 = |I_6| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi ft + \arg(I_6)) = 7.325 \cdot \sin(314t - 16.608^\circ)$$

Определим показание ваттметра:

$$P_W = \operatorname{Re}(\dot{I}_6 \cdot \varphi_c) = \operatorname{Re}((4.964 + 1.48j) \cdot (64.869 + 42.761j)) = 258.678 \text{ Вт}$$

Проверка расчёта методом баланса мощностей

Проверим выполнение баланса активных, реактивных и полных мощностей цепи

Мощности источников:

$$S_{E2} = \dot{I}_2 \cdot E_2 = (3.559 - 5.454j) \cdot (126.335 + 113.752j) = 1070 - 284j \text{ ВА}$$

$$S_{E3} = \dot{I}_3 \cdot E_3 = (2.576 - 6.379j) \cdot (7.844 + 89.658j) = 592 + 181j \text{ ВА}$$

$$S_{\Sigma} = S_{E1} + S_{E3} = 1070 - 284j + 592 + 181j = 1662 - 103j \text{ ВА}$$

Мощности приемников

$$P_2 = \dot{I}_2 \cdot U_{R2} = (3.559 - 5.454j) \cdot (-104.013 - 21.064j) = 636 \text{ Вт}$$

$$P_3 = \dot{I}_3 \cdot U_{R3} = (2.576 - 6.379j) \cdot (31.655 + 78.375j) = 581 \text{ Вт}$$

$$P_7 = \dot{I}_4 \cdot U_{R7} = (3.98 + 0.556j) \cdot (41.366 - 5.775j) = 168 \text{ Вт}$$

$$P_5 = \dot{I}_5 \cdot U_{R5} = (0.983 + 0.925j) \cdot (9.682 - 9.107j) = 18 \text{ Вт}$$

$$P_6 = \dot{I}_6 \cdot U_{R6} = (4.964 + 1.48j) \cdot (47.858 - 14.274j) = 259 \text{ Вт}$$

$$P_{\Sigma} = P_2 + P_3 + P_7 + P_5 + P_6 = 636 + 581 + 168 + 18 + 259 = 1662 \text{ Вт}$$

$$Q_1 = \dot{I}_1 \cdot U_{C1} = (1.404 + 6.934j) \cdot (-104.013 - 21.064j) = -751j \text{ вар}$$

$$Q_3 = \dot{I}_3 \cdot U_{L3} = (2.576 - 6.379j) \cdot (-54.879 + 22.165j) = 407j \text{ вар}$$

$$Q_4 = \dot{I}_4 \cdot (U_{C4} + U_{L7}) = (3.98 + 0.556j) \cdot (-5.557 - 39.805j + 3.334 + 23.883j) = -65j \text{ вар}$$

$$Q_5 = \dot{I}_5 \cdot U_{C5} = (0.983 + 0.925j) \cdot (-1.606 - 1.707j) = -3j \text{ вар}$$

$$Q_6 = \dot{I}_6 \cdot U_{L6} = (4.964 + 1.48j) \cdot (17.011 + 57.035j) = 308j \text{ вар}$$

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 =$$

$$= -751j + 407j - 65j - 3j + 308j = 103j \text{ вар.}$$

Баланс сошелся.

Расчёт падений напряжений внешнего контура и построение потенциальной диаграммы.

Рассчитаем напряжения на элементах цепи:

$$U_{C1} = I_1 \cdot X_{C1} = (1.404 - 6.934j) \cdot -15j = -104.013 - 21.064j = 106.124 \cdot e^{-j168.55^\circ} \text{ B}$$

$$U_{R2} = I_2 \cdot R_2 = (3.559 + 5.454j) \cdot 15 = 53.39 + 81.806j = 97.687 \cdot e^{j56.87^\circ} \text{ B}$$

$$U_{L3} = I_3 \cdot X_{L3} = (2.576 + 6.379j) \cdot 8.604j = -54.879 + 22.165j = 59.186 \cdot e^{j158^\circ} \text{ B}$$

$$U_{R3} = I_3 \cdot R_3 = (2.576 + 6.379j) \cdot 12.287 = 31.655 + 78.375j = 84.526 \cdot e^{j68^\circ} \text{ B}$$

$$U_{C4} = I_4 \cdot X_{C4} = (3.98 - 0.556j) \cdot -10j = -5.557 - 39.805j = 40.191 \cdot e^{-j97.95^\circ} \text{ B}$$

$$U_{C5} = I_5 \cdot X_{C5} = (0.983 - 0.925j) \cdot -1.736j = -1.606 - 1.707j = 2.344 \cdot e^{-j133.25^\circ} \text{ B}$$

$$U_{R5} = I_5 \cdot R_5 = (0.983 - 0.925j) \cdot 9.848 = 9.682 - 9.107j = 13.292 \cdot e^{-j43.249^\circ} \text{ B}$$

$$U_{L6} = I_6 \cdot X_{L6} = (4.964 - 1.48j) \cdot 11.491j = 17.011 + 57.035j = 59.518 \cdot e^{j73.392^\circ} \text{ B}$$

$$U_{R6} = I_6 \cdot R_6 = (4.964 - 1.48j) \cdot 9.642 = 47.858 - 14.274j = 49.941 \cdot e^{-j16.61^\circ} \text{ B}$$

$$U_{L7} = I_4 \cdot X_{L7} = (3.98 - 0.556j) \cdot 6j = 3.334 + 23.883j = 24.114 \cdot e^{j82.05^\circ} \text{ B}$$

$$U_{R7} = I_4 \cdot R_7 = (3.98 - 0.556j) \cdot 10.392 = 41.366 - 5.775j = 41.767 \cdot e^{-j7.95^\circ} \text{ B}$$

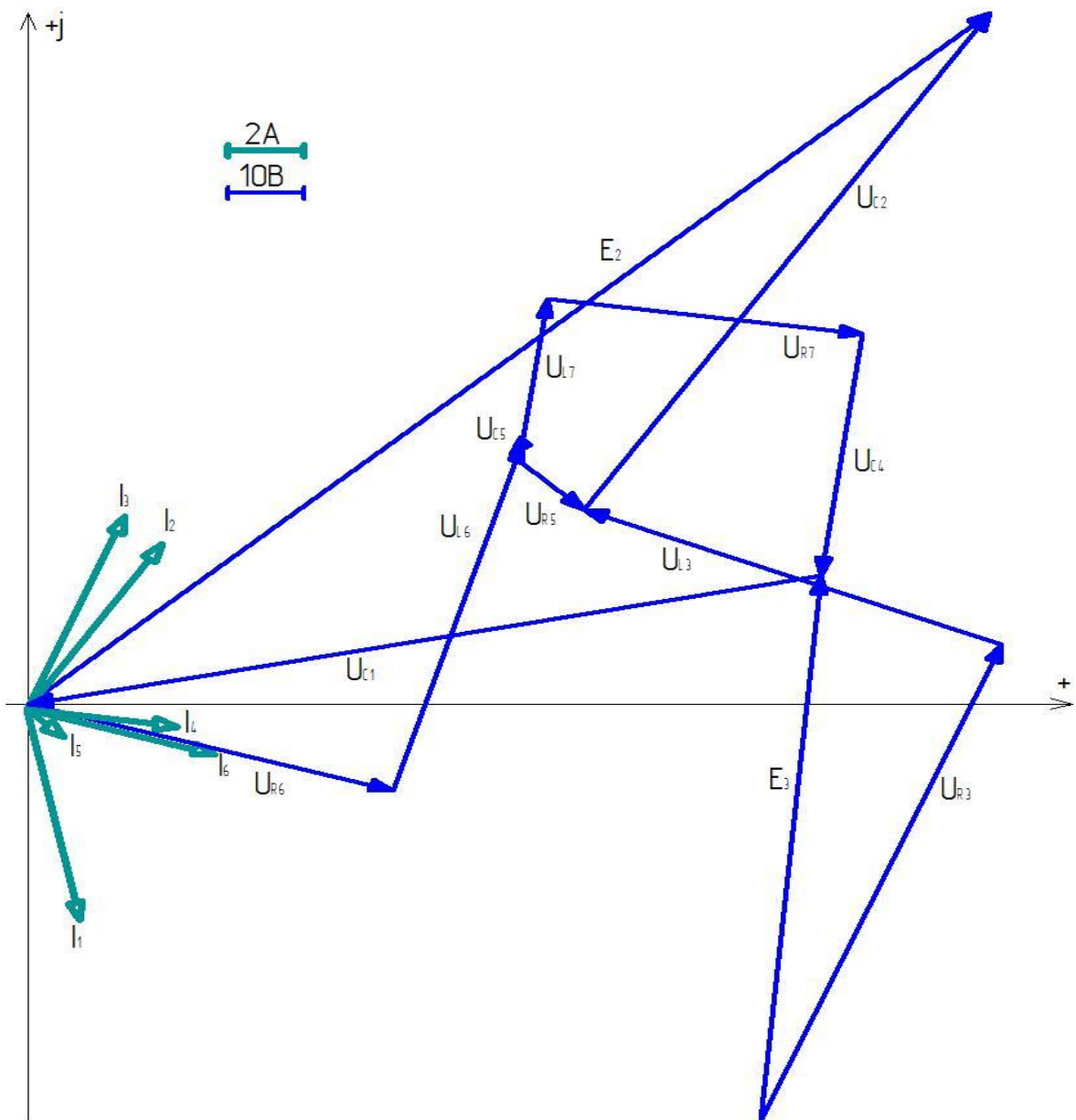


Рисунок 6 – Потенциальная диаграмма внешнего контура схемы

10. ТРЁХ ФАЗНЫЕ ЦЕПИ

Таблица 3 – Заданные параметры цепи

№ варианта	Ψ_A , град.	Z_a , Ом	Z_b , Ом	Z_c , Ом	Z_l , Ом	Z_{Φ} , Ом		
						R , Ом	L , мГн	C , мкФ
1	90°	15∠60°	15∠-90°	15	60∠80°	15	31,8	927,3
2	-60°	15∠-60°	15	20∠50°	15∠60°	10	8	327
3	-20°	20∠45°	15∠-90°	10∠60°	10∠70°	3	5	212
4	50°	10∠-45°	15∠90°	15∠-70°	20	5	18	160
5	90°	15	15∠-90°	20∠60°	10∠30°	10	31,8	123
6	-50°	20∠-30°	15	10∠60°	20∠40°	4	55	736
7	-40°	10∠30°	15∠-90°	15	10∠90°	1	119	318
8	70°	15∠-60°	15∠90°	20∠50°	10∠50°	15	31,8	2376
9	20°	15∠90°	15∠-90°	10∠-50°	20	3	15,9	1104
10	50°	10∠-90°	15∠90°	15∠40°	10∠70°	1	31,8	637
11	30°	10∠90°	15	35∠80°	12∠45°	65	165	120
12	70°	20∠40°	15∠-90°	10∠30°	15∠50°	3	15	170
13	-40°	10	15∠-90°	15∠30°	15∠60°	20	13	1170
14	-90°	15∠-90°	15	20∠20°	25∠60°	8	27	559
15	-40°	20∠-60°	15∠90°	10	15∠70°	30	48	318
16	40°	15∠90°	15∠90°	15∠-20°	12∠60°	83	184	170
17	30°	15∠-30°	15∠90°	15∠-30°	9∠80°	6	178	85
18	-10°	20∠30°	15∠90°	10∠-45°	15∠70°	10	15,9	218
19	40°	15∠60°	15∠90°	15∠-20°	15∠60°	17	31,8	637
20	-30°	60∠80°	12	15∠-45°	15∠40°	37	31,8	212
21	-40°	15∠90°	15∠-10°	15	15∠30°	9	18,4	160
22	50°	10	15∠45°	15∠-60°	10∠50°	10	31,8	637
23	90°	10	15∠-30°	25∠60°	15∠45°	26	95,5	159
24	45°	10∠90°	10∠-30°	15∠70°	25∠30°	56	26	371
25	60°	10	15∠40°	12∠-60°	30∠10°	3	35	612
26	30°	10∠90°	15∠-50°	9∠90°	15∠30°	5	50	280
27	-60°	10∠-90°	15∠-60°	15	15∠10°	8	95	160
28	-50°	10	25∠10°	15∠60°	12∠45°	65	165	120
29	60°	10∠-90°	15∠90°	25∠-10°	15∠50°	18	17	92
30	30°	10∠90°	15	35∠80°	10∠30°	6	36,6	160

Изобразить схему цепи, обозначив на ней токи, фазные и линейные напряжения источника и напряжения на нагрузке. Комплексные сопротивления на схеме, заданные в таблице 3 изобразить в виде соответствующих элементов R , L и C .

Действующее значение линейного напряжения трехфазного источника принять равным 380 В.

Записать в таблицу 3 комплексные действующие фазные и линейные напряжения трехфазного источника и заданные параметры цепи из таблицы 3.

Определить комплексные фазные напряжения на нагрузках, комплексные фазные токи нагрузок, линейные токи, ток в нейтральном проводе, а также падение напряжения в линии $\Delta U_{\text{л}}$. Определить активную и реактивную мощности цепи при соединении нагрузки по схеме «звезда». Значения мощностей записать в таблицу.

Построить в масштабе векторные диаграммы отдельно для каждой из схем соединения нагрузки. Определить показания ваттметров.

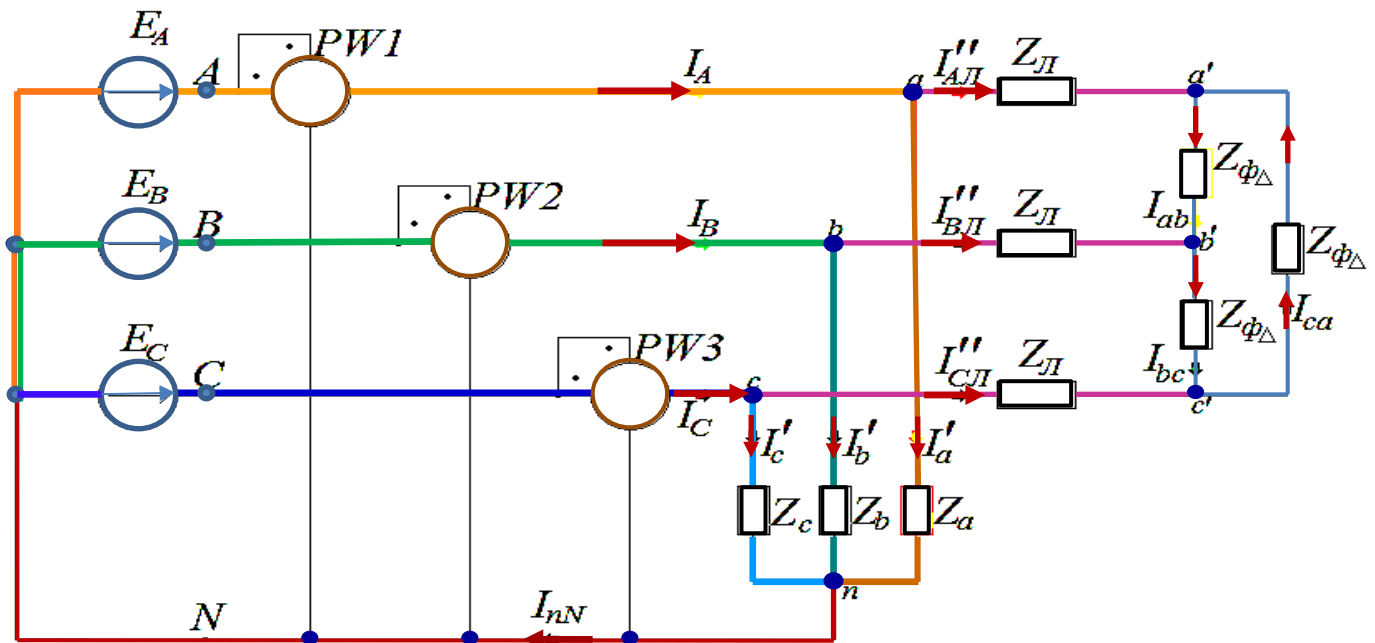


Рисунок – 7 Схема разветвленной трехфазной цепи

где:

$$f = 50, \text{ Гц}; \quad R = 15, \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_a = 15 \angle 90^\circ, \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_Л = 60 \angle 80^\circ, \text{ Ом};$$

$$L = 31,8 \text{ мГн}; \quad U_Л = 380, \text{ В}; \quad \underline{Z}_b = 15 \angle -90^\circ, \text{ Ом};$$

$$C = 927,3 \text{ мкФ}; \quad \underline{\Psi}_A = 90^\circ, \text{ А}; \quad \underline{Z}_c = 15, \text{ Ом};$$

Расчёт трёхфазных цепей по схемам звезда и треугольник

$$\underline{E} = E \angle \psi \rightarrow \underline{E} = E \cdot e^{j\psi} \rightarrow C = a + jb$$

$$\underline{\Psi}_A = 90^\circ - \text{угол ЭДС } \underline{E}_A$$

$$\underline{E}_A = \frac{380}{\sqrt{3}} \cdot e^{j90^\circ} = 220 \cdot e^{j90^\circ} = 220 \cos(90^\circ) + j220 \sin(90^\circ) = 0 + j220, \text{ В}$$

$$\underline{\Psi}_B = 90^\circ - 120^\circ = -30^\circ - \text{угол ЭДС } \underline{E}_B$$

$$\underline{E}_B = \frac{380}{\sqrt{3}} \cdot e^{j-30^\circ} = 220 \cdot e^{j-30^\circ} = 220 \cos(-30^\circ) - j220 \sin(30^\circ) = 190,52559 - j110, \text{ В}$$

$$\underline{\Psi}_C = 90^\circ + 120^\circ = 210^\circ - \text{угол ЭДС } \underline{E}_C.$$

$$\underline{E}_C = \frac{380}{\sqrt{3}} \cdot e^{j210^\circ} = 220 \cdot e^{j210^\circ} = 220 \cos(210^\circ) + j220 \sin(210^\circ) = -190,52559 - j110, \text{ В}$$

Рассчитываем комплексные сопротивления, определяем вид элемента (R,L,C)

$$\underline{Z}_a = 15 \angle 90^\circ = 15 \cdot e^{j90^\circ} = 15 \cos(90^\circ) + j15 \sin(90^\circ) = 0 + j15, \text{ Ом}; (L)$$

$$\underline{Z}_b = 15 \angle -90^\circ = 15 \cdot e^{j-90^\circ} = 15 \cos(-90^\circ) - j15 \sin(90^\circ) = 0 - j15, \text{ Ом}; (C)$$

$$\underline{Z}_c = 15, \text{ Ом} (R)$$

$$\underline{Z}_Л = 60 \angle 80^\circ = 60 \cdot e^{j80^\circ} = 60 \cos(80^\circ) + j60 \sin(80^\circ) = 10,41889 + j59,0885, \text{ Ом}; (R, L)$$

$$L_\phi = 31,8 \text{ мГн} = 0,0318 \text{ Гн}; \quad C_\phi = 927,3 \text{ мкФ} = 0,0009273 \text{ Ф}.$$

$$X_{L\phi} = L_\phi \cdot \omega = L_\phi \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,0318 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 9,9852 \text{ Ом};$$

$$X_{C\phi} = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,0009273} = 3,434394, \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{\phi\Delta} = R_\phi + jX_{L\phi} - jX_{C\phi} = 15 + j9,9852 - j3,434394 = 15 - j6,550806 =$$

$$= \sqrt{15^2 + 6,550806^2} \cdot e^{j \arctg \frac{6,550806}{15}} = 16,36805 \cdot e^{j23^\circ,592'}, \text{ Ом}$$

Преобразуем часть схемы (рисунок 2) и рассчитываем $\underline{Z}_{ЭУ}$:

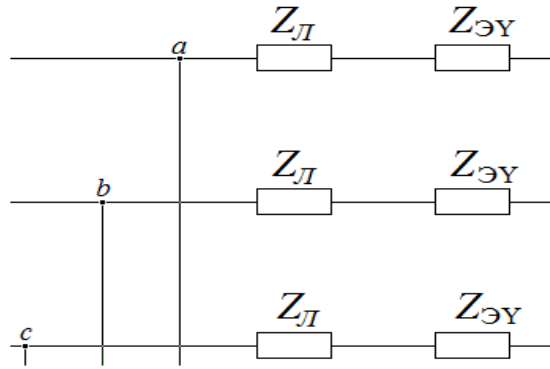


Рисунок 8 – Преобразованная часть схемы

$$\underline{Z}_{ЭУ} = \frac{Z_{\Phi\Delta}}{3} = \frac{16,36805 \cdot e^{j23^{\circ},592'}}{3} = 5,45603 \cdot e^{j23^{\circ},592'}, \text{ Ом};$$

Определяем комплексные токи нагрузок и линейные токи

$$I_A = I'_A + I''_{AЛ} = 14,66667 + 3,2637 + j0,7745 = 17,93037 + j0,7745 =$$

$$= \sqrt{17,93037^2 + 0,7745^2} \cdot e^{j \arctg \frac{0,7745}{17,93037}} = 17,94709 \cdot e^{j2^{\circ},473'}, \text{ А}$$

$$I'_A = \frac{E_A}{Z_a} = \frac{220 \cdot e^{j90^{\circ}}}{15 \cdot e^{j90^{\circ}}} = 14,66667, \text{ А}$$

$$I''_{AЛ} = \frac{E_A}{Z_{Л} + Z_{ЭУ}} = \frac{220 \cdot e^{j90^{\circ}}}{65,586 \cdot e^{j76^{\circ},65'}} = 3,35 \cdot e^{j13^{\circ},35'} = 3,35 \cdot \cos(13^{\circ},35') + j3,35 \cdot \sin(13^{\circ},35') =$$

$$= 3,2637 + j0,7745, \text{ А}$$

$$\text{Где: } \underline{Z}_{Л} + \underline{Z}_{ЭУ} = 10,41889 + j59,0885 + 4,72507 + j2,18361 = 15,14396 + j63,81357 =$$

$$= \sqrt{15,14396^2 + 63,81357^2} \cdot e^{j \arctg \frac{63,81357}{15,14396}} = 65,58584 \cdot e^{j76^{\circ},6498'}, \text{ Ом};$$

$$I_B = I'_B + I''_{BЛ} = 7,33333 + j12,701709 - 0,96110 - j3,21374 = 6,3722 + j9,48797 =$$

$$= \sqrt{6,3722^2 + 9,48797^2} \cdot e^{j \arctg \frac{9,48797}{6,3722}} = 11,4292 \cdot e^{j56^{\circ},11'}, \text{ А}$$

$$I'_B = \frac{E_B}{Z_b} = \frac{220 \cdot e^{j-30^{\circ}}}{15 \cdot e^{j-90^{\circ}}} = 14,66667 \cdot e^{j60^{\circ}} = 14,66667 \cdot \cos(60^{\circ}) + j14,66667 \cdot \sin(60^{\circ}) =$$

$$= 7,33333 + j12,701709, \text{ А}$$

$$I''_{BЛ} = \frac{E_B}{Z_{Л} + Z_{ЭУ}} = \frac{220 \cdot e^{j-30^{\circ}}}{65,586 \cdot e^{j76^{\circ},65'}} = 3,35 \cdot e^{j-106^{\circ},65'} =$$

$$= 3,35 \cdot \cos(-106^{\circ},65') - j3,35 \cdot \sin(106^{\circ},65') = -0,96110 - j3,21374, \text{ А};$$

$$I_C = I'_C + I''_{CЛ} = -12,7017 - j7,33333 - 2,3026 + j2,4392 = -15,0043 - j4,8941 =$$

$$= \sqrt{15,0043^2 + 4,8941^2} \cdot e^{j \arctg \frac{-0,7745}{-15,0043} + 180^{\circ}} = 15,7823 \cdot e^{j198^{\circ},065'}, \text{ А}$$

$$I'_C = \frac{E_C}{Z_c} = \frac{220 \cdot e^{j210^{\circ}}}{15} = 14,66667 \cdot e^{j210^{\circ}} = 14,66667 \cdot \cos(210^{\circ}) + j14,66667 \cdot \sin(210^{\circ}) =$$

$$= -12,7017 - j7,33333, \text{ А}$$

$$I_{CЛ}'' = \frac{E_C}{Z_{Л} + Z_{3Y}} = \frac{220 \cdot e^{j210^\circ}}{65,586 \cdot e^{j76^\circ,65'}} = 3,35 \cdot e^{j133^\circ,35'} =$$

$$= 3,35 \cdot \cos(133^\circ, 35') + j3,35 \cdot \sin(133^\circ, 35') = -2,3026 + j2,4392, A;$$

Рассчитываем ток в нейтральном проводе:

$$I_{nN} = I'_a + I'_b + I'_c = 14,66667 + 7,33333 + j12,70171 - 12,70171 - j7,33333 = 9,2983 + j5,3684 =$$

$$= \sqrt{9,2983^2 + 5,3684^2} \cdot e^{j \arctg \frac{5,3684}{9,2983}} = 10,7367 \cdot e^{j30^\circ}, A$$

Рассчитываем фазные токи нагрузок:

$$I_{AЛ}'' = \sqrt{3} \cdot I_{ab} \cdot e^{j-30^\circ} \Rightarrow$$

$$I_{ab} = I_{AЛ}'' \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{j30^\circ} = 3,35438 \cdot e^{j13^\circ,35'} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{j30^\circ} = 1,93665 \cdot e^{j43^\circ,35'} =$$

$$= 1,93665 \cdot \cos(43^\circ, 35') + j1,93665 \cdot \sin(43^\circ, 35') = 1,408277 + j1,32943, A$$

$$I_{bc} = I_{ab} \cdot e^{j-120^\circ} = 1,93665 \cdot e^{j43^\circ,35'} \cdot e^{j-120^\circ} = 1,93665 \cdot e^{j-76^\circ,65'} =$$

$$= 1,93665 \cdot \cos(-76^\circ, 65') - j1,93665 \cdot \sin(76^\circ, 65') = 0,4472 - j1,8843, A;$$

$$I_{ca} = I_{ab} \cdot e^{j120^\circ} = 1,93665 \cdot e^{j43^\circ,35'} \cdot e^{j120^\circ} = 1,93665 \cdot e^{j163^\circ,35'} =$$

$$= 1,93665 \cdot \cos(163^\circ, 35') + j1,93665 \cdot \sin(163^\circ, 35') = -1,85545 + j0,555, A;$$

Определяем комплексные фазные напряжения на нагрузках: $I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{\phi\Delta}} \Rightarrow$

$$U_{ab} = I_{ab} \cdot Z_{\phi\Delta} = 1,93665 \cdot e^{j43^\circ,35'} \cdot 16,36805 \cdot e^{j23^\circ,592'} = 31,6992 \cdot e^{j66^\circ,94'} =$$

$$= 31,6992 \cdot \cos(66^\circ, 94') + j31,6992 \cdot \sin(66^\circ, 94') = 12,4153 + j29,16676, B$$

$$U_{bc} = I_{bc} \cdot Z_{\phi\Delta} = 1,93665 \cdot e^{j-76^\circ,65'} \cdot 16,36805 \cdot e^{j23^\circ,592'} = 31,6992 \cdot e^{j-53^\circ,06'} =$$

$$= 31,6992 \cdot \cos(-53^\circ, 06') - j31,6992 \cdot \sin(53^\circ, 06') = 19,0514 - j25,335, B;$$

$$U_{ca} = I_{ca} \cdot Z_{\phi\Delta} = 1,93665 \cdot e^{j163^\circ,35'} \cdot 16,36805 \cdot e^{j23^\circ,592'} = 31,6992 \cdot e^{j186^\circ,94'} =$$

$$= 31,6992 \cdot \cos(186^\circ, 94') + j31,6992 \cdot \sin(186^\circ, 94') = -31,4668 - j3,831419, B;$$

Выполняем проверку 2-го закона Кирхгофа для контура N-A-a-c-C-N:

$$E_A - E_C = I'_a \cdot Z_a - I'_c \cdot Z_c$$

$$E_A - E_C = 0 + j220 - (-190,52559 - j110) = \mathbf{190,5256 + j330, B}$$

$$a \cdot Z_a = 14,66667 \cdot 15 \cdot e^{j90^\circ} = 220 \cdot e^{j90^\circ} = 220 \cdot \cos(90^\circ) + j220 \cdot \sin(90^\circ) = 0 + j220, B;$$

$$c \cdot Z_c = 14,66667 \cdot e^{j210^\circ} \cdot 15 = 220 \cdot e^{j210^\circ} = 220 \cdot \cos(210^\circ) + j220 \cdot \sin(210^\circ) =$$

$$= -190,5256 - j110, B;$$

$$I'_a \cdot Z_a - I'_c \cdot Z_c = 0 + j220 - (-190,5256 - j110) = j220 + 190,5256 + j110 =$$

$$= \mathbf{190,5256 + j330, B}.$$

Определяем активную мощность цепи при соединении нагрузки по схеме «звезда»:

$$P_A = I_a'^2 \cdot R_a = 14,66667^2 \cdot 0 = 0, Вт;$$

$$P_B = I_b'^2 \cdot R_b = 14,66667^2 \cdot 0 = 0, Вт;$$

$$P_C = I_c'^2 \cdot R_c = 14,66667^2 \cdot 15 = 3226,668, Вт;$$

Определяем реактивную мощность цепи при соединении нагрузки по схеме «звезда»:

$$Q_A = I_a'^2 \cdot \mp jX_a = 14,66667^2 \cdot 15 = 3226,668, Вар;$$

$$Q_B = I_b'^2 \cdot \mp jX_b = 14,66667^2 \cdot -15 = -3226,668, Вар;$$

$$Q_C = I_c'^2 \cdot \mp jX_c = 14,66667^2 \cdot 0 = 0, Вар;$$

Построение совмещённой диаграммы напряжений и токов

Строим в масштабе векторную топографическую диаграмму для схемы соединения нагрузки «треугольник»:

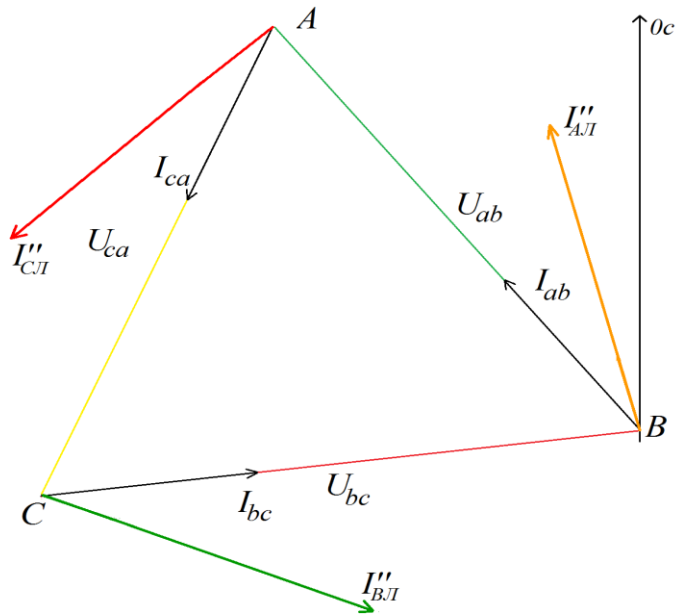


Рисунок – 9 Топографическая диаграмма для схемы соединения треугольник

Строим в масштабе векторную топографическую диаграмму для схемы соединения нагрузки «звезда»:

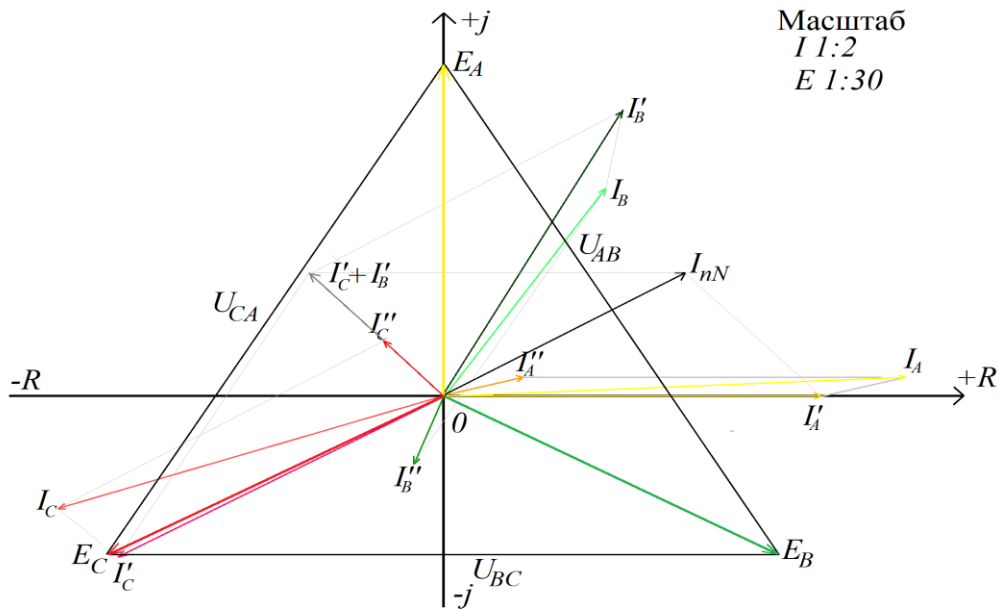


Рисунок – 10 Топографическая диаграмма для схемы соединения звезда

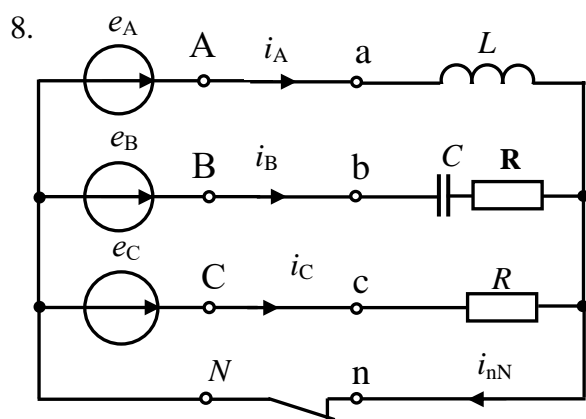
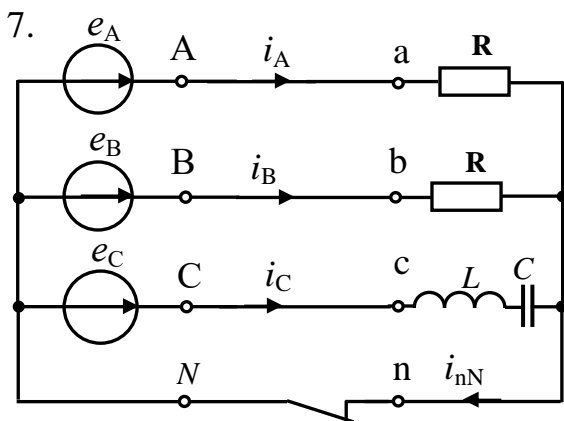
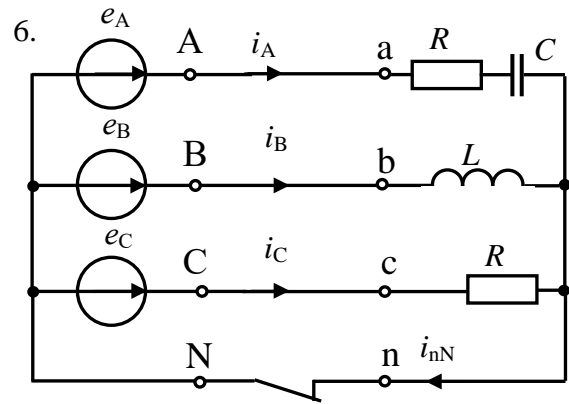
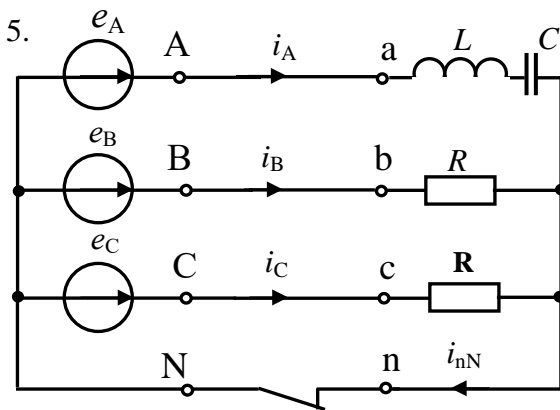
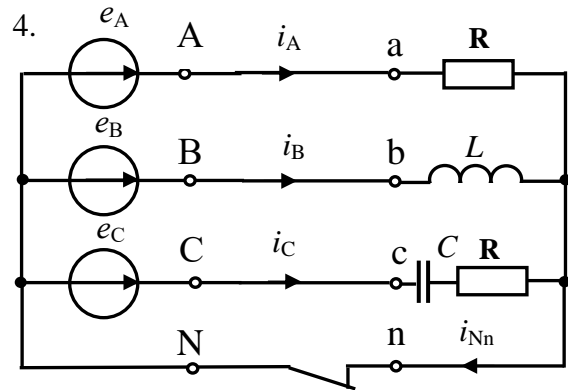
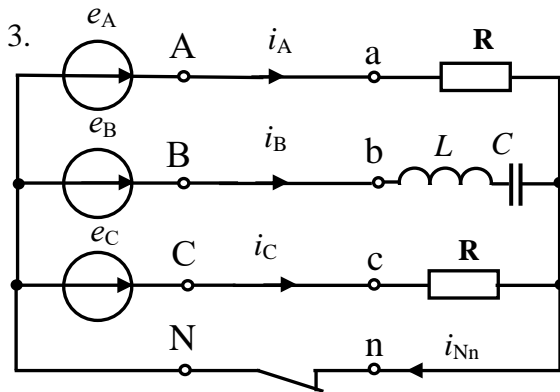
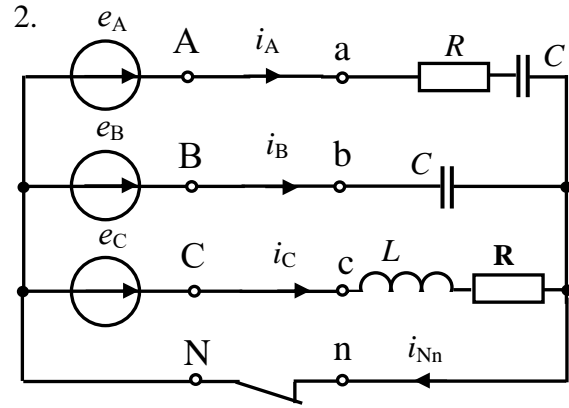
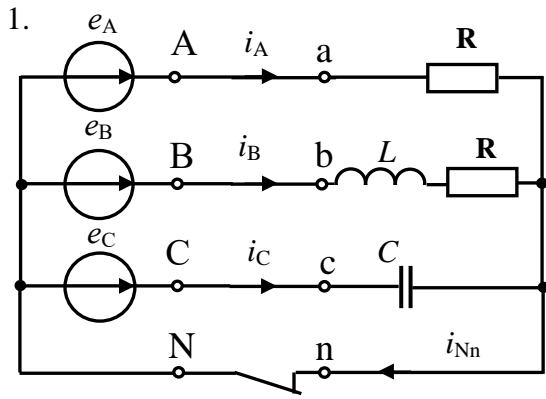
Определяем показания ваттметров:

$$PW_1 = I_A \cdot E_A \cdot \cos(\Psi_{E_A} - \Psi_{I_A}) = 17,94709 \cdot 220 \cdot \cos(90^\circ - 2,433^\circ) = 167,612 \text{ , Вт};$$

$$PW_2 = I_B \cdot E_B \cdot \cos(\Psi_{E_B} - \Psi_{I_B}) = 11,4292 \cdot 220 \cdot \cos(-30^\circ - 56^\circ, 11') = 170,5814 \text{ , Вт};$$

$$PW_3 = I_C \cdot E_C \cdot \cos(\Psi_{E_C} - \Psi_{I_C}) = 15,7823 \cdot 220 \cdot \cos(198^\circ, 065' - 210^\circ) = 3397,049 \text{ , Вт};$$

11. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРЁХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ



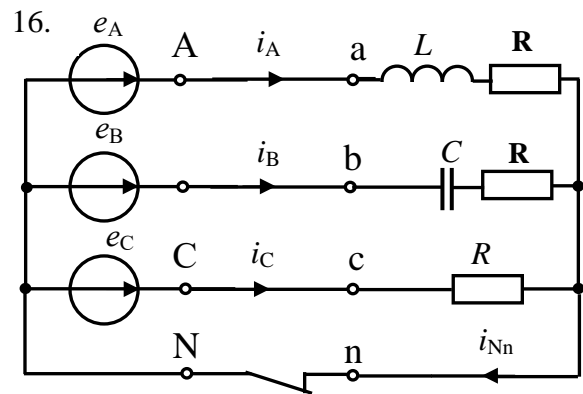
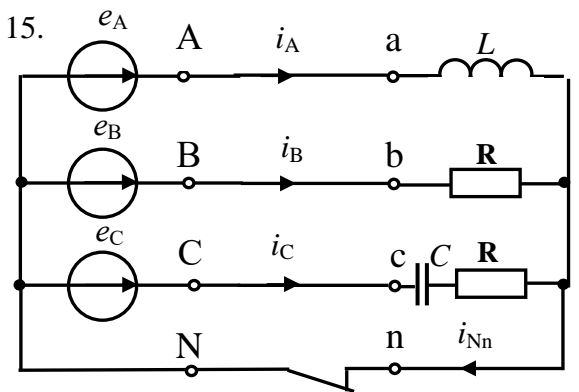
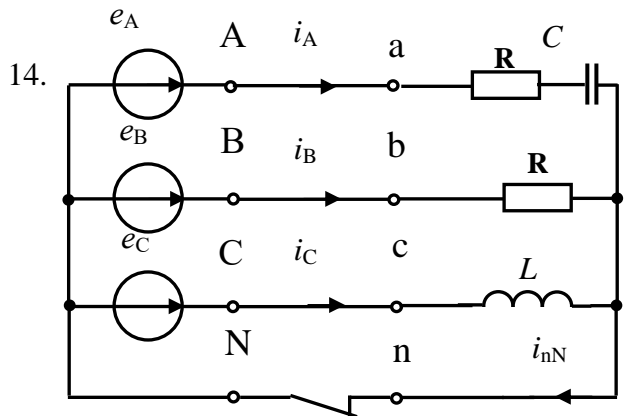
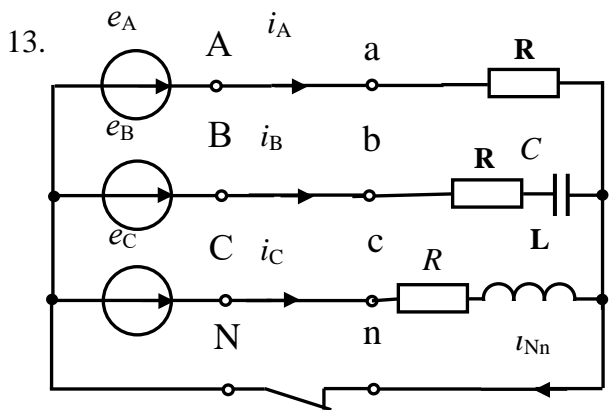
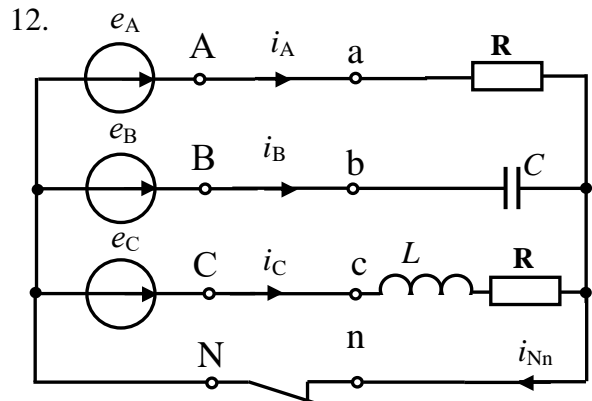
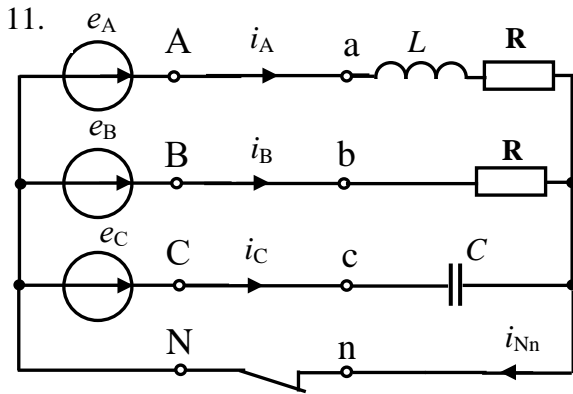
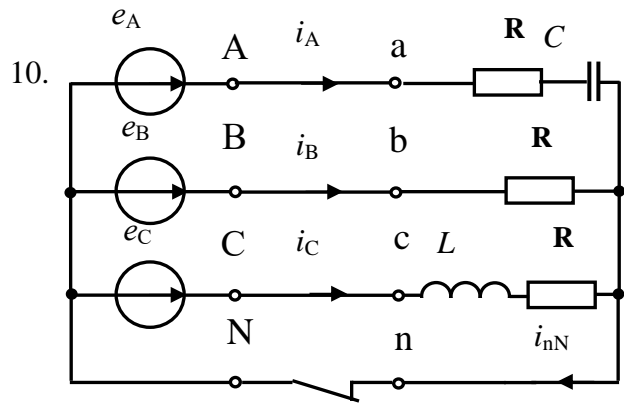
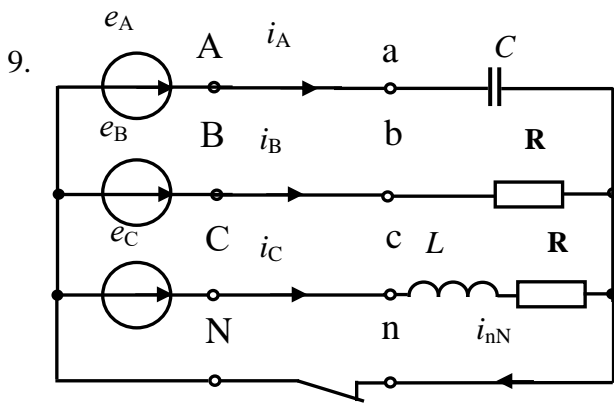


Рисунок 1– Заданные схемы трех фазных цепей

Пример. Даны параметры элементов цепи: $R_a; R_b; R_c; C; L$.

ЭДС фазы A $e_A(\omega t) = E_{m,\phi} \sin(\omega t + \Psi_A)$ В.

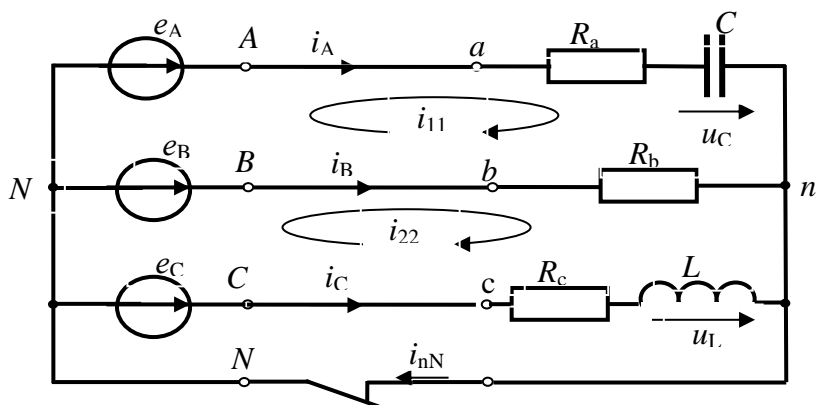


Рисунок 1– Заданная схема трехфазной цепи

1. Решение. Изображаем схему цепи при $t > 0$

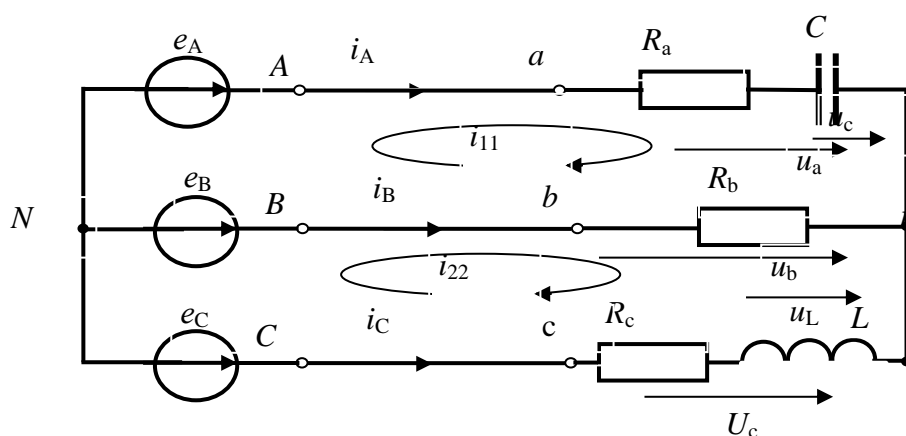


Рис. 2. Схема цепи в период переходных процессов

Расчет переходных параметров можно провести путем решения трех уравнений по законам Кирхгофа (здесь ток конденсатора $i_A = C \frac{du_C}{dt}$):

$$C \frac{du_C}{dt} + i_B + i_C = 0;$$

$$C \frac{du_C}{dt} \cdot R_a + u_C - i_{B,CB} R_b = e_A - e_B;$$

$$i_B R_b - L \frac{di_{C,CB}}{dt} - i_C R_c = e_B - e_C.$$

Решение уравнений найдем как сумму установившихся и свободных составляющих переходных параметров:

$$i_A = i_{A,y} + i_{A,CB}, \quad i_B = i_{B,y} + i_{B,CB}, \quad i_C = i_{C,y} + i_{C,CB};$$

$$u_a = u_{a,y} + u_{a,CB}, \quad u_b = u_{b,y} + u_{b,CB}, \quad u_C = u_{C,y} + u_{C,CB}, \quad u_L = u_{L,y} + u_{L,CB}.$$

2. Определим параметры цепи в установившемся режиме при $t \geq 0$ (ключ разомкнут) одним из трех методов.

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа

Составляем уравнения по законам Кирхгофа для комплексных амплитуд токов и напряжений:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{mA.y} + \underline{I}_{mB.y} + \underline{I}_{mC.y} &= 0; \\ \underline{I}_{mA.y} \underline{Z}_a - \underline{I}_{mB.y} \underline{Z}_b &= \underline{E}_{mA} - \underline{E}_{mB}; \\ \underline{I}_{mB.y} R_b - \underline{I}_{mC.y} \underline{Z}_c &= \underline{E}_{mB} - \underline{E}_{mC}. \end{aligned}$$

По методу контурных токов

$$\begin{aligned} \underline{I}_{m11.y} (\underline{Z}_a + R_b) - \underline{I}_{m22.y} \underline{Z}_b &= \underline{E}_{mA} - \underline{E}_{mB}; \\ -\underline{I}_{m11.y} R_b + \underline{I}_{m22.y} (\underline{Z}_c + R_b) &= \underline{E}_{mB} - \underline{E}_{mC}. \\ \underline{I}_{mA.y} = \underline{I}_{m11.y}; \underline{I}_{mB.y} = \underline{I}_{m22.y} - \underline{I}_{m11.y}; \underline{I}_{mC.y} &= -\underline{I}_{m22.y}. \end{aligned}$$

По методу узловых потенциалов

$$\begin{aligned} \underline{U}_{m.nN} &= \frac{\underline{E}_{mA} \underline{Y}_a + \underline{E}_{mB} \underline{Y}_b + \underline{E}_{mC} \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}; \\ \underline{I}_{mA.y} = \frac{\underline{U}_{m.a.a}}{\underline{Z}_a} = \frac{\underline{E}_{mA} - \underline{U}_{m.nN}}{\underline{Z}_a}; \underline{I}_{mB.y} = \frac{\underline{U}_{m.b.y}}{\underline{Z}_b} = \frac{\underline{E}_{mB} - \underline{U}_{m.nN}}{\underline{Z}_b}; \underline{I}_{mC.y} = \frac{\underline{U}_{m.c.c}}{\underline{Z}_c} = \frac{\underline{E}_{mC} - \underline{U}_{m.nN}}{\underline{Z}_c}. \end{aligned}$$

Во всех равенствах комплексные параметры равны:

$$\underline{Z}_a = R_a + j \left(-\frac{1}{\omega C} \right) = Z_a e^{j\varphi_a} \text{ Ом}; \underline{Z}_b = R_b; \underline{Z}_c = R_c + j\omega L = Z_c e^{j\varphi_c} \text{ Ом}.$$

Результат решения – комплексные амплитуды токов:

$$\underline{I}_{mA.y} = I_{mA.y} e^{j\Psi_{A.y}}; \underline{I}_{mB.y} = I_{mB.y} e^{j\Psi_{B.y}}; \underline{I}_{mC.y} = I_{mC.y} e^{j\Psi_{C.y}}.$$

Установившиеся мгновенные токи:

$$i_{A.y} = I_{mA.y} \sin(\omega t + e^{j\Psi_{A.y}}) \text{ А}; i_{B.y} = I_{mB.y} \sin(\omega t + e^{j\Psi_{B.y}}) \text{ А}; i_{C.y} = I_{mC.y} \sin(\omega t + e^{j\Psi_{C.y}}) \text{ А}.$$

Установившиеся фазные напряжения;

$$\begin{aligned} \underline{U}_{m.a.y} = \underline{I}_{mA.y} \cdot \underline{Z}_a = U_{m.a.y} e^{j\Psi_{a.y}}, u_{a.y} &= U_{m.a.y} \sin(\omega t + \Psi_{a.y}); \\ \underline{U}_{m.b.y} = \underline{I}_{mB.y} \cdot \underline{Z}_b = U_{m.b.y} e^{j\Psi_{b.y}}, u_{b.y} &= U_{m.b.y} \sin(\omega t + \Psi_{b.y}) \\ \underline{U}_{m.c.y} = \underline{I}_{mC.y} \cdot \underline{Z}_c = U_{m.c.y} e^{j\Psi_{c.y}} \text{ В}, u_{c.y} &= U_{m.c.y} \sin(\omega t + \Psi_{c.y}) \end{aligned}$$

Установившееся напряжение на конденсаторе:

$$\underline{U}_{C.m.y} = \underline{I}_{mC.y} (-jX_C) = U_{C.m.y} e^{j\Psi_{u.C.y}}$$

Мгновенное напряжение на емкости $u_{C.y} = 296,2 \sin(\omega t + \Psi_{u.C.y}) \text{ В}$.

Установившееся напряжение на катушке индуктивности:

$$\underline{U}_{m.L.y} = \underline{I}_{mC.y} \cdot jX_L = U_{m.L.y} e^{j\Psi_{L.y}}; u_{L.y} = U_{m.L.y} \sin(\omega t + \Psi_{L.y}).$$

3. Определяем свободные составляющие токов и напряжений в соответствии со схемой цепи на рис. 3.

4. Составляем уравнения по законам Кирхгофа – однородные дифференциальные уравнения 2-го порядка:

$$C \frac{du_{C,cb}}{dt} + i_{B,cb} + i_{C,cb} = 0;$$

$$C \frac{du_{C,cb}}{dt} \cdot R_a + u_{C,cb} - i_{B,cb} R_b = 0;$$

$$i_{B,cb} R_{B,cb} - L \frac{di_{C,cb}}{dt} - i_{C,cb} R_c = 0.$$

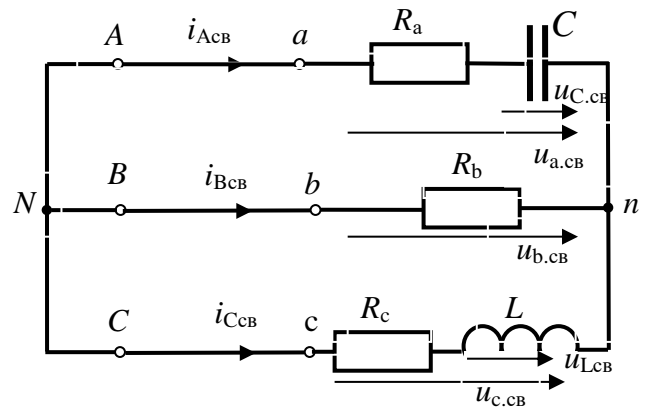


Рис. 3. Схема для расчета свободных составляющих переходных параметров

5. Составляем характеристическое уравнение, записав формулу комплексного входного сопротивления цепи по отношению, например, к ветви фазы *A*, а затем сделав в нем замену $j\omega \rightarrow p$ и приравняв полученное равенство нулю:

$$\underline{Z}(j\omega) = \frac{R_b(R_c + j\omega L)}{R_b + R_c + j\omega L} + R_a + \frac{1}{j\omega C} \rightarrow \frac{R_b(R_c + pL)}{R_b + R_c + pL} + R_a + \frac{1}{pC} = 0;$$

После преобразования получим квадратное уравнение $p^2 + bp + c = 0$.

Решая полученное квадратное уравнение, найдем его корни:

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

Если корни характеристического уравнения будут действительными числами $p_1 \neq p_2 < 0$, свободные составляющие будут представлять собой функции вида $f_{cb} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$, где коэффициенты A_1 и A_2 — постоянные интегрирования.

При равных действительных числах $p_1 = p_2 = p < 0$ свободные составляющие имеют вид функции $f_{cb} = (A_1 + A_2 t) e^{pt}$.

При комплексно сопряженных корнях $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_{cb}$ значения свободных токов и напряжений записываются в следующем виде:

$$f_{cb} = F_m e^{-\alpha t} \sin(\omega_{cb} t + \psi_{cb}).$$

Здесь амплитуды F_m , и начальные фазы ψ_{cb} , являются неизвестными постоянными интегрирования.

Во всех случаях постоянные интегрирования определяются по начальным условиям — значениям токов и напряжений в момент коммутации и значениям производных от токов и напряжений, которые можно найти по законам коммутации и из исходной системы уравнений при $t = 0$.

6. Определяем начальные условия.

Так как в каждой формуле для переходных параметров неизвестных два, для их определения необходимо иметь два уравнения. Второе уравнение можно получить путем дифференцирования первого.

Рассмотрим определение постоянных интегрирования для случая комплексно сопряженных корней.

Для тока фазы *C* получим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} u_{C.CB} &= U_{m.C} e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \psi_C) \\ \frac{du_{C.CB}}{dt} &= U_{m.C} (-\alpha) e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \psi_C) + U_{m.C} \omega_{CB} e^{-\alpha t} \cos(\omega_{CB} t + \psi_C) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} i_{C.CB} &= I_{m.C} e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \psi_{iC}) \\ \frac{di_{C.CB}}{dt} &= I_{m.C} (-\alpha) e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \psi_{iC}) + I_{m.C} \omega_{CB} e^{-\alpha t} \cos(\omega_{CB} t + \psi_{iC}) \end{aligned} \right\}.$$

Для напряжения на конденсаторе:

Для определения соответственно токов i_A , i_B и напряжения u_L составим аналогично уравнения:

$$\left. \begin{aligned} i_{A.CB} &= I_{m.A} e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \psi_{iA}) \\ \frac{di_{A.CB}}{dt} &= I_{m.A} (-\alpha) e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \psi_{iA}) + I_{m.A} \omega_{CB} e^{-\alpha t} \cos(\omega_{CB} t + \psi_{iA}) \end{aligned} \right\}.$$

$$\left. \begin{aligned} i_{B.CB} &= I_{m.B} e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \psi_{iB}) \\ \frac{di_{B.CB}}{dt} &= I_{m.B} (-\alpha) e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \psi_{iB}) + I_{m.A} \omega_{CB} e^{-\alpha t} \cos(\omega_{CB} t + \psi_{iB}) \end{aligned} \right\}.$$

$$\left. \begin{aligned} u_{L.CB} &= U_{L.m} e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \psi_{uL}) \\ \frac{du_{L.CB}}{dt} &= U_{m.L} (-\alpha) e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \psi_{uL}) + U_{m.L} \omega_{CB} e^{-\alpha t} \cos(\omega_{CB} t + \psi_{uL}) \end{aligned} \right\}.$$

Запишем эти уравнения при $t = 0$:

$$1) \left. \begin{aligned} u_{C.CB}(0) &= U_{m.C} \sin(\psi_C) \\ \left. \frac{du_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0} &= U_{m.C} (-\alpha) \sin(\psi_C) + U_{m.C} \omega_{CB} \cos(\psi_C) \end{aligned} \right\}.$$

$$2) \left. \begin{aligned} i_{C.CB}(0) &= I_{m.C} \sin(\psi_{iC}) \\ \left. \frac{di_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0} &= I_{m.C} (-\alpha) \sin(\psi_{iC}) + I_{m.C} \omega_{CB} \cos(\psi_{iC}) \end{aligned} \right\};$$

$$3) \left. \begin{aligned} i_{A.CB}(0) &= I_{m.A} \sin(\psi_{iA}) \\ \left. \frac{di_{A.CB}}{dt} \right|_{t=0} &= I_{m.A} (-\alpha) \sin(\psi_{iA}) + I_{m.A} \omega_{CB} \cos(\psi_{iA}) \end{aligned} \right\}.$$

$$4) \left. \begin{aligned} i_{B.CB}(0) &= I_{m.B} \sin(\psi_{iB}) \\ \left. \frac{di_{B.CB}}{dt} \right|_{t=0} &= I_{m.B} (-\alpha) \sin(\psi_{iB}) + I_{m.A} \omega_{CB} \cos(\psi_{iB}) \end{aligned} \right\}.$$

$$5) \left\{ \begin{array}{l} u_{L.cb}(0) = U_{L.m} \sin(\psi_{u_L}) \\ \left. \frac{du_{L.cb}}{dt} \right|_{t=0} = U_{m.L} (-\alpha) \sin(\psi_{u_L}) + U_{m.L} \omega_{cb} \cos(\psi_{u_L}) \end{array} \right\}.$$

Таким образом, постоянные интегрирования – амплитуды и начальные фазы, определяются путем решения соответствующих пар уравнений при условии определения значений пар параметров в момент коммутации (при $t = 0$).

Прежде всего следует определить независимые начальные условия, т.е. $i_{C.cb}(0) = i_{L.cb}(0)$ и $u_{C.cb}(0)$ по законам коммутации.

В момент коммутации ($t = 0$) справедливы следующие выражения:

$$i_{C.cb}(0) = i_C(0) - i_{C.y}(0), \quad u_{C.cb}(0) = u_C(0) - u_{C.y}(0),$$

где $u_{C.y}(0) = U_{m.C.y} \sin(\psi_{u.C.y})$ В, $i_{L.y}(0) = i_{C.y}(0) = I_{m.C.y} \sin(\psi_{C.y})$ А.

Для определения начальных значений $u_C(0)$ и $i_C(0)$ следует рассчитать эти параметры до коммутации из расчета четырех проводной трехфазной цепи (см. рис. 1 — ключ замкнут).

7. Расчет схемы цепи до коммутации комплексным методом ($\underline{U}_{nN} = 0$).

$$\underline{I}_{m.A} = \frac{\underline{E}_{m.A}}{\underline{Z}_a} = I_{m.A} e^{j\psi_A}; \quad \underline{I}_{m.C} = \frac{\underline{E}_{m.C}}{\underline{Z}_c} = I_{m.C} e^{j\psi_C}.$$

Комплексное напряжение на конденсаторе $\underline{U}_{m.C} = \underline{I}_{m.A} \cdot \left(-j \frac{1}{\omega C}\right) = U_{m.C} e^{j\psi_{u_C}}$ В.

Мгновенные значения параметров до коммутации:

$$i_C = I_{m.C} \sin(\omega t + \psi_{i_C}) \text{ А}; \quad u_C = U_{m.C} \sin(\omega t + \psi_{u_C}) \text{ В}.$$

При $t = 0$ найдем:

$$i_C(0) = I_{m.C} \sin(\psi_{i_C}) \text{ А}; \quad u_C(0) = U_{m.C} \sin(\psi_{u_C}) \text{ В}.$$

Далее находим значения $u_{C.cb}(0) = u_C(0) - u_{C.y}(0)$; $i_{C.cb}(0) = i_C(0) - i_{C.y}(0)$.

8. Для определения зависимых начальных условий, т.е. значений $i_{A.cb}(0)$, $i_{B.cb}(0)$ и $u_{L.cb}(0)$, а также значений производных $\left. \frac{du_{C.cb}}{dt} \right|_{t=0}$, $\left. \frac{di_{A.cb}}{dt} \right|_{t=0}$, $\left. \frac{di_{B.c}}{dt} \right|_{t=0}$, $\left. \frac{di_{C.cb}}{dt} \right|_{t=0}$ и $\left. \frac{du_{L.c}}{dt} \right|_{t=0}$, запишем исходную систему однородных дифференциальных уравнений при $t = 0$ (см. рис. 3), в которой значения $u_{C.cb}(0)$ и $i_{C.cb}(0)$ известны:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{A.cb}(0) + i_{B.cb}(0) + i_{C.cb}(0) = 0; \\ i_{A.cb}(0) \cdot R_a + u_{C.cb}(0) - i_{B.cb}(0) R_b = 0; \\ i_{B.cb}(0) R_b - L \left. \frac{di_{C.cb}}{dt} \right|_{t=0} - i_{C.cb}(0) R_c = 0. \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} i_{A.cb}(0) + i_{B.cb}(0) = -i_{C.cb}(0); \\ i_{A.cb}(0) \cdot R_a - i_{B.cb}(0) R_b = -u_{C.cb}(0); \\ i_{B.cb}(0) R_b - L \left. \frac{di_{C.cb}}{dt} \right|_{t=0} = i_{C.cb}(0) R_c. \end{array} \right\}$$

Получили три уравнения с тремя неизвестными, в результате решения которых найдем значения $i_{A.cb}(0)$, $i_{B.cb}(0)$ и $u_{L.cb}(0)$.

Производную $\left. \frac{di_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0}$ найдем из равенства $L \left. \frac{di_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0} = u_{L.CB}(0)$, откуда

$$\left. \frac{di_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0} = \frac{u_{L.CB}(0)}{L}.$$

Учитывая, что ток через конденсатор $i_{A.CB}(0) = C \left. \frac{du_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0}$, найдем значение

$$\left. \frac{du_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0} = \frac{i_{A.CB}(0)}{C}.$$

Таким образом, постоянные интегрирования $U_{m.C}$ и Ψ_{uc} , $I_{m.C}$ и Ψ_{ic} , найдем из решения следующих систем уравнений:

$$1) \left\{ \begin{array}{l} u_{C.CB}(0) = U_{m.C} \sin(\psi_{uc}) \\ \left. \frac{du_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0} = U_{m.C}(-\alpha) \sin(\psi_{uc}) + U_{m.C} \omega_{CB} \cos(\psi_{uc}) \end{array} \right\}$$

$$2) \left\{ \begin{array}{l} i_{C.CB}(0) = I_{m.C} \sin(\psi_{ic}) \\ \left. \frac{di_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0} = I_{m.C}(-\alpha) \sin(\psi_{ic}) + I_{m.C} \omega_{CB} \cos(\psi_{ic}) \end{array} \right\}.$$

Найдем зависимые начальные условия $\left. \frac{di_{A.CB}}{dt} \right|_{t=0}$, $\left. \frac{di_{B.CB}}{dt} \right|_{t=0}$, $\left. \frac{du_{L.CB}}{dt} \right|_{t=0}$.

Для их определения продифференцируем исходную систему уравнений и запишем ее при $t = 0$ (здесь значения $\left. \frac{di_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0}$ и $\left. \frac{du_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0}$ найдены ранее):

$$\left\{ \begin{array}{l} \left. \frac{di_{A.CB}}{dt} \right|_{t=0} + \left. \frac{di_{B.CB}}{dt} \right|_{t=0} + \left. \frac{di_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0} = 0, \\ R_a \left. \frac{di_{A.CB}}{dt} \right|_{t=0} + \left. \frac{du_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0} - R_b \left. \frac{di_{B.CB}}{dt} \right|_{t=0} = 0, \\ R_b \left. \frac{di_{B.CB}}{dt} \right|_{t=0} - \left. \frac{du_{L.CB}}{dt} \right|_{t=0} - R_c \left. \frac{di_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0} = 0. \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left. \frac{di_{A.CB}}{dt} \right|_{t=0} + \left. \frac{di_{B.CB}}{dt} \right|_{t=0} = - \left. \frac{di_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0}, \\ R_a \left. \frac{di_{A.CB}}{dt} \right|_{t=0} - R_b \left. \frac{di_{B.CB}}{dt} \right|_{t=0} = - \left. \frac{du_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0}, \\ R_b \left. \frac{di_{B.CB}}{dt} \right|_{t=0} - \left. \frac{du_{L.CB}}{dt} \right|_{t=0} = R_c \left. \frac{di_{C.CB}}{dt} \right|_{t=0}. \end{array} \right\}$$

Из решения системы трех уравнений с тремя неизвестными найдем искомые значения производных $\left. \frac{di_{A.CB}}{dt} \right|_{t=0}$, $\left. \frac{di_{B.CB}}{dt} \right|_{t=0}$, $\left. \frac{du_{L.CB}}{dt} \right|_{t=0}$.

9. Определение свободных составляющих переходных параметров.

Решая первую систему уравнений, найдем:

$$U_{m.C} = \frac{u_{C.cb}(0)}{\sin(\psi_{u_c})}, \quad \frac{u_{C.cb}(0)}{\sin(\psi_{u_c})}(-\alpha)\sin(\psi_{u_c}) + \frac{u_{C.cb}(0)}{\sin(\psi_{u_c})}\omega_{cb}\cos(\psi_{u_c}) = \left. \frac{du_{C.cb}}{dt} \right|_{t=0},$$

$$u_{C.cb}(0) \cdot (-\alpha) + \frac{u_{C.cb}(0) \cdot \omega_{cb}}{\operatorname{tg}(\psi_{u_c})} = \left. \frac{du_{C.cb}}{dt} \right|_{t=0}.$$

Далее определяется $\operatorname{tg}(\psi_{u_c})$, $\psi_C = \arcsin \psi_{u_c}$, $\sin(\psi_{u_c})$ и $U_{C.m} = \frac{u_{C.cb}(0)}{\sin(\psi_{u_c})}$ В.

Таким образом, нашли: $u_{C.cb} = U_{m.C} e^{-\alpha t} \sin(\omega_{cb} t + \psi_{u_c})$

Переходное напряжение на конденсаторе:

$$u_C = u_{C.y} + u_{C.cb} = U_{m.C.y} \sin(\omega t + \psi) + U_{C.m} e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega_{cb} t + \psi_{u_c}) \text{ В.}$$

Таким образом, решая аналогично системы уравнений 2), 3), 4) и 5) найдем постоянные интегрирования для токов $I_{m.A}$ и $\Psi_{i.A}$, $I_{m.B}$ и $\Psi_{i.B}$, $I_{m.C}$ и $\Psi_{i.C}$ и напряжения на катушке $U_{m.L}$ и Ψ_{uL} (см. выше). Определим свободные составляющие остальных переходных параметров – $i_{A.cb}$, $i_{B.cb}$, $i_{C.cb}$ и $u_{L.cb}$.

Затем запишем переходные параметры как суммы установившихся и свободных составляющих.

Примечание:

1. Если корни характеристического уравнения $p_1 \neq p_2 < 0$, для определения постоянных интегрирования A_1 и A_2 для каждого k -го переходного параметра (тока, напряжения) составляется пара уравнений при $t = 0$ вида $f_{cb}(0) = A_1 + A_2$ и $\left. \frac{df_{k.cb}}{dt} \right|_{t=0} = A_1 p_1 + A_2 p_2$;

Тогда решение, например, для напряжения на конденсаторе, запишется в виде выражения $u_C = u_{C.y} + u_{C.cb} = U_{m.C} \sin(\omega t + \psi_{u.C.y}) + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$ В, а для тока

$$i_C = i_{C.y} + i_{C.c.} = I_{m.C.y} \sin(\omega t + \psi_{i.C.y}) + B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t}.$$

2. Если корни характеристического уравнения одинаковые $p_1 = p_2 = p$, для определения постоянных интегрирования A_1 и A_2 для каждого k -го переходного параметра (тока, напряжения) составляется пара уравнений при $t = 0$ вида

$$f_{cb}(0) = A_1 \text{ и } \left. \frac{df_{k.cb}}{dt} \right|_{t=0} = A_1 p + A_2.$$

Решения записывается в следующем виде:

$$u_C = u_{C.y} + u_{C.cb} = U_{m.C} \sin(\omega t + \psi_{u.C.y}) + (A_1 + A_2 p t) e^{p t} \text{ В;}$$

$$i_A = i_{A.y} + i_{A.cb} = I_{m.C.y} \sin(\omega t + \psi_{i.C.y}) + (B_1 + B_2 t) e^{p t} \text{ А.}$$

Свободные составляющие переходных фазных напряжений на нагрузке можно определить в соответствии с законом Ома:

$$u_{a.cb} = i_{A.cb} R_a + u_{C.cb}; \quad u_{b.cb} = i_{B.cb} R_b; \quad u_{c.cb} = i_{C.cb} R_c + u_{L.cb}.$$

Затем записать формулы этих напряжений как суммы установившихся и свободных составляющих.

Графики переходных параметров могут быть построены с помощью компьютерной стандартной программы либо получены экспериментально с помощью программы EWB.

Построение графиков тока переходного процесса:

$$i_{LIII}(t) = i_{LYCT}(t) + i_{LCB}(t);$$

$$i_{LIII}(t) = 4,89 \cdot \sin(\omega t - 16,12^\circ) + 4,23 \cdot e^{-100 \cdot t} \cdot \sin(153t + 3).$$

1. Строим график установившегося процесса, кривая-1:

$$i_{LYCT}(t) = 4,89 \cdot \sin(\omega t - 16,12^\circ) \text{ (A)}$$

График этого уравнения это классическая синусоида (1) с максимумом тока в точке 4,89 по вертикали, при $t=0$, со смещением вправо на по горизонтали на $16,12^\circ$.

Переходной процесс прекращается в течение $2\tau \div 6\tau$, определяем длительность периода установившегося режима: $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{6,28}{314} = 0,02 \text{ с}$; постоянная времени τ определяем как: $\tau = \frac{1}{-\alpha} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ с}$. Определяем сколько τ содержится в периоде $n = \frac{T}{\tau} = \frac{0,02}{0,01} = 2$ при частоте $f = 50 \text{ Гц}$. Переводим τ времени в τ градусы:

$$\tau = \frac{2\pi}{n} = \frac{360^\circ}{2} = 180^\circ. \quad \text{Заменяем } \omega t \text{ на } \tau.$$

$$\text{При } t=0 \quad i_{LYCT}(0) = 4,89 \cdot \sin(-16,12^\circ) = -1,36 \text{ (A)}; \quad i_{LYCT}(0,5\tau) = 4,89 \cdot \sin(90^\circ - 16,12^\circ) = 4,7 \text{ (A)};$$

$$i_{LYCT}(\tau) = 4,89 \cdot \sin(180^\circ - 16,12^\circ) = 1,36 \text{ (A)}; \quad i_{LYCT}(1,5\tau) = 4,89 \cdot \sin(270^\circ - 16,12^\circ) = -4,7 \text{ (A)};$$

$$i_{LYCT}(2\tau) = 4,89 \cdot \sin(360^\circ - 16,12^\circ) = -1,36 \text{ (A)}; \quad i_{LYCT}(2,5\tau) = 4,89 \cdot \sin(450^\circ - 16,12^\circ) = 4,7 \text{ (A)};$$

τ	0	$0,5\tau$	τ	$1,5\tau$	2τ	$2,5\tau$
$i(t)$	-1,36	4,7	1,36	-4,7	-1,36	4,7

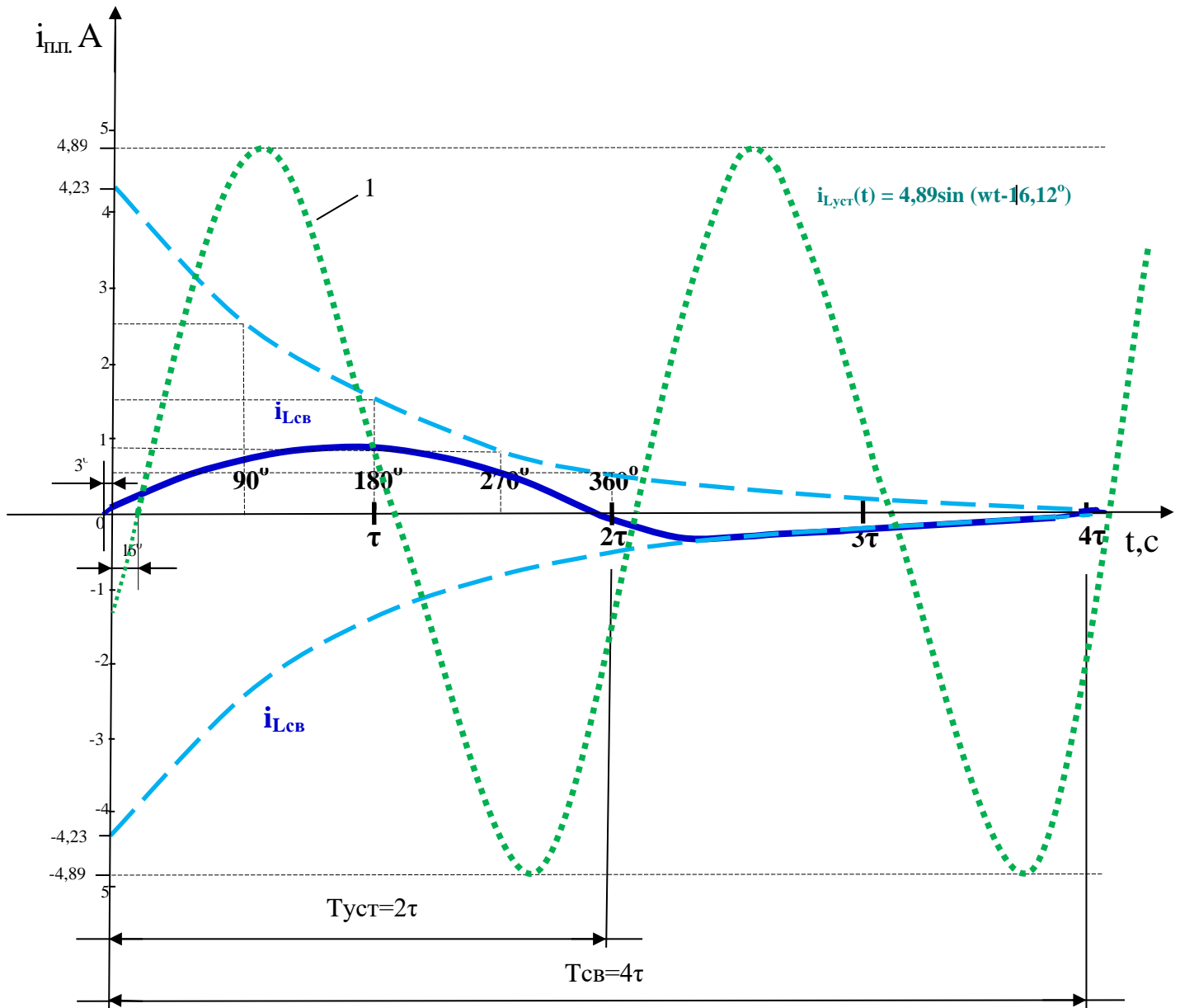
2. Определяем длительность периода свободного режима: $T = \frac{2\pi}{\omega_{св}} = \frac{6,28}{153} = 0,04 \text{ с}$;

Определяем сколько τ содержится в периоде: $n = \frac{T}{\tau} = \frac{0,04}{0,01} = 4$ при частоте $f = 24,36 \text{ Гц}$.

Синусоида свободного тока имеет частоту примерно в два раза меньше частоты промышленного тока в России. Период в этом случае будет 702° .

3. Строим график свободного тока: $i_{LCB}(t) = 4,23 \cdot e^{-100t} \cdot \sin(153t + 3)$, для этого разбиваем этот график на два графика:

$$i_{св}(t) = 4,23 \cdot e^{-100t} \quad \text{и} \quad i_{LCB}(t) = \sin(153t + 3).$$



Приравниваем τ к t и рассчитываем ток:

$$i_{LCB}(0) = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot 0} = 4,23 \text{ (A)};$$

$$i_{LCB 0,5\tau}(t) = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot \tau} = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot 0,005} = 4,23 \cdot e^{-0,5} = 4,23 \cdot 0,607 = 2,57 \text{ (A)};$$

$$i_{LCB 1\tau}(t) = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot \tau} = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot 0,01} = 4,23 \cdot e^{-1} = 4,23 \cdot 0,37 = 1,55$$

$$i_{LCB 1,5\tau}(t) = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot \tau} = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot 0,015} = 4,23 \cdot e^{-1,5} = 4,23 \cdot 0,833 = 0,944$$

$$i_{LCB 2\tau}(t) = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot \tau} = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot 0,02} = 4,23 \cdot e^{-2} = 4,23 \cdot 0,135 = 0,57$$

$$i_{LCB 3\tau}(t) = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot \tau} = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot 0,03} = 4,23 \cdot e^{-3} = 4,23 \cdot 0,0498 = 0,21$$

$$i_{LCB 4\tau}(t) = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot \tau} = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot 0,04} = 4,23 \cdot e^{-4} = 4,23 \cdot 0,0183 = 0,0775$$

$$i_{LCB 5\tau}(t) = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot \tau} = 4,23 \cdot e^{-100 \cdot 0,05} = 4,23 \cdot e^{-5} = 4,23 \cdot 0,007 = 0,029$$

τ	0	$0,5\tau$	τ	$1,5\tau$	2τ	3τ	4τ
$i_{CB}(t)$	4.23	2.57	1.55	0.944	0.57	0.21	0.0775

Строим график свободного тока: $i_{LCB}(t) = \sin(153t + 3^\circ)$

Переводим ωt времени в τ градусы: $\tau = \frac{2\pi}{n} = \frac{360^\circ}{4} = 90^\circ$.

Заменяем ωt на τ

$$i_{LCB0}(t) = \sin 3^\circ = 0,052;$$

$$i_{LCB0,5\tau}(t) = \sin(45^\circ + 3^\circ) = 0,74;$$

$$i_{LCB1\tau}(t) = \sin(90^\circ + 3^\circ) = 0,9986;$$

$$i_{LCB1,5\tau}(t) = \sin(135^\circ + 3^\circ) = 0,67;$$

$$i_{LCB2\tau}(t) = \sin(180^\circ + 3^\circ) = -0,052;$$

$$i_{LCB3\tau}(t) = \sin(270^\circ + 3^\circ) = -0,9986;$$

$$i_{LCB4\tau}(t) = \sin(360^\circ + 3^\circ) = 0,052.$$

τ	0	0,5 τ	τ	1,5 τ	2 τ	3 τ	4 τ
$i_{CB}(t)$	0.052	0.74	0.9986	0.67	-0.052	-0.9986	0.052

12.Разработка заключения

Студент подводит итоги работы и делает соответствующие выводы. Необходимо указать, что знание методов расчёта электрических цепей позволяет рассчитать нагрузку на предприятиях АПК и потребляемую мощность сельских поселков, асинхронных двигателей преобразующих в механическую мощность до 50% электроэнергии, производимой в России, и таким образом «приводят в движение» промышленность, сельское хозяйство.

Оформление библиографического списка

В библиографическом списке указываются сведения о книгах (автор, заглавие, место издания, издательство, год издания и количество страниц), нормативной правовой документации и т.д.

Оформление Приложения (по необходимости)

Приложения являются самостоятельной частью работы. В приложениях курсовой работы помещают материал, дополняющий основной текст.

Приложениями могут быть: таблицы большого формата; статистические данные; фотографии средств измерения, индивидуальной и коллективной защиты, техническая документация и сертификаты на станки, оборудование и материалы, а также тексты, которые по разным причинам не могут быть помещены в основной работе и т.д.

Требования к оформлению курсовой работы Оформление текстового материала (ГОСТ 7.0.11 – 2011)

Курсовая работа должна быть выполнена печатным способом с использованием компьютера и принтера на одной стороне белой бумаги формата А4 (210x297 мм).

Поля: с левой стороны – 25 мм; с правой – 10 мм; в верхней части – 20 мм; в нижней – 20 мм.

Тип шрифта: *Times New Roman Cyr*. Шрифт основного текста: обычный, размер 14 пт. Шрифт заголовков разделов (глав): полужирный, размер 16 пт. Шрифт заголовков подразделов: полужирный, размер 14 пт. Цвет шрифта должен быть черным. Межсим-

вольный интервал – обычный. Межстрочный интервал – полуторный. Абзацный отступ – 1,25 см.

Страницы должны быть пронумерованы. Порядковый номер ставится в середине верхнего поля. Первой страницей считается титульный лист, но номер страницы на нем не проставляется. Рецензия - страница 2, затем 3 и т.д.

Главы имеют сквозную нумерацию в пределах работы и обозначаются арабскими цифрами. В конце заголовка точка не ставится. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой. Переносы слов в заголовках не допускаются.

Номер подраздела (параграфа) включает номер раздела (главы) и порядковый номер подраздела (параграфа), разделенные точкой. Пример – 1.1, 1.2 и т.д.

Главы работы по объему должны быть пропорциональными. Каждая глава начинается с новой страницы.

В работе необходимо чётко и логично излагать свои мысли, следует избегать повторов и отступлений от основной темы. Не следует загромождать текст длинными описательными материалами.

На последней странице курсовой работы ставятся дата окончания работы и подпись автора.

Законченную работу следует переплести в папку.

Написанную и оформленную в соответствии с требованиями курсовую работу обучающийся регистрирует на кафедре. Срок рецензирования – не более 7 дней.

Оформление ссылок (ГОСТР 7.0.5)

При написании курсовой работы необходимо давать краткие внутри текстовые библиографические ссылки. Если делается ссылка на источник в целом, то необходимо после упоминания автора или авторского коллектива, а также после приведенной цитаты работы, указать в квадратных скобках номер этого источника в библиографическом списке. Например: по мнению Ван Штраалена, существуют по крайней мере три случая, когда биоиндикация становится незаменимой [7].

Допускается внутри текстовую библиографическую ссылку заключать в круглые скобки, с указанием авторов и года издания объекта ссылки. Например, (Черников, Соколов 2018).

Если ссылку приводят на конкретный фрагмент текста документа, в ней указывают порядковый номер и страницы, на которых помещен объект ссылки. Сведения разделяют запятой, заключая в квадратные скобки. Например, [10, с. 81]. Допускается оправданное сокращение цитаты. В данном случае пропущенные слова заменяются многоточием.

Оформление иллюстраций (ГОСТ 2.105-95)

На все рисунки в тексте должны быть даны ссылки. Рисунки должны располагаться непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые, или на следующей странице. Рисунки нумеруются арабскими цифрами, при этом нумерация сквозная, но допускается нумеровать и в пределах раздела (главы). В последнем случае, номер рисунка состоит из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой (например: Рисунок 1.1).

Подпись к рисунку располагается под ним посередине строки. Слово «Рисунок» пишется полностью. В этом случае подпись должна выглядеть так: Рисунок 2 – Жизненные формы растений

Точка в конце названия не ставится.

При ссылках на иллюстрации следует писать «... в соответствии с рис. 2» при сквозной нумерации и «... в соответствии с рис. 1.2» при нумерации в пределах раздела.

Независимо от того, какая представлена иллюстрация - в виде схемы, графика, диаграммы - подпись всегда должна быть «Рисунок». Подписи типа «Схема 1.2», «Диагр. 1.5» не допускаются.

Схемы, графики, диаграммы (если они не внесены в приложения) должны размещаться сразу после ссылки на них в тексте курсовой работы. Допускается размещение иллюстраций через определенный промежуток текста в том случае, если размещение иллюстрации непосредственно после ссылки на нее приведет к разрыву и переносу ее на следующую страницу.

Если в тексте документа имеется иллюстрация, на которой изображены составные части изделия, то на этой иллюстрации должны быть указаны номера позиций этих составных частей в пределах данной иллюстрации, которые располагают в возрастающем порядке, за исключением повторяющихся позиций, а для электрических элементов позиционные обозначения, установленные в схемах данного изделия.

Исключение составляют электрические элементы, являющиеся органами регулировки или настройки, для которых (кроме номера позиции) дополнительно указывают в подписуночном тексте назначение каждой регулировки и настройки, позиционное обозначение и надписи на соответствующей планке или панели.

Допускается, при необходимости, номер, присвоенный составной части изделия на иллюстрации, сохранять в пределах документа.

Общие правила представления формул (ГОСТ 2.105-95)

Формулы должны быть оформлены в редакторе формул *Equation Editor* и вставлены в документ как объект.

Большие, длинные и громоздкие формулы, которые имеют в составе знаки суммы, произведения, дифференцирования, интегрирования, размещают на отдельных строках. Это касается также и всех нумеруемых формул. Для экономии места несколько коротких однотипных формул, отделенных от текста, можно подать в одной строке, а не одну под одну. Небольшие и несложные формулы, которые не имеют самостоятельного значения, вписывают внутри строк текста.

Объяснение значений символов и числовых коэффициентов нужно подавать непосредственно под формулой в той последовательности, в которой они приведены в формуле. Значение каждого символа и числового коэффициента нужно подавать с новой строки. Первую строку объяснения начинают со слова «где» без двоеточия.

Уравнения и формулы нужно выделять из текста свободными строками. *Выше и ниже каждой формулы нужно оставить не меньше одной свободной строки.* Если уравнение не вмещается в одну строку, его следует перенести после знака равенства (=), или после знаков плюс (+), минус (-), умножение.

Нумеровать следует лишь те формулы, на которые есть ссылка в следующем тексте.

Порядковые номера помечают арабскими цифрами в круглых скобках около правого поля страницы без точек от формулы к ее номеру. Формулы должны нумероваться сквозной нумерацией арабскими цифрами, которые записывают на уровне формулы справа в круглых скобках. Допускается нумерация формул в пределах раздела. В этом случае номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных

точкой. Номер, который не вмещается в строке с формулой, переносят ниже формулы. Номер формулы при ее перенесении вмещают на уровне последней строки. Если формула взята в рамку, то номер такой формулы записывают снаружи рамки с правой стороны напротив основной строки формулы. Номер формулы-дроби подают на уровне основной горизонтальной черточки формулы.

Номер группы формул, размещенных на отдельных строках и объединенных фигурной скобкой, помещается справа от острия парантеза, которое находится в середине группы формул и направлено в сторону номера.

Общее правило пунктуации в тексте с формулами такое: формула входит в предложение как его равноправный элемент. Поэтому в конце формул и в тексте перед ними знаки препинания ставят в соответствии с правилами пунктуации.

Двоеточие перед формулой ставят лишь в случаях, предусмотренных правилами пунктуации: а) в тексте перед формулой обобщающее слово; б) этого требует построение текста, который предшествует формуле.

Знаками препинания между формулами, которые идут одна под одной и не отделены текстом, могут быть запятая или точка с запятой непосредственно за формулой к ее номеру.

Пример: Внутренняя электромагнитная мощность трансформатора вычисляется по формуле:

$$P_{ЭМ} = P_1 + p_{ЭЛЛ} - p_{ме} \quad (4.2)$$

где $P_1 = 3U_1I_1\cos\varphi_1$ – активная мощность, поступающая в первичную обмотку из сети;

$p_{ЭЛЛ}$ – электрические потери мощности в первичной обмотке трансформатора;

$p_{ме}$ – магнитные потери в трансформаторе (потери в стали).

При ссылке на формулу в тексте ее номер ставят в круглых скобках.

Например: Из формулы (4.2) следует.

Оформление таблиц (ГОСТ 2.105-95)

На все таблицы в тексте должны быть ссылки. Таблица должна располагаться непосредственно после текста, в котором она упоминается впервые, или на следующей странице.

Все таблицы нумеруются (нумерация сквозная, либо в пределах раздела – в последнем случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера внутри раздела, разделенных точкой (*например:* Таблица 1.2)). Таблицы каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением обозначения приложения (*например:* Приложение 2, табл. 2).

Название таблицы следует помещать над таблицей слева, без абзацного отступа в одну строку с ее номером через тире (*например:* Таблица 6 – Результаты измерений и заключение).

При переносе таблицы на следующую страницу название помещают только над первой частью. Над другими частями также слева пишут слово «Продолжение» или «Окончание» и указывают номер таблицы (*например:* Продолжение таблицы 6).

Таблицы, занимающие страницу и более, обычно помещают в приложение. Таблицу с большим количеством столбцов допускается размещать в альбомной ориентации. В таблице допускается применять размер шрифта 12, интервал 1,0.

Заголовки столбцов и строк таблицы следует писать с прописной буквы в единственном числе, а подзаголовки столбцов – со строчной буквы, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если они имеют самостоятельное значение. В конце заголовков и подзаголовков столбцов и строк точки не ставят.

Разделять заголовки и подзаголовки боковых столбцов диагональными линиями не допускается. Заголовки столбцов, как правило, записывают параллельно строкам таблицы, но при необходимости допускается их перпендикулярное расположение.

Горизонтальные и вертикальные линии, разграничивающие строки таблицы, допускается не проводить, если их отсутствие не затрудняет пользование таблицей. Но заголовки столбцов и строк таблицы должны быть отделены линией от остальной части таблицы.

Оформление библиографического списка (ГОСТ 7.1) Оформление книг

с 1 автором

1. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин [Текст]: учебник для вузов / И.П. Копылов [и др.]. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2012. – 767 с. – (Бакалавр. Углубленный курс).

с 2-3 авторами

1. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы [Текст]: учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.

2. Забудский, Е.И. Электрические машины [Текст]: учебное пособие для вузов. Ч.3. Синхронные машины / Е.И. Забудский. – 2-е изд., перераб. и доп., в четырех частях. – Москва: Мегapolis, 2019. – 295 с.

3. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин [Текст]: учебник для вузов / И.П. Копылов [и др.]. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2012. – 767 с. – (Бакалавр. Углубленный курс).

с 4 и более авторами

1. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы [Текст]: учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.

2. Забудский, Е.И. Электрические машины [Текст]: учебное пособие для вузов. Ч.1. Трансформаторы / Е.И. Забудский. – М.: МГАУ имени В.П. Горячкина, 2002. – 167 с.

3. Забудский, Е.И. Электрические машины [Текст]: учебное пособие для вузов. Ч.3. Синхронные машины / Е.И. Забудский. – 2-е изд., перераб. и доп., в четырех частях. – Москва: Мегapolis, 2019. – 295 с.

4. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин [Текст]: учебник для вузов / И.П. Копылов [и др.]. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2012. – 767 с. – (Бакалавр. Углубленный курс).

Оформление учебников и учебных пособий

Забудский, Е.И. Электрические машины [Текст]: учебное пособие для вузов. Ч.4. Машины постоянного тока / Е.И. Забудский. – М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2014. – 160 с.

Оформление учебников и учебных пособий под редакцией

Копылов, И.П. Электрические машины [Текст]: уч. пособие / И.П. Копылов, С.И. Копылов; под ред. И.П. Копылова. – М.: Юрайт, 2014. – 180 с.

Для многотомных книг

Забудский, Е.И. Электрические машины Т.2. Асинхронные машины / Е.И. Забудский. – М.: Юрайт, 2014. – 123 с.

Словари и энциклопедии

Ожегов, С.И. Толковый словарь русского языка / С.И. Ожегов, Н. Ю. Шведова. – М.: Азбуковник, 2000. – 940 с.

Оформление статей из журналов и периодических сборников

Забудский, Е.И. Стабилизация напряжения распределительной электросети на основе однокристалльной микро ЭВМ // International Journal "INFORMATION TECHNOLOGIES & KNOWLEDGE" Vol. 11, Number 1, IТHEA, Sofia (Bulgaria), June 2017, pp.73-99.
http://zabudsky.ru/Bolgar2017p1-2_72-99_100.pdf

Диссертация

Жуланова, В.Н. Гумусное состояние почв и продуктивность агроценозов Тувы // В.Н. Жуланова. – Дисс. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2005. – 150 с.

Автореферат диссертации

Козеичева, Е.С. Влияние агрохимических свойств почв центрального нечерноземья на эффективность азотных удобрений: Автореф. дис. канд. биол. наук: 06.01.04 – М.: 2011. – 23с.

Описание нормативно-технических и технических документов

1. ГОСТ 27471–87. Машины электрические вращающиеся. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 52776–2007. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики.
3. ГОСТ 31606–2012. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно. Общие технические требования.
4. ГОСТ 9630–80. Двигатели трехфазные асинхронные напряжением свыше 1000 В. Общие технические условия.
5. ГОСТ 7217–87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний.

Описание официальных изданий

Конституция Российской Федерации: принята всенародным голосованием 12 декабря 1993 года. – М.: Эксмо, 2013. – 63 с.

Депонированные научные работы

1. Крылов, А.В. Гетерофазная кристаллизация бромида серебра / А.В. Крылов, В.В. Бабкин; Редкол. «Журн. прикладной химии». – Л., 1982. – 11 с. – Деп. в ВИНТИ 24.03.82; № 1286-82.
2. Кузнецов, Ю.С. Изменение скорости звука в холодильных расплавах / Ю.С. Кузнецов; Моск. хим.-технол. ун-т. – М., 1982. – 10 с. – Деп. в ВИНТИ 27.05.82; № 2641.

Электронные ресурсы

Забудский, Е.И. Математическое моделирование управляемых электро-магнитных реакторов [Электронный ресурс]: Монография / Е.И. Забудский – Москва: ООО "Мегаполис", 2018. – 356 с. Color.

Режим доступа: http://zabudsky.ru/Monograph_March2018site.pdf

Оформление графических материалов

Графическая часть выполняется на одной стороне белой чертёжной бумаги в соответствии с требованиями ГОСТ 2.301-68 формата А1 (594x841). В обоснованных случаях для отдельных листов допускается применение других форматов.

Требования к оформлению графической части изложены в стандартах ЕСКД: ГОСТ 2.302-68* «Масштабы»; ГОСТ 2.303-68* «Линии»; ГОСТ 2.304-81* «Шрифты», ГОСТ 2.305-68** «Изображения – виды, разрезы, сечения» и т. д. Основная надпись на чертежах выполняется по ГОСТ 2.104-68*. Оформление основной надписи графической части выполняется в соответствии с ГОСТ Р 21.1101-2013 СПДС.

Чертежи должны быть оформлены в полном соответствии с государственными стандартами: «Единой системы конструкторской документации» (ЕСКД); «Системы проектной документации для строительства» (СПДС (ГОСТ 21)) и других нормативных документов. На каждом листе тонкими линиями отмечается внешняя рамка по размеру формата листа, причем вдоль короткой стороны слева оставляется поле шириной 25 мм для подшивки листа. В правом нижнем углу располагается основная подпись установленной формы, приложение Г.

Порядок защиты курсовой работы

Ответственность за организацию и проведение защиты курсовой работы возлагается на заведующего кафедрой и руководителя выполнения курсовой работы. Заведующий кафедрой формирует состав комиссии по защите курсовых работ, утвержденный протоколом заседания кафедры. Руководитель информирует обучающихся о дне и месте проведения защиты курсовых работ, обеспечивает работу комиссии необходимым оборудованием, проверяет соответствие тем представленных курсовых работ примерной тематике, готовит к заседанию комиссии экзаменационную ведомость с включением в нее тем курсовых работ обучающихся, дает краткую информацию о порядке проведения защиты курсовых работ, обобщает информацию об итогах проведения защиты курсовых работ на заседании кафедры.

К защите могут быть представлены только работы, которые получили положительную рецензию. Не зачтенная работа должна быть доработана в соответствии с замечаниями руководителя в установленные сроки и сдана на проверку повторно.

Защита курсовых работ проводится до начала экзаменационной сессии. Защита курсовой работы включает:

- краткое сообщение автора продолжительностью 5-7 минут об актуальности работы, целях, объекте исследования, результатах и рекомендациях по совершенствованию деятельности анализируемой организации в рамках темы исследования;
- вопросы к автору работы и ответы на них;
- отзыв руководителя.

Защита курсовой работы производится публично (в присутствии обучающихся, защищающих работы в этот день) членам комиссии.

Если при проверке курсовой работы или защите выяснится, что обучающийся не является ее автором, то защита прекращается. Обучающийся будет обязан написать курсовую работу по другой теме.

При оценке курсовой работы учитывается:

- степень самостоятельности выполнения работы;
- актуальность и новизна работы;
- сложность и глубина разработки темы;
- знание современных подходов на исследуемую проблему;
- использование периодических изданий по теме;
- качество оформления;
- четкость изложения доклада на защите;
- правильность ответов на вопросы.

В соответствии с установленными правилами курсовая работа оценивается по следующей шкале:

- на **"отлично"** оценивается работа, в которой студентом сформулированы собственные аргументированные выводы по теме курсовой работы. Студент владеет специальной терминологией; стилистические и грамматические ошибки отсутствуют. Оформление курсовой работы соответствует предъявляемым требованиям. При написании и защите курсовой работы студентом продемонстрирован высокий уровень развития профессиональных компетенций, теоретических знаний и наличие практических навыков. При защите курсовой работы студент отвечает на вопросы;

- на **"хорошо"** оценивается работа, в соответствии с утвержденным планом; расчеты, таблицы, выполнены с неточностями. Имеются замечания к оформлению курсовой работы. Студент владеет специальной терминологией. При написании и защите курсовой работы студентом продемонстрирован средний уровень развития профессиональных компетенций, наличие теоретических знаний и достаточных практических навыков. При защите курсовой работы студент владеет материалом, но отвечает не на все поставленные вопросы.

- на **"удовлетворительно"** оценивается работа, в соответствии с утвержденным планом; расчеты, таблицы выполнены с ошибками. Студентом не сделаны собственные выводы по теме курсовой работы. Грубые недостатки в оформлении курсовой работы; слабое владение специальной терминологией; стилистические и грамматические ошибки. При защите курсовой работы, испытывал затруднения при ответах на вопросы

- на **"неудовлетворительно"** оценивается работа, выполненная не в соответствии с утвержденным планом, в которой не раскрыто содержание вопроса; допущены грубые ошибки в расчетах, таблицах. Студентом не сделаны выводы по теме курсовой работы. Грубые недостатки в оформлении курсовой работы. На защите курсовой работы студент показал поверхностные знания по теме, не правильно отвечал на вопросы.

По итогам защиты за курсовую работу выставляется оценка на титульный лист работы, в экзаменационную ведомость и зачетную книжку обучающегося.

Учебно-методическое и информационное обеспечение курсовой работы Основная литература

1. Горбунов А.Н. и др. Теоретические основы электротехники: Учебник для с.х. вузов. — М., УМЦ «Триада», 2005. — 304 с.
2. Новожилов О.П. Электротехника (теория электрических цепей): учебник для академического бакалавриата (соответствует ФГОС ВПО 4-го поколения). — М., Юрайт, 2014. — 643 с. (50 экз.)
3. Попов В.П. Основы теории цепей: учебник для бакалавров: соответствует ФГОС ВПО 3-го поколения. — М., Юрайт, 2015. — 696 с. (50 экз.)
4. Арсеньев Г.Н. Основы теории цепей (ФГОС 3-го поколения). — М., «Форуби», 2014. — 447 с. (10 экз.)
5. Баскаков В.П., Журавлев О.Б., Крук Б.И. Основы анализа цепей: учебное пособие для вузов. — М., Горячая линия-Телеком, 2014. — 591 с. (10 экз.)
6. Навроцкая Л.В. Рабочая тетрадь для лабораторных работ по электротехнике и электронике [Текст] / Л.В. Навроцкая, А.В. Кравцов, А.В. Пузарин — М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2014. — 33 с.
7. Навроцкая Л.В. Лабораторный практикум по автоматизированному расчету и моделированию электрических цепей [Текст] / Л.В. Навроцкая — М.: Издательский центр РХТУ им. Менделеева, 2014. — 83 с.

Дополнительная литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для Вузов, 11-е изд. — М., Гардарики, 2007. — 701 с.
2. Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники: курс лекций. — М., Корона Век, 2013. — 502 с.
3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. К.С. Демирчан и др. Теоретические основы электротехники: В 3-х томах / К.С. Демирчан,
5. Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. — СПб., «Питер», 2004.

Перечень программного обеспечения и информационных справочных систем для выполнения курсовой работы

Таблица 6 – Перечень программного обеспечения

Наименование программы	Тип программы	Автор	Год разработки
Microsoft Word	Оформительская	Microsoft	2010
Microsoft Excel	Расчетная, составление таблиц и диаграмм	Microsoft	2010
AutoCad	Система автоматизированного проектирования (САПР)	Autodesk	2009
Power Point	Презентация	Microsoft	2010

1. <http://www.kodges.ru/> (тексты книг по электротехническим дисциплинам, в основном, в формате. pdf для бесплатного перекачивания) (открытый доступ);
2. <http://www.electrolibrary.info/>; (электронная электротехническая библиотека) (открытый доступ)
3. <http://www.rsl.ru> (официальный сайт российской государственной библиотеки) (открытый доступ);
4. <http://www.cnshb.ru/elbib.shtm> (электронная библиотека ЦНСХБ) (открытый доступ).

Методические рекомендации разработал:
к.т.н., доцент

Навроцкая Л.В.

Приложение А

Пример оформления титульного листа курсовой работы



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»
(ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)

Институт механики и энергетики имени В.П.Горячкина
Кафедра Электроснабжения и электротехники

Учебная дисциплина «Электротехника и электроника»

КУРСОВАЯ РАБОТА

на тему:

Выполнил
обучающийся ... курса... группы

Дата регистрации КР
на кафедре _____

Допущен (а) к защите

Руководитель:

ученая степень, ученое звание, ФИО

Члены комиссии:

ученая степень, ученое звание, ФИО подпись

ученая степень, ученое звание, ФИО подпись

ученая степень, ученое звание, ФИО подпись

Оценка _____

Дата защиты _____

Москва, 20__

Приложение Б
Примерная форма задания

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Российский государственный аграрный университет – МСХА
имени К.А. Тимирязева

Институт механики и энергетики имени В.П.Горячкина
Кафедра «Электроснабжения и электротехники»

ЗАДАНИЕ
НА КУРСОВУЮ РАБОТУ (КР)

Обучающийся _____

Тема КР _____

Исходные данные к работе _____

Перечень подлежащих разработке в работе вопросов:

Перечень дополнительного материала _____

Дата выдачи задания «__» _____ 201__ г.

Руководитель (подпись, ФИО) _____

Задание принял к исполнению (подпись обучающегося) _____

«__» _____ 201__ г.

Приложение В

Примерная форма рецензии на курсовую работу

РЕЦЕНЗИЯ

на курсовую работу обучающегося

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Обучающийся _____

Учебная дисциплина _____

Тема курсовой работы

Полнота раскрытия темы:

Оформление:

Замечания:

Курсовая работа отвечает предъявляемым к ней требованиям и заслуживает _____ оценки.

(отличной, хорошей, удовлетворительной, не удовлетворительной)

Рецензент _____

(фамилия, имя, отчество, уч.степень, уч.звание, должность, место работы)

Дата: « ____ » _____ 20 ____ г.

Подпись: _____

Приложение Г

Пример заполнения основной надписи (штампа) на чертежах

185									
120									
(1)									
(2)									
(3)									
(4)									
(5) (6) (7)									
(8)									

В графах основной надписи и дополнительных графах к ней (номера граф указаны в скобках) приводят:

- в графе 1 - обозначение шифра документа, в том числе: код кафедры, номер учебной группы, год оформления графического документа, номер графического документа. Например - шифр документа – 27-471-15-01, где, 27 - кода кафедры, 471 - номера учебной группы, 15 - год оформления графического документа, 01- номер графического документа;

- в графе 2 - наименование работы;
- в графе 3 - наименование раздела работы;
- в графе 4 - наименование изображений, помещенных на данном листе, в соответствии с их наименованием на чертеже. Если на листе помещено одно изображение, допускается его наименование приводить только в графе 4.

Наименования спецификаций и других таблиц, а также текстовых указаний, относящихся к изображениям, в графе 4 не указывают (кроме случаев, когда спецификации или таблицы выполнены на отдельных листах).

- в графе 5 - условное обозначение вида документации: ДП - для дипломных проектов, КР - для курсовых работ, БР - бакалаврская работа, МД – для магистерских диссертаций.

- в графе 6 - порядковый номер листа документа.;
- в графе 7 - общее количество листов документа;
- в графе 8 - наименование учебного заведения и его подразделения, разработавшей документ.

Пример заполнения штампа.

				27-471-15-07			
				Благоустройство производственной зоны с использованием строительных отходов на примере промышленного предприятия в Нижегородской области			
Должность	Фамилия	Подпись	Дата	Экономическая часть	Стадия	Лист	Листов
Разработчик	Вабишев О.А.			Экономическая часть	БР	7	7
Руководит.	Солонин И.А.						
Зав. вып. каф.	Сметанин В.И.			Основные показатели проекта	ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева кафедра ОТСОП		
Норм. конт.	Шибалова Г.В.						

РЕЦЕНЗИЯ

на методические рекомендации для расчёта курсовых работ по дисциплины
Б1.О.23 «Электротехника и электроника»
ОПОП ВО по направлению **13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника»**,
направленность **«Энергообеспечение предприятий»**
(квалификация выпускника – бакалавр)

Андреевым Сергеем Андреевичем, заведующим кафедрой «Автоматизации и роботизации технологических процессов» им. ак. И.Ф. Бородина», ФГБОУ ВО г. Москвы РГАУ-МСХА, к.т.н., профессором проведена рецензия методических рекомендаций для расчёта курсовых работ по дисциплине «Электротехника и электроника» направления **13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника»**, направленности **«Энергообеспечение предприятий» (квалификация выпускника – прикладной бакалавр)** разработанной в ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», на кафедре «Электроснабжение и электротехника им. академика И.А. Будзко» (разработчик – Навроцкая Людмила Васильевна, к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника им. академика И.А. Будзко»).

Рассмотрев представленные на рецензию материалы, рецензент пришел к следующим выводам:

1. Предъявленные методические рекомендации для расчёта курсовых работ дисциплины «Электротехника и электроника» (далее по тексту Программа) соответствует требованиям ФГОС ВО по направлению **13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника»**. Методические рекомендации для расчёта курсовых работ содержат все основные разделы, соответствует требованиям к нормативно-методическим документам.

2. Представленная в Программе **актуальность** методических рекомендаций для расчёта курсовых работ в рамках реализации ОПОП ВО не подлежит сомнению – дисциплина включена в обязательную часть, учебного плана учебного цикла – Б1.

3. Представленные в Программе **цели** методических рекомендаций для расчёта курсовых работ соответствуют требованиям ФГОС ВО направления – **13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**.

4. В соответствии с Программой за методическими рекомендациями для расчёта курсовых работ «Электротехника и электроника» закреплены 3 **компетенции** (индикаторы достижения компетенции) ОПК–2 ПК–2 ПК–11. Методические рекомендации для расчёта курсовых работ по дисциплине «Электротехника и электроника» и представленная Программа способны реализовать их в объявленных требованиях. **Результаты обучения**, представленные в Программе в категориях знать, уметь, владеть соответствуют специфике и содержанию методических рекомендаций для расчёта курсовых работ демонстрируют возможность получения заявленных результатов.

5. Общая трудоёмкость дисциплины «Электротехника и электроника» составляет 8 зачётных единицы (288 часов).

6. Методические рекомендации для расчёта курсовых работ взаимосвязана с другими дисциплинами Учебного плана по направлению **13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника»** и возможность дублирования в содержании отсутствует. Поскольку дисциплина не предусматривает наличие специальных требований к входным знаниям, умениям и компетенциям студента, хотя может являться предшествующей для специальных, в том числе профессиональных дисциплин, использующих знания в области теплоэнергетики в профессиональной деятельности бакалавра по данному направлению подготовки.

7. Представленные методические рекомендации для расчёта курсовых работ предполагает использование современных образовательных технологий, используемые при реализации различных видов учебной работы. Формы образовательных технологий соответствуют специфике дисциплины.

8. Методические рекомендации для расчёта курсовых работ по «Электротехника и электроника» предполагает применение занятий в интерактивной форме.

9. Виды, содержание и трудоёмкость самостоятельной работы студентов, представленные в Программе, соответствуют требованиям к подготовке выпускников, содержащимся во ФГОСВО направления **13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника»**.

10. Представленные и описанные **методические рекомендации для расчёта курсовых работ** формы *текущей* оценки знаний (защита курсовой работы), соответствуют специфике дисциплины и требованиям к выпускникам.

Форма промежуточного контроля знаний студентов, предусмотренная Программой, осуществляется в форме: КР и зачёт с оценкой в 3 семестре и РГР и экзамен 4 семестре, что соответствует статусу дисциплины, как дисциплины формируемой участниками образовательных отношений учебного плана учебного цикла – Б1 ФГОС ВО направления **13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника»**.

11. Представленные и описанные **методические рекомендации для расчёта курсовых работ** как формы *текущей* оценки знаний (курсовой работы), соответствуют специфике дисциплины и требованиям к выпускникам.

12. Формы оценки знаний, представленные в **методических рекомендациях для расчёта курсовых работ** соответствуют специфике дисциплины и требованиям к выпускникам.

13. Учебно-методическое обеспечение дисциплины представлено: основной литературой – 7 источников (базовый учебник), дополнительной литературой – 5 наименований, соответствует требованиям ФГОСВО направления **13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника»**.

14. Материально-техническое обеспечение дисциплины соответствует специфике дисциплины **«Электротехника и электроника»** и обеспечивает использование современных образовательных, в том числе интерактивных методов обучения.

15. Методические рекомендации для расчёта курсовых работ *дают* представление о специфике обучения по дисциплине **«Электротехника и электроника»**.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

На основании проведенной рецензии можно сделать заключение, что характер, структура и содержание **методических рекомендаций для расчёта курсовых работ** по дисциплине **«Электротехника и электроника»** по направлению **13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника»**, направленность **«Энергообеспечение предприятий» (квалификация выпускника – бакалавр)**, разработанная Навроцкой Людмилой Васильевной, к.т.н., доцентом кафедры «Электроснабжение и электротехника им. академика И.А. Будзко» соответствует требованиям ФГОС ВО, современным требованиям экономики, рынка труда и позволит при её реализации успешно обеспечить формирование заявленных компетенций.

Рецензент: Андреев Сергей Андреевич, заведующий кафедрой «Автоматизации и роботизации технологических процессов» им. ак. И.Ф. Бородина», к.т.н., профессор

« 20 » 03 2020 г.