

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Оренбургский государственный университет

Кафедра теоретической и общей электротехники

С.Н.БРАВИЧЕВ
Л.В.БЫКОВСКАЯ

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО И СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИМ ЗАДАНИЯМ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
Оренбургского государственного университета

Оренбург 2001

ББК 31.211я7

Б 87

УДК 621.3.011.7(07)

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО И СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Введение

Методические указания предназначены для выполнения расчётно-графических заданий по теоретическим основам электротехники студентами-заочниками технических специальностей.

Предлагаемые контрольные задания охватывают весь основной материал курса «Теоретические основы электротехники» по разделам линейные электрические цепи постоянного и синусоидального тока и соответствуют государственному стандарту по ТОЭ.

Контрольные задания имеют 100 вариантов. Вариант определяется двумя цифрами. Варианты одного и того же задания отличаются друг от друга числовыми значениями параметров, схемами и характером искомой величины.

При изучении курса и выполнении контрольных заданий рекомендуются учебники и учебные пособия, выпущенные в последние годы, так как в старых изданиях изложение ряда новых вопросов может отсутствовать. Рекомендуется пользоваться одним учебником при изучении всего курса и только тогда, когда тот или иной вопрос изложен в нем недостаточно ясно или вовсе не нашел отражения, использовать другой учебник. Целесообразность такого подхода обусловлена и тем, что в учебниках имеется небольшая разница в обозначениях и это может вызвать некоторые затруднения при переходе от одного учебника к другому. При изучении курса ТОЭ студентам необходимо составлять конспект, в который полезно выписывать основные законы, определения и формулы. Этот конспект окажет большую помощь при выполнении контрольных заданий и подготовке к экзаменам.

В качестве достаточно полного перечня вопросов для самопроверки могут служить названия параграфов в учебнике Л.А.Бессонова «Теоретические основы электротехники». Там же приведены задачи с решениями по всему курсу ТОЭ. Для лучшего усвоения курса рекомендуется просмотреть решения этих задач, а также имеющиеся там вопросы для самопроверки.

Для студентов-заочников посещение лекций и практических занятий официально не обязательно. Однако это весьма желательно, так как на лекциях излагается наиболее важный и сложный материал курса. Кроме того, на лекции можно выяснить возникающие вопросы.

Для более углубленного изучения теории цепей и теории поля рекомендуются учебные пособия, приведенные в списке дополнительной литературы, а

также «Сборник задач по ТОЭ» (под ред. Л.А.Бессонова), 1980, в котором имеется около 40% задач с решениями.

Замечание к таблице условий задач. Если в таблице указано, например, $f 10^{-7}$, Гц, Гц=1, то $f=10^7$ Гц; если указано $\gamma 10^{-6}$, Ом⁻¹·м⁻¹=1, то $\gamma=10^6$ Ом⁻¹·м⁻¹.

Методические указания к выполнению расчетно-графических заданий

При изучении курса ТОЭ студенты приобретают необходимые знания об основных методах расчета и физических процессах, происходящих в электрических цепях и электромагнитных полях.

К представленным на рецензию расчетно-графическим заданиям предъявляются следующие требования:

а) Основные положения решения должны быть достаточно подробно пояснены;

б) Рисунки, графики, схемы, в том числе и заданные условием задачи должны быть выполнены аккуратно и в удобочитаемом масштабе с указанием обозначений;

в) Расчетно-графические задания выполняются на листах формата А4 с обязательной нумерацией страниц;

г) Вычисления должны быть сделаны с точностью до третьего знака после запятой. Погрешность вычислений не должна превышать 5%;

д) Расчетно-графические задания должны быть датированы и подписаны студентом;

Выполненные расчетно-графические задания будут зачтены, если решения не содержат ошибок принципиального характера и если выполнены перечисленные требования.

Работа над расчетно-графическими заданиями помогает студентам проверить степень усвоения им курса, вырабатывает у них навык четко и кратко излагать свои мысли. Для успешного достижения этой цели необходимо руководствоваться следующими правилами:

1) Начиная решение задачи, указать, какие физические законы или расчетные методы предполагается использовать при решении, привести математическую запись этих законов и методов.

2) Тщательно продумать, какие буквенные символы предполагается использовать в решении. Пояснить значение каждого буквенного символа словами или же соответствующим обозначением на схеме.

3) В ходе решения задачи не следует изменять принятые направления токов и наименование узлов, сопротивлений и т.д. Не следует изменять обозначения, заданные условием. При решении одной и той же задачи различными методами одну и ту же величину надлежит обозначать одним и тем же буквенным символом.

4) Расчет каждой исходной величины следует выполнить сначала в общем виде, а затем в полученную формулу подставить числовые значения и привести окончательный результат с указанием единицы измерения. При решении системы уравнений целесообразно воспользоваться компьютером, в частности пакетом MathCad, предназначенным для выполнения математических вычислений любой сложности, или известными методами упрощения расчета определителей (например, вынесение за знак определителя общего множителя и др., а еще проще методом подстановки).

5) Промежуточные и конечные результаты расчетов должны быть ясно выделены из общего текста.

6) Решение задач не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований и арифметических расчетов.

7) Для элементов электрических схем следует пользоваться обозначениями, применяемыми в учебниках по ТОЭ.

8) Каждому этапу решения задачи нужно давать пояснения.

9) При построении кривых выбирать такой масштаб, чтобы на 1 см оси координат приходилось $1 \cdot 10^{\pm n}$ или $2 \cdot 10^{\pm n}$ единиц измерения физической величины, где n -целое число. Градуировку осей выполнять, начиная с нуля, равномерно через один или через два параметра. Числовые значения координат точек, по которым строятся кривые, не приводить. Весь график в целом и отдельные кривые на нем должны иметь названия.

Для самостоятельного изучения курса теоретических основ электротехники рекомендуется следующая литература:

а) *Учебники:*

- а.1) Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб. для электротех., энерг., приборостроит. спец. вузов – 9-е изд., перераб. И доп. - М.:Высш.шк., 1996. – 638 с.: ил.
- а.2) Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Ч. 1, 2.- М.:Энергия, 1981.
- а.3) Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В, Страхов С.В. Основы теории цепей.- М.: Энергоатомиздат, 1989.
- а.4) Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. -М., 1972, т.І, 1969, т.ІІІ.
- а.5) Атабеков А.Н. и др. Теоретические основы электротехники. - М., 1978, т. І, 1979, т. ІІ.

б) *Задачники:*

- б.1) Бессонов Л.А., Демидова И.Г., Заруди М.Е. и др. Сборник задач по теоретическим основам электротехники. - М.: Высш.шк.; 2000.
- б.2) Шебес М.Р. Теория линейных электрических цепей в упражнениях и задачах. - М., 1973.

в) *Дополнительная литература :*

- в.1) Огорелков Б.И., Ушаков А.Н., Ушакова Н.Ю. Методы расчёта электрических цепей постоянного тока. Методические указания и консультации к самостоятельному изучению курса ТОЭ и подготовке к лабораторно-практическим занятиям.-Оренбург: ОрПТИ, 1988.
- в.2) Пискунова Ж.Г., Бравичев С.Н. Методы расчёта линейных электрических цепей постоянного тока. Методические указания и консультации к самостоятельному изучению курса ТОЭ. – Оренбург: ОрПТИ, 1994.
- в.3) Пискунова Ж.Г., Бравичев С.Н. Расчёт линейных электрических цепей с установившимися синусоидальными токами. Методические указания и консультации к самостоятельному изучению курса ТОЭ. – Оренбург: ОГУ, 1996.
- в.4) Ушаков А.Н., Ушакова Н.Ю. Секреты MathCad для инженерных и научных расчётов. - Оренбург: ОГУ, 2001.
- в.5) Быковский В.В., Ушакова Н.Ю., Быковская Л.В. Расчёт электрических цепей в системе MathCad. Методические указания. - Оренбург: ОГТУ, 1995.

г) *Литература для выполнения расчётно-графического задания № 1:*

- г.1) Бессонов Л.А. (9-е издание) , §`2.1-2.14, §2.20-2.26.
- г.2) Зевеке Г.В. и др. (5-е издание) § 1.1-1.9, §1.12, §2.1-2.3, §2.5, §2.8.
- г.3) Нейман Л.Р., Демирчян. К.С. Т.1, § 3.8-3.10, 5.5-5.15.
- г.4) Поливанов К.М. Т.1, § 1.1-1.7, 2.1-2.11.

д) *Литература для выполнения расчётно-графического задания № 2:*

- д.1) Бессонов Л.А. (9-е издание) , §`3.1-3.23, §3.25-3.28.
- д.2) Зевеке Г.В. и др. (5-е издание) § 3.1-3.19, §3.21-3.22.
- д.3) Нейман Л.Р., Демирчян. К.С. Т.1, § 3.1-3.3, 3.19, 4.1-4.10, 5.1-5.17..
- д.4) Поливанов К.М. Т.1, § 3.1-3.6, 5.1-5.5.

1 Задание 1 Линейные цепи постоянного тока

Задача: Для электрической схемы, соответствующей номеру варианта и изображенной на рисунках 1.1-1.20, выполнить следующее:

1.1 Составить на основании законов Кирхгофа систему уравнений для расчета токов во всех ветвях схемы.

1.2 Определить токи во всех ветвях схемы методом контурных токов.

1.3 Определить токи во всех ветвях схемы методом узловых потенциалов.

1.4 Результаты расчета токов, проведенного двумя методами, свести в таблицу и сравнить между собой.

1.5 Составить баланс мощностей в исходной схеме (схеме с источником тока), вычислив суммарную мощность источников и суммарную мощность нагрузок (сопротивлений).

1.6 Определить ток I_1 в заданной по условию схеме с источником тока, используя метод эквивалентного генератора.

1.7 Начертить потенциальную диаграмму для любого замкнутого контура, включающего обе э.д.с.

Величины сопротивлений, э.д.с. и токов источников тока для каждого варианта даны в таблице 1.1.

1.8 Примечания:

1.8.1 Ответвления к источник тока, ток которого по условию равен нулю, на схемах контрольных работ не показывать.

1.8.2 Обозначая на схеме токи в ветвях, необходимо учесть, что ток через сопротивление, параллельное источнику тока, отличается от тока источника тока и тока через источник э.д.с.

1.8.3 Перед выполнением пп. 1.2 и 1.3 рекомендуется преобразовать источник тока в источник э.д.с. и вести расчет для полученной схемы.

1.8.4 В п.1.6 при определении входного сопротивления двухполюсника следует преобразовать схему соединения треугольником в эквивалентную схему соединения звездой.

1.8.5 Рекомендуется подумать о том, как можно выполнить п.п.1.2 и 1.3 без преобразования источника тока в источник э.д.с. В конце контрольной работы пояснить методику расчета в этом случае.

Таблица 1.1 – Параметры схемы

Вариант	R _{и-с}	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	E ₁	E ₂	E ₃	J _{k1}	J _{k2}	J _{k3}
		Ом						В			А		
1.	1.15	13	5	9	7	10	4	-	10	21	-	0	1
2.	1.1	13	5	2	8	11	15	-	12	16	-	0	2
3.	1.16	4	8	6	10	13	10	-	30	9	-	0	1
4.	1.11	20	80	100	35	150	40	-	100	150	-	0	1
5.	1.17	10	18	5	10	8	6	-	20	30	-	0	1
6.	1.3	4	13	9	10	5	6	-	16	8.2	-	0	0.2
7.	1.7	130	40	60	80	110	45	12	13	-	0	0.3	-
8.	1.20	6	5	8	14	7	8	-	20	14	-	0	1
9.	1.8	55	80	100	40	70	120	-	25	10	-	0	0.05
10.	1.10	110	60	45	150	80	50	25	8	-	0	0.1	-
11.	1.9	7	12	4	9	15	8	-	20	8	-	0	0.5
12.	1.18	30	40	22	10	14	50	-	23	9.5	-	0	0.25
13.	1.12	15	12	10	9	8	7	13	14	-	0	0.5	-
14.	1.4	12	35	22	6	10	15	-	20	7.6	-	0	0.2
15.	1.13	4	7	10	12	20	5.5	-	20	10	-	0	1
16.	1.5	4	11	5	12	7	8	25	4.5	-	0	0.5	-
17.	1.14	9	20	16	40	30	22	-	30	10	-	0	0.5
18.	1.6	5	10	12	7	8	15	-	15	13	-	0	1
19.	1.19	5	7	10	4	15	20	15	-	20	0	-	1
20.	1.2	8	10	6	15	21	26	25	-	14	0	-	1
21.	1.15	19.5	7.5	13.5	10.5	15	6	-	9	45	-	0.8	0
22.	1.1	19.5	7.5	3	12	16.5	22.5	-	12	30	-	0.8	0
23.	1.16	6	12	9	15	19.5	15	-	21	22.5	-	2	0
24.	1.11	30	120	150	52.5	225	60	-	90	375	-	0.5	0

Вари ант	$R_{ц-суюк}$	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	E_1	E_2	E_3	J_{k1}	J_{k2}	J_{k3}
		Ом						В			А		
25.	1.17	15	27	7.5	15	12	9	-	16.5	52.5	-	0.5	0
26.	1.3	6	19.5	13.5	15	7.5	9	-	16.2	15	-	0.4	0
27.	1.7	195	60	90	120	165	67.5	10.2	37.5	-	0.04	0	-
28.	1.20	9	7.5	12	21	10.5	12	-	15	33	-	2	0
29.	1.8	82.5	120	150	60	105	180	-	25.5	22.5	-	0.1	0
30.	1.10	165	90	67.5	225	120	75	21	21	-	0.1	0	-

Продолжение таблицы 1.1

Вари ант	$R_{ц-суюк}$	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	E_1	E_2	E_3	J_{k1}	J_{k2}	J_{k3}
		Ом						В			А		
31.	1.9	10.5	18	6	13.5	22.5	12	-	12	15	-	1	0
32.	1.18	45	60	33	15	21	75	-	16.5	22.5	-	0.3	0
33.	1.12	22.5	18	15	13.5	12	10.5	15	30	-	0.2	0	-
34.	1.4	18	52.5	33	9	15	22.5	-	9	18	-	0.4	0
35.	1.13	6	10.5	15	18	30	8.25	-	9	30	-	2	0
36.	1.5	6	16.5	7.5	18	10.5	12	25.5	15	-	2	0	-
37.	1.14	13.5	30	24	60	45	33	-	15	27	-	1	0
38.	1.6	7.5	15	18	10.5	12	22.5	-	15	37.5	-	0.5	0
39.	1.19	7.5	10.5	15	6	22.5	30	15	-	45	1	-	0
40.	1.2	12	15	9	22.5	31.5	39	25.5	-	30	1	-	0
41.	1.15	6.5	2.5	4.5	3.5	5	2	-	4	15	-	0.4	0
42.	1.1	6.5	2.5	1	4	5.5	7.5	-	5	10	-	0.4	0
43.	1.16	2	4	3	5	6.5	5	-	11	7.5	-	1	0
44.	1.11	10	40	50	17.5	75	20	-	34	125	-	0.4	0
45.	1.17	5	9	2.5	5	4	3	-	8.2	17.5	-	0.2	0
46.	1.3	2	6.5	4.5	5	2.5	3	-	6.7	5	-	0.2	0
47.	1.7	65	20	30	40	55	22.5	4.7	12.5	-	0.02	0	-
48.	1.20	3	2.5	4	7	3.5	4	-	7.5	11	-	1	0
49.	1.8	27.5	40	50	20	35	60	-	6.5	7.5	-	0.15	0
50.	1.10	55	30	22.5	75	40	25	8.1	7	-	0.08	0	-
51.	1.9	3.5	6	2	4.5	7.5	4	-	7	5	-	0.5	0
52.	1.18	15	20	11	5	7	25	-	7.5	7.5	-	0.2	0
53.	1.12	7.5	6	5	4.5	4	3.5	3.5	10	-	0.4	0	-
54.	1.4	6	17.5	11	3	5	7.5	-	6.5	6	-	0.2	0
55.	1.13	2	3.5	5	6	10	2.75	-	6.5	10	-	1	0
56.	1.5	2	5.5	2.5	6	3.5	4	10.5	5	-	1	0	-
57.	1.14	4.5	10	8	20	15	11	-	10	9	-	0.5	0
58.	1.6	2.5	5	6	3.5	4	7.5	-	6	12.5	-	0.3	0
59.	1.19	2.5	3.5	5	2	7.5	10	7	-	15	0.2	-	0
60.	1.2	4	5	3	7.5	10.5	13	10.5	-	10	0.5	-	0
61.	1.15	26	10	18	14	20	8	-	20	24	-	0	2
62.	1.1	26	10	4	16	22	30	-	24	32	-	0	2
63.	1.16	8	16	12	20	26	20	-	60	24	-	0	0.5
64.	1.17	20	36	10	20	16	12	-	40	40	-	0	3
65.	1.17	20	36	10	20	16	12	-	40	40	-	0	3
66.	1.3	8	26	18	20	10	12	-	32	11	-	0	0.5
67.	1.7	260	80	120	160	220	90	24	34	-	0	-0.2	-
68.	1.20	12	10	16	28	14	16	-	40	12	-	0	2

Вариант	$R_{\text{и-суюк}}$	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	E_1	E_2	E_3	J_{k1}	J_{k2}	J_{k3}
		Ом						В			А		
69.	1.8	110	160	200	80	140	240	-	50	22	-	0	0.04
70.	1.10	220	120	90	300	160	100	50	22	-	0	0.05	-
71.	1.9	14	24	8	18	30	16	-	40	12	-	0	1
72.	1.18	60	80	44	20	28	100	-	46	8	-	0	0.5
73.	1.12	30	24	20	18	16	14	26	28	-	0	0.5	-
74.	1.4	24	70	44	12	20	30	-	40	19.6	-	0	0.1
75.	1.13	8	14	20	24	40	11	-	40	10	-	0	1.5
76.	1.5	8	22	10	24	14	16	50	16.6	-	0	0.2	-
77.	1.14	18	40	32	80	60	44	-	60	28	-	0	0.25

Продолжение таблицы 1.1

Вариант	$R_{\text{и-суюк}}$	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	E_1	E_2	E_3	J_{k1}	J_{k2}	J_{k3}
		Ом						В			А		
78.	1.6	10	20	24	14	16	30	-	30	38	-	0	0.5
79.	1.19	10	14	20	8	30	40	30	-	20	0	-	2
80.	1.2	16	20	12	30	42	52	50	-	34	0	-	0.5
81.	1.15	32.5	12.5	22.5	17.5	25	10	-	20	75	-	0.4	0
82.	1.1	32.5	12.5	5	20	27.5	37.5	-	25	50	-	0.4	0
83.	1.16	10	20	15	25	32.5	25	-	35	37.5	-	2	0
84.	1.11	50	200	250	87	375	100	-	150	625	-	0.5	0
85.	1.17	25	45	12.5	25	20	15	-	32	87.2	-	0.4	0
86.	1.3	10	32.5	22.5	25	12.5	15	-	27	25	-	0.4	0
87.	1.7	325	100	150	200	275	112	17	62.5	-	0.04	0	-
88.	1.20	15	12.5	20	35	17.5	20	-	25	55	-	2	0
89.	1.8	137	200	250	100	175	300	-	34.5	37.5	-	0.14	0
90.	1.10	275	150	112	375	200	225	24	35	-	0.14	0	-
91.	1.9	17.5	30	10	22.5	37.5	20	-	26	25	-	0.8	0
92.	1.18	75	100	55	25	35	125	-	32.5	37.5	-	0.25	0
93.	1.12	37.5	30	25	22.5	20	17.5	25	50	-	0.2	0	-
94.	1.4	30	87.5	55	15	25	37.5	-	15	30	-	0.4	0
95.	1.13	10	17.5	25	30	50	13.75	-	15	50	-	2	0
96.	1.5	10	27.5	12.5	30	17.5	20	32.5	25	-	3	0	-
97.	1.14	22.5	50	40	100	75	55	-	35	45	-	0.8	0
98.	1.6	12.5	25	30	17.5	20	37.5	-	35	62.5	-	0.1	0
99.	1.19	12.5	17.5	25	10	37.5	50	30	-	75	0.6	-	0
100.	1.2	20	25	15	37.5	52.5	65	50.5	-	50	0.6	-	0

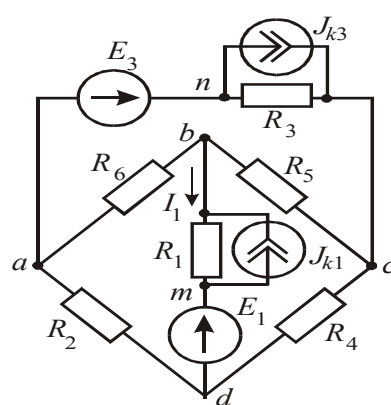
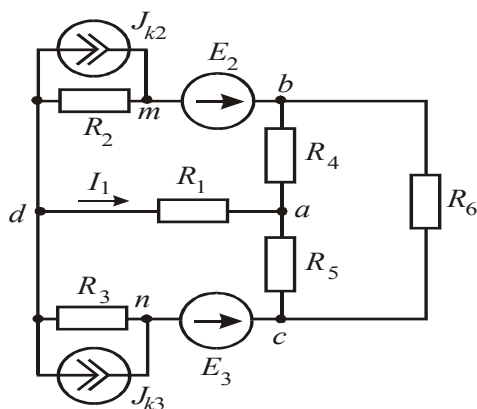


Рисунок 1.1

Рисунок 1.2

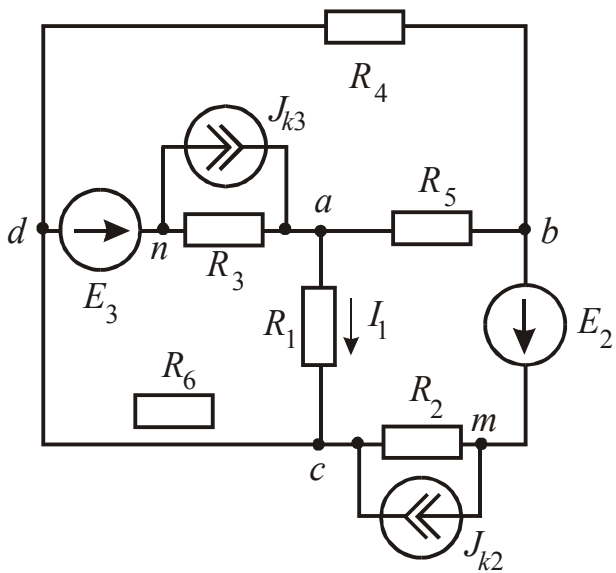


Рисунок 1.3

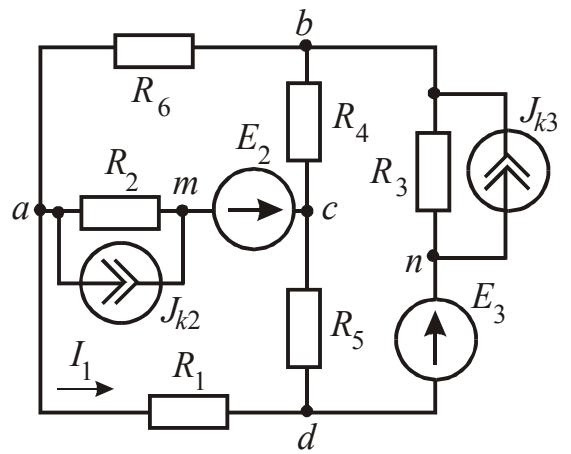


Рисунок 1.4

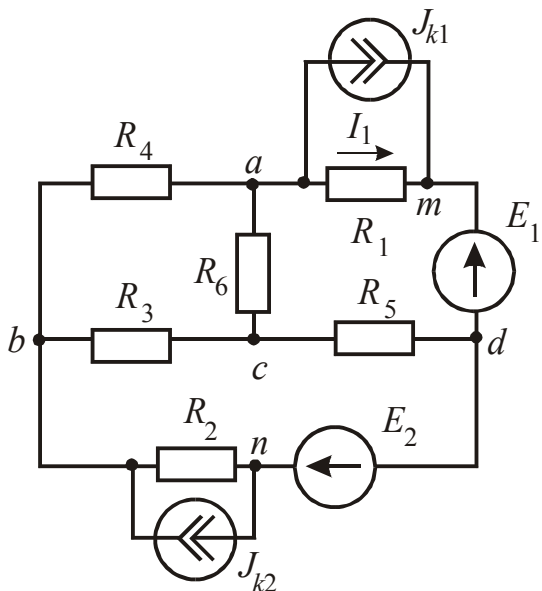


Рисунок 1.5

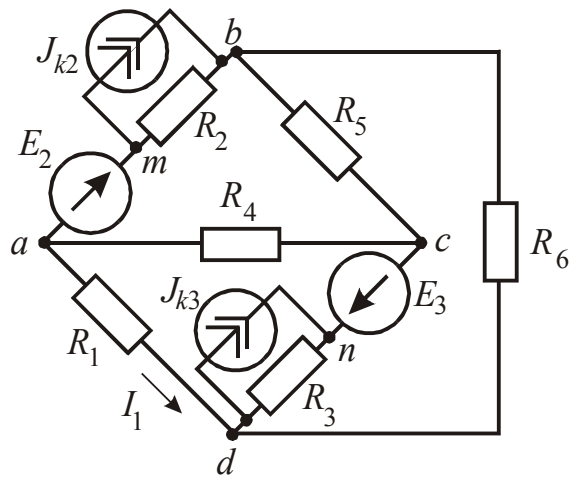


Рисунок 1.6

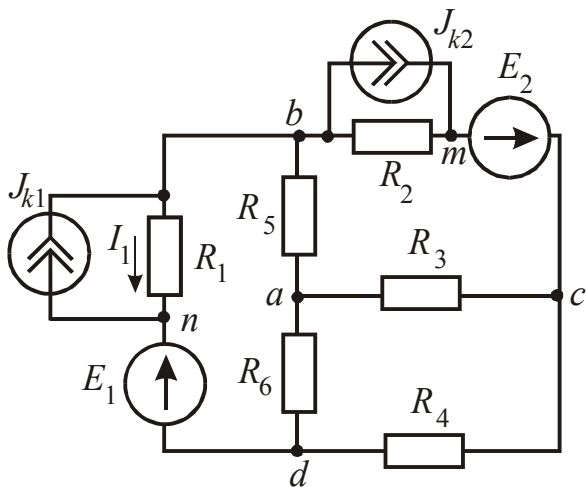


Рисунок 1.7

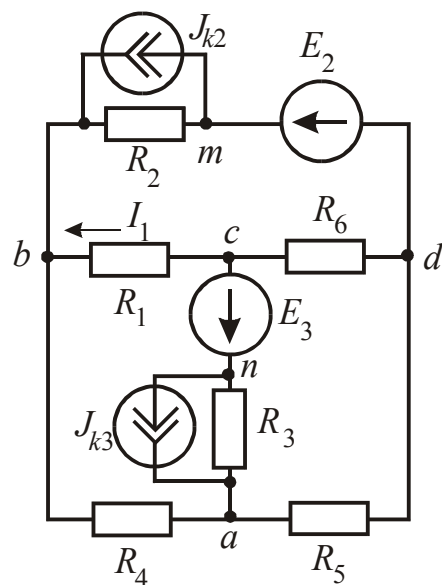


Рисунок 1.8

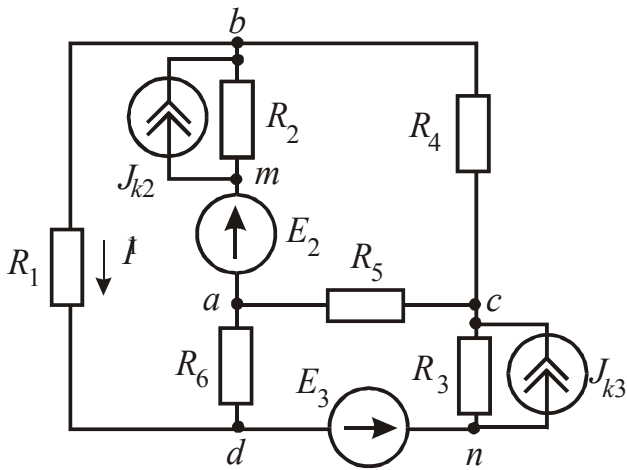


Рисунок 1.9

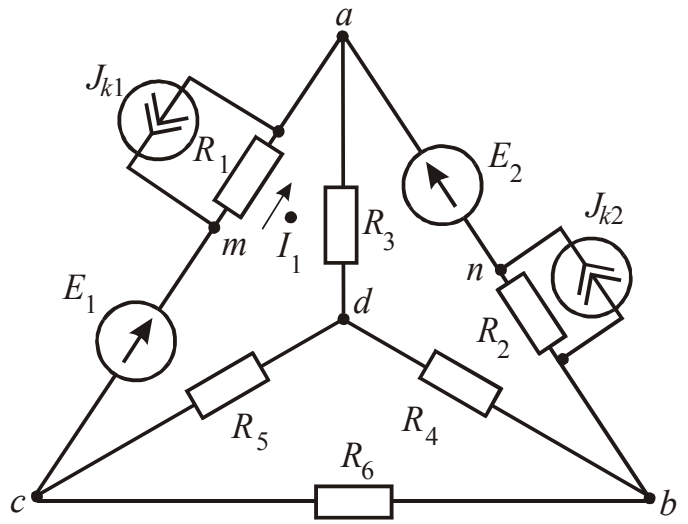


Рисунок 1.10

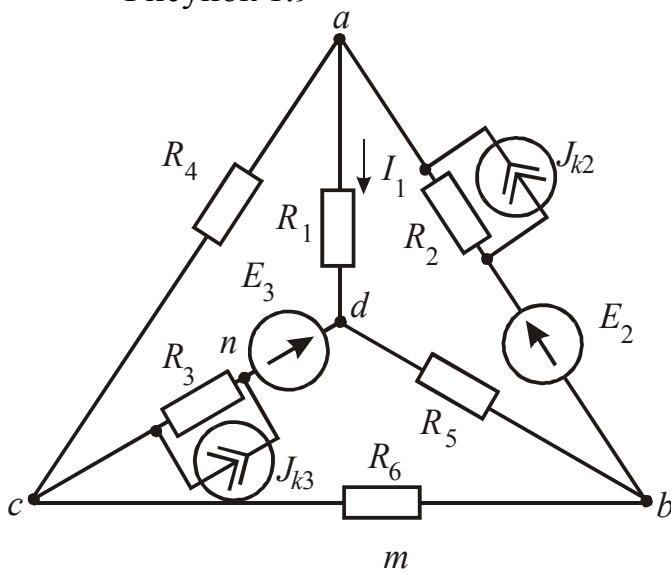


Рисунок 1.11

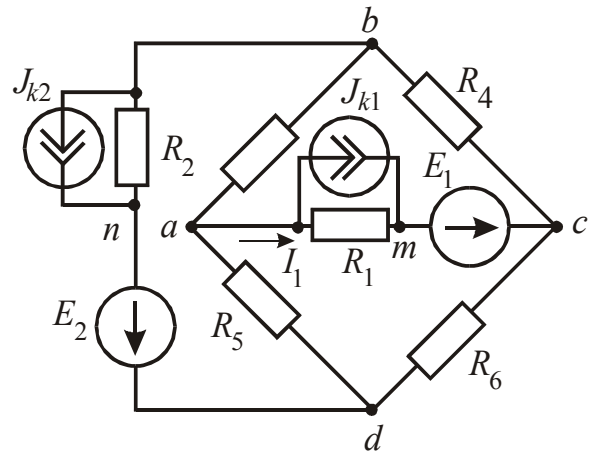


Рисунок 1.12

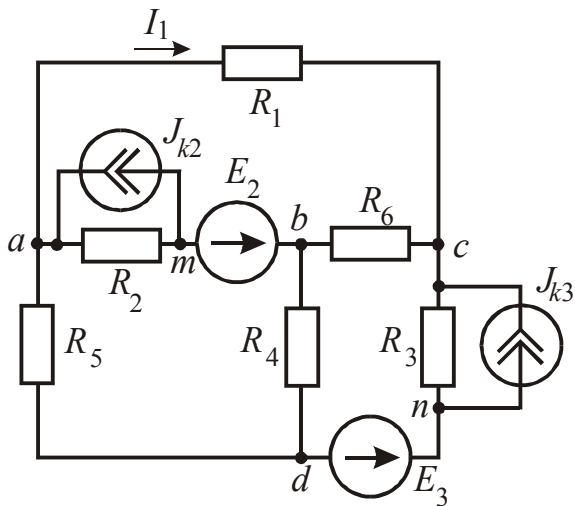


Рисунок 1.13

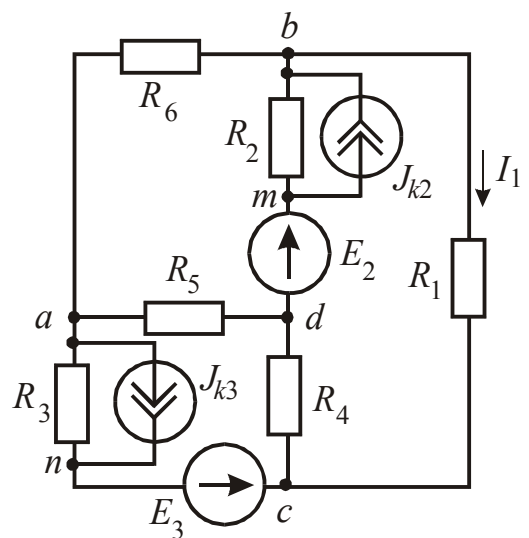


Рисунок 1.14

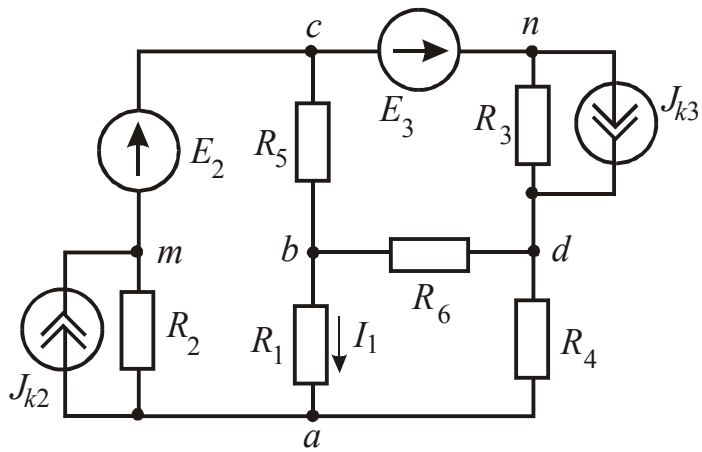


Рисунок 1.15

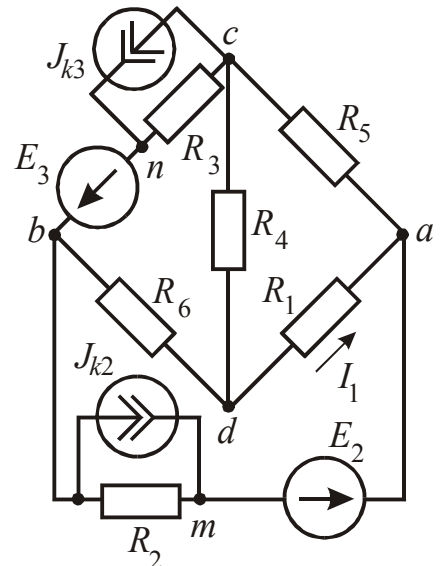


Рисунок 1.16

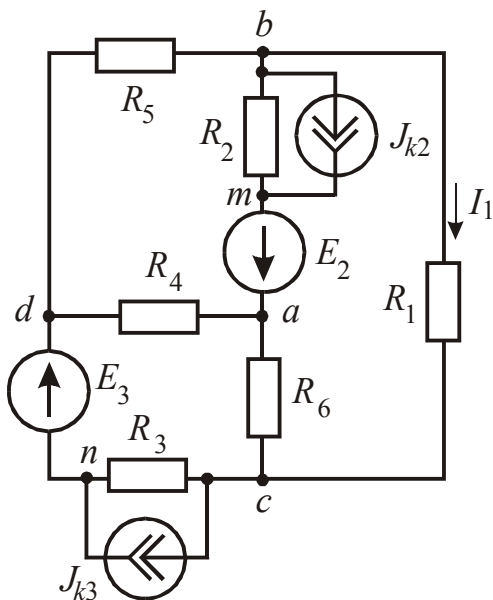


Рисунок 1.17

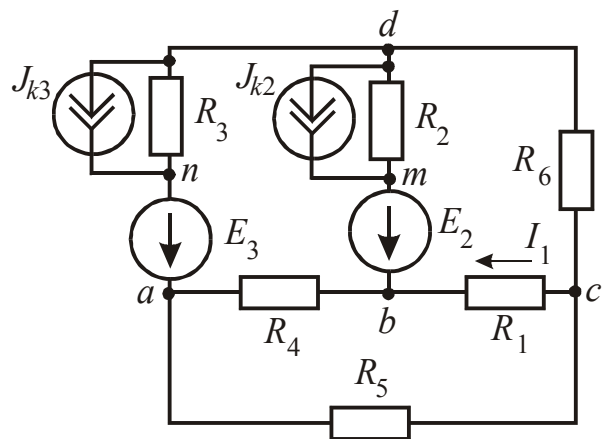


Рисунок 1.18

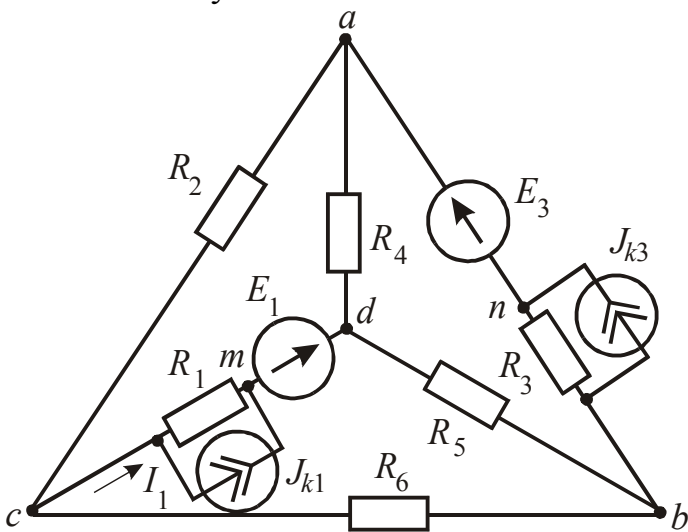


Рисунок 1.19

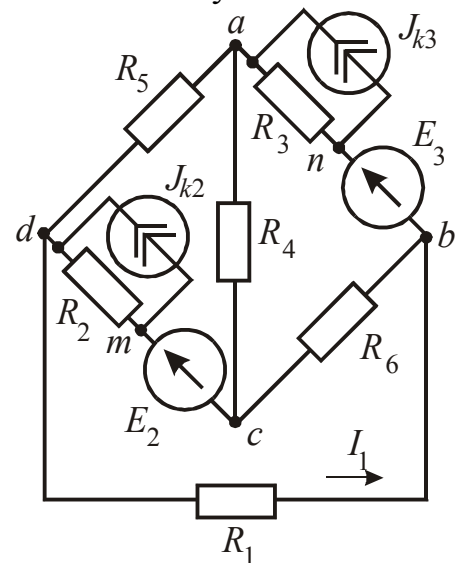


Рисунок 1.20

1.9 Пример выполнения расчётно-графического задания № 1.

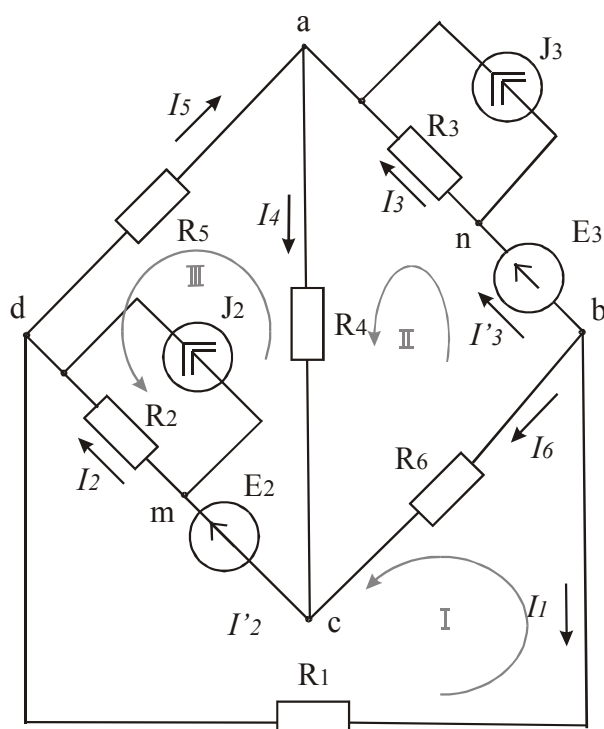


Рисунок 1.21

На рисунке 1.21 изображена схема электрической цепи, параметры, которой $R_1=9 \text{ Ом}$, $R_2=7.5 \text{ Ом}$, $R_3=12 \text{ Ом}$, $R_4=21 \text{ Ом}$, $R_5=10.5 \text{ Ом}$, $R_6=12 \text{ Ом}$, $E_2=15 \text{ В}$, $E_3=33 \text{ В}$, $J_2=2 \text{ А}$, $J_3=1 \text{ А}$.

1.9.1 Составим на основании законов Кирхгофа систему уравнений для расчёта токов во всех ветвях схемы.

Первый закон Кирхгофа: Алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в любом узле электрической схемы, равна нулю.

Второй закон Кирхгофа: Алгебраическая сумма падений напряжений в любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС вдоль того же контура.

Выбираем положительные направления токов и обозначаем их на схеме. Пронумеровываем узлы схемы. **Узел** – это место пересечения трёх и более ветвей. В схеме на рисунке 1 шесть узлов a, b, c, d, m, n. По первому закону Кирхгофа составляем $(y-1) = 5$ уравнений, где y – количество узлов. Принято считать положительные токи, вытекающие из узла.

Выбираем независимые контуры и направление их обхода. Большинство простых цепей можно изобразить на одной плоскости без пересечения ветвей. Такие цепи называют планарными (плоскими). Для планарной цепи уравнения, записанные для всех контуров-ячеек, кроме внешнего контура, являются взаимно-независимыми. Выбираем $v-(y-1)$ контуров, где v – количество ветвей с неизвестными токами. В схеме на рисунке 1.21 всего десять ветвей, токи в ветвях с источниками тока известны и равны токам источников, поэтому для этих двух ветвей уравнения не составляем, следовательно, в схеме восемь ветвей с

неизвестными токами. Следовательно, для данной схемы по второму закону Кирхгофа составляем

$v-(y-1)=8-(6-1)=3$ уравнения. Источник тока не может входить в контур для составления уравнений по второму закону Кирхгофа

Система уравнений, составленная по законам Кирхгофа, для электрической схемы на рисунке 1.21:

$$-I_5 + I_4 - I_3 - J_3 = 0$$

$$I_1 + I_6 + I'_3 = 0$$

$$-I_4 - I_6 + I'_2 = 0$$

$$I_5 - I_2 - I_1 - J_2 = 0$$

$$-I'_2 + I_2 + J_2 = 0$$

$$R_2 I_2 - R_1 I_1 + R_6 I_6 = E_2$$

$$R_3 I_3 + R_4 I_4 - R_6 I_6 = E_3$$

$$-R_2 I_2 - R_4 I_4 - R_5 I_5 = -E_2$$

1.9.2 Определим токи во всех ветвях методом контурных токов.

Согласно методу контурных токов, предполагается, что в каждом независимом контуре течет единый контурный ток. В методе контурных токов для расчёта цепи с v неизвестными токами составляют систему контурных уравнений, то есть уравнений по второму закону Кирхгофа. Число уравнений $v-(y-1)$. Неизвестными в этих уравнениях являются не реальные искомые токи ветвей, а так называемые контурные токи, замыкающиеся по независимым контурам. Реальные токи ветвей определяют как алгебраическую сумму контурных токов. Если в схеме есть ветвь с идеальным источником тока, то один из контуров замыкают через ветвь с источником и считают, что контурный ток в этом контуре известен и равен току источника тока.

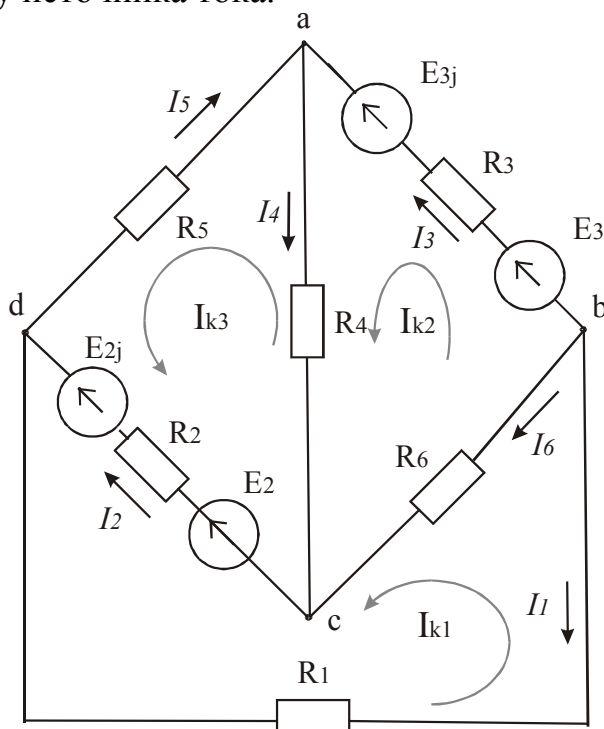


Рисунок 1.22

Согласно указаниям преобразуем источники тока в источники ЭДС (рисунок 1.22). При расчете задаемся положительными направлениями токов ветвей и обозначаем их на схеме. Определяем независимые контуры и обозначаем направления их обхода. Составляем систему уравнений по методу контурных токов для электрической схемы на рисунке 1.22.

$$R_{11}I_{k1} + R_{12}I_{k2} + R_{13}I_{k3} = E_{k1}$$

$$R_{21}I_{k1} + R_{22}I_{k2} + R_{23}I_{k3} = E_{k2}$$

$$R_{31}I_{k1} + R_{32}I_{k2} + R_{33}I_{k3} = E_{k3}$$

где R_{11}, R_{22}, R_{33} – полные сопротивления первого, второго и третьего контуров, соответственно, Ом;

$R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{23}$ - сопротивления, принадлежащие двум контурам одновременно, Ом. Если направления контурных токов в общей для контуров ветви совпадают, то взаимное сопротивление положительно;

E_{k1}, E_{k2}, E_{k3} - алгебраическая сумма ЭДС, входящих в первый, второй и третий контуры, соответственно, В.

Решение системы уравнений в пакете Mathcad и определение токов показано на рисунке 1.23.

$R_{11} := R_1 + R_2 + R_6$	$R_{11} = 28.5$	$R_{22} := R_3 + R_6 + R_4$	$R_{22} = 45$
$R_{12} := -R_6$	$R_{12} = -12$	$R_{23} := -R_4$	$R_{23} = -21$
$R_{21} := R_{12}$	$R_{21} = -12$	$R_{32} := R_{23}$	$R_{32} = -21$
$R_{13} := -R_2$	$R_{13} = -7.5$	$R_{33} := R_5 + R_2 + R_4$	$R_{33} = 39$
$R_{31} := R_{13}$	$R_{31} = -7.5$	$E_{k1} := E_2 + J_2 \cdot R_2$	$E_{k1} = 30$
$E_{k2} := E_3 + J_3 \cdot R_3$	$E_{k2} = 45$	$E_{k3} := -E_2 - J_2 \cdot R_2$	$E_{k3} = -30$
$R := \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{32} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix}$		$E_k := \begin{pmatrix} E_{k1} \\ E_{k2} \\ E_{k3} \end{pmatrix} \quad I_k := R^{-1} \cdot E_k \quad I_k = \begin{pmatrix} 1.9545 \\ 1.7866 \\ 0.5686 \end{pmatrix}$	
$I_1 := -I_{k1}$	$I_1 = -1.9545$	$I_2 := I_{k1} - I_{k3}$	$I_2 = 1.3859$
$I_3 := I_{k2}$	$I_3 = 1.7866$	$I_4 := I_{k2} - I_{k3}$	$I_4 = 1.2179$
$I_5 := (-I_{k3})_3$	$I_5 = -0.5686$	$I_6 := I_{k1} - I_{k2}$	$I_6 = 0.1679$

Рисунок 1.23 – Расчёт токов методом контурных токов

1.9.3 Определим токи во всех ветвях методом узловых потенциалов.

В методе узловых потенциалов для расчёта цепи с неизвестными токами составляют систему узловых уравнений, то есть уравнений по второму закону Кирхгофа. Причём, токи в этих уравнениях выражены по закону Ома через потенциалы узлов, то есть неизвестными в этих уравнениях являются не токи, а

потенциалы. Выражение токов через разности потенциалов и ЭДС обеспечивают выполнение второго закона Кирхгофа.

Принимаем потенциал одного из узлов равным нулю (рисунок 1.24). в электрической схеме на рисунке 1.24 заземляем четвертый узел.

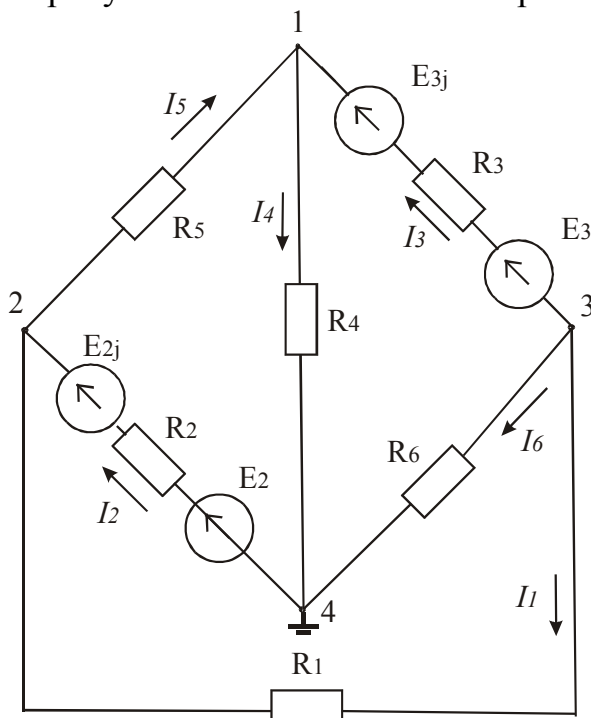


Рисунок 1.24

Для остальных узлов составляем систему уравнений по методу узловых потенциалов:

$$g_{11}\varphi_1 + g_{12}\varphi_2 + g_{13}\varphi_3 = J_{y1}$$

$$g_{21}\varphi_1 + g_{22}\varphi_2 + g_{23}\varphi_3 = J_{y2}$$

$$g_{31}\varphi_1 + g_{32}\varphi_2 + g_{33}\varphi_3 = J_{y3}$$

где g_{11}, g_{22}, g_{33} – собственные проводимости первого, второго и третьего узлов, равные сумме проводимостей всех ветвей присоединенных к соответствующим узлам, Ом;

$g_{12}, g_{13}, g_{21}, g_{23}$ – сумма проводимостей всех ветвей, соединяющих два узла, взятая с обратным знаком, Ом.;

J_{y1}, J_{y2}, J_{y3} – узловые токи, А.. Определяются как алгебраическая сумма произведений ЭДС, присоединённых к данному узлу, на проводимости ветвей, и алгебраическая сумма токов источников токов, присоединенных к данному узлу, то есть $J_y = \sum Eg + \sum J$.

Расчёт токов методом узловых потенциалов в системе Mathcad показан на рисунке 1.26.

$g_{11} := \left(\frac{1}{R3}\right) + \left(\frac{1}{R5}\right) + \left(\frac{1}{R4}\right)$	$g_{11} = 0.2262$	$g_{22} := \left(\frac{1}{R1}\right) + \left(\frac{1}{R5}\right) + \left(\frac{1}{R2}\right)$	$g_{22} = 0.3397$
$g_{12} := \frac{-1}{R5}$	$g_{12} = -0.0952$	$g_{21} := g_{12}$	$g_{23} := \frac{-1}{R1}$
$g_{13} := \frac{-1}{R3}$	$g_{13} = -0.0833$	$g_{31} := g_{13}$	$g_{23} = -0.1111$
			$g_{32} := g_{23}$
		$g_{33} := \left(\frac{1}{R3}\right) + \left(\frac{1}{R6}\right) + \left(\frac{1}{R1}\right)$	$g_{33} = 0.2778$
$J_{y1} := \frac{(J3 \cdot R3 + E3)}{R3}$	$J_{y1} = 3.75$	$J_{y2} := \frac{(J2 \cdot R2 + E2)}{R2}$	$J_{y2} = 4$
$J_{y3} := \frac{-(J3 \cdot R3 + E3)}{R3}$	$J_{y3} = -3.75$		
$g := \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix}$	$J_y := \begin{pmatrix} J_{y1} \\ J_{y2} \\ J_{y3} \end{pmatrix}$	$\phi := g^{-1} \cdot J_y$	$\phi = \begin{pmatrix} 25.5766 \\ 19.6059 \\ 2.0153 \end{pmatrix}$
$I_1 := \frac{(\phi_3 - \phi_2)}{R1}$	$I_1 = -1.9545$	$I_2 := \frac{(0 - \phi_2 + J2 \cdot R2 + E2)}{R2}$	$I_2 = 1.3859$
$I_3 := \frac{(\phi_3 - \phi_1 + E3 + J3 \cdot R3)}{R3}$	$I_3 = 1.7866$	$I_4 := \frac{(\phi_1 - 0)}{R4}$	$I_4 = 1.2179$
$I_5 := \frac{(\phi_3 - \phi_1)}{R5}$	$I_5 = -0.5686$	$I_6 := \frac{(\phi_3 - 0)}{R6}$	$I_6 = 0.1679$

Рисунок 1.26

1.9.4 Составим баланс мощностей. Рассчитаем токи I_2 и I_3 в исходной схеме и определим напряжения на зажимах источников тока (рисунок 1.27).

$I_2 := I_2' - J_2$	$I_2 = -0.6141$	$I_3 := I_3' - J_3$	$I_3 = 0.7866$
$U_{j2} := -I_2 \cdot R_2$	$U_{j2} = 4.6059$	$U_{j3} := -I_3 \cdot R_3$	$U_{j3} = -9.4388$
$P_{ist} := E_2 \cdot I_2' + U_{j2} \cdot J_2 + E_3 \cdot I_3' + U_{j3} \cdot J_3$			$P_{ist} = 79.5179$
$P_{potr} := (I_1)^2 \cdot R_1 + (I_2)^2 \cdot R_2 + (I_3)^2 \cdot R_3 + (I_4)^2 \cdot R_4 + (I_5)^2 \cdot R_5 + (I_6)^2 \cdot R_6$			$P_{potr} = 79.5179$

Рисунок 1.27

1.9.5 Определим ток I_l в исходной схеме, используя метод эквивалентного генератора. Исключаем из схемы первую ветвь, преобразуем источники тока в источники ЭДС и рассчитываем U_{abxx} . Затем исключаем из схемы все

источники, оставляя их внутренние сопротивления, и находим входное сопротивление относительно зажимов а и б (рисунок 1.28).

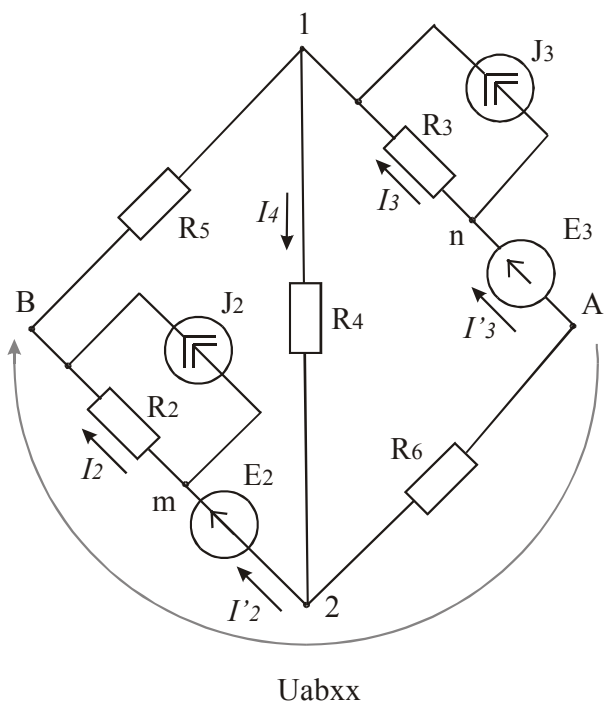


Рисунок 1.28

После преобразования в схеме останется два узла, следовательно, наиболее рациональным для расчёта токов является метод двух узлов. Затем определяем напряжение U_{abxx} , по второму закону Кирхгофа. Для определения величины входного сопротивления преобразуем звезду сопротивлений $R_5-R_4-R_3$ (рисунок 1.29, а) в эквивалентный треугольник, рисунок 1.29, б. .

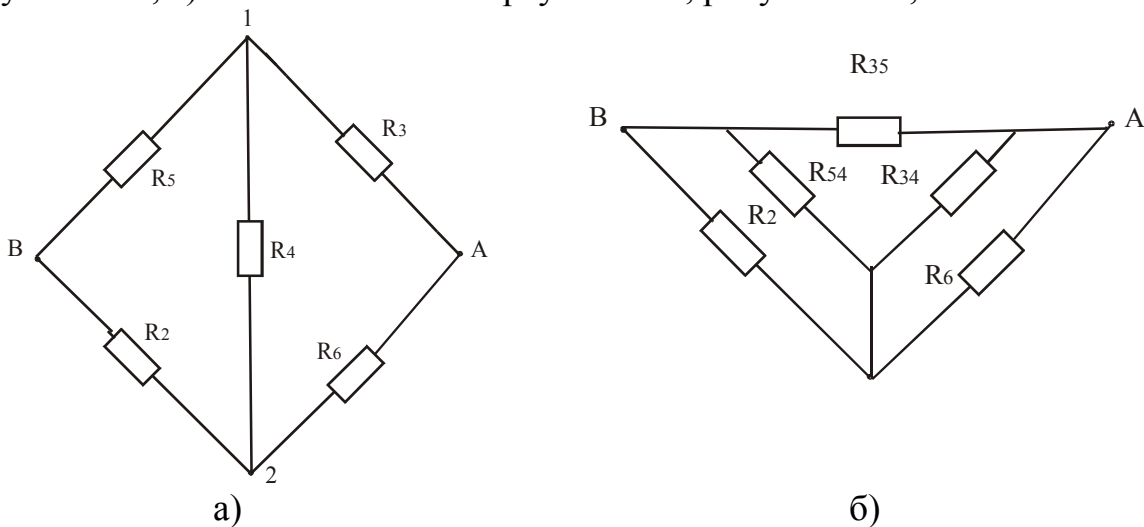


Рисунок 1.29

Расчёт тока в первой ветви методом эквивалентного генератора в системе Mathcad показан на рисунке 1.30.

$$U_{12} := \frac{\left[\frac{(E3 + J3 \cdot R3)}{R3 + R6} + \frac{(E2 + J2 \cdot R2)}{R2 + R5} \right]}{\left(\frac{1}{R3 + R6} \right) + \left(\frac{1}{R2 + R5} \right) + \frac{1}{R4}} \quad U_{12} = 24.4521$$

$$I'2 := \frac{(-U_{12} + E2 + J2 \cdot R2)}{R5 + R2} \quad I'2 = 0.3082 \quad I2 := I'2 - J2 \quad I2 = -1.6918$$

$$I'3 := \frac{(-U_{12} + E3 + J3 \cdot R3)}{R6 + R3} \quad I'3 = 0.8562$$

$$U_{abxx} := E2 + R6 \cdot I'3 - R2 \cdot I2 \quad U_{abxx} = 37.9623$$

$$R54 := R5 + R4 + \frac{R5 \cdot (R4)}{R3} \quad R54 = 49.875$$

$$R35 := R5 + R3 + \frac{R5 \cdot (R3)}{R4} \quad R35 = 28.5$$

$$R452 := \frac{R54 \cdot (R2)}{R54 + R2} \quad R452 = 6.5196$$

$$R34 := R3 + R4 + \frac{R3 \cdot (R4)}{R5} \quad R34 = 57$$

$$R346 := \frac{R34 \cdot (R6)}{R34 + R6} \quad R346 = 9.913$$

$$R62 := R452 + R346 \quad R62 = 16.4327$$

$$R_{ab} := \frac{(R62 \cdot R35)}{R62 + R35} \quad R_{ab} = 10.4229$$

$$I1 := \frac{-U_{abxx}}{(R_{ab} + R1)} \quad I1 = -1.9545$$

Рисунок 1.30

1.9.5 Построим потенциальную диаграмму для внешнего контура (рисунок 1.31). Для построения рассчитываем потенциалы после каждого элемента внешнего контура.

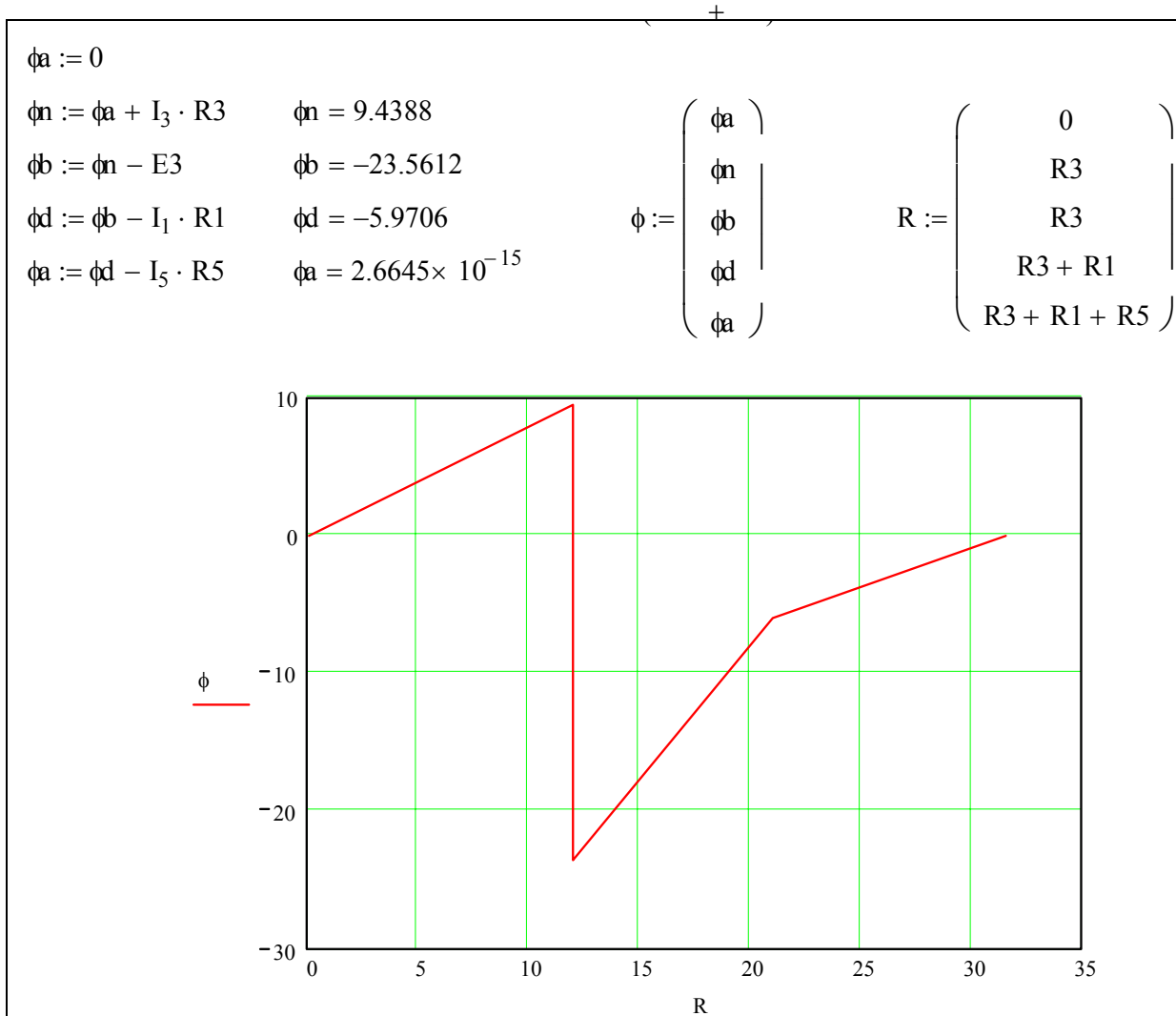


Рисунок 1.31

2 Задание 2 Электрические цепи синусоидального тока

Задача. Для электрической схемы, соответствующей номеру варианта (таблица 2.1) и изображенной на рисунке 2.1-2.20, выполнить следующее:

2.1 На основании законов Кирхгофа составить в общем виде систему уравнений для расчета токов во всех ветвях цепи, записав ее в двух формах: а) дифференциальной; б) символической.

2.2 Определить комплексы действующих значений токов во всех ветвях, воспользовавшись одним из методов расчета линейных электрических цепей.

2.3 По результатам, полученным в п. 2.2, определить показание ваттметра двумя способами: а) с помощью выражения для комплексов тока и напряжения на ваттметре; б) по формуле $UI \cos \varphi$. С помощью векторной диаграммы тока и напряжения, на которые реагирует ваттметр, пояснить определение угла $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$.

2.4 Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов. При этом потенциал точки a , указанной по схеме, принять равным нулю.

2.5 Используя данные расчетов, полученных в п. 2.2, записать выражение для мгновенного значения тока и напряжения в ветви с элементом, перечёркнутым стрелкой. Построить графические зависимости указанных величин от ωt .

2.8 Полагая, что между любыми двумя индуктивными катушками, расположенными в различных ветвях заданной схемы, имеется магнитная связь при коэффициенте взаимной индуктивности, равном M , составить в общем виде систему уравнений по законам Кирхгофа для расчета токов во всех ветвях схемы, записав ее в двух формах: а) дифференциальной; б) символической.

2.9 Примечания:

2.9.1 Ориентируясь на ранее принятые направления токов в ветвях, одноименные зажимы индуктивных катушек выбрать по своему усмотрению так, чтобы было их встречное включение, и обозначить на схеме эти зажимы звездочками (точками).

2.9.2 В случае отсутствия в заданной схеме второй индуктивности вторую катушку ввести дополнительно в одну из ветвей, не содержащих L .

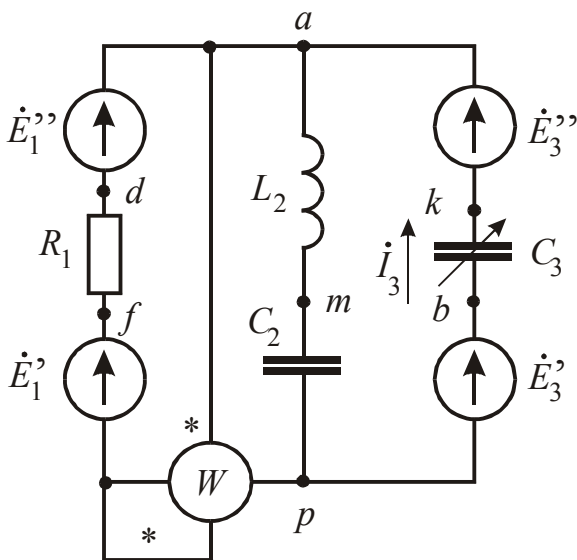


Рисунок 2.1

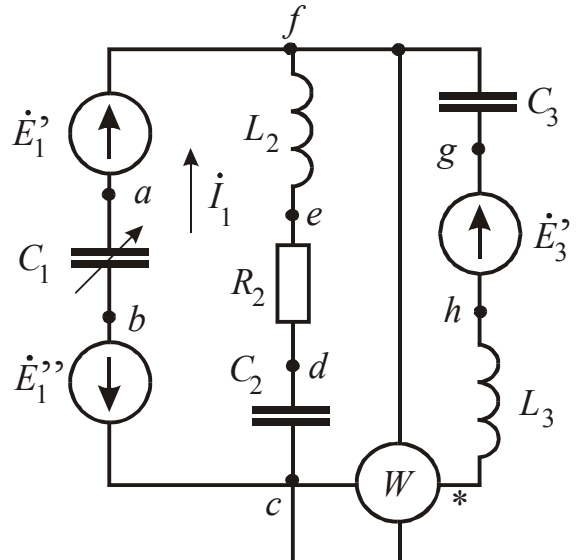


Рисунок 2.2

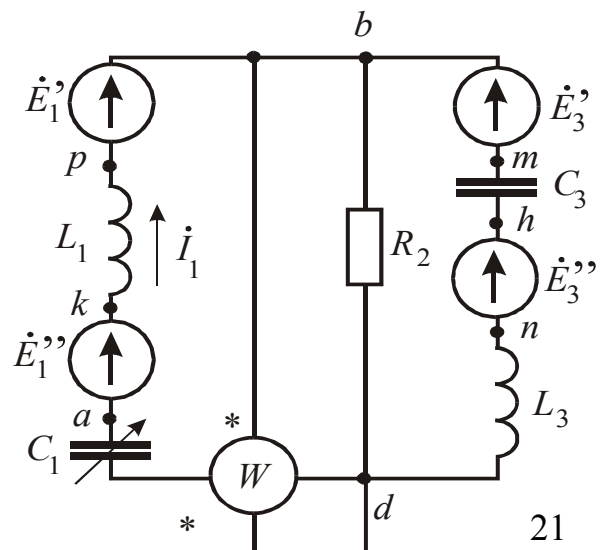
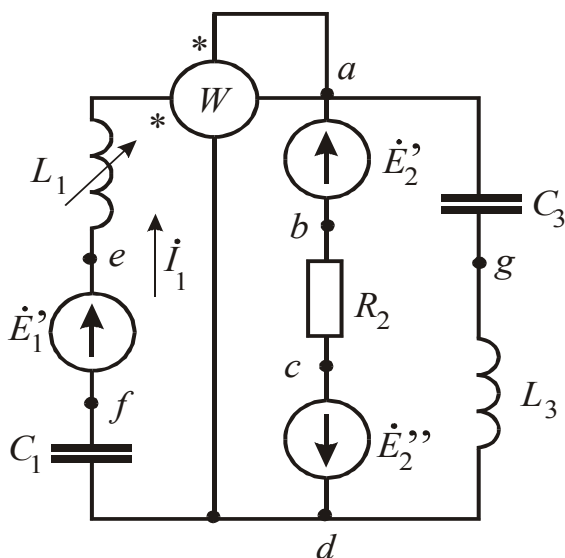


Рисунок 2.3

Рисунок 2.4

Таблица 2.1

Вариант	Рисунок	L_1	L_2	L_3	C_1	C_2	C_3	R_1	R_2	R_3	$f, \text{Гц}$	e', e
		мГн			мкФ			Ом				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2.15	-	63,8	-	106	∞	-	-	-	10	50	$100 \sin(\omega t + 60^\circ)$
2	2.20	21,2	0	-	-	132,5	-	-	-	25	60	$70,5 \sin \omega t$
3	2.1	-	34,7	-	-	∞	80,3	17	-	-	55	$80 \sin(\omega t + 45^\circ)$
4	2.8	13,6	-	109,2	32,5	-	94,6	-	65	-	70	$141 \cos(\omega t - 90^\circ)$
5	2.13	-	-	132	50	-	184	-	65	-	50	$141 \cos(\omega t + 345^\circ)$
6	2.19	-	21,2	24,8	-	-	35,5	17	-	-	90	$80 \sin(\omega t + 40^\circ)$
7	2.10	12,7	47,8	-	-	31,9	-	-	-	25	100	$70,5 \sin(\omega t + 20^\circ)$
8	2.3	100,5	-	0	88,5	-	132,5	-	25	-	60	$70,5 \sin(\omega t - 13^\circ)$
9	2.14	-	83,8	0	-	15,8	29,5	17	-	-	150	$113 \sin(\omega t + 338^\circ)$
10	2.4	20,8	-	52,7	15,1	-	64,6	-	65	-	130	$100 \sin(\omega t - 35^\circ)$
11	2.5	0	250	-	31,8	66	-	-	-	100	50	$141 \cos(\omega t + 270^\circ)$
12	2.16	-	477	125	-	4	33	100	-	-	100	0
13	2.6	-	-	159	15,9	-	∞	-	100	-	100	-
14	2.11	100	25	-	-	8	-	-	-	100	159	0
15	2.17	-	136	-	-	18,2	9,1	100	-	-	175	0
16	2.9	120	-	0	16	-	8	-	100	-	200	$169 \sin(\omega t + 180^\circ)$
17	2.7	24	-	-	12,7	5,5	-	-	-	10	500	0
18	2.12	0	80	145	∞	-	44,5	60	-	-	120	-
19	2.2	-	0	1000	20	∞	8	-	25	-	40	$566 \cos(\omega t + 270^\circ)$
20	2.18	80	90	0	10	5	∞	-	-	70	160	$141 \cos(\omega t - 30^\circ)$
21	2.15	-	63,8	-	160	∞	-	-	-	10	50	$99 \sin(\omega t + 20^\circ)$
22	2.20	12,7	31,8	-	-	39,8	-	-	-	25	100	$70,5 \cos(\omega t + 270^\circ)$

Продолжение таблицы 2.1

Вариант	Рисунок	$e''_1, в$	$e'_2, в$	$e''_2, в$	$e'_3, в$	$e''_3, в$
1	2	14	15	16	17	18
1	2.15	$63,5 \sin (\omega t-56^0)$	$178 \cos (\omega t-90^0)$	0	-	-
2	2.20	0	-	-	$84,6 \sin (\omega t-30^0)$	-
3	2.1	$80 \cos (\omega t-135^0)$	-	-	$56,6 \cos (\omega t+235^0)$	0
4	2.8	0	-	-	0	$282 \sin (\omega t-50^0)$
5	2.13	0	-	-	$200 \sin (\omega t+5^0)$	$116 \sin (\omega t-11^0)$
6	2.19	$80 \sin (\omega t+50^0)$	-	-	$56,4 \cos (\omega t-130^0)$	0
7	2.10	0	-	-	$84,6 \sin (\omega t-10^0)$	0
8	2.3	-	$68,5 \sin (\omega t-84^0)$	$56 \cos (\omega t+100^0)$	-	-
9	2.14	0	-	-	$56,4 \cos (\omega t-147^0)$	-
10	2.4	$100 \sin (\omega t+55^0)$	-	-	0	$282 \sin (\omega t-40^0)$
11	2.5	0	-	-	$141 \sin (\omega t+90^0)$	0
12	2.16	$141 \sin (\omega t-270^0)$	-	-	0	$141 \cos (\omega t-90^0)$
13	2.6	$169 \sin \omega t$	$169 \cos \omega t$	0	$169 \sin (\omega t+180^0)$	0
14	2.11	$169 \sin (\omega t+180^0)$	0	$169 \sin \omega t$	$169 \cos \omega t$	0
15	2.17	$169 \sin (\omega t+90^0)$	$169 \sin (\omega t+180^0)$	0	0	$169 \cos (\omega t-90^0)$
16	2.9	-	0	$169 \cos \omega t$	$169 \cos (\omega t+270^0)$	0
17	2.7	$282 \sin \omega t$	$282 \sin (\omega t-180^0)$	0	-	-
18	2.12	-	$689 \sin (\omega t+12^0)$	$496 \cos (\omega t-149^040')$	$705 \sin (\omega t+307^0)$	-
19	2.2	0	-	-	$705 \sin (\omega t-180^0)$	-
20	2.18	-	$62 \sin (\omega t+326^0)$	$96,5 \cos (\omega t+111^0)$	-	-
21	0	$179 \cos (\omega t+270^0)$	0	-	-	-
22	2.20	0	-	-	$84,6 \cos (\omega t+240^0)$	0

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
23	2.1	-	17,35	-	-	∞	40,15	17	-	-	110	$113 \sin \omega t$
24	2.8	13,6	-	54,6	32,5	-	∞	-	65	-	70	$141 \sin \omega t$
25	2.13	-	-	26,3	12,5	-	88,4	-	65	-	200	$200 \cos \omega t$
26	2.19	-	10,6	24,8	-	-	13,8	17	-	-	180	0
27	2.10	12,7	8	-	-	63,8	-	-	-	25	100	$70,5 \sin (\omega t+20^{\circ})$
28	2.3	402	-	0	354	-	530	-	25	-	15	$70,5 \sin (\omega t+257^{\circ})$
29	2.14	-	41,9	19,13	-	7,9	7,4	17	-	-	300	$113 \sin (\omega t-22^{\circ})$
30	2.4	10,4	-	26,35	7,55	-	32,3	-	65	-	260	0
31	2.5	1600	250	-	5,3	66	-	-	-	100	50	0
32	2.16	-	1600	250	-	5,3	66	100	-	-	50	$282 \sin (\omega t-135^{\circ})$
33	2.6	-	-	318	15,9	-	15,9	-	100	-	100	-
34	2.11	159	39,8	-	-	12,7	-	-	-	100	100	0
35	2.17	-	68	-	-	9,1	4,55	100	-	-	350	$169 \cos (\omega t-90^{\circ})$
36	2.9	60	-	0	8	-	4	-	100	-	400	$169 \sin (\omega t+180^{\circ})$
37	2.7	16	-	-	∞	5,5	-	-	-	10	500	0
38	2.12	0	320	580	∞	-	178	60	-	-	30	-
39	2.2	-	49,75	500	10	79,6	4	-	25	-	80	$566 \cos (\omega t-90^{\circ})$
40	2.18	320	360	0	40	20	∞	-	-	70	40	$141 \sin (\omega t-300^{\circ})$
41	2.15	-	127,6	-	106	159	-	-	-	10	50	$99 \sin (\omega t-340^{\circ})$
42	2.20	21,2	39,8	-	-	75,6	-	-	-	25	60	$70,5 \cos (\omega t-90^{\circ})$
43	2.1	-	34,7	-	-	∞	80,3	17	-	-	55	$113,1 \sin \omega t$

Продолжение таблицы 2.1

1	2	14	15	16	17	18
23	2.1	0	-	-	$46,2 \sin \omega t$	$32,4 \sin (\omega t-90^0)$
24	2.8	0	-	-	$282 \sin (\omega t-50^0)$	0
25	2.13	$74,2 \sin (\omega t+120^0)$	-	-	$282 \cos (\omega t+295^0)$	0
26	2.19	$112,8 \sin (\omega t-5^0)$	-	-	$56,4 \sin (\omega t-40^0)$	0
27	2.10	0	-	-	$84,6 \sin (\omega t-10^0)$	0
28	2.3	-	$68,5 \cos (\omega t-174^0)$	$56 \sin (\omega t-170^0)$	-	-
29	2.14	0	-	-	$56,4 \cos (\omega t-147^0)$	-
30	2.4	$141 \sin (\omega t+10^0)$	-	-	$200 \sin (\omega t+5^0)$	$200 \sin (\omega t-85^0)$
31	2.5	$141 \sin \omega t$	-	-	$141 \cos \omega t$	0
32	2.16	$400 \cos (\omega t-30^0)$	-	-	0	$141 \sin \omega t$
33	2.6	$169 \sin \omega t$	$169 \sin (\omega t+90^0)$	0	$169 \sin (\omega t-180^0)$	0
34	2.11	$169 \sin (\omega t-180^0)$	$240 \sin (\omega t+45^0)$	$169 \sin (\omega t-90^0)$	$169 \cos \omega t$	0
35	2.17	$240 \sin (\omega t+135^0)$	$169 \sin (\omega t+180^0)$	0	0	$169 \cos (\omega t-90^0)$
36	2.9	-	0	$169 \sin (\omega t+90^0)$	$169 \sin \omega t$	0
37	2.7	$282 \sin \omega t$	$282 \sin (\omega t+180^0)$	0	-	-
38	2.12	-	$689 \cos (\omega t-78^0)$	$496 \sin (\omega t-59^040')$	$705 \sin (\omega t-53^0)$	-
39	2.2	0	-	-	$705 \sin (\omega t+180^0)$	-
40	2.18	-	$62 \cos (\omega t-124^0)$	$96,4 \sin (\omega t+201^0)$	-	-
41	2.15	0	0	$179 \cos (\omega t-90^0)$	-	-
42	2.20	0	-	-	$84,6 \sin (\omega t+330^0)$	0
43	2.1	0	-	-	$56,6 \sin (\omega t-35^0)$	0

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
44	2.8	6,8	-	54,6	16,25	-	47,3	-	65	-	140	$141 \cos (\omega t+270^{\circ})$
45	2.13	-	-	26,3	12,5	-	88,4	-	65	-	200	$141 \sin (\omega t+75^{\circ})$
46	2.19	-	21,2	49,6	-	-	27,6	17	-	-	90	0
47	2.10	6,35	4	-	-	31,9	-	-	-	25	200	$70,5 \sin (\omega t+20^{\circ})$
48	2.3	402	-	228	354	-	265	-	25	-	15	$70,5 \cos (\omega t-130^{\circ})$
49	2.14	-	41,9	0	-	7,9	14,75	17	-	-	300	$60 \sin (\omega t+315^{\circ})$
50	2.4	20,8	-	52,7	15,1	-	64,6	-	65	-	130	0
51	2.5	1060	413	-	17,6	110	-	-	-	100	30	$141 \cos (\omega t-90^{\circ})$
52	2.16	-	662	103	-	2,21	27,6	100	-	-	120	0
53	2.6	-	-	318	31,8	-	∞	-	100	-	50	-
54	2.11	100	25	-	-	8	-	-	-	100	159	$169 \sin (\omega t+90^{\circ})$
55	2.17	-	136	-	-	18,2	9,1	100	-	-	175	0
56	2.9	60	-	40	8	-	2	-	100	-	400	$169 \sin (\omega t-180^{\circ})$
57	2.7	48	-	-	25,4	11	-	-	-	10	250	0
58	2.12	0	160	290	∞	-	89	60	-	-	60	-
59	2.2	-	0	500	10	∞	4	-	25	-	80	$620 \sin (\omega t+54^{\circ})$
60	2.18	80	90	69,75	10	5	14,22	-	-	70	160	$141 \sin (\omega t-300^{\circ})$
61	2.15	-	53	-	88,4	∞	-	-	-	10	60	$99 \cos (\omega t+290^{\circ})$
62	2.20	21,1	0	-	-	132,5	-	-	-	25	60	$56 \sin (\omega t-60^{\circ})$
63	2.1	-	69,4	-	-	240,6	80,3	17	-	-	55	$113,1 \cos (\omega t-90^{\circ})$

Продолжение таблицы 2.1

1	2	14	15	16	17	18
44	2.8	0	-	-	$282 \cos (\omega t-140^{\circ})$	0
45	2.13	0	-	-	$282 \sin (\omega t+25^{\circ})$	0
46	2.19	$112,8 \sin (\omega t-5^{\circ})$	-	-	$56,4 \sin (\omega t-40^{\circ})$	0
47	2.10	0	-	-	$84,6 \sin (\omega t-10^{\circ})$	0
48	2.3	-	$84,6 \sin (\omega t+317^{\circ})$	0	-	-
49	2.14	$60 \cos (\omega t+90^{\circ})$	-	-	$56,4 \sin (\omega t+303^{\circ})$	-
50	2.4	$141 \sin (\omega t+10^{\circ})$	-	-	0	$282 \sin (\omega t-40^{\circ})$
51	2.5	0	-	-	$141 \sin (\omega t-270^{\circ})$	0
52	2.16	$141 \cos \omega t$	-	-	$100 \sin (\omega t+135^{\circ})$	$100 \cos (\omega t+315^{\circ})$
53	2.6	$169 \sin \omega t$	$120 \sin (\omega t+135^{\circ})$	$120 \cos (\omega t-45^{\circ})$	$169 \sin (\omega t-180^{\circ})$	
54	2.11	$240 \sin (\omega t-135^{\circ})$	0	$169 \sin \omega t$	$169 \cos \omega t$	0
55	2.17	$169 \cos \omega t$	$169 \sin (\omega t+90^{\circ})$	$240 \sin (\omega t-135^{\circ})$	0	$169 \sin \omega t$
56	2.9	0	$120 \sin (\omega t-45^{\circ})$	$120 \sin (\omega t+45^{\circ})$	$169 \sin \omega t$	0
57	2.7	$282 \sin \omega t$	$282 \cos (\omega t+90^{\circ})$	0	-	-
58	2.12	-	$705 \cos (\omega t-37^{\circ})$	-	$705 \sin (\omega t-53^{\circ})$	-
59	2.2	$538 \cos (\omega t+22^{\circ})$	-	-	$705 \cos (\omega t+90^{\circ})$	-
60	2.18	-	$141 \cos (\omega t-90^{\circ})$	0	-	-
61	2.15	0	$155 \sin (\omega t+30^{\circ})$	$89,5 \cos (\omega t-150^{\circ})$	-	-
62	2.20	$64,5 \sin (\omega t-131^{\circ})$	-	-	$84,6 \cos (\omega t-120^{\circ})$	0
63	2.1	0	-	-	$56,6 \cos (\omega t-125^{\circ})$	0

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
64	2.8	6,8	-	27,3	16,25	-	∞	-	65	-	140	141 sin ωt
65	2.13	-	-	63,5	25	-	100	-	65	-	100	141 cos ($\omega t - 15^\circ$)
66	2.19	-	23,7	27,9	-	-	39,9	17	-	-	80	0
67	2.10	12,7	47,8	-	-	31,9	-	-	-	25	100	66,5 sin ωt
68	2.3	100,5	-	56,9	88,5	-	66,25	-	25	-	60	70,5 sin ($\omega t - 13^\circ$)
69	2.14	-	167,6	76,52	-	31,6	29,5	17	-	-	75	113 cos ($\omega t - 112^\circ$)
70	2.4	20,8	-	29,4	15,1	-	∞	-	65	-	130	0
71	2.5	159	250	-	21,2	66	-	-	-	100	50	244 cos ωt
72	2.16	-	318	250	-	15,9	66	100	-	-	50	0
73	2.6	-	-	636	31,8	-	31,8	-	100	-	50	-
74	2.11	50	12,5	-	-	4	-	-	-	100	318	0
75	2.17	-	68	-	-	9,1	4,55	100	-	-	350	0
76	2.9	120	-	80	16	-	4	-	100	-	200	169 sin ($\omega t - 180^\circ$)
77	2.7	16	-	-	∞	5,5	-	-	-	10	500	282 cos ($\omega t - 90^\circ$)
78	2.12	318,4	320	580	88,4	-	178	60	-	-	30	-
79	2.2	-	199	2000	40	318,4	16	-	25	-	20	566 sin ωt
80	2.18	320	360	279	40	20	56,88	-	-	70	40	141 cos ($\omega t + 330^\circ$)
81	2.15	-	47,8	-	53	159	-	-	-	10	100	99 cos ($\omega t - 70^\circ$)
82	2.20	8,46	0	-	-	53,2	-	-	-	25	150	70,5 cos ($\omega t - 90^\circ$)

Продолжение таблицы 2.1

1	2	14	15	16	17	18
64	2.8	0	-	-	$181,4 \sin \omega t$	$216 \sin (\omega t-90^{\circ})$
65	2.13	0	-	-	0	$282 \sin (\omega t-335^{\circ})$
66	2.19	$112,8 \cos (\omega t-95^{\circ})$	-	-	$40 \sin (\omega t+5^{\circ})$	$40 \sin (\omega t-85^{\circ})$
67	2.10	$24,2 \cos \omega t$	-	-	$84,6 \cos (\omega t-100^{\circ})$	0
68	2.3	-	$84,6 \cos (\omega t-133^{\circ})$	0	-	-
69	2.14	0	-	-	$56,4 \sin (\omega t-57^{\circ})$	-
70	2.4	$141 \sin (\omega t+10^{\circ})$	-	-	0	$282 \sin (\omega t-40^{\circ})$
71	2.5	$282 \sin (\omega t-60^{\circ})$	-	-	$141 \sin (\omega t-270^{\circ})$	0
72	2.16	$141 \sin (\omega t+90^{\circ})$	-	-	0	$141 \cos (\omega t+270^{\circ})$
73	2.6	$169 \cos (\omega t+270^{\circ})$	$169 \sin (\omega t+90^{\circ})$	0	$169 \sin (\omega t-180^{\circ})$	0
74	2.11	$169 \sin (\omega t-180^{\circ})$	0	$169 \sin \omega t$	$240 \sin (\omega t+135^{\circ})$	$169 \sin \omega t$
75	2.17	$169 \cos \omega t$	$169 \sin (\omega t-180^{\circ})$	0	0	$169 \sin \omega t$
76	2.9	0	0	$169 \cos \omega t$	0	$169 \sin \omega t$
77	2.7	0	$282 \sin (\omega t+180^{\circ})$	0	-	-
78	2.12	-	$705 \sin (\omega t-307^{\circ})$	0	$705 \cos (\omega t+217^{\circ})$	-
79	2.2	0	-	-	$705 \cos (\omega t-270^{\circ})$	-
80	2.18	-	$141 \cos (\omega t+270^{\circ})$	0	-	-
81	2.15	0	$179 \sin \omega t$	0	-	-
82	2.20	0	-	-	$73 \sin \omega t$	$42,3 \cos (\omega t-180^{\circ})$

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
83	2.1	-	34,7	-	-	120,3	40,15	17	-	-	110	$113 \cos(\omega t - 90^\circ)$
84	2.8	13,6	-	54,6	32,5	-	∞	-	65	-	70	$100 \sin(\omega t + 45^\circ)$
85	2.13	-	-	38,2	12,5	-	33,2	-	65	-	200	$141 \sin(\omega t - 285^\circ)$
86	2.19	-	21,2	24,8	-	-	35,5	17	-	-	90	0
87	2.10	6,35	23,9	-	-	15,9	-	-	-	25	200	$70 \cos(\omega t - 70^\circ)$
88	2.3	201	-	0	177	-	265	-	25	-	30	$70,5 \cos(\omega t - 103^\circ)$
89	2.14	-	167,6	0	-	31,6	59	17	-	-	75	$60 \sin(\omega t - 34^\circ)$
90	2.4	10,4	-	14,7	7,55	-	∞	-	65	-	260	0
91	2.5	318	125	-	5,3	33	-	-	-	100	100	0
92	2.16	-	1600	250	-	5,3	66	100	-	-	50	0
93	2.6	-	-	159	15,9	-	∞	-	100	-	100	-
94	2.11	159	39,8	-	-	12,7	-	-	-	100	100	-
95	2.17	-	238	-	-	31,8	15,9	100	-	-	100	0
96	2.9	60	-	40	8	-	2	-	100	-	400	$169 \sin(\omega t - 180^\circ)$
97	2.7	32	-	-	∞	11	-	-	-	10	250	0
98	2.12	79,6	80	145	22,1	-	44,5	60	-	-	120	-
99	2.2	-	0	2000	40	∞	16	-	25	-	20	$440 \sin(\omega t - 316^\circ)$
100	1.18	160	180	0	20	10	∞	-	-	70	80	$141 \sin(\omega t + 60^\circ)$

Продолжение таблицы 2.1

1	2	14	15	16	17	18
83	2.1	0	-	-	$56,6 \sin (\omega t-35^{\circ})$	0
84	2.8	$100 \sin (\omega t-45^{\circ})$	-	-	$282 \sin (\omega t-50^{\circ})$	0
85	2.13	0	-	-	$282 \cos (\omega t-65^{\circ})$	0
86	2.19	$112,8 \sin (\omega t-5^{\circ})$	-	-	$56,4 \sin (\omega t-40^{\circ})$	0
87	2.10	0	-	-	$83,5 \sin \omega t$	$14,7 \sin (\omega t+90^{\circ})$
88	2.3	-	$84,6 \sin (\omega t-43^{\circ})$	0	-	-
89	2.14	$60 \sin (\omega t+180^{\circ})$	-	-	$56,4 \cos (\omega t+213^{\circ})$	-
90	2.4	$141 \sin (\omega t+10^{\circ})$	-	-	0	$282 \sin (\omega t-40^{\circ})$
91	2.5	$141 \sin \omega t$	-	-	$372 \sin (\omega t-311^{\circ})$	$282 \cos (\omega t-120^{\circ})$
92	2.16	$141 \cos \omega t$	-	-	0	$141 \sin \omega t$
93	2.6	$169 \cos (\omega t-90^{\circ})$	$169 \cos \omega t$	0	$120 \cos (\omega t+45^{\circ})$	$120 \sin (\omega t-135^{\circ})$
94	2.11	$169 \sin (\omega t+180^{\circ})$	0	$169 \cos (\omega t-90^{\circ})$	$169 \sin (\omega t+90^{\circ})$	0
95	2.17	$169 \cos \omega t$	$169 \sin (\omega t-180^{\circ})$	0	$240 \sin (\omega t+45^{\circ})$	$169 \sin (\omega t-90^{\circ})$
96	2.9	0	0	$169 \cos \omega t$	$169 \sin \omega t$	0
97	2.7	$282 \cos (\omega t-90^{\circ})$	$141 \sin (\omega t-90^{\circ})$	$325 \sin (\omega t-30^{\circ})$	-	-
98	2.12	-	$705 \sin (\omega t+53^{\circ})$	0	$705 \cos (\omega t-143^{\circ})$	-
99	2.2	$392 \cos (\omega t+40^{\circ})$	-	-	$705 \cos (\omega t-270^{\circ})$	-
100	2.18	-	$141 \cos (\omega t+270^{\circ})$	0	-	-

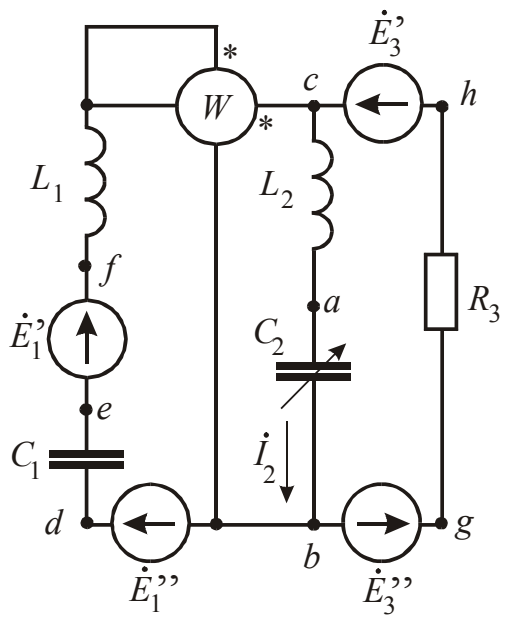


РИСУНОК 2.5

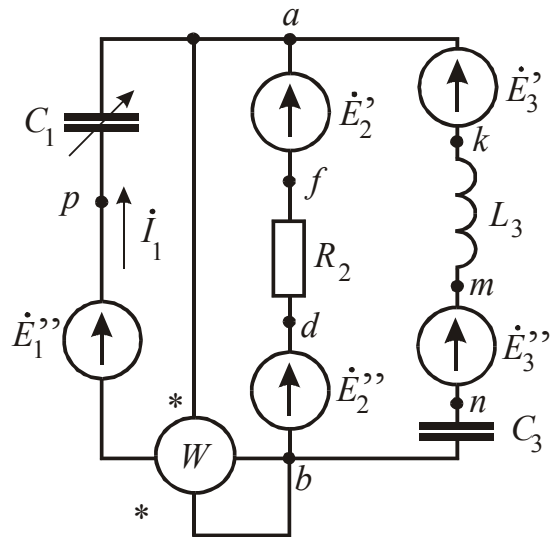


РИСУНОК 2.6

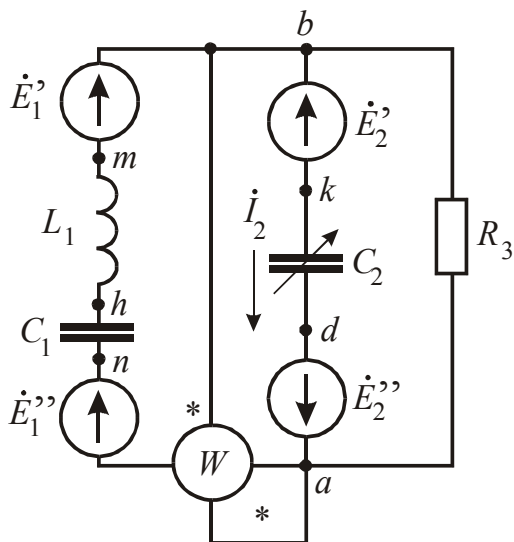


Рисунок 2.7

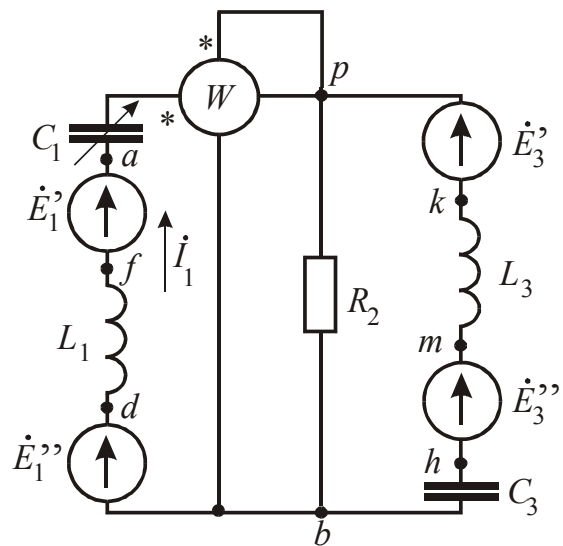


Рисунок 2.8

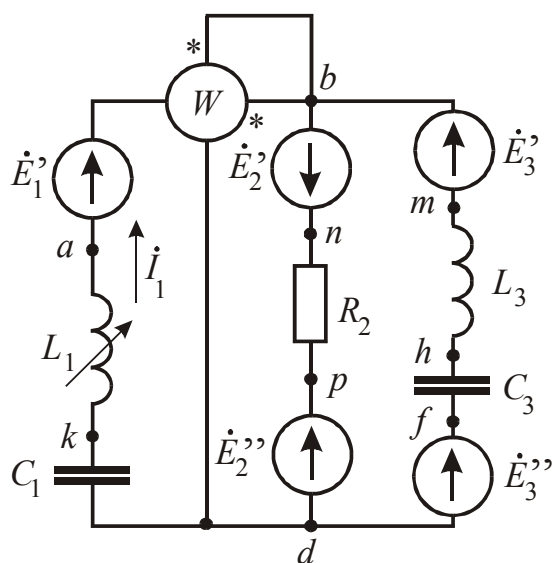


Рисунок 2.9

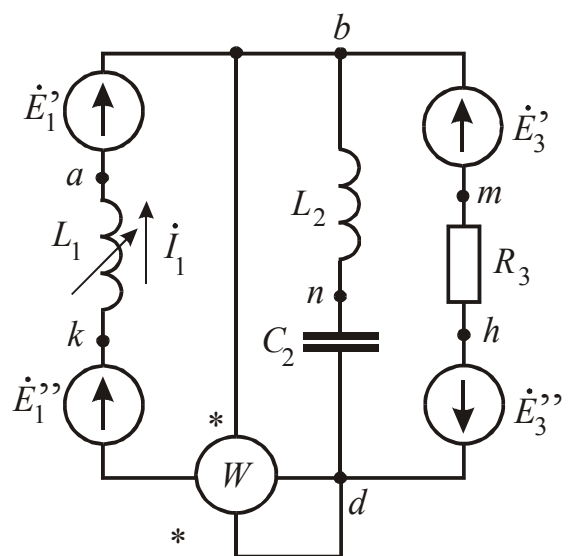


Рисунок 2.10

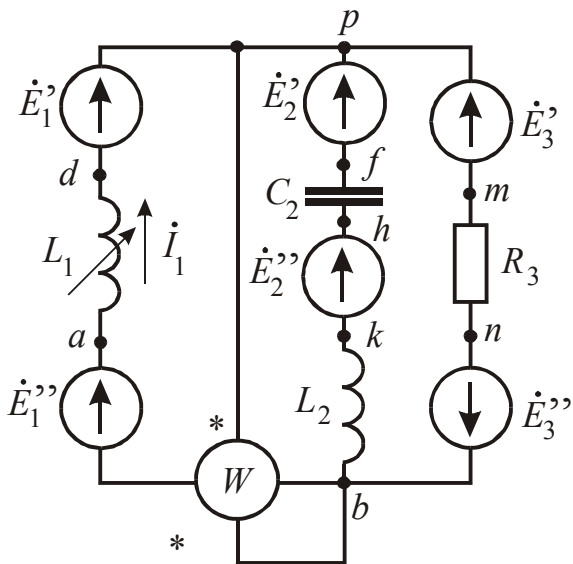


Рисунок 2.11

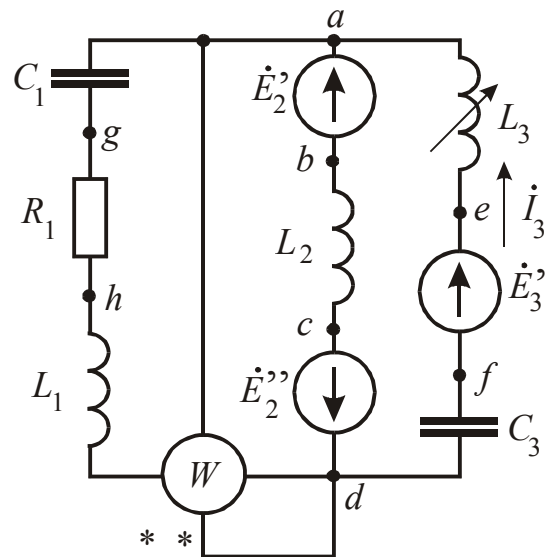


Рисунок 2.12

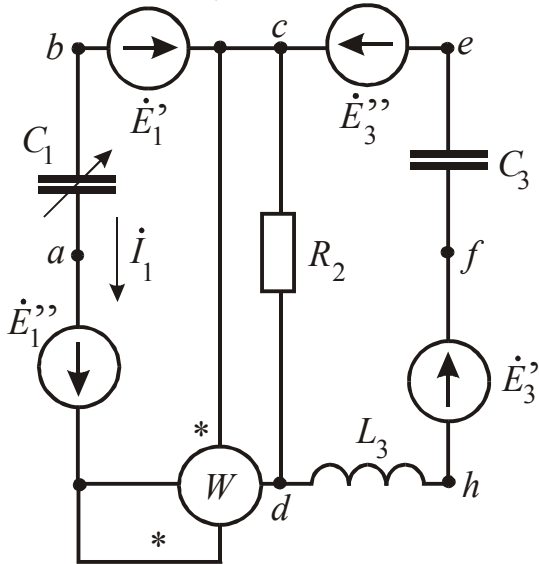


Рисунок 2.13

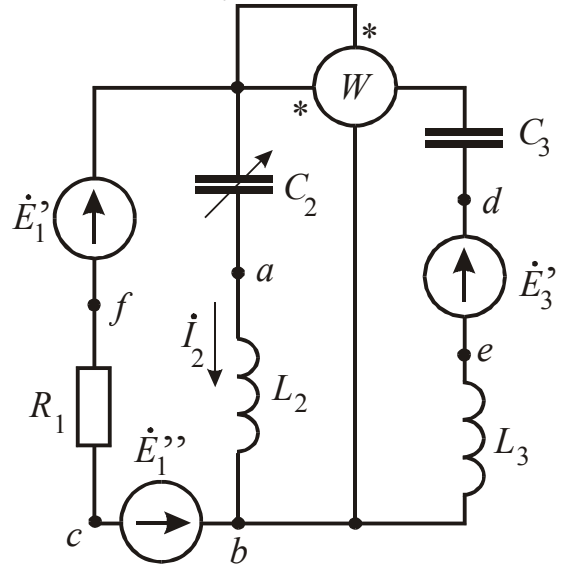


Рисунок 2.14

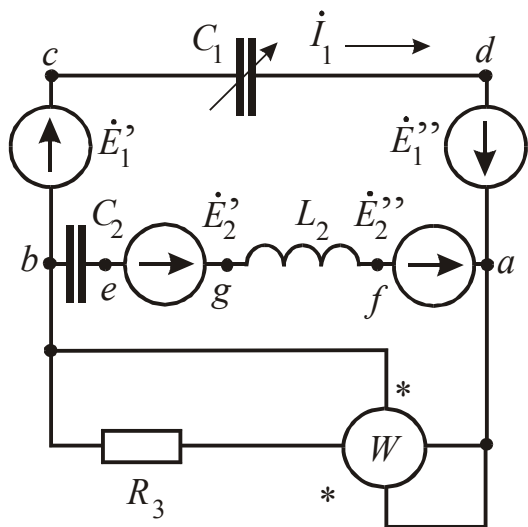


Рисунок 2.15

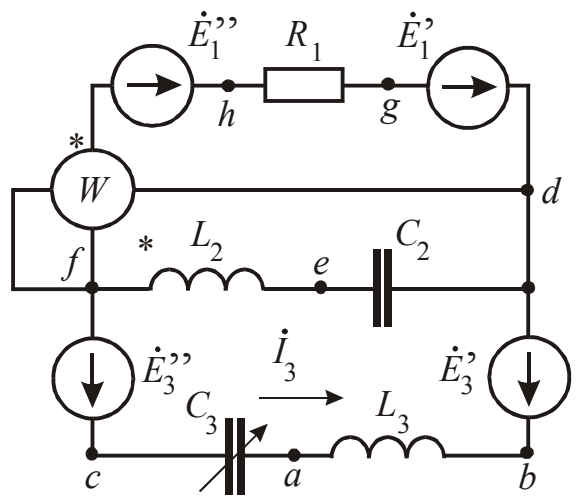


Рисунок 2.16

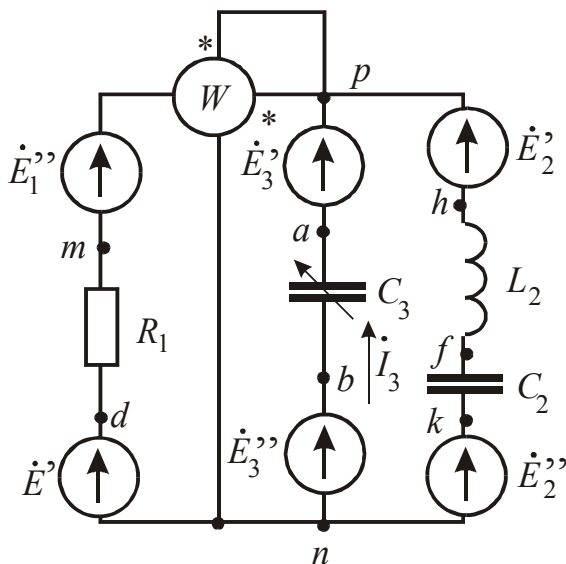


Рисунок 2.17

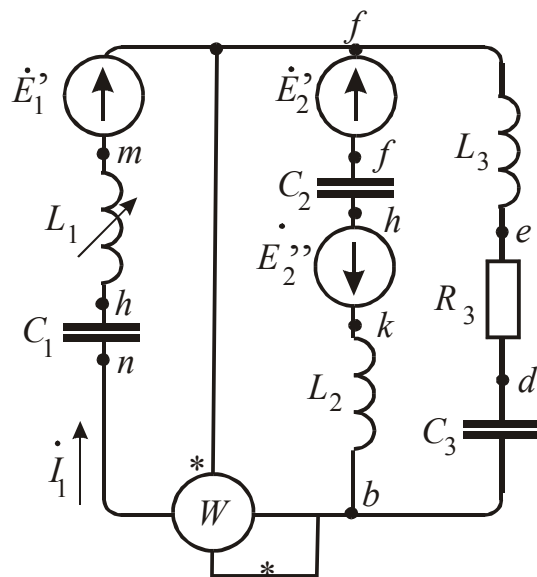


Рисунок 2.18

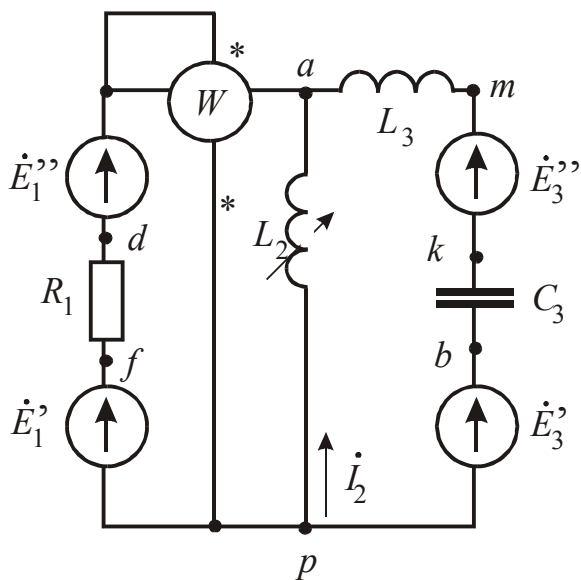


Рисунок 2.19

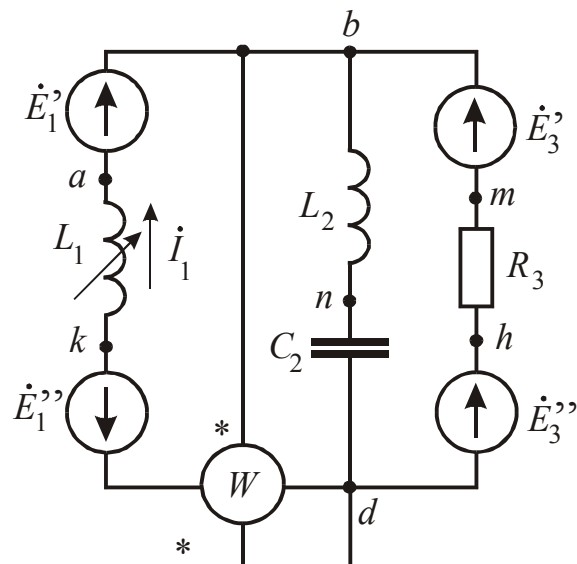


Рисунок 2.20

2.10 Пример выполнения расчётно-графического задания № 2.

2.10.1 На основании законов Кирхгофа составить в общем виде систему уравнений для расчёта токов во всех ветвях цепи, изображенной на рисунке 2.21, записав ее в двух формах: а) дифференциальной; б) символической.

Дифференциальная форма:

$$\begin{cases} -i_1 + i_2 - i_3 = 0 \\ \frac{1}{C_1} \cdot \int i_1 dt + L_2 \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t} + \frac{1}{C_2} \cdot \int i_2 dt + R_2 \cdot i_2 = e_1' - e_1'' \\ -\frac{1}{C_3} \cdot \int i_3 dt - L_3 \cdot \frac{\partial i_3}{\partial t} - \frac{1}{C_2} \cdot \int i_2 dt - R_2 \cdot i_2 - L_2 \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t} = -e_3' \end{cases}$$

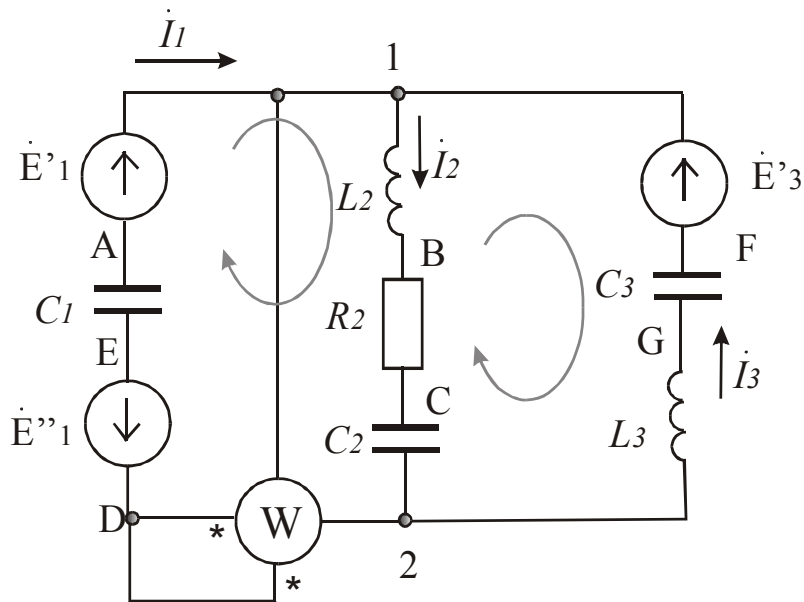


Рисунок 2.21

Символическая форма:

$$\begin{cases} -\dot{I}_1 + \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0 \\ -jx_{C1} \cdot \dot{I}_1 + (jx_{L2} + R_2 - jx_{C2}) \cdot \dot{I}_2 = -\dot{E}'_1 + \dot{E}''_1 \\ -(jx_{L2} + R_2 - jx_{C2}) \cdot \dot{I}_2 - (jx_{L3} - jx_{C3}) \cdot \dot{I}_3 = -\dot{E}'_3 \end{cases}$$

2.10.2 Определить комплексы действующих значений токов во всех ветвях, воспользовавшись одним из методов расчёта линейных электрических цепей. Если

$$e_1'(t) = 440 \cdot \sin(\omega \cdot t - 316^\circ)$$

$$e_1''(t) = 392 \cdot \cos(\omega \cdot t + 40^\circ)$$

$$e_3'(t) = 705 \cdot \cos(\omega \cdot t - 143^\circ)$$

$C_1 = 40$ мкФ, $L_2 = 199$ мГн, $R_2 = 25$ Ом, $C_2 = 10$ мкФ, $L_3 = 2000$ мГн; $C_3 = 16$ мкФ.

Так как в схеме два узла, наиболее рациональным для расчёта цепи будет метод двух узлов. Пример расчёта в системе Mathcad показан на рисунке 2.22.

2.10.3 По результатам, полученным в пункте 2.10.2, определить показание ваттметра двумя способами: с помощью выражения для комплексов тока и напряжения на ваттметре и по формуле $UI \cos \varphi$. Расчёт показан на рисунке 2.23.

Прибор ваттметр предназначен для измерения активной мощности. Два зажима прибора, включенных последовательно с участком цепи, на котором измеряется активная мощность, определяют ток на этом участке, а два зажима включенных параллельно – измеряют напряжение на этом же участке.

$$\begin{array}{llll}
C1 := 40 \cdot 10^{-6} & L2 := 199 \cdot 10^{-3} & \text{rd}(x) := x \cdot \frac{180}{\pi} & \text{dr}(x) := x \cdot \frac{\pi}{180} \\
C2 := 10 \cdot 10^{-6} & L3 := 2000 \cdot 10^{-3} & f := 20 & \\
C3 := 16 \cdot 10^{-6} & R2 := 25 & \omega := 2 \cdot \pi \cdot f &
\end{array}$$

Комплексные действующие значения ЭДС:

$$E11 := \left(\frac{440}{\sqrt{2}} \right) \cdot e^{-i \cdot \text{dr}(316)} \quad E12 := \left(\frac{392}{\sqrt{2}} \right) \cdot e^{i \cdot \text{dr}(40+90)} \quad E3 := \left(\frac{705}{\sqrt{2}} \right) \cdot e^{i \cdot \text{dr}(-143+90)}$$

$$E11 = 223.806 + 216.127i \quad E12 = -178.172 + 212.337i \quad E3 = 300.011 - 398.128i$$

Комплексные сопротивления ветвей

$$Z1 := -i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C1} \quad Z2 := R2 + i \cdot \omega \cdot L2 - i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C2} \quad Z3 := i \cdot \omega \cdot L3 - i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C3}$$

$$Z1 = -198.944i \quad Z2 = 25 - 770.768i \quad Z3 = -246.032i$$

Напряжение между 1 и 2 узлами

$$U12 := \frac{\left[\frac{E3}{Z3} + \frac{(E11 - E12)}{Z1} \right]}{\left[\left(\frac{1}{Z1} \right) + \left(\frac{1}{Z2} \right) + \left(\frac{1}{Z3} \right) \right]} \quad U12 = 312.539 - 152.69i$$

Токи в ветвях определяем по обобщенному закону Ома

$$I1 := \frac{(-U12 - E12 + E11)}{Z1} \quad I1 = -0.787 + 0.45i \quad |I1| = 0.906 \quad \text{rd}(\arg(I1)) = 150.249$$

$$I2 := \frac{(U12)}{Z2} \quad I2 = 0.211 + 0.399i \quad |I2| = 0.451 \quad \text{rd}(\arg(I2)) = 62.105$$

$$I3 := \frac{(-U12 + E3)}{Z3} \quad I3 = 0.998 - 0.051i \quad |I3| = 0.999 \quad \text{rd}(\arg(I3)) = -2.922$$

Баланс мощности

$$S_{\text{ист}} := (E11 - E12) \cdot \bar{I1} + E3 \cdot \bar{I3} \quad S_{\text{ист}} = 5.086 - 565.588i$$

$$P_{\text{потр}} := R2 \cdot (|I2|)^2 \quad P_{\text{потр}} = 5.086$$

$$Q_{\text{потр}} := \left(-i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C1} \right) \cdot (|I1|)^2 + \left[\left(-i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C2} \right) + i \cdot \omega \cdot L2 \right] \cdot (|I2|)^2 + \left[\left(-i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C3} \right) + i \cdot \omega \cdot L3 \right] \cdot (|I3|)^2 \quad Q_{\text{потр}} = -565.588i$$

Рисунок 2.22

$$\begin{aligned}
 U_w &:= -Z_1 \cdot I_1 - E_{12} + E_{11} & U_w &= 312.539 - 152.69i & |U_w| &= 347.843 & \text{rd}(\arg(U_w)) &= -26.038 \\
 I_1 &= -0.787 + 0.45i & |I_1| &= 0.906 & \text{rd}(\arg(I_1)) &= 150.249 \\
 P_1 &:= \text{Re}(U_w \cdot \overline{(-I_1)}) & & & P_1 &= 314.474 \\
 P_2 &:= |U_w| \cdot (-|I_1|) \cdot \cos(\arg(U_w) - \arg(I_1)) & & & P_2 &= 314.474
 \end{aligned}$$

Рисунок 2.23

Векторная диаграмма тока и напряжения, на которые реагирует ваттметр, приведена на рисунке 2.24.

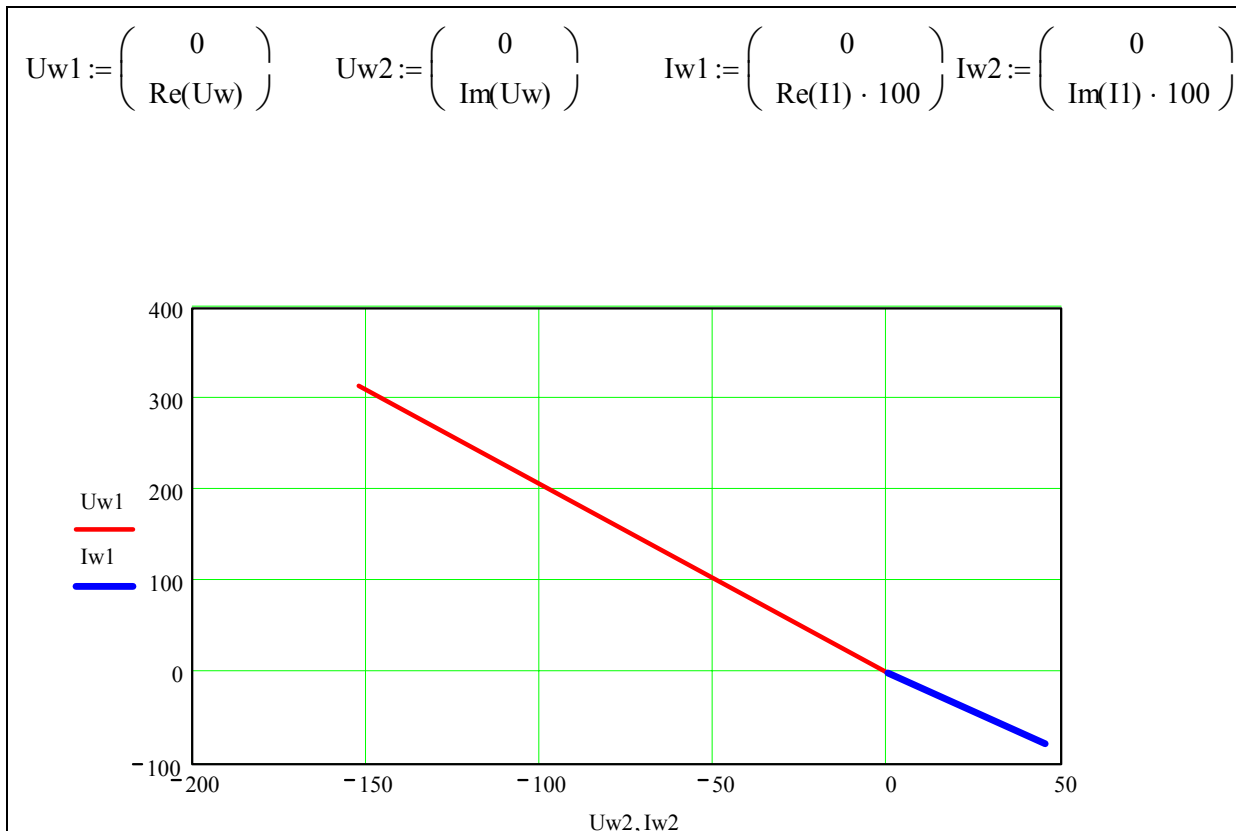


Рисунок 2.24

2.10.4 Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов. При этом потенциал точки a , указанной на схеме принять равным нулю. На рисунке 2.25 показан расчёт топографической диаграммы напряжений, на рисунке 2.26 построена топографическая диаграмма напряжений, совмещенная с векторной диаграммой токов.

$F_a := 0$	
$F_1 := F_a + E_{11}$	$F_1 = 223.806 + 216.127i$
$F_f := F_1 - E_3$	$F_f = -76.205 + 614.255i$
$F_g := F_f + \left(-i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_3}\right) \cdot I_3$	$F_g = -101.531 + 118.096i$
$F_2 := F_g + (i \cdot \omega \cdot L_3) \cdot I_3$	$F_2 = -88.733 + 368.817i$
$F_e := F_2 - E_{12}$	$F_e = 89.438 + 156.48i$
$F_a := F_e - \left(-i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_1}\right) \cdot I_1$	$F_a = 0$
$F_b := F_1 - (i \cdot \omega \cdot L_2) \cdot I_2$	$F_b = 233.775 + 210.85i$
$F_c := F_b - R_2 \cdot I_2$	$F_c = 228.499 + 200.884i$
$F_2 := F_c - \left(-i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right) \cdot I_2$	$F_2 = -88.733 + 368.817i$

$rI := \begin{pmatrix} 0 \\ \text{Re}(I_1) \\ 0 \\ \text{Re}(I_2) \\ 0 \\ \text{Re}(I_3) \end{pmatrix}$	$mI := \begin{pmatrix} 0 \\ \text{Im}(I_1) \\ 0 \\ \text{Im}(I_2) \\ 0 \\ \text{Im}(I_3) \end{pmatrix}$	$rF1 := \begin{pmatrix} \text{Re}(F_a) \\ \text{Re}(F_1) \\ \text{Re}(F_f) \\ \text{Re}(F_g) \\ \text{Re}(F_2) \\ \text{Re}(F_e) \\ \text{Re}(F_a) \end{pmatrix}$	$mF1 := \begin{pmatrix} \text{Im}(F_a) \\ \text{Im}(F_1) \\ \text{Im}(F_f) \\ \text{Im}(F_g) \\ \text{Im}(F_2) \\ \text{Im}(F_e) \\ \text{Im}(F_a) \end{pmatrix}$
---	---	---	---

$rF2 := \begin{pmatrix} \text{Re}(F_a) \\ \text{Re}(F_1) \\ \text{Re}(F_b) \\ \text{Re}(F_c) \\ \text{Re}(F_2) \end{pmatrix}$	$mF2 := \begin{pmatrix} \text{Im}(F_a) \\ \text{Im}(F_1) \\ \text{Im}(F_b) \\ \text{Im}(F_c) \\ \text{Im}(F_2) \end{pmatrix}$
---	---

Рисунок 2.25

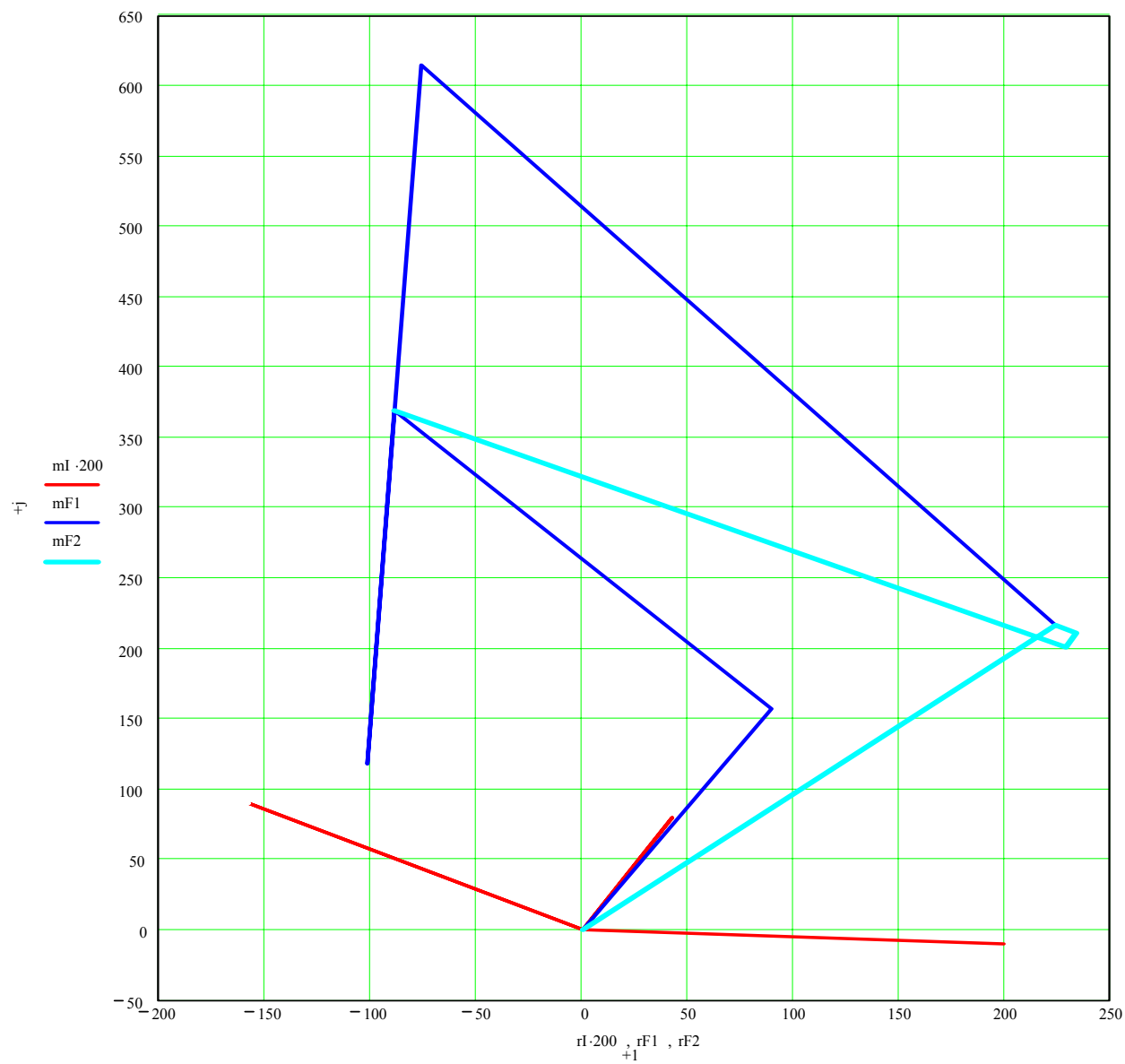


Рисунок 2.26

Список использованных источников

1. Бессонов Л.А., Демидова И.Г., Заруди М.Е. и др. Методические указания и контрольные задания для студентов-заочников технических специальностей высших учебных заведений. «Теоретические основы электротехники». – М.: Высш.шк., 1982.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М. : Высш.шк., 1978.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Ч. 1, 2.- М.:Энергия, 1981
4. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В, Страхов С.В. Основы теории цепей.- М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Бессонов Л.А., Демидова И.Г., Заруди М.Е. и др. Сборник задач по теоретическим основам электротехники. - М.: Высш.шк.; 2000.
6. Огорелков Б.И., Ушаков А.Н., Ушакова Н.Ю. Методы расчёта электрических цепей постоянного тока: Методические указания и консультации к самостоятельному изучению раздела курса ТОЭ. - ч.1. – Оренбург: ОрПи, 1988.
7. Пискунова Ж.Г., Бравичев С.Н. Методические указания и консультации для самостоятельной работы по разделу курса ТОЭ « Методы расчёта линейных электрических цепей постоянного тока». – Оренбург: ОрПи, 1994. – 44 с.
8. Пискунова Ж.Г., Бравичев С.Н. Расчёт линейных электрических цепей с установленными синусоидальными токами: Методические указания и консультации к самостоятельному изучению курса ТОЭ. – Оренбург: ОГУ, 1996. – 44 с.
9. Ушаков А.Н., Ушакова Н.Ю. Секреты MathCad для инженерных и научных расчётов. - Оренбург: ОГУ, 2001.
10. Быковский В.В., Ушакова Н.Ю., Быковская Л.В. Расчёт электрических цепей в системе Math Cad. Методические указания. - Оренбург: ОГТУ, 1995.