

**4829**



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»

Кафедра «Электротехника»

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Методические указания к выполнению расчетно-графических работ

для обучающихся по специальности

23.05.05 Системы обеспечения движения поездов

очной и заочной форм обучения

Составители: А.А. Ионов

А.С. Фадеев

Самара  
2019

**Теоретические основы электротехники** : методические указания к выполнению расчетно-графических работ для обучающихся по специальности 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов очной и заочной форм обучения / составители : А. А. Ионов, А. С. Фадеев. – Самара : СамГУПС, 2019. – 63 с.

В методических указаниях представлены задания для выполнения расчетно-графических работ по основным разделам курса «Теоретические основы электротехники». Также представлены подробно разобранные задачи, позволяющие обучающимся самостоятельно разобрать расчетно-графические работы.

Методические указания предназначены для подготовки обучающихся по специальности 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов, но могут быть полезны и другим специалистам, связанным с расчетом электрических цепей.

Утверждены на заседании кафедры «Электротехника» 27.06. 2019 г., протокол № 11.  
Печатаются по решению редакционно-издательского совета университета.

Составители: Ионов Андрей Андреевич  
Фадеев Александр Сергеевич

Рецензенты: к. т. н., доцент, зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» СамГУПС Е. В. Добрынин;  
к. т. н., доцент кафедры «Механизация, автоматизация и энергоснабжение строительства» АСУ СамГТУ М. А. Назаров

Под редакцией А.А. Ионова

Подписано в печать 25.10.2019. Формат 60x90 1/16.

Усл. печ. л. 3,94. Заказ 129.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
ЧАСТЬ I. ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИМ РАБОТАМ (РГР) .....	7
РГР № 1. Анализ разветвленной цепи постоянного тока.....	7
РГР № 2. Расчет разветвленной цепи синусоидального тока .....	11
РГР № 3, 4, 5. Расчет трехфазной цепи .....	16
РГР № 6. Расчет линейной цепи при несинусоидальных ЭДС и токах.....	23
РГР № 7. Расчет разветвленной магнитной цепи.....	28
ЧАСТЬ II. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ .....	34
Задача № 1. Анализ разветвленной цепи постоянного тока .....	34
Задача № 2. Расчет разветвленной цепи синусоидального тока .....	39
Задача № 3. Расчет трехфазной цепи.....	43
Задача № 4. Расчет линейной цепи при несинусоидальных ЭДС и токах .....	55
Задача № 5. Расчет разветвленной магнитной цепи .....	59
Библиографический список.....	63

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Теоретические основы электротехники» относится к профессиональному циклу ОПОП по специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» очной и заочной форм обучения.

*Целями освоения дисциплины являются:* освоение знаний об основных процессах, происходящих в электрических и магнитных цепях, усвоение навыков практической работы и расчетов электрических и магнитных цепей.

*Задачи освоения дисциплины:*

– усвоить теоретические основы процессов, происходящих в электрических и магнитных цепях;

– освоить методы и приемы расчета и анализа электрических и магнитных цепей в различных режимах работы при разнообразных воздействиях на электрическую цепь;

– получить навыки использования законов физики и математического анализа для решения практических задач анализа работы аппаратуры и устройств, используемых на ж.-д. транспорте.

*Требования к предварительной подготовке обучающегося*

Перед началом изучения курса «Теоретические основы электротехники» у обучающегося должны быть знания по следующим дисциплинам: математика, физика, инженерная и компьютерная графика.

*Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:* электроника, электрические машины, теория линейных электрических цепей, теория дискретных устройств, теоретические основы автоматики и телемеханики, теория передачи сигналов, электропитание и электроснабжение нетяговых потребителей, автоматика и телемеханика на перегонах, станционные системы автоматики и телемеханики.

*Выполнение лабораторных работ предполагает частичное формирование следующих компетенций:*

ОК-1: знание базовых ценностей мировой культуры и готовность опираться на них в своем личностном и общекультурном развитии; владение культурой мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения.

ОК-2: способность логически верно, аргументированно и ясно строить устную и письменную речь, создавать тексты профессионального назначения; умение отстаивать свою точку зрения, не разрушая отношений.

ПК-10: способность применять знания в области электротехники и электроники для разработки и внедрения технологических процессов, технологического оборудования и технологической оснастки, средств автоматизации и механизации.

ПК-29: умение проводить научные исследования и эксперименты; анализировать, интерпретировать и моделировать в областях проектирования и ремонта систем обеспечения движения поездов.

ПК-31: владение способами сбора, систематизации, обобщения и обработки научно-технической информации, подготовки обзоров, аннотаций, составления рефератов, отчетов и библиографий по объектам исследования; наличие опыта участия в научных дискуссиях и процедурах защиты научных работ и выступлений с докладами и сообщениями по тематике проводимых исследований; владение способами распространения и популяризации профессиональных знаний, проведения учебно-воспитательной работы с обучающимися.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

**знать:** основные законы и методы расчета электрических цепей постоянного и переменного тока;

**уметь:** определять параметры электрических цепей постоянного и переменного тока; различать и выбирать электрические аппараты для типовых электрических цепей;

**владеть:** методами выбора электрических аппаратов для типовых электрических схем систем управления.

РГР по курсу «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) планируются и выполняются с целью:

- углубления и закрепления теоретических знаний;
- приобретения навыков электротехнических расчетов;
- оформления технической документации;
- проверки усвоения курса.

Самостоятельная работа при выполнении РГР способствует углублению и закреплению теоретических знаний. Прежде чем приступить к выполнению РГР, обучающийся должен изучить требуемые разделы учебной литературы [1–6].

Требования для выполнения студентами РГР:

1. Расчетно-графические работы должны быть выполнены на листах формата А4 на одной стороне листа;

2. Работа должна иметь титульный лист. Все листы должны быть сшиты или скреплены;

3. Схемы, графики, диаграммы и чертежи выполняются по ГОСТ. Цветные карандаши или шариковые ручки допускаются только при выполнении построения зависимостей функции от времени;

4. Текст пояснительной записки представляется в напечатанном виде, либо пишется синими или черными чернилами;

5. Если используются неизвестные формулы и зависимости без вывода, необходимо делать ссылки на источники. Все приводимые преобразования должны иметь однозначный смысл;

6. На схемах обязательно указываются принятые положительные направления токов, без этого изложенная работа не имеет смысла;

7. Результаты решения, как правило, представляются в виде таблиц, диаграмм, графиков. В таблицах приводят значения полученных разными методами результатов и оценка их точности в процентах;

8. Графики и диаграммы желательно выполнять на миллиметровой бумаге;

9. Все графики и диаграммы выполняются с соблюдением масштаба. Масштабы должны быть кратны ряду 1, 2, 5 и 10, а для угловых величин – кратны 3;

10. Результаты решений, промежуточные выкладки и уравнения записываются в общем виде, после чего подставляются численные значения. Расположение численных значений величин должно строго соответствовать расположению их буквенных обозначений;

11. После результата вычислений проставляются обозначения единиц измерения.

# ЧАСТЬ I

## ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИМ РАБОТАМ

### Расчетно-графическая работа № 1. Анализ разветвленной цепи постоянного тока

#### Содержание работы

Цепь находится под воздействием источников ЭДС ( $E$ ). Схемы цепей по вариантам приведены на рис. 1.1÷1.20. Номинальные значения источников ЭДС и сопротивлений приведены в табл. 1.1.

Для заданной схемы выполнить следующее:

1. Вычертить схему Вашего варианта и задаться произвольными направлениями искомых токов;
2. Составить на основании законов Кирхгофа систему уравнений для определения значений токов во всех ветвях схемы;
3. Определить токи во всех ветвях схемы методом контурных токов;
4. Вычислить токи во всех ветвях схемы методом узловых потенциалов;
5. Полученные результаты расчета токов, проведенного двумя методами, свести в таблицу и сравнить между собой;
6. Рассчитать баланс мощностей в исходной схеме, вычислив суммарную мощность источников и суммарную мощность нагрузок (сопротивлений);
7. Определить ток в любой ветви заданной схемы, используя метод эквивалентного генератора;
8. Вычертить потенциальную диаграмму для любого замкнутого контура, включающего две ЭДС.

Номер варианта для выполнения расчетно-графической работы определяется двумя последними цифрами зачетной книжки обучающегося.

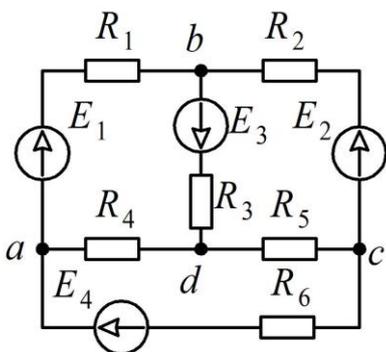


Рис. 1.1

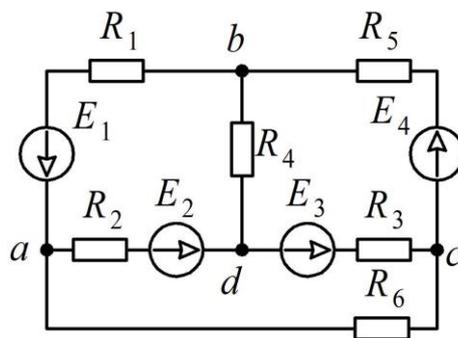


Рис. 1.2

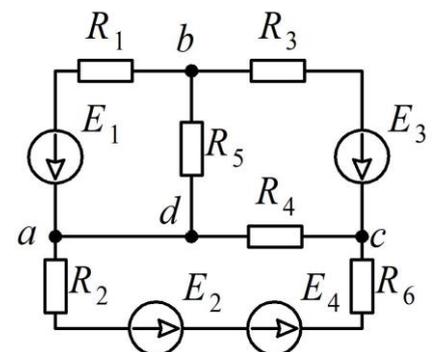


Рис. 1.3

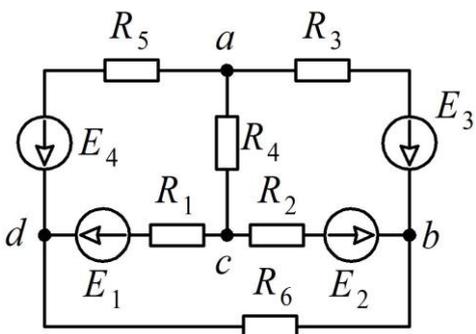


Рис. 1.4

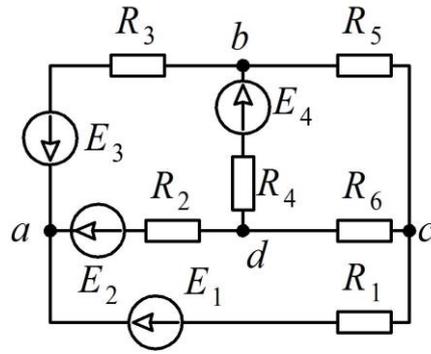


Рис. 1.5

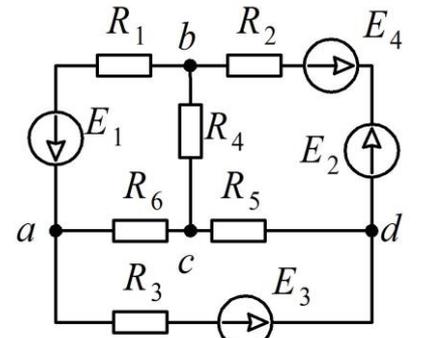


Рис. 1.6

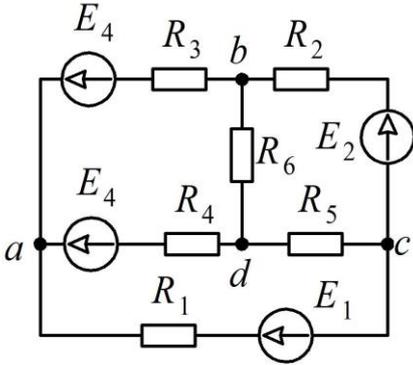


Рис. 1.7

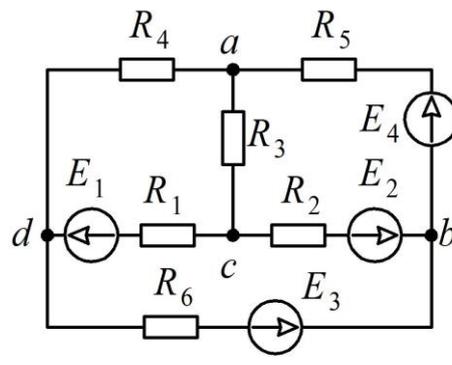


Рис. 1.8

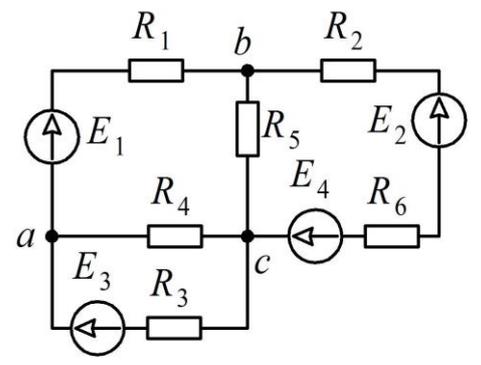


Рис. 1.9

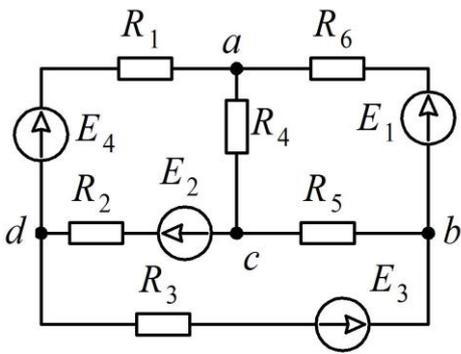


Рис. 1.10

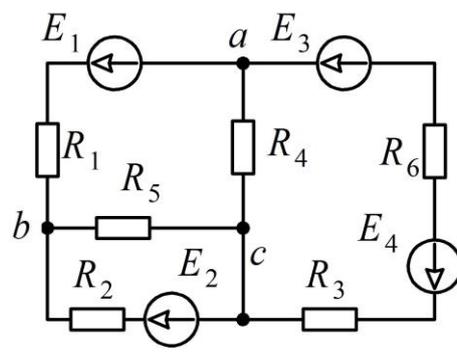


Рис. 1.11

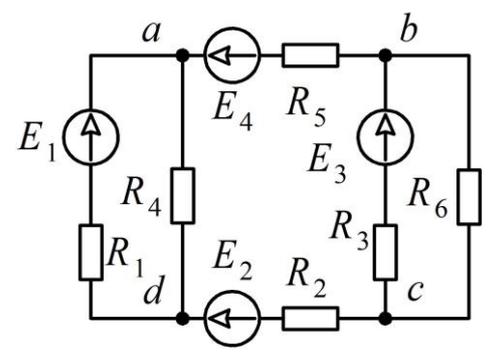


Рис. 1.12

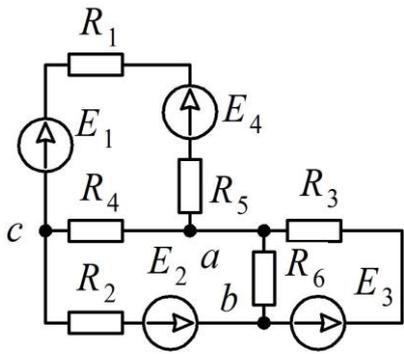


Рис. 1.13

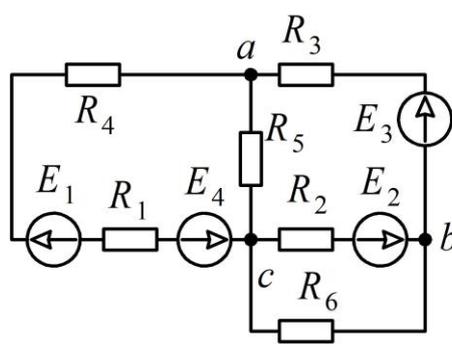


Рис. 1.14

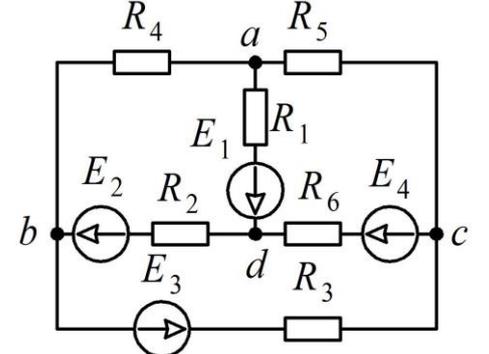


Рис. 1.15

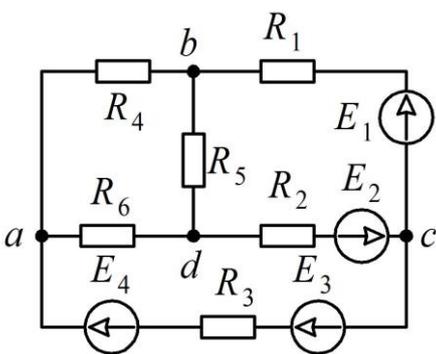


Рис. 1.16

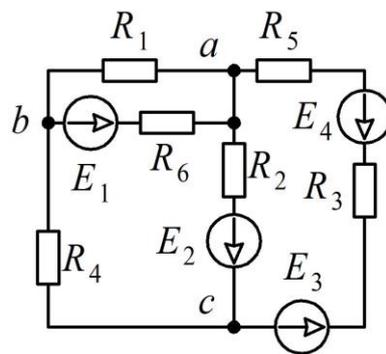


Рис. 1.17

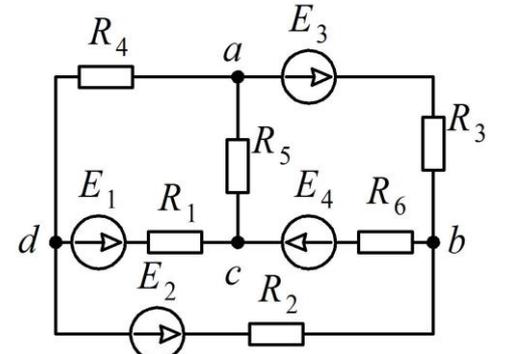


Рис. 1.18

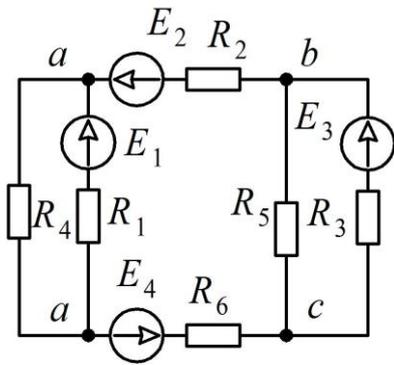


Рис. 1.19

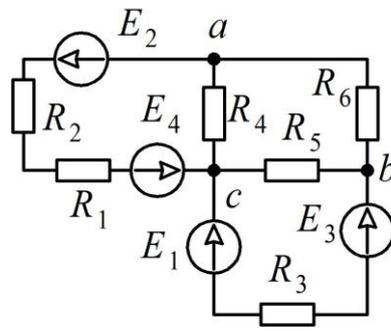


Рис. 1.20

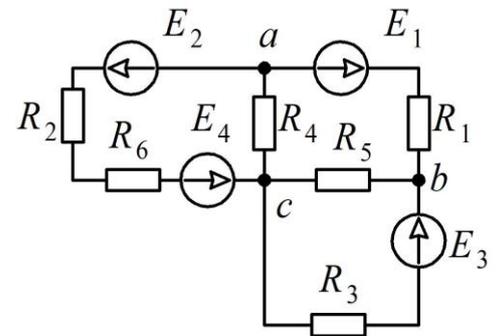


Рис. 1.21

Таблица 1.1

Вариант	Рисунок	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$
		Ом						В			
1	1.15	19,5	7,5	13,5	21	15	4	10	9	45	3,2
2	1.1	19,5	7,5	3	11	16,5	30	15	12	30	24
3	1.16	6	12	9	5	19,5	16	20	21	22,5	18
4	1.11	30	120	150	70	225	12	25	90	375	6
5	1.17	15	27	7,5	1	12	13,5	30	16,5	52,5	6
6	1.3	6	19,5	13,5	5	7,5	36	20	16,2	15	14,4
7	1.7	19,5	60	90	600	165	40	10,2	37,5	15	24
8	1.20	9	7,5	12	315	10,5	20	20	15	33	18
9	1.8	82,5	120	150	40	105	504	15	25,5	22,5	10,5
10	1.10	165	90	67,5	200	120	100	21	21	15	16,5
11	1.9	10,5	18	6	3,5	22,5	15	10	12	15	15
12	1.18	45	60	33	20	21	50	10	16,5	22,5	15
13	1.12	22,5	18	15	15	12	5,5	15	30	20	2,4
14	1.4	18	52,5	33	3	15	90	20	9	18	6
15	1.13	6	10,5	15	7	30	16,5	10	9	30	60
16	1.5	6	16,5	7,5	12	10,5	36	25,5	15	20	12
17	1.14	13,5	30	24	180	45	12	20	15	27	13,5
18	1.6	7,5	15	18	5,5	12	24	10	15	37,5	7,5
19	1.19	7,5	10,5	15	1	22,5	42	15	20	45	42
20	1.2	12	15	9	60	31,5	31	25,5	10	30	31,5
21	1.15	6,5	2,5	4,5	8	5	1	15	4	15	0,4
22	1.1	6,5	2,5	1	15	5,5	10	20	5	10	4
23	1.16	2	4	3	3	6,5	7	15	11	7,5	3
24	1.11	10	40	50	20	75	15	30	34	125	6
25	1.17	5	9	2,5	2	4	9	10	8,2	17,5	0,8
26	1.3	2	6,5	4,5	4	2,5	7,5	10	6,7	5	1,5
27	1.7	65	20	30	120	55	12,5	4,7	12,5	8	2,4
28	1.20	3	2,5	4	7,5	3,5	2	10	7,5	11	3
29	1.8	27,5	40	50	8	35	150	10	6,5	7,5	5,25
30	1.10	55	30	22,5	15	40	50	8,1	7	10	5,5

Вариант	Рисунок	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$
		Ом						В			
31	1.9	3,5	6	2	1,5	7,5	12	10	7	5	6
32	1.18	15	20	11	6	7	10	10	7,5	7,5	2
33	1.12	7,5	6	5	45	4	1,5	3,5	10	5	1,6
34	1.4	6	17,5	11	1	5	30	10	6,5	6	1
35	1.13	2	3,5	5	1	10	5	15	6,5	10	10
36	1.5	2	5,5	2,5	3,5	12	6	10,5	5	10	3,5
37	1.14	4,5	10	8	25	15	6	15	10	9	2,25
38	1.6	2,5	5	6	1,5	4	5	10	6	12,5	1,5
39	1.19	2,5	3,5	5	1	7,5	14	7	10	15	2,8
40	1.2	4	5	3	20	10,5	9	10,5	15	10	5,25
41	1.15	26	10	18	30	20	3	10	20	24	6
42	1.21	26	10	4	4	22	40	12	24	32	80
43	1.16	8	16	12	10	26	22	30	60	24	6
44	1.11	40	160	200	168	300	40	100	200	200	60
45	1.17	20	36	10	12	16	18	30	40	40	48
46	1.3	8	26	18	3	10	60	20	32	11	30
47	1.7	260	80	120	800	220	70	24	34	15	160
48	1.21	12	10	16	30	14	15	20	40	12	30
49	1.8	110	160	200	20	140	360	20	50	22	5,6
50	1.10	220	120	90	150	160	100	50	22	15	11
51	1.9	14	24	8	7	30	80	20	40	12	80
52	1.18	60	80	44	40	28	50	10	46	8	25
53	1.12	30	24	20	20	16	10	26	38	10	8
54	1.4	24	70	44	7	20	40	20	40	19,6	2
55	1.13	8	14	20	14	40	13	20	40	10	60
56	1.5	8	22	10	14	14	16	50	16,6	23	2,8
57	1.14	18	40	32	160	60	20	30	60	28	4,5
58	1.6	10	20	24	8	16	32	30	30	38	10
59	1.19	10	14	20	6	30	10	30	20	20	20
60	1.2	16	20	12	48	42	25	50	30	34	21
61	1.15	32,5	12,5	22,5	20	25	6	30	20	75	2,4
62	1.21	32,5	12,5	5	15	27,5	50	30	25	50	20
63	1.16	10	20	15	14	32,5	65	40	35	37,5	30
64	1.11	50	200	250	100	375	100	100	50	625	50
65	1.17	25	45	12,5	8	20	45	40	32	87,5	8
66	1.3	10	32,5	22,5	23	12,5	90	30	27	25	36
67	1.7	325	100	150	400	275	100	17	62,5	20	16
68	1.20	15	12,5	20	37,5	17,5	14	30	25	55	30
69	1.8	137	200	250	50	175	60	20	34,5	37,5	24,5
70	1.10	275	150	112	200	200	750	24	35	40	38,5
71	1.9	17,5	30	10	10	37,5	30	20	26	25	24
72	1.18	75	100	55	150	36	50	30	32,5	27,5	12,5

Вариант	Рисунок	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$
		Ом						В			
73	1.12	37,5	100	25	225	20	12	25	50	20	4
74	1.4	30	87,5	55	5	25	150	10	15	30	10
75	1.13	10	17,5	25	15	50	15	30	15	50	100
76	1.5	10	27,5	12,5	10	17,5	40	32,5	25	20	30
77	1.14	22,5	50	40	50	75	30	30	35	45	18
78	1.6	12,5	25	30	12	20	40	20	35	62,5	2,5
79	1.19	12,5	17,5	25	5	37,5	17,5	30	30	75	10,5
80	1.2	20	25	15	100	52,5	35	50,5	33	50	31,5
81	1.15	18	5	9	16,8	10	12	15	10	21	1,2
82	1.1	13	5	2	6	11	20	20	12	16	40
83	1.16	4	8	6	9	13	11	10	30	9	6
84	1.11	20	80	100	70	150	24	100	100	50	24
85	1.17	10	18	5	7	8	18	10	20	30	8
86	1.3	4	13	9	5	5	7	15	16	8,2	1,4
87	1.7	130	40	60	720	110	30	12	13	15	21,6
88	1.21	6	5	8	210	7	2	10	20	14	0,2
89	1.8	55	80	100	30	70	60	10	25	10	3,5
90	1.10	110	60	45	50	80	30	25	8	10	11
91	1.9	7	12	4	5	15	9	10	20	8	4,5
92	1.18	30	40	22	60	14	40	10	23	9,5	10
93	1.12	15	12	10	10	8	3	13	14	18	4
94	1.4	12	35	22	4	10	20	15	20	7,6	2
95	1.13	4	7	10	5	20	6	15	20	10	2
96	1.5	4	11	5	6	7	12	25	4,5	10	3
97	1.14	9	20	16	60	30	15	20	30	10	4,5
98	1.6	5	10	12	5	8	24	20	15	13	1
99	1.19	5	7	10	4	15	70	15	10	20	70
100	1.2	8	10	6	24	21	12	25	10	14	21

## Расчетно-графическая работа № 2. Расчет разветвленной цепи синусоидального тока

### Содержание работы

Согласно номеру варианта (две последних цифры шифра зачетной книжки) выбрать электрическую схему, изображенную на рис. 2.1–2.20. В табл. 2.1 определены численные значения элементов для выбранной схемы. Для соответствующей схемы в табл. 2.2 приведены параметры источников ЭДС ветвей. В случае если цифры шифра находятся в интервале 51–100, необходимо из имеющего числа вычесть 50 и использовать полученное число при выборе варианта.

Требуется выполнить:

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. Определить комплексы действующих значений токов во всех ветвях, воспользовавшись одним из методов расчета линейных электрических цепей. При выполнении п. 2 учесть, что одна из ЭДС в табл. 2.2 может быть задана функцией косинуса. Чтобы правильно осуществить запись такой ЭДС в виде комплексного числа, необходимо выполнить перевод такой функции к закону синуса;

3. По результатам, полученным в п. 2, определить показание ваттметра;

4. Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов, приняв потенциал одной из точек схемы за ноль;

5. Используя данные расчетов, полученных в п. 2, записать выражения для мгновенного значения любого тока и построить график зависимости его функции  $\omega t$ .

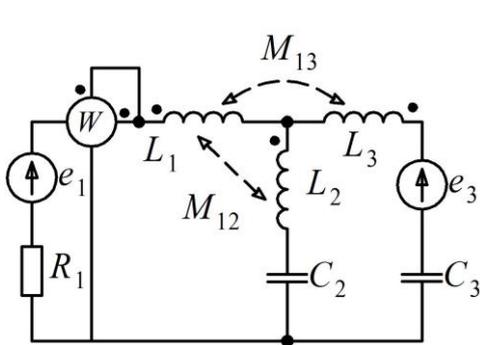


Рис. 2.1

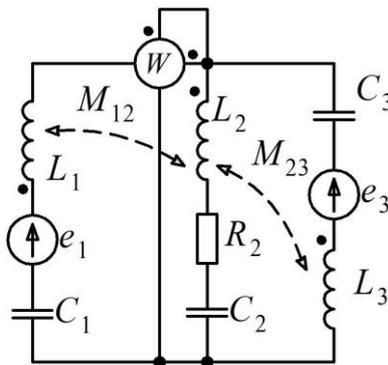


Рис. 2.2

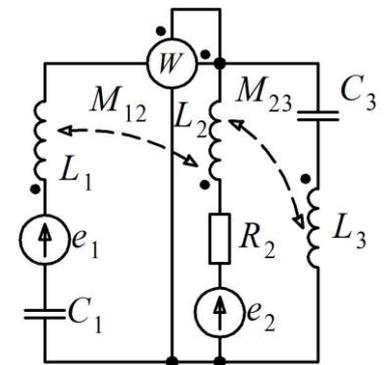


Рис. 2.3

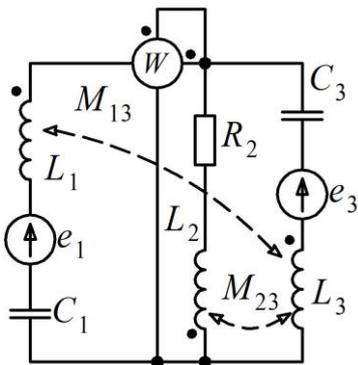


Рис. 2.4

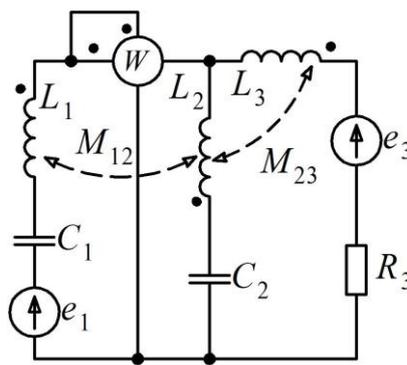


Рис. 2.5

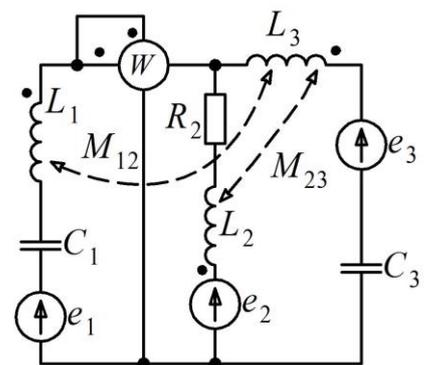


Рис. 2.6

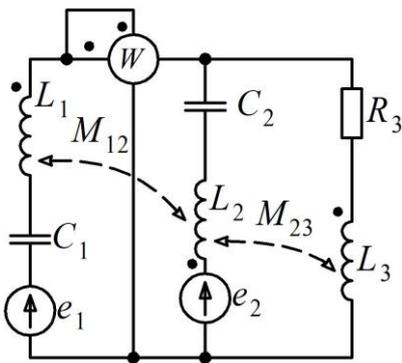


Рис. 2.7

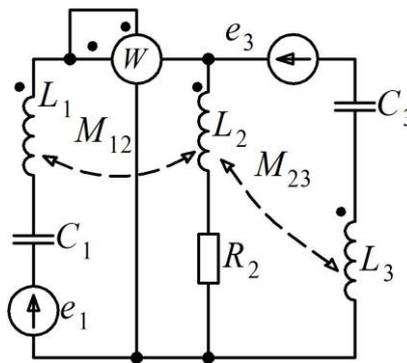


Рис. 2.8

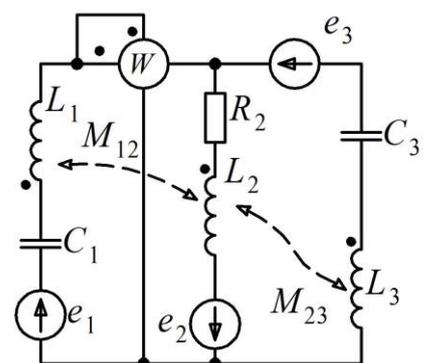


Рис. 2.9

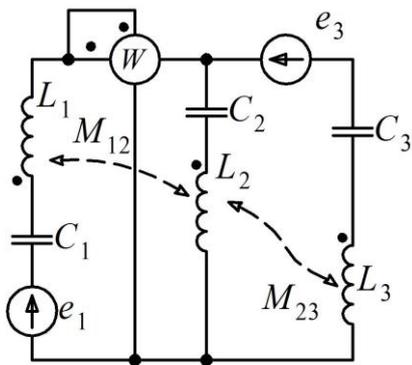


Рис. 2.10

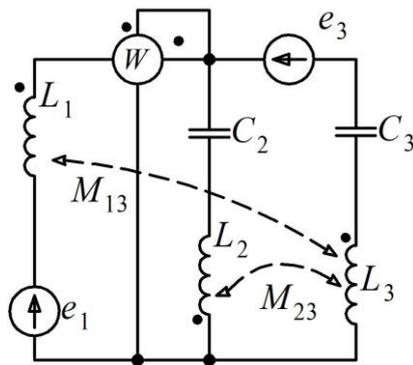


Рис. 2.11

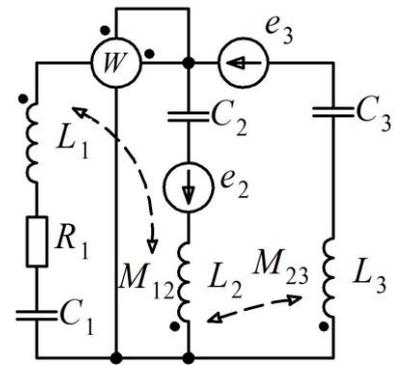


Рис. 2.12

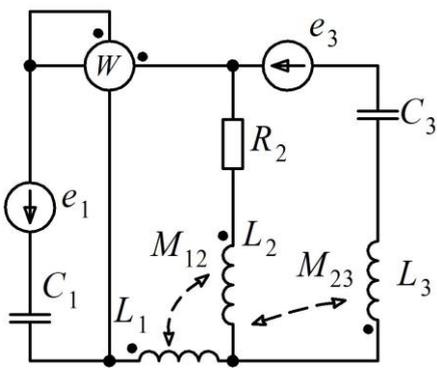


Рис. 2.13

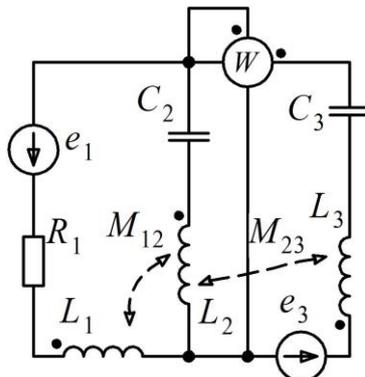


Рис. 2.14

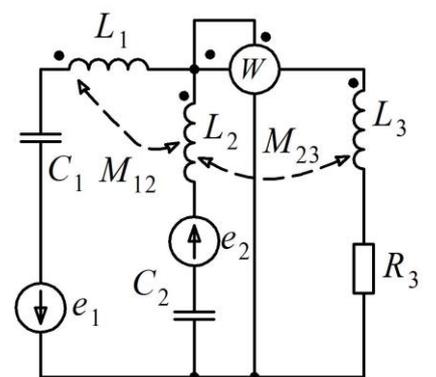


Рис. 2.15

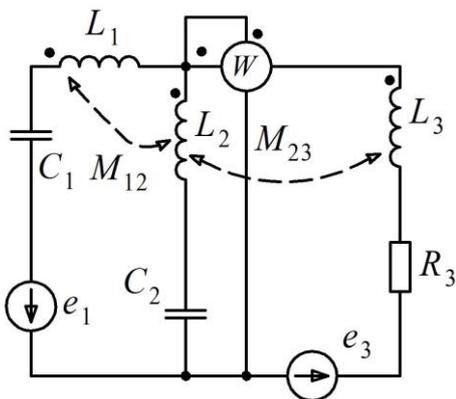


Рис. 2.16

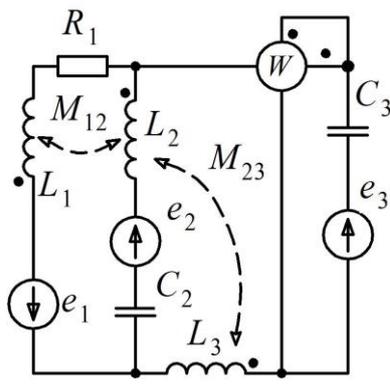


Рис. 2.17

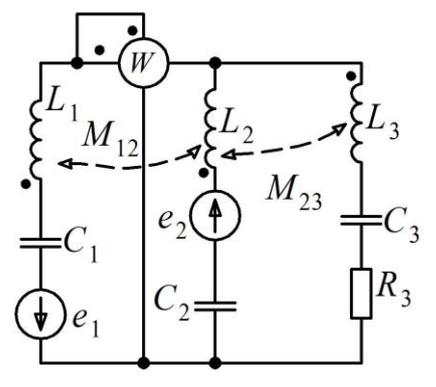


Рис. 2.18

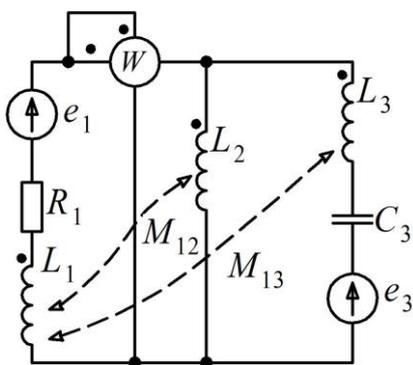


Рис. 2.19

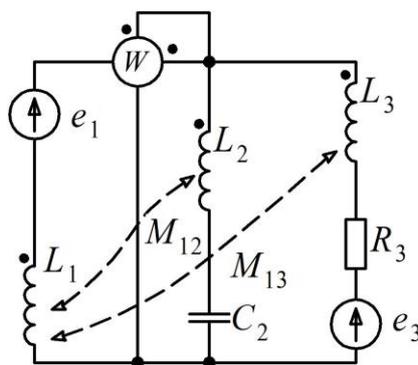


Рис. 2.20

## Параметры электрической схемы

Вариант	Рис.	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$f$
		мГн			мкФ		Ом			Гц	
1	2.1	3,19	6,38	1,8	–	5,3	10,6	10	–	–	1100
2	2.3	40,3	20,1	30	16	–	22	–	25	–	500
3	2.5	160	25	50	0,63	0,56	–	–	–	100	150
4	2.7	1,6	3,2	4,8	1	0,56	–	–	–	10	2600
5	2.9	6	10	7	0,8	–	0,4	–	100	–	500
6	2.11	15,9	3,98	8	–	1,28	6,2	–	–	–	1000
7	2.13	5,2	1,3	2,63	1,24	–	8,64	–	65	–	5000
8	2.15	6,38	12,7	25,6	10,6	15,9	–	–	–	10	700
9	2.17	7	13	25	–	1,82	0,96	102	–	–	4000
10	2.19	3	2,12	4,96	–	–	2,63	18	–	–	1000
11	2.2	10	4,98	50	1	7,6	0,22	–	25	–	1250
12	2.4	1,04	4,32	2,64	0,76	–	3,2	–	65	–	300
13	2.6	16	48	31,8	3,18	–	6,38	–	100	–	2000
14	2.8	0,68	1,36	5,46	1,68	–	4,73	–	65	–	3000
15	2.10	1,27	0,8	1,4	20,2	6,4	18,2	–	–	–	500
16	2.12	64	32	58	8,2	12,6	5,62	60	–	–	800
17	2.14	2,1	4,19	8	–	0,79	1,47	17	–	–	3500
18	2.16	40	160	25	0,53	6,6	–	–	–	102	400
19	2.18	32	36	60	4	2	6,4	–	–	70	1800
20	2.20	2,12	3,98	8	–	7,56	–	–	–	25	1000
21	2.15	4,18	2,6	15,6	10,6	6,4	–	–	–	33	1700
22	2.10	4,12	1,2	8,62	5,6	0,22	1,6	–	–	–	1100
23	2.5	85	34	22	6,4	5,8	–	–	–	12	300
24	2.1	4,0	2	8	–	10,2	6,2	103	–	–	150
25	2.6	8	16	31,8	1,6	–	1,6	–	96	–	500
26	2.9	0,3	0,1	0,17	2,2	–	1,2	–	80	–	1500
27	2.12	0,4	2,8	6,2	5,8	15,8	1,6	33	–	–	1250
28	2.18	4,2	6,3	0,6	0,2	0,4	4,6	–	–	33	1700
29	2.3	3,4	1,2	0,3	6,1	–	2,4	–	52	–	2200
30	2.16	0,4	16	2,5	5,3	6,6	–	–	–	250	1400
31	2.7	6,1	2,4	8,2	0,1	15,6	–	–	–	120	2260
32	2.19	0,4	4,2	2,2	–	–	8,2	55	–	–	360
33	2.11	5,9	9,4	4,5	–	2,2	4,6	–	–	–	800
34	2.9	0,4	0,1	0,22	8,6	–	2,2	–	500	–	100
35	2.8	8,6	6,3	6,5	6,8	–	8,4	–	650	–	300
36	2.19	2,2	0,18	4,2	–	–	6,4	65	–	–	800
37	2.10	1,4	0,8	1,3	10,2	4,7	15,8	–	–	–	600
38	2.17	0,7	1,4	2,5	–	2,4	1	200	–	–	2200
39	2.12	5,4	8,2	2,6	2,25	7,8	16	330	–	–	1300
40	2.18	0,02	1,4	0,6	2,2	4	4,6	–	–	820	1500

Вариант	Рис.	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$f$
		мГн			мкФ		Ом			Гц	
41	2.14	1,2	6,4	4,8	–	0,22	1,12	360	–	–	2400
42	2.20	42	48	16	–	100	–	–	–	625	1600
43	2.6	1,6	8,4	4,1	46	–	63	–	240	–	1850
44	2.4	10,4	24,3	46,2	0,84	–	1,64	–	130	–	700
45	2.13	52	13,1	63,2	1,15	–	2,4	–	560	–	3000
46	2.8	0,12	0,44	6,2	12	–	5,6	–	750	–	2800
47	2.9	3	10	17	2,6	–	6,4	–	800	–	300
48	2.11	3,3	5,4	5,4	–	8,6	6,4	–	–	–	600
49	2.16	22	18	11	14	16	–	–	–	2,4	800
50	2.7	61	48	75	12	22,4	–	–	–	103	1600

Таблица 2.2

## Параметры источников ЭДС ветвей

Рисунок	$e_1$	$e_2$	$e_3$
	В		
2.1	$99 \sin(\omega t + 20^\circ)$	–	$179 \cos(\omega t + 270^\circ)$
2.2	$566 \cos(\omega t - 90^\circ)$	–	$705 \sin(\omega t + 180^\circ)$
2.3	$70,5 \cos(\omega t - 130^\circ)$	$84,5 \sin(\omega t + 317^\circ)$	–
2.4	$114 \sin(\omega t + 10^\circ)$	–	$200 \sin(\omega t - 80^\circ)$
2.5	$114 \sin \omega t$	–	$114 \cos \omega t$
2.6	$169 \sin \omega t$	$169 \sin(\omega t + 90^\circ)$	$169 \cos(\omega t + 90^\circ)$
2.7	$282 \sin \omega t$	$282 \cos(\omega t + 90^\circ)$	–
2.8	$141 \cos(\omega t + 270^\circ)$	–	$282 \sin(\omega t + 310^\circ)$
2.9	$169 \sin(\omega t + 180^\circ)$	$169 \cos(\omega t + 180^\circ)$	$169 \cos \omega t$
2.10	$70,5 \sin(\omega t + 20^\circ)$	–	$84,5 \cos \omega t$
2.11	$240 \sin(\omega t + 135^\circ)$	–	$169 \cos \omega t$
2.12	–	$689 \cos(\omega t - 78^\circ)$	$705 \sin(\omega t - 53^\circ)$
2.13	$141 \cos(\omega t - 15^\circ)$	–	$242 \sin(\omega t + 25^\circ)$
2.14	$60 \sin(\omega t + 315^\circ)$	–	$56,3 \sin(\omega t + 303^\circ)$
2.15	$99 \sin(\omega t - 340^\circ)$	$179 \cos(\omega t - 90^\circ)$	–
2.16	$141 \cos \omega t$	–	$100 \sin(\omega t + 135^\circ)$
2.17	$169 \cos \omega t$	$169 \sin(\omega t + 90^\circ)$	$169 \sin \omega t$
2.18	$141 \sin(\omega t - 300^\circ)$	$62 \cos(\omega t - 24^\circ)$	–
2.19	$112 \sin(\omega t - 5^\circ)$	–	$56 \cos(\omega t - 130^\circ)$
2.20	$70,5 \cos(\omega t - 90^\circ)$	–	$84,5 \sin(\omega t + 330^\circ)$

## Расчетно-графические работы № 3, 4, 5. Расчет трехфазной цепи

### Содержание работы

В качестве задания для расчета предлагается трехфазная цепь, состоящая из симметричного трехфазного источника электрической энергии, к которому через линию электропередач ( $R_1$  и  $X_1$ ) подключены приемники, соединенные по типу «звезда» либо «треугольник». Электрическая цепь может работать в следующих режимах:

- симметричная нагрузка (РГР 3), при которой сопротивления всех фаз приемника одинаковы ( $Z_A = Z_B = Z_C$ );
- несимметричная нагрузка (РГР 4), при которой принудительно увеличено в три раза сопротивление фазы  $a$  (или  $ab$ ) второго приемника;
- аварийный режим (РГР 5), осуществляемый за счет размыкания ключа (указанного на схеме). При этом меняется режим работы схемы.

Требуется для каждого режима:

1. Указать на схеме все необходимые для расчета цепи токи, напряжения и потенциалы;
2. Произвести расчет всех токов в схеме (фазные и линейные), а также линейные и фазные напряжения между узлами подключения нагрузки;
3. Используя метод «двух ваттметров», определить показания ваттметров, указанных на схеме, и суммарную мощность схемы;
4. Рассчитать активную мощность, потребляемую нагрузкой. При расчете не учитывается активное сопротивление линии электропередач. Сравнить полученное значение мощности со значением, полученным в п. 3 задания;
5. Рассчитать и построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

Согласно номеру заданного варианта (две последних цифры зачетной книжки) выбрать электрическую схему (рис. 3.1–3.36), а по табл. 3.1 определить численные значения элементов для выбранной схемы.

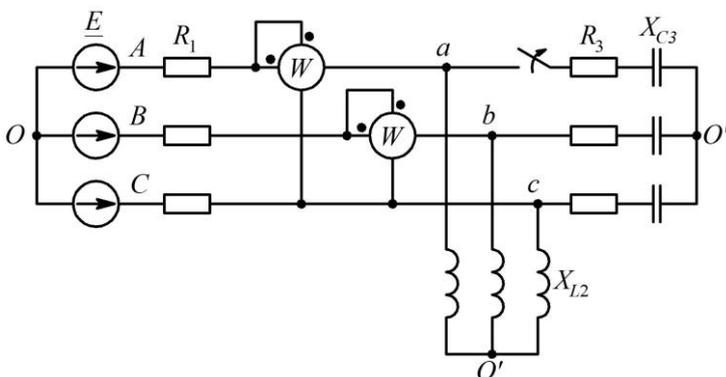


Рис. 3.1

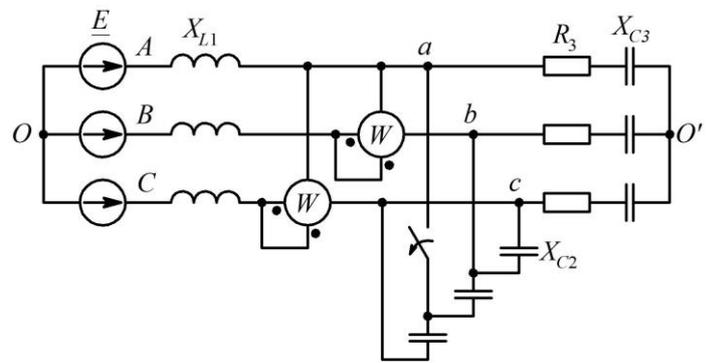


Рис. 3.2

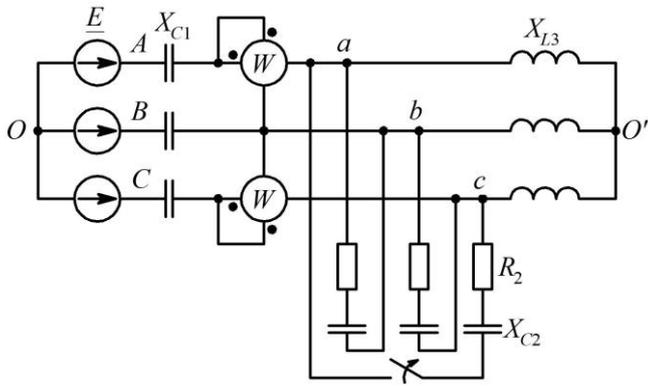


Рис. 3.3

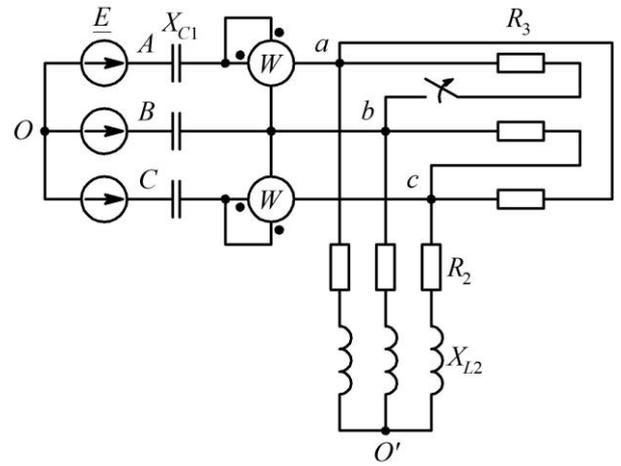


Рис. 3.4

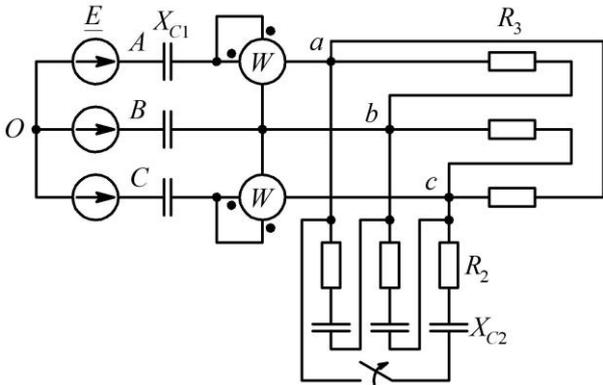


Рис. 3.5

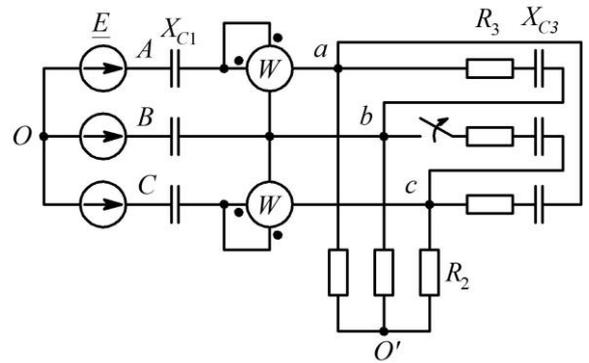


Рис. 3.6

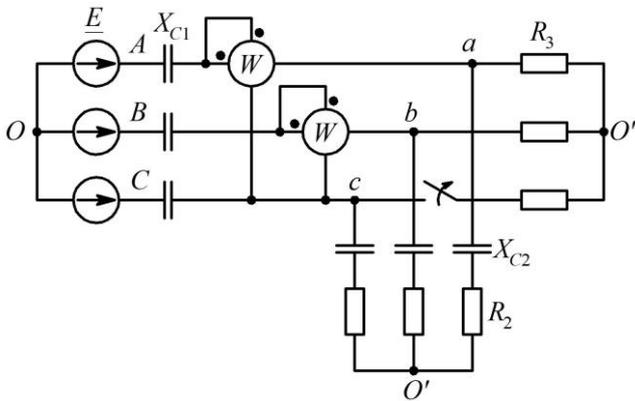


Рис. 3.7

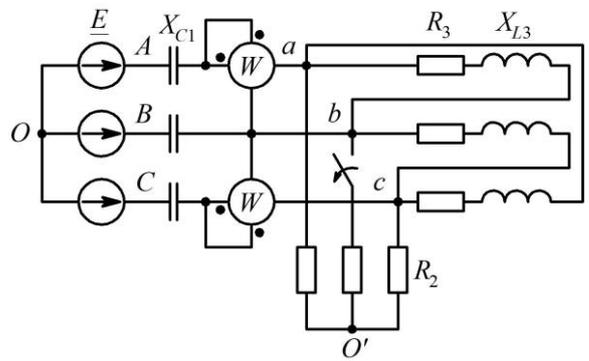


Рис. 3.8

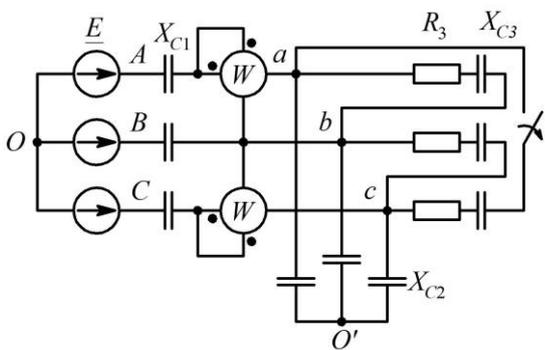


Рис. 3.9

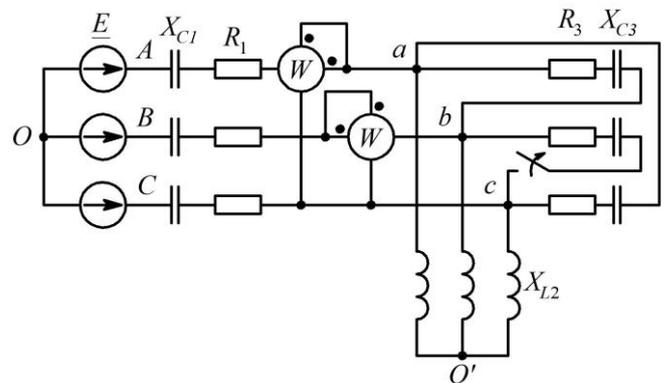


Рис. 3.10

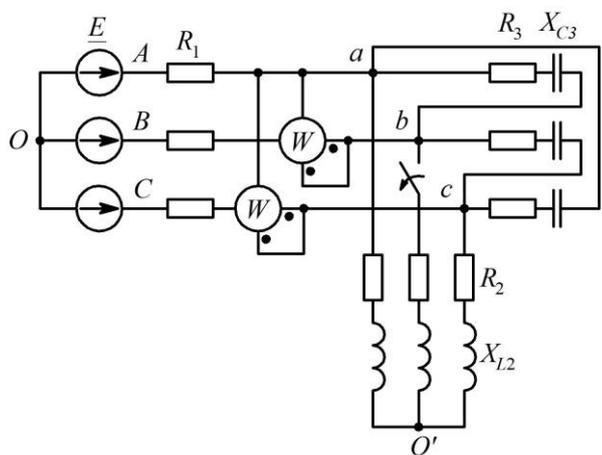


Рис. 3.11

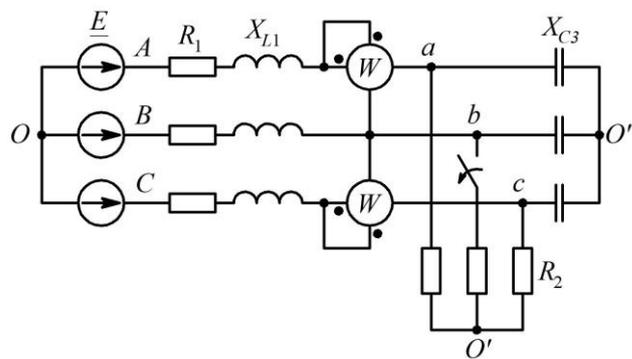


Рис. 3.12

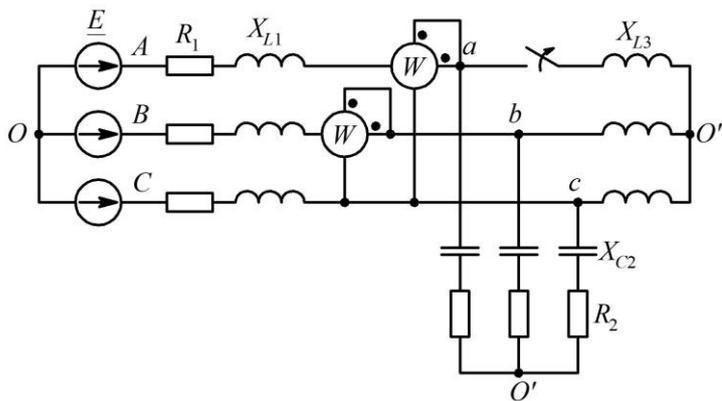


Рис. 3.13

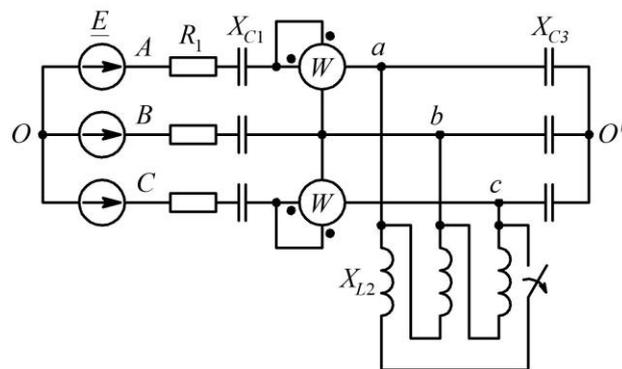


Рис. 3.14

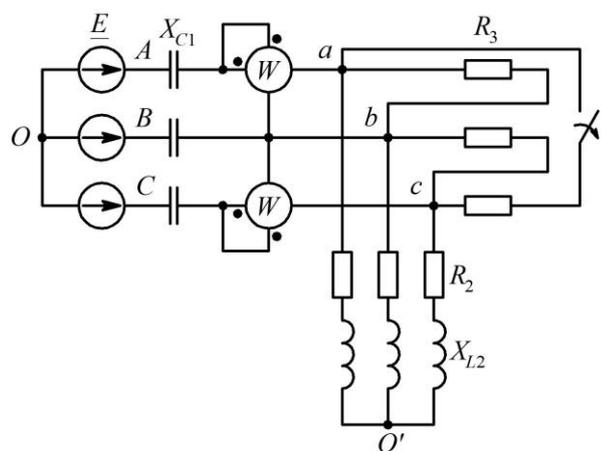


Рис. 3.15

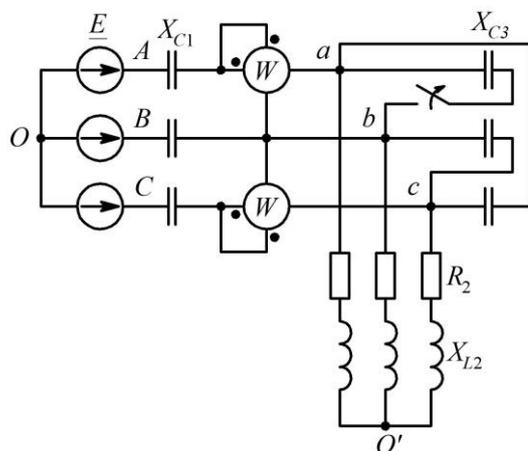


Рис. 3.16

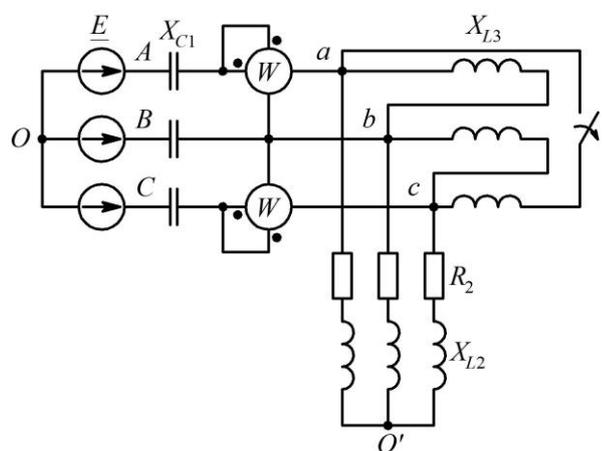


Рис. 3.17

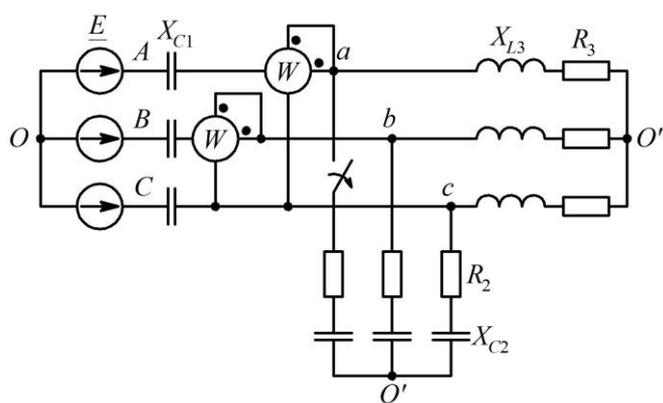


Рис. 3.18

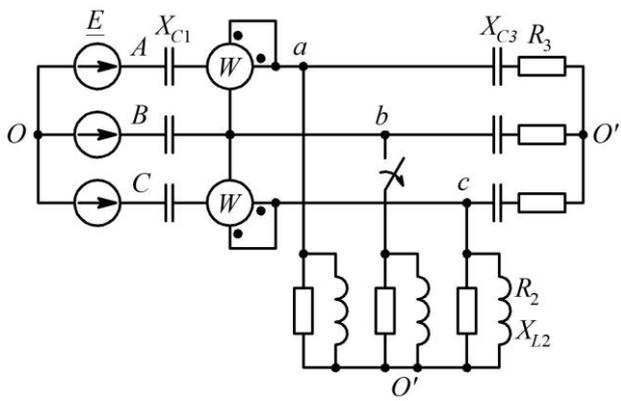


Рис. 3.19

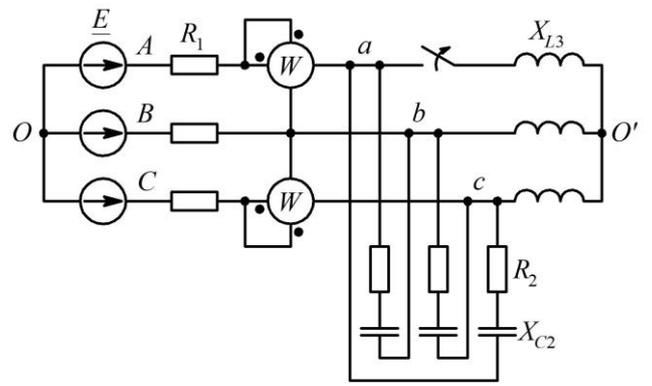


Рис. 3.20

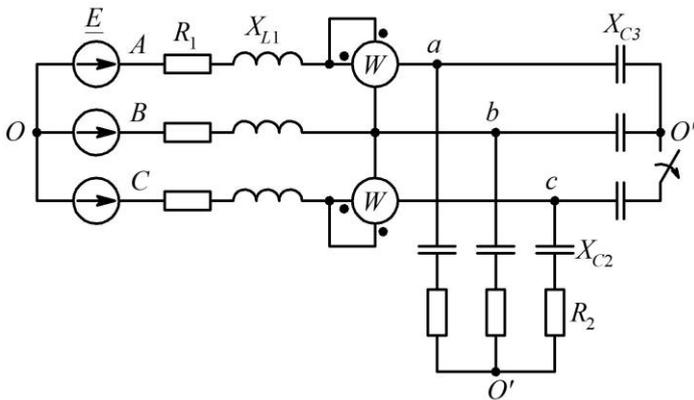


Рис. 3.21

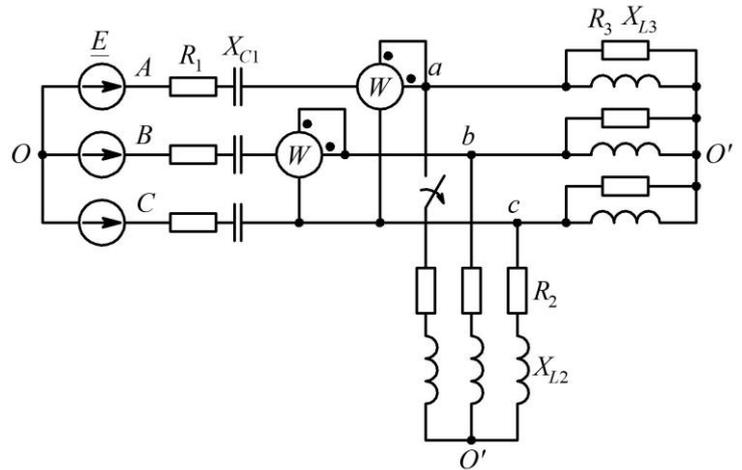


Рис. 3.22

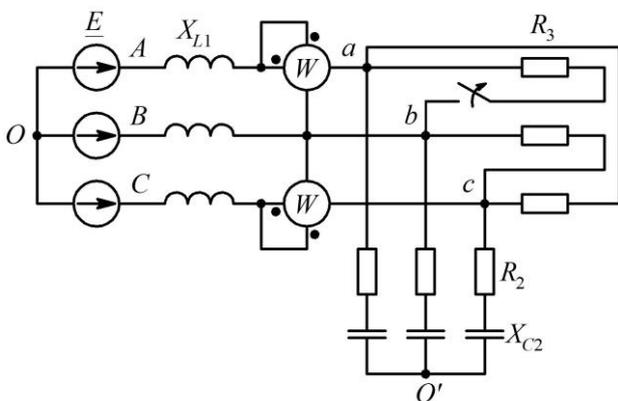


Рис. 3.23

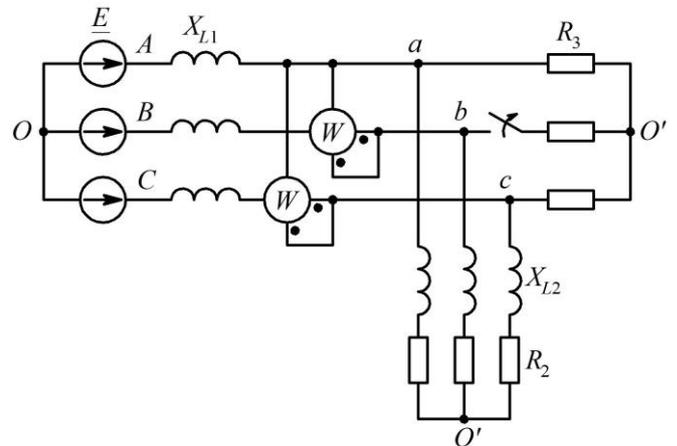


Рис. 3.24

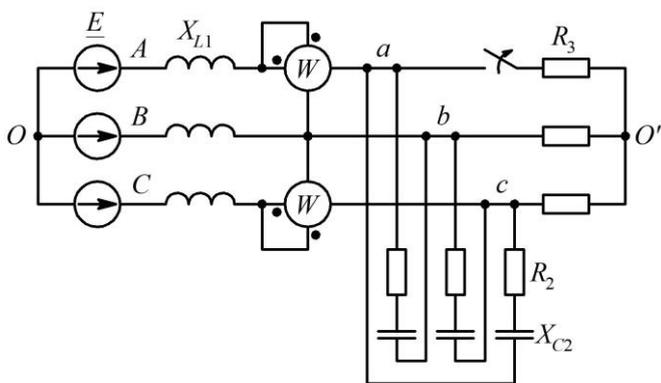


Рис. 3.25

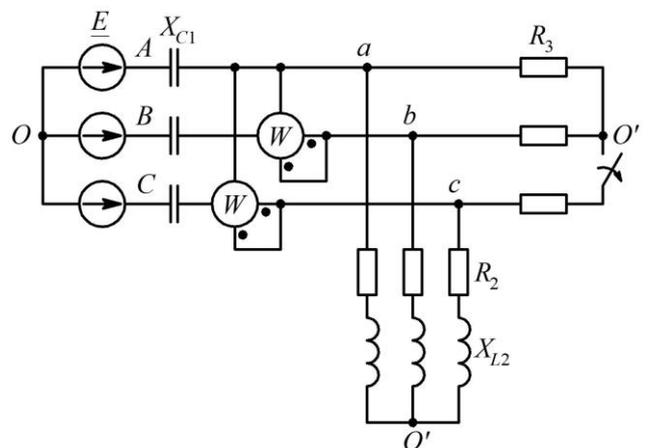


Рис. 3.26

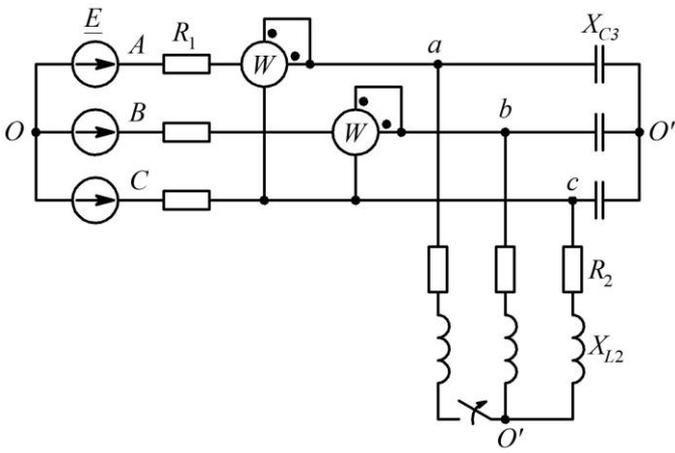


Рис. 3.27

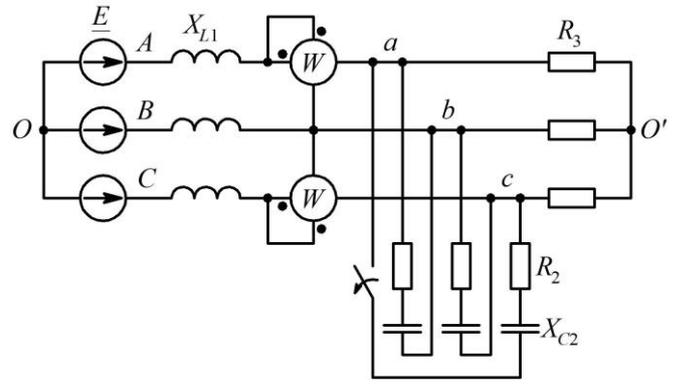


Рис. 3.28

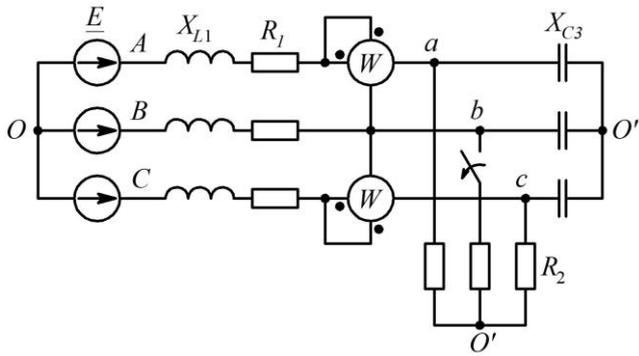


Рис. 3.29

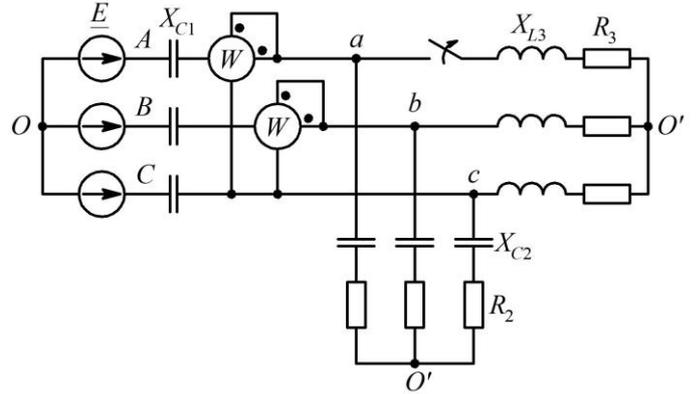


Рис. 3.30

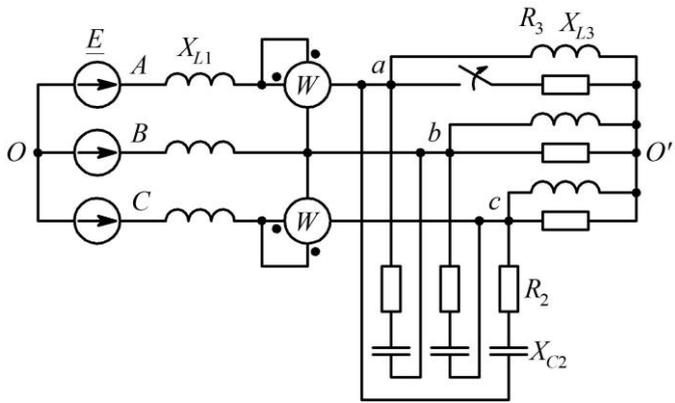


Рис. 3.31

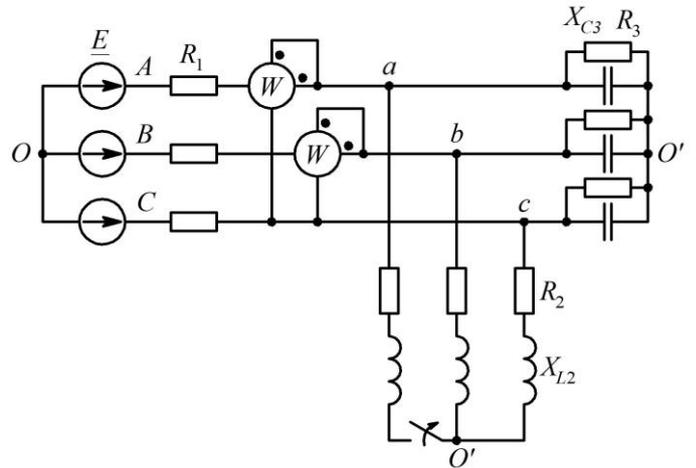


Рис. 3.32

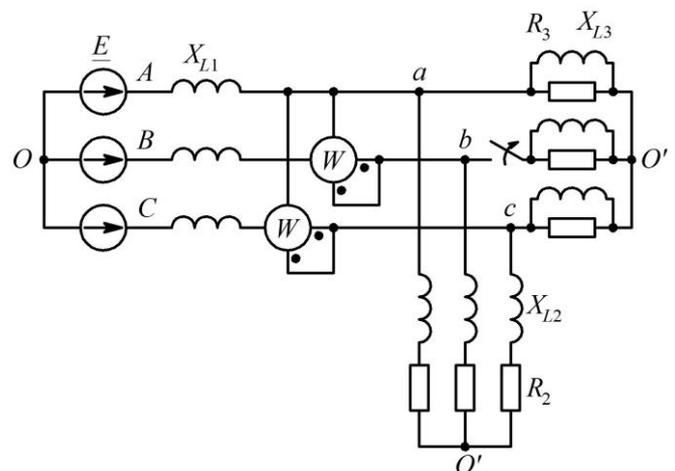


Рис. 3.33

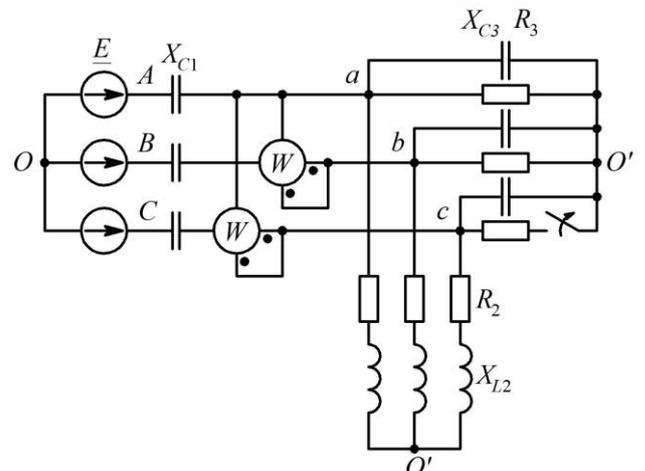


Рис. 3.34

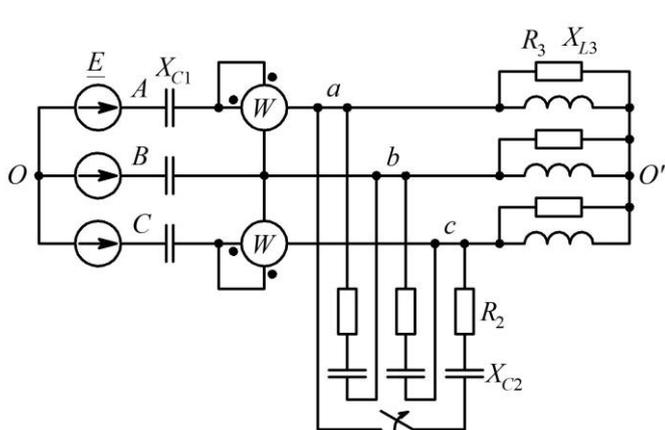


Рис. 3.35

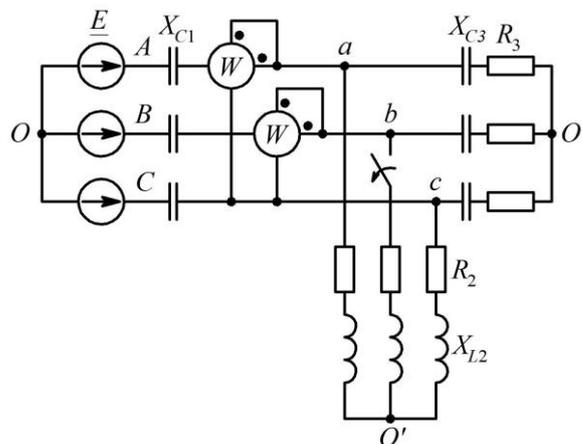


Рис. 3.36

Таблица 3.1

Параметры электрической схемы

№ вар.	Схема	$E$	$R_1$	$X_{L1}$	$X_{C1}$	$R_2$	$X_{L2}$	$X_{C2}$	$R_3$	$X_{L3}$	$X_{C3}$
		В	Ом								
1	1	127	10				50		60		60
2	2	220		20				60	40		40
3	3	380			35	72		72		54	
4	4	127			26	42	42		68		
5	5	220			15	18		18	74		
6	6	380			43	61			93		93
7	7	73,4			15	24		24	10		
8	8	42,2			6,3	9,2			4,4	4,4	
9	9	657			10			330	240		240
10	10	24,4	12		12		6		3		3
11	11	127	10			50	50		60		60
12	12	12,7	85	34		75					33
13	13	24,4	15	64		7,5		82		30	
14	14	42,2	10		24,6		24,6				23
15	15	73,4			24,6	28	24,6		22		
16	16	127			54,8	26	27,4				54,8
17	17	220			21,4	56	42,8			12,6	
18	18	220			1,4	5,1		4,1	2,8	2,8	
19	19	380	10		84	115	120		44	30	
20	20	657		98		44		26	26		
21	21	657		14		12	85		35		
22	22	380		23		20		12	20		
23	23	127			44	24	44		31		
24	24	73,4	32			12,8	12,8				12,8
25	25	42,2		15,6		32,4		15,6	32,8		
26	26	24,4	33	110		150					80
27	27	12,7			0,4	0,8		1,1	2	1,1	
28	28	12,7		26		14		42,6	10	22	
29	29	24,4	12			12	15		10		22

Продолжение табл. 3.1

№ вар.	Схема	<i>E</i>	<i>R</i> <sub>1</sub>	<i>X</i> <sub>L1</sub>	<i>X</i> <sub>C1</sub>	<i>R</i> <sub>2</sub>	<i>X</i> <sub>L2</sub>	<i>X</i> <sub>C2</sub>	<i>R</i> <sub>3</sub>	<i>X</i> <sub>L3</sub>	<i>X</i> <sub>C3</sub>
		<i>B</i>	Ом								
30	30	42,2		71		22	71		11,5	71	
31	31	73,4			12	42	120		86		34
32	32	127			100	86		24	200	50	
33	33	220			44	28	36		80		86
34	7	220			450	24		38	78		
35	8	380			64	220			300	100	
36	9	657			540			110	420		150
37	11	127	40			10	10		20		22
38	12	12,7	58	43		57					3,3
39	13	220	22	6,4		75		8,2		3,0	
40	14	12,7	1,0		24,6		4,6				2,3
41	15	73,4			2,4	2,8	4,6		2,2		
42	16	12,7			5,8	2,7	2,7				5,8
43	17	42,2			21	6,5	82,4			62,1	
44	18	220			68	44		82	82	210	
45	19	380	22		12	180	44		52	28	
46	20	657		550		410		620	340		
47	21	657		210		75	48		39		
48	22	380		7,0		12		20	9,8		
49	23	127			2,2	2,2	4,4		1,3		
50	24	12,7	1,2			2,8	4,8				4,8
51	25	42,2		16,5		23,4		16,5	12,2		
52	26	24,4	15	35		35					20
53	27	12,7			27	0,85		5,1	3,1	1,9	
54	28	12,7		62		17		8	8	10	
55	29	24,4	55			24	33		27		44
56	30	42,2		100		2,2	80		0,8	180	
57	1	127	100				500		60		160
58	2	220		240				110	47		140
59	3	380			350	70		150		240	
60	4	127			2,6	12	2,6		22		
61	5	220			111	111		180	180		
62	6	380			243	461			293		49,3
63	7	73,4			150	4,2		240	100		
64	8	42,2			6	12			18	45	
65	9	657			14			30	20		40
66	10	24,4	1,8		12		1,6		13		1,3
67	30	42,2		18		2,2	11		24	1,8	
68	1	127	127				16		84		168
69	21	657		470		7,5	400		390		
70	3	380			300	12		183		141	
71	15	73,4			28	28	56		56		

№ вар.	Схема	$E$	$R_1$	$X_{L1}$	$X_{C1}$	$R_2$	$X_{L2}$	$X_{C2}$	$R_3$	$X_{L3}$	$X_{C3}$
		$B$	Ом								
72	28	42,2		122		17		16	8	15	
73	23	73,4			42	100	28		100		
74	29	380	550			2400	120		500		440
75	21	657		21,8		750	480		390		
76	25	42,2		10,5		220		18	160		
77	5	127			54	82		12	1800		
78	11	127	40			10	10		20		22
79	12	12,7	580	430		3,7					39
80	13	42,2	220	68		7,5		100		150	
81	14	380	150		21,6		26				18
82	17	42,2			1200	520	4,28			10	
83	18	220			12	510		18	1,7	56	
84	19	380	110		220	115	180		440	55	
85	20	657		920		410		2600	130		
86	18	220			68	44		82	120	210	
87	19	380	1		1200	330	44		110	410	
88	20	657		550		410		620	340		
89	21	657		210		75	48		39		
90	31	42,2			12	8	4,4		10		16
91	32	127			68	48		65	50	94	
92	33	73,4			44	64	48		28		32
93	7	24,4			12	6,6		4,8	28		
94	8	127			78	64			52	64	
95	9	220			560			64	52		28
96	13	24,4	15	64		7,5		82		30	
97	14	42,2	10		24,6		24,6				23
98	15	73,4			24,6	28	24,6				22
99	16	127			54,8	26	27,4				54,8
00	21	657		330		75	480		390		

**Расчетно-графическая работа № 6. Расчет линейной цепи  
при несинусоидальных ЭДС и токах**

*Содержание работы*

Приложенный к схеме (рис. 6.1) входной сигнал  $u(t)$  изменяется по гармоническому закону (табл. 6.1). Форма выходного сигнала выбирается по последней цифре в зачетной книжке.

Воспользовавшись разложением входного сигнала в ряд Фурье, учитывая постоянную составляющую и отличных от нуля первые три гармоники, необходимо определить:

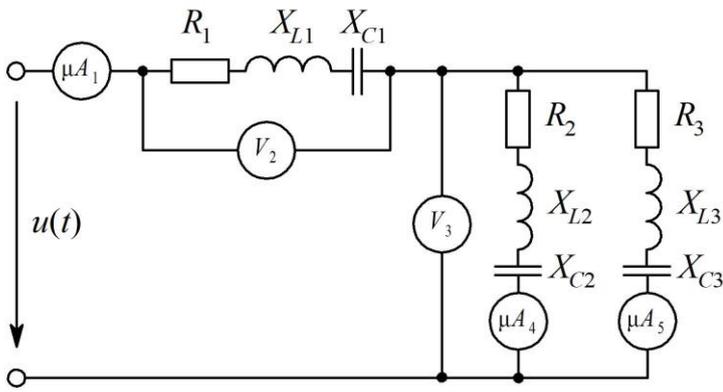


Рис. 6.1

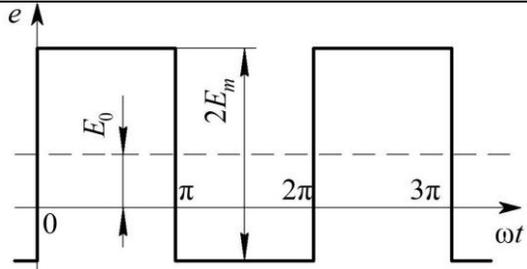
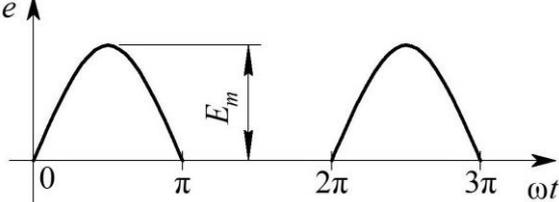
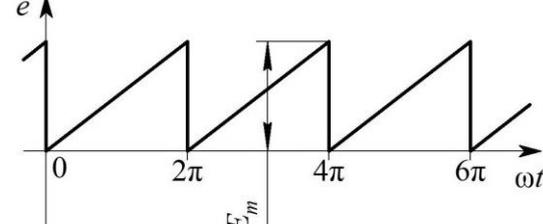
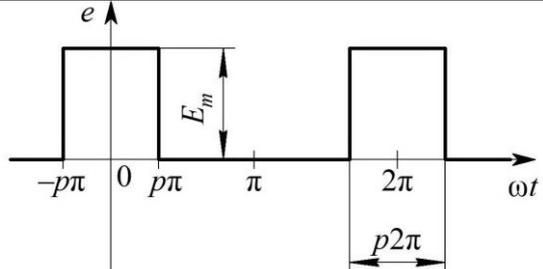
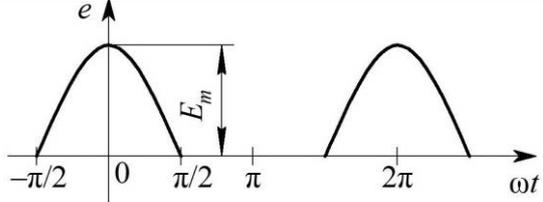
1. Мгновенные значения токов в ветвях цепи;
2. Построить график мгновенных значений измеряемых приборами величин в функции времени (период изменения величины  $T = 0,02$  с);
3. Показания электродинамических приборов;
4. Активную мощность цепи.

Исходные данные для расчета

согласно заданному варианту приведены в табл. 6.2. Номер варианта выбирается по двум последним цифрам в зачетной книжке. В случае если цифры находятся в интервале 51–100, необходимо из имеющегося числа вычесть 50 и использовать полученное число при выборе варианта.

Таблица 6.1

Вариант	График ЭДС, разложение в ряд
1	<p>Принять <math>\alpha = \pi/4</math> рад</p> $U(t) = \frac{4E_m}{\pi\alpha} \left( \sin \alpha \sin \omega t + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \sin 5\omega t + \dots \right)$
2	$U(t) = \frac{8E_m}{\pi^2} \left( \sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t - \dots \right)$

Вариант	График ЭДС, разложение в ряд
3	 <p>Принять <math>E_0 = 1/2 E_m</math></p> $U(t) = E_0 + \frac{4E_m}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$
4	 $U(t) = \frac{2E_m}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \sin \omega t - \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t - \dots \right)$
5	 $U(t) = \frac{E_m}{2} - \frac{E_m}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots \right)$
6	 <p>Принять <math>p = 1/3</math></p> $U(t) = pE_m + \frac{2E_m}{\pi} \left( \sin p\pi \cos \omega t + \frac{1}{2} \sin 2p\pi \cos 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3p\pi \cos 3\omega t + \dots \right)$
7	 $U(t) = \frac{2E_m}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \dots \right)$

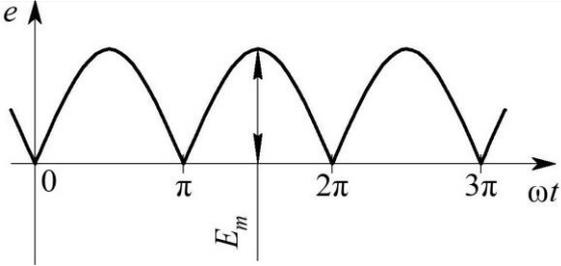
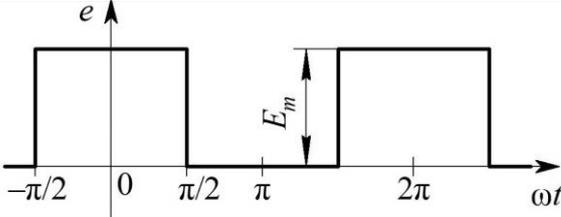
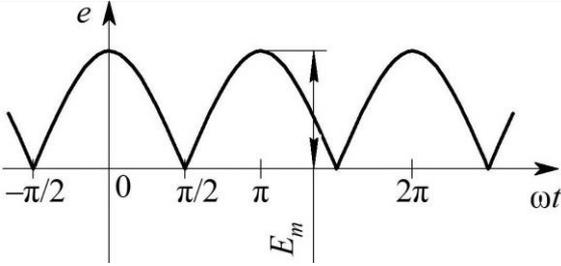
Вариант	График ЭДС, разложение в ряд
8	 $U(t) = \frac{4E_m}{\pi} \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t - \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t - \dots \right)$
9	 $U(t) = \frac{E_m}{2} + \frac{2E_m}{\pi} \left( \cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \dots \right)$
0	 $U(t) = \frac{4E_m}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t + \dots \right)$

Таблица 6.2

### Параметры элементов электрической схемы

Вар.	$E_m$ , В	$R_1$ , Ом	$L_1$ , мГн	$C_1$ , мкФ	$R_2$ , Ом	$L_2$ , мГн	$C_2$ , мкФ	$R_3$ , Ом	$L_3$ , мГн	$C_3$ , мкФ	Прибор
1	25	10	—	—	4,2	6,38	—	3,3	1,8	10,6	1
2	40	—	40,3	—	25	20,1	24,6	10	30	—	2
3	150	100	160	0,63	85	25	0,56	100	—	50	3
4	16	10	1,6	1	—	—	0,56	21,4	4,8	22,6	4
5	26	6,7	—	—	10	10	5,4	6,7	7	—	5
6	67	—	15,9	12,6	7,3	3,98	—	6,4	8	—	1
7	84	2,4	5,2	1,24	6,5	1,31	2,4	—	2,63	8,64	2
8	96	6,38	6,38	10,6	—	12,76	15,9	10	25,6	12,4	3
9	127	100	100	100	90	13,6	18,2	70	—	—	4
10	85	18	13	12	6,5	—	—	6,5	4,96	2,63	5
11	54	15	10	1	25	4,98	7,6	12	50	—	1
12	42	—	4,8	—	65	4,32	—	8	2,64	3,2	2
13	19	12	16	3,18	21	48	—	16	31,8	6,38	3

Окончание табл. 6.2

Вар.	Em, В	R1, Ом	L1, мГн	C1, мкФ	R2, Ом	L2, мГн	C2, мкФ	R3, Ом	L3, мГн	C3, мкФ	Прибор
14	36	1,5	0,68	–	–	1,36	4,4	3	5,46	4,73	4
15	28	2	1,27	6	4,4	0,8	6,4	–	1,4	–	5
16	102	60	64	8,2	24	32	12,6	10,5	–	–	1
17	84	17	–	2,1	–	4,19	0,79	7,6	8	1,47	2
18	23	100	40	–	160	–	0,53	45	25	6,6	3
19	57	22	32	4	–	36	2	70	60	6,4	4
20	38	2,5	2,12	–	4	–	7,56	–	8	6,4	5
21	17	3,6	4,18	–	5,8	2,6	–	33	15,6	2,4	1
22	22	9	–	9,6	3,3	1,2	0,22	10	8,62	12,6	2
23	48	–	85	6,4	–	34	5,8	12	22	–	3
24	140	10	4,0	–	2,4	2	2,4	–	8	1,2	4
25	22	9,6	8	1,6	4,2	16	–	5,4	31,8	1,6	5
26	38	5,8	0,3	2,2	80	–	0,1	2,5	0,17	1,2	1
27	62	33	0,4	–	2,5	2,8	2,4	5,6	–	1,6	2
28	88	–	4,2	0,2	7,8	6,3	0,4	8,2	0,6	–	3
29	100	25	65	–	52	96	200	–	74	85	4
30	65	63	14	100	–	14	63	42	–	50	5
31	42	–	23	85	100	–	10	12	18	–	1
32	105	55	0,4	4,6	41	4,2	8,2	24	2,2	–	2
33	122	12	5,9	3,4	–	–	2,2	4,5	4,5	4,6	3
34	81	8,6	–	–	6	4,3	4,6	6,2	0,22	–	4
35	51	–	8,6	6,8	6,5	6,3	–	2,7	6,5	–	5
36	47	6,5	2,2	2,2	5,4	0,18	6,4	–	4,2	8,7	1
37	25	11	1,4	15	–	8,9	4,7	5,6	1,3	12	2
38	39	20	0,7	20	12	1,4	2,4	7,8	–	–	3
39	32	33	5,4	2,25	27	–	–	12	2,6	16	4
40	132	6,5	0,02	2,2	24	1,4	4	8,2	0,6		5
41	87	–	1,2	–	16	6,4	–	18	4,8	1,12	1
42	26	45	42	21	15	48	–	5	16	12	2
43	59	1,5	1,6	–	–	8,4	1,2	4,6	4,1	6,3	3
44	43	15	10,4	0,84	13	24,3	11,6	–	46,2	–	4
45	29	3,3	5,2	1,15	8,6	13,1	4,6	5,4	–	–	5
46	56	5,2	–	12	–	0,44	5,1	3,3	3,8	5,6	1
47	91	4,7	10	–	7,8	–	15	4,1	17	6,4	2
48	75	6,2	3,3	4,7	–	5,4	8,6	6,2	5,4	6,4	3
49	126	8,4	22	–	15	18	–	7,6	11	16	4
50	97	9,6	6,1	–	3,8	7,4	22,4	10	15,6	45	5

## Расчетно-графическая работа № 7. Расчет разветвленной магнитной цепи

### Содержание работы

Магнитные свойства стали, из которой изготовлены магнитопроводы, определяются кривой намагничивания, заданной в табл. 7.1. Схематические изображения с размещением намагничивающих катушек, способа их намотки на сердечник и положительных направлений тока приведены на рис. 7.1–7.20.

Требуется:

1. Рассчитать магнитную цепь методом двух узлов и определить величины, указанные в крайнем справа столбце табл. 7.2.
2. Составить систему уравнений для магнитной цепи по законам Кирхгофа.

В табл. 7.2 приняты следующие обозначения:  $l$  – длина средней магнитной линии одной ветви магнитной цепи;  $l_\delta$  – величина воздушного зазора (его положение в магнитной цепи дано на схемах магнитопроводов);  $S$  – сечение участков магнитопровода;  $w_i$  – число витков в катушках;  $I$  – постоянный ток в катушке.

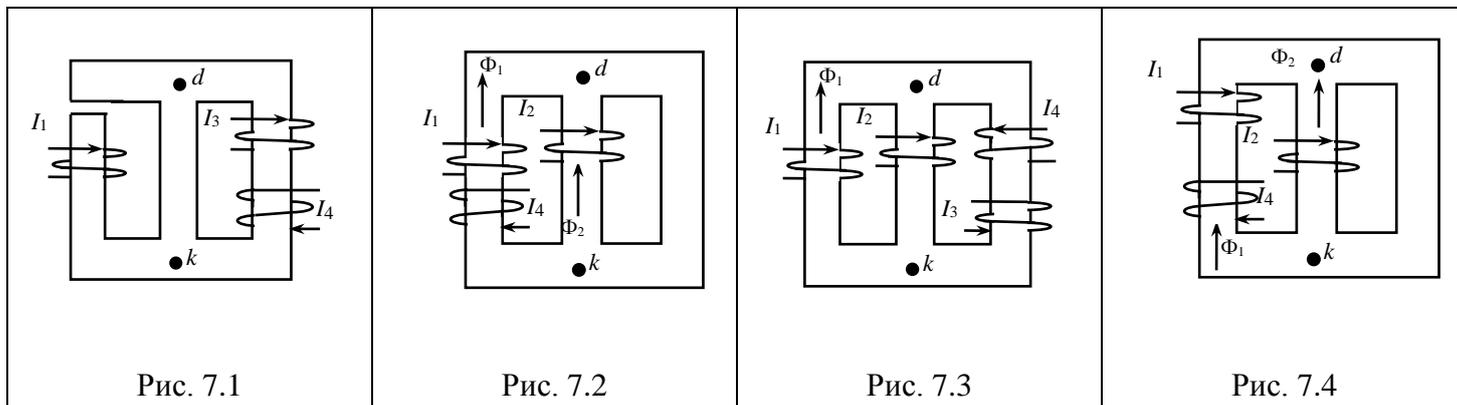
Обозначение величины дается с индексом, который указывают, к какой ветви магнитной цепи относятся та или иная величина: индекс 1 – к левой магнитной ветви; 2 – к средней ветви; 3 – к правой ветви.

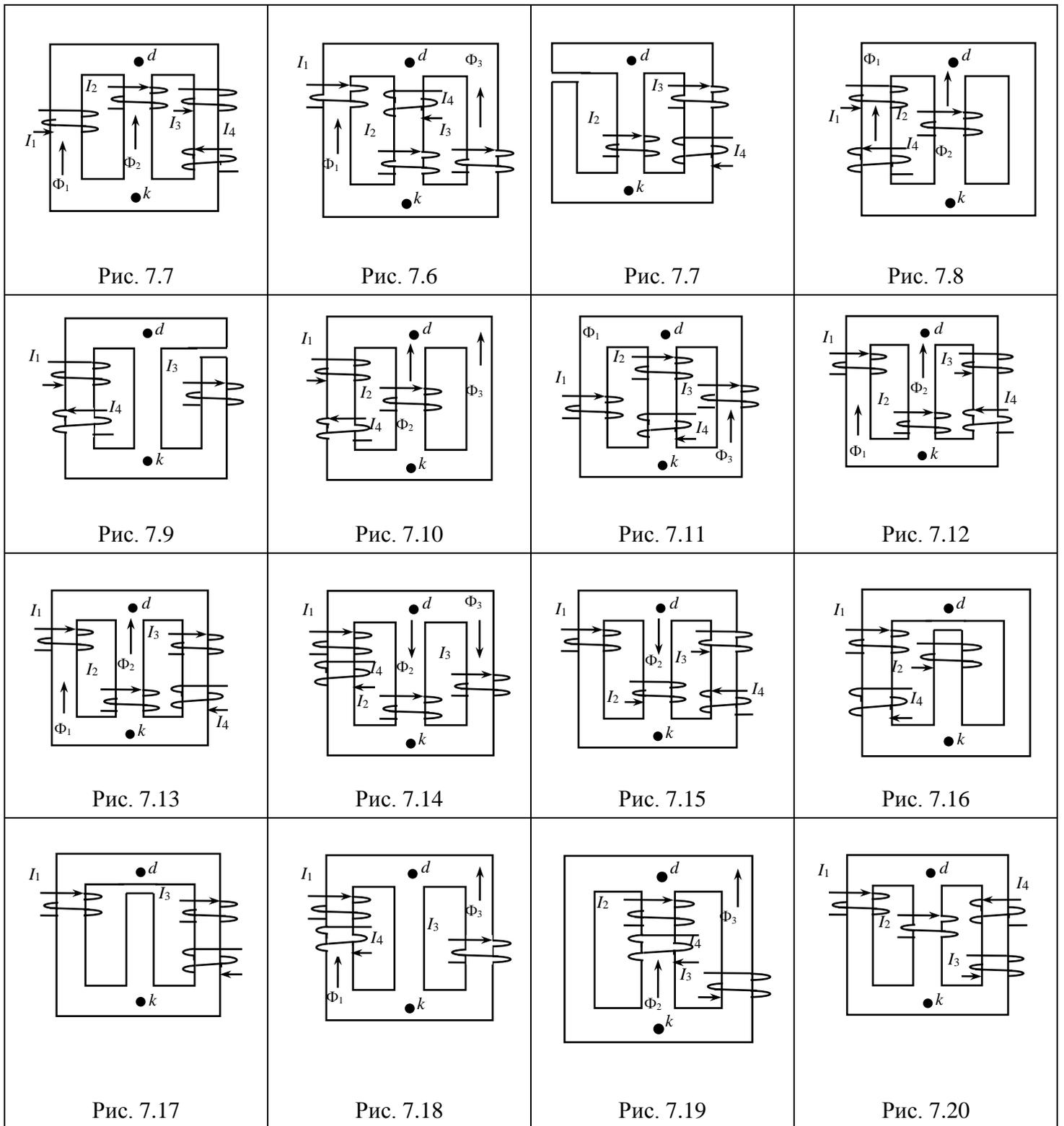
Номер варианта, для выполнения расчетно-графической работы, определяется двумя последними цифрами зачетной книжки обучающегося.

Таблица 7.1

Магнитные свойства стали магнитопровода

$H$ , А/м	20	40	60	80	120	200	400	600	800	1200
$B$ , Тл	0,22	0,75	0,93	1,02	1,14	1,28	1,47	1,53	1,57	1,6





## Исходные данные магнитной цепи

Вариант	Рисунок	$l_1$ , см	$S_1$ , см <sup>2</sup>	$w_1$ , витков	$I_1$ , А	$l_2$ , см	$S_2$ , см <sup>2</sup>	$w_2$ , витков	$I_2$ , А	$l_3$ , см	$S_3$ , см <sup>2</sup>	$w_3$ , витков	$I_3$ , А	$w_4$ , витков	$I_4$ , А	$l_8$ , мм	Доп. условия $\Phi \cdot 10^{-5}$	Определить
1	7.1	30	4	300	1,52	10	6	–	–	30	4	50	2,5	50	2,5	0,5	–	$\Phi_1, \Phi_2$
2	7.2	100	6,15	300	0,3	33	4,2	200	–	100	10	–	–	300	0,3	–	$\Phi_1 = \Phi_2$	$I_2, \Phi_3$
3	7.5	30	4,3	300	0,1	12	6	300	–	20	4,8	100	0,42	50	0,21	–	$\Phi_2 = 0$	$I_2, \Phi_3$
4	7.6	30	7,3	105	1	11,5	12,3	50	0,3	22,5	10	975	–	100	0,15	–	$\Phi_3 - \Phi_1 = 20$	$\Phi_1, I_3$
5	7.9	32	14,4	300	0,75	26	10,5	–	–	40	15	200	1	50	1,5	1	–	$\Phi_2, \Phi_3$
6	7.10	40	42	300	0,4	13	14	–	0,3	40	15	–	–	60	0,5	–	$\Phi_2 = \Phi_3$	$\Phi_3, w_2$
7	7.13	30	4,2	430	0,5	10	4,8	–	0,1	32	4,9	100	0,5	50	1	–	$\Phi_2 = 0$	$\Phi_1, w_2$
8	7.14	19	8,1	300	0,15	6,5	5,1	210	0,1	15	3,2	150	–	165	0,1	–	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20$	$\Phi_1, I_3$
9	7.17	55	55	260	1	18	84	–	–	57	57	200	1	60	0,5	1,25	–	$\Phi_2, \Phi_3$
10	7.18	55	25,3	500	0,5	25	50	–	–	47	45,5	300	–	100	1	–	$\Phi_1 = \Phi_3$	$\Phi_2, I_3$
11	7.3	11	1,95	100	–	3,5	0,96	400	0,05	13	1,25	55	0,3	20	0,15	–	$\Phi_1 = 25$	$\Phi_2, I_1$
12	7.4	35	2,9	140	0,25	10	4,75	390	–	45	8,33	–	–	50	0,5	–	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20$	$\Phi_1, I_2$
13	7.7	13,5	7,5	–	–	4,32	1,9	100	1	19,8	1,75	200	0,5	200	0,25	1	–	$\Phi_3, \Phi_1$
14	7.8	30	5,6	150	0,2	10	5	200	–	18	8,9	–	–	200	0,1	–	$\Phi_1 = \Phi_2$	$\Phi_3, I_2$
15	7.11	28	7,95	290	0,5	11,5	13,8	26	1	37	7,1	2000	–	50	0,5	–	$\Phi_3 = 98$	$\Phi_2, I_3$
16	7.12	28	3,9	38	0,5	8	6,8	275	–	28	9,9	220	0,25	200	0,12	–	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20$	$\Phi_2, I_2$
17	7.15	25	8	635	0,1	10	5	–	0,1	25	3	50	0,2	40	0,1	–	$\Phi_2 = 70$	$\Phi_3, w_2$
18	7.16	70	97	550	0,4	35	220	250	1,4	70	92	–	–	200	0,4	0,57	–	$\Phi_2, \Phi_3$
19	7.19	43	11,9	–	–	14	11,5	100	1,1	48	9,1	520	–	200	0,55	–	$\Phi_2 = \Phi_3$	$\Phi_1, I_3$
20	7.20	32	9,3	270	0,06	9	7,7	–	0,2	30	15,5	108	0,7	120	0,35	–	$\Phi_2 - \Phi_1 = 30$	$\Phi_2, w_2$
21	7.1	25	4	505	0,9	14	6,15	–	–	25	3,9	625	0,2	625	0,2	0,5	–	$\Phi_2, \Phi_3$
22	7.2	90	6	360	0,3	30	4	200	–	90	9,7	–	–	360	0,2	–	$\Phi_1 = \Phi_2$	$I_2, \Phi_3$
23	7.5	25	4,15	150	0,2	8	4	300	–	35	5,95	70	0,52	30	0,52	–	$\Phi_2 = 0$	$\Phi_1, I_2$
24	7.6	40	8	210	0,5	22,5	14	100	0,1	30	10	975	–	50	0,4	–	$\Phi_3 - \Phi_1 = 20$	$\Phi_3, I_3$
25	7.9	40	15	400	0,5	20	10,3	–	–	40	15	800	0,25	100	1	1	–	$\Phi_1, \Phi_3$

Продолжение табл. 7.2

Вариант	Рисунок	$l_1$ , см	$S_1$ , см <sup>2</sup>	$w_1$ , витков	$I_1$ , А	$l_2$ , см	$S_2$ , см <sup>2</sup>	$w_2$ , витков	$I_2$ , А	$l_3$ , см	$S_3$ , см <sup>2</sup>	$w_3$ , витков	$I_3$ , А	$w_4$ , витков	$I_4$ , А	$l_δ$ , мм	Доп. условия $\Phi \cdot 10^{-5}$	Определить
26	7.10	35	40	100	1	10	13,7	–	0,3	30	14,2	–	–	25	2	–	$\Phi_2 = \Phi_3$	$\Phi_2, w_2$
27	7.13	35	4,3	215	1	10	4,8	–	0,1	20	4,4	600	0,1	200	0,2	–	$\Phi_2 = 0$	$\Phi_1, w_2$
28	7.14	15	7,8	105	0,3	5,5	4,9	300	0,07	23	4,2	150	–	50	0,6	–	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20$	$\Phi_3, I_3$
29	7.17	65	71	520	0,5	22	84	–	–	62	62	360	0,5	50	1	1,25	–	$\Phi_2, \Phi_1$
30	7.18	48	24,9	300	1	30	51,5	–	–	52	51,5	300	–	200	0,25	–	$\Phi_1 = \Phi_3$	$\Phi_2, I_3$
31	7.3	13	2,05	100	–	3	0,94	100	0,02	11	1,18	100	0,15	46	0,1	–	$\Phi_1 = 25$	$\Phi_1, I_3$
32	7.4	45	3,1	100	0,3	14	5,3	390	–	35	7,8	–	–	200	0,15	–	$\Phi_2 - \Phi_1 = 25$	$\Phi_2, I_2$
33	7.7	19,5	7,7	–	–	10	2,1	200	0,5	24,2	1,8	500	0,2	125	0,4	0,1	–	$\Phi_2, \Phi_1$
34	7.8	18	4,9	100	0,25	10	5	–	0,2	25	9,5	–	–	100	0,25	–	$\Phi_1 = \Phi_2$	$\Phi_1, w_2$
35	7.11	26	7,9	145	1	11	13,6	52	0,5	39	7,2	200	–	50	0,5	–	$\Phi_3 = 98$	$\Phi_2, I_3$
36	7.12	35	4,1	19	1	6	6,3	275	–	25	9,6	200	0,2	200	0,2	–	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20$	$\Phi_3, I_2$
37	7.15	20	7,7	107	0,59	9	4,9	–	0,1	15	2,6	10	0,7	20	0,35	–	$\Phi_2 = 70$	$\Phi_3, w_2$
38	7.16	100	104	125	2	28	82	125	2,8	95	200	–	–	100	0,5	0,48	–	$\Phi_3, w_2$
39	7.19	40	11,8	–	–	13	11	60	2,2	50	9,3	520	–	80	1,1	–	$\Phi_2 = \Phi_3$	$\Phi_2, I_3$
40	7.20	34	9,5	175	0,1	12	8	–	0,2	28	15,6	40	2,5	14	1,25	–	$\Phi_2 - \Phi_1 = 30$	$\Phi_3, w_2$
41	7.1	35	4,1	350	1,3	8	5,8	–	–	20	38	250	0,5	250	0,5	0,5	–	$\Phi_1, \Phi_2$
42	7.2	90	5	100	1,2	30	4	–	1,1	85	9,7	–	–	100	0,6	–	$\Phi_1 = \Phi_2$	$\Phi_2, w_2$
43	7.5	15	3,8	60	0,5	6	2	300	–	20	4,8	100	0,3	300	0,07	–	$\Phi_2 = 0$	$\Phi_1, I_2$
44	7.6	37,5	7,8	200	0,52	13	12,8	100	0,2	37,5	10,5	975	–	40	0,25	–	$\Phi_3 - \Phi_1 = 20$	$\Phi_2, I_3$
45	7.9	35	14,6	600	0,3	18	10,2	–	–	40	15	100	0,2	240	0,5	1	–	$\Phi_1, \Phi_3$
46	7.10	30	38	500	0,25	17	14,7	–	0,3	45	15,4	–	–	50	0,5	–	$\Phi_2 = \Phi_3$	$w_2, \Phi_3$
47	7.13	25	4	1075	0,2	10	4,8	–	0,1	29	4,6	100	0,05	250	0,2	–	$\Phi_2 = 0$	$w_2, \Phi_3$
48	7.14	20	8,2	515	0,1	7	5,2	105	0,2	17	3,6	150	–	200	0,05	–	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20$	$\Phi_1, I_3$
49	7.17	58	58	200	1,3	19	84	–	–	55	55	375	0,4	100	0,8	1,25	–	$\Phi_1, \Phi_2$
50	7.18	45	24,7	500	0,5	27	59,4	–	–	48	47,5	300	–	100	1	–	$\Phi_2 = \Phi_3$	$\Phi_1, I_3$

Продолжение табл. 7.2

Вариант	Рисунок	$l_1$ , см	$S_1$ , см <sup>2</sup>	$w_1$ , витков	$I_1$ , А	$l_2$ , см	$S_2$ , см <sup>2</sup>	$w_2$ , витков	$I_2$ , А	$l_3$ , см	$S_3$ , см <sup>2</sup>	$w_3$ , витков	$I_3$ , А	$w_4$ , витков	$I_4$ , А	$l_8$ , мм	Доп. условия $\Phi \cdot 10^{-5}$	Определить
51	7.3	10	1,92	100	—	4,5	1,01	200	0,1	14	1,26	68	0,2	60	0,1	—	$\Phi_1 = 25$	$\Phi_2, I_1$
52	7.4	38	2,97	300	0,15	11	4,9	390	—	43	8,25	—	—	50	0,3	—	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20$	$I_2, \Phi_2$
53	7.7	29,8	8,2	—	—	13	2,2	1000	0,1	25	1,82	100	0,75	50	1,5	0,1	—	$\Phi_2, \Phi_3$
54	7.8	32	6	75	0,4	10	5	200	—	20	9	—	—	100	0,2	—	$\Phi_1 = \Phi_2$	$\Phi_2, I_2$
55	7.11	32	8,1	725	0,2	12,5	14,1	100	0,3	33	6,9	2000	—	140	0,15	—	$\Phi_3 = 98$	$\Phi_1, I_3$
56	7.12	30	4	38	0,5	10	7	275	—	30	10	300	0,2	200	0,1	—	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20$	$\Phi_2, I_2$
57	7.15	30	8,4	89	0,73	12	5,2	—	0,1	26	3	20	0,4	30	0,2	—	$\Phi_2 = 70$	$\Phi_1, w_2$
58	7.16	110	105	400	0,5	27	177	175	2	100	240	—	—	100	1	4,6	—	$\Phi_1, \Phi_2$
59	7.19	48	12,1	—	—	16	12,9	120	1	43	8,8	520	—	200	0,5	—	$\Phi_2 = \Phi_3$	$\Phi_1, I_3$
60	7.20	26	8,6	125	0,14	13	8,1	—	0,2	22	14,7	20	4,7	25	0,94	—	$\Phi_2 - \Phi_1 = 30$	$\Phi_1, w_2$
61	7.1	40	4,1	455	1	10	6	—	—	40	4,15	125	1	125	1	0,5	—	$\Phi_1, \Phi_3$
62	7.2	85	5,9	150	1	25	3,9	—	1,1	95	9,9	—	—	60	0,5	—	$\Phi_1 = \Phi_2$	$\Phi_1, w_2$
63	7.5	30	4,3	200	0,15	10	8	300	—	20	4,8	100	0,35	50	0,35	—	$\Phi_2 = 0$	$\Phi_1, I_2$
64	7.6	40	8	420	0,25	15	13	125	0,2	30	10	975	—	50	0,1	—	$\Phi_3 - \Phi_1 = 20$	$\Phi_1, I_3$
65	7.9	48	15,6	100	0,2	20	10,3	—	—	40	15	800	0,25	250	0,4	1	—	$\Phi_2, \Phi_3$
66	7.10	38	41	250	0,3	12	13,8	—	0,3	50	15,8	—	—	125	0,6	—	$\Phi_2 = \Phi_3$	$\Phi_1, w_2$
67	7.13	18	3,8	860	0,25	10	4,8	—	0,1	23	4,5	70	1	60	0,5	—	$\Phi_2 = 0$	$w_2, \Phi_3$
68	7.14	18	8	205	0,2	6	5	210	0,1	20	4	150	—	410	0,05	—	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20$	$\Phi_2, I_3$
69	7.17	63	66,5	650	0,4	21	84	—	—	65	65	100	1,15	50	2,3	1,25	—	$\Phi_2, \Phi_3$
70	7.18	52	25,2	600	0,35	29	51	—	—	55	55,3	300	—	200	0,7	—	$\Phi_2 = \Phi_3$	$\Phi_2, I_3$
71	7.3	14	2,07	100	—	5	1,03	100	0,2	10	1,14	300	0,05	46	0,1	—	$\Phi_1 = 25$	$\Phi_2, I_1$
72	7.4	42	3,07	400	0,1	13	5,14	390	—	37	7,9	—	—	100	0,2	—	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20$	$I_2, \Phi_3$
73	7.7	42,5	9	—	—	20	2,4	50	2	40,5	2	100	1	250	0,2	0,1	—	$\Phi_1, \Phi_3$
74	7.8	20	5	200	0,12	10	5	—	0,2	30	10	—	—	100	0,25	—	$\Phi_1 = \Phi_2$	$\Phi_1, w_2$
75	7.11	34	8,3	290	0,5	13	14,2	155	0,2	31	6,8	2000	—	200	0,1	—	$\Phi_3 = 98$	$\Phi_2, I_3$

Вариант	Рисунок	$l_1$ , см	$S_1$ , см <sup>2</sup>	$w_1$ , витков	$I_1$ , А	$l_2$ , см	$S_2$ , см <sup>2</sup>	$w_2$ , витков	$I_2$ , А	$l_3$ , см	$S_3$ , см <sup>2</sup>	$w_3$ , витков	$I_3$ , А	$w_4$ , витков	$I_4$ , А	$l_δ$ , мм	Доп. условия $\Phi \cdot 10^{-5}$	Определить
76	7.12	32	4,06	76	0,25	14	8,3	275	–	35	10,4	500	0,1	150	0,2	–	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20$	$\Phi_3, I_2$
77	7.15	22	7,8	635	0,1	15	5,5	–	0,1	28	3,1	22	0,5	12	0,25	–	$\Phi_2 = 70$	$w_2, \Phi_3$
78	7.16	90	100	100	2	30	188	700	0,5	90	100	–	–	100	1	0,5	–	$\Phi_1, \Phi_2$
79	7.19	50	12,1	–	–	17	14	340	0,5	40	8,6	520	–	200	0,25	–	$\Phi_2 = \Phi_3$	$\Phi_2, I_3$
80	7.20	25	8,5	250	0,07	14	8,2	–	0,2	23	14,9	68	1,2	90	0,4	–	$\Phi_2 - \Phi_1 = 30$	$\Phi_2, w_2$
81	7.1	20	4	413	1	12	6,06	–	–	38	4,05	200	1	50	1	0,5	–	$\Phi_1, \Phi_2$
82	7.2	80	5,7	200	0,1	25	3,9	200	–	80	9,5	–	–	4	2	–	$\Phi_1 = \Phi_2$	$\Phi_1, I_2$
83	7.5	20	4	100	0,5	10	8	300	–	30	5,6	150	0,21	50	0,42	–	$\Phi_2 = 0$	$I_2, \Phi_3$
84	7.6	33,5	7,6	500	0,3	12	12	400	0,5	45	11,3	75	–	20	0,5	–	$\Phi_3 - \Phi_1 = 20$	$\Phi_1, I_3$
85	7.9	45	15,4	200	0,21	22	10,4	–	–	40	15	400	0,5	200	0,5	1	–	$\Phi_1, \Phi_2$
86	7.10	45	44	100	1	15	14,2	–	0,3	35	13,7	–	–	100	1	–	$\Phi_2 = \Phi_3$	$\Phi_1, w_2$
87	7.13	20	3,9	215	0,5	10	4,8	–	0,1	26	4,6	400	0,2	200	0,1	–	$\Phi_2 = 0$	$w_2, \Phi_3$
88	7.14	17	7,9	400	1	5	4,8	420	0,05	26	4,4	150	–	43	0,5	–	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20$	$\Phi_2, I_3$
89	7.17	60	60	400	0,1	20	84	–	–	60	60	300	0,57	50	1,15	1,25	–	$\Phi_1, \Phi_2$
90	7.18	50	25	400	0,65	28	51	–	–	50	50	300	–	200	0,35	–	$\Phi_2 = \Phi_3$	$\Phi_1, I_3$
91	7.3	12	2	100	0,7	4	1	500	0,04	12	1,2	150	0,1	92	0,05	–	$\Phi_1 = 25$	$I_1, \Phi_3$
92	7.4	40	3	200	–	12	5	390	–	40	8	–	–	200	1	–	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20$	$I_2, \Phi_2$
93	7.7	20	8	–	0,2	7	2	500	0,2	20	1,78	400	0,3	50	0,6	0,1	–	$\Phi_2, \Phi_3$
94	7.8	25	5,3	80	0,5	10	5	–	0,2	32	10,2	–	–	40	0,25	–	$\Phi_1 = \Phi_2$	$\Phi_1, w_2$
95	7.11	30	8	1450	0,1	12	14	104	0,25	35	7	2000	–	50	0,5	–	$\Phi_3 = 98$	$\Phi_3, I_3$
96	7.12	35	3,8	76	0,25	12	7,6	275	–	32	10,2	100	0,5	120	0,25	–	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20$	$\Phi_1, I_2$
97	7.15	15	7,2	135	0,47	8	4,8	–	0,1	20	2,9	40	0,2	60	0,1	–	$\Phi_2 = 70$	$\Phi_1, w_2$
98	7.16	85	100	2000	0,1	33	200	500	0,7	85	100	–	–	500	0,2	0,52	–	$\Phi_1, \Phi_2$
99	7.19	45	12	–	–	15	12	350	0,4	45	9	520	–	400	0,2	–	$\Phi_1 = \Phi_2$	$\Phi_3, I_3$
100	7.20	30	10	350	0,05	10	7,8	–	0,2	25	15	675	0,1	250	0,2	–	$\Phi_2 - \Phi_1 = 30$	$\Phi_1, w_2$

## ЧАСТЬ II

### ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Задача № 1.** Анализ разветвленной цепи постоянного тока.

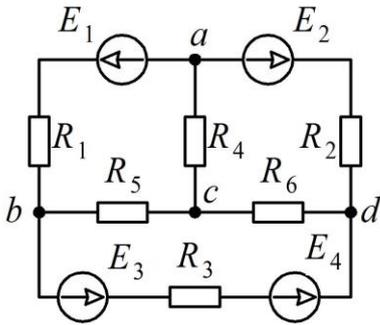


Рис. 1.1

Для электрической схемы, представленной на рис. 1.1, на основании данных представленных в табл. 1.1, необходимо:

- составить на основании законов Кирхгофа систему уравнений для определения значений токов ( $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ ) во всех ветвях схемы;
- определить токи во всех ветвях схемы методом контурных токов и методом узловых потенциалов. Полученные результаты расчета токов, проведенного двумя методами, свести в таблицу и сравнить между собой;
- определить один из токов, на выбор, в заданной схеме, используя метод эквивалентного генератора;
- рассчитать баланс мощностей в исходной схеме, вычислив суммарную мощность источников и суммарную мощность нагрузок (сопротивлений);
- выполнить построение потенциальной диаграммы.

Таблица 1.1

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_4, \text{ Ом}$	$R_5, \text{ Ом}$	$R_6, \text{ Ом}$	$E_1, \text{ В}$	$E_2, \text{ В}$	$E_3, \text{ В}$	$E_4, \text{ В}$
6	12	9	5	20	20	20	21	22,5	30

#### Решение

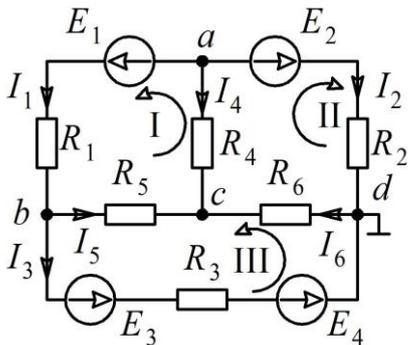


Рис. 1.2

1. На основании исходной электрической схемы (рис. 1.1) разработаем схему для проведения расчетов (рис. 1.2). На расчетной схеме, в произвольном порядке, произведем расстановку направления токов в ветвях, направления обхода контуров (направления контурных токов) и укажем узел, который подлежит заземлению, для проведения расчета по методу узловых потенциалов.

2. Определение числа уравнений. В схеме количество узлов  $y = 4$ ; число ветвей  $b = 6$ .

Рассчитаем число независимых уравнений по законам Кирхгофа:

- по первому закону  $N_1 = y - 1 = 4 - 1 = 3$ ;
- по второму закону  $N_2 = b - N_1 = 6 - 3 = 3$ .

Составим систему уравнений по законам Кирхгофа. По первому закону Кирхгофа три уравнения:

$$\begin{aligned}
 -I_1 - I_2 - I_4 &= 0 \text{ (узел } a); \\
 I_1 - I_3 - I_5 &= 0 \text{ (узел } b);
 \end{aligned}$$

$$I_4 + I_5 + I_6 = 0 \text{ (узел } c\text{)}.$$

При составлении уравнений учитывалось, что токи, втекающие в узел берутся со знаком «+», а вытекающие – со знаком «-».

По второму закону Кирхгофа три уравнения:

$$I_1 R_1 - I_4 R_4 + I_5 R_5 = E_1 \text{ (первый контур);}$$

$$I_2 R_2 - I_4 R_4 + I_6 R_6 = E_2 \text{ (второй контур);}$$

$$I_3 R_3 - I_5 R_5 + I_6 R_6 = E_3 + E_4 \text{ (третий контур).}$$

3. Решение методом контурных токов. Воспользуемся направлениями контурных токов указанных на рис. 1.2. Т. к. в схеме три замкнутых контура то и контурных токов будет три. На основании рис. 1.2 запишем уравнения для расчета истинных значений токов:

$$I_1 = I_I; I_2 = I_{II}; I_3 = I_{III}; I_4 = -I_I - I_{II}; I_5 = I_I - I_{III}; I_6 = I_{II} + I_{III}. \quad (1.1)$$

Запишем уравнения для каждого контура по второму закону Кирхгофа:

$$I_I(R_1 + R_4 + R_5) + I_{II}R_4 - I_{III}R_5 = E_1;$$

$$I_I R_4 + I_{II}(R_2 + R_4 + R_6) + I_{III}R_6 = E_2;$$

$$-I_I R_5 + I_{II}R_6 + I_{III}(R_3 + R_5 + R_6) = E_3 + E_4.$$

Решим исходную систему матричным способом, для чего представим ее в виде:

$$[R][I] = [E]. \quad (1.2)$$

Здесь матрица сопротивлений:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 + R_4 + R_5 & R_4 & -R_5 \\ R_4 & R_2 + R_4 + R_6 & R_6 \\ -R_5 & R_6 & R_3 + R_5 + R_6 \end{bmatrix}.$$

Матрица-столбец ЭДС:

$$[E] = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 + E_4 \end{bmatrix}.$$

Подставим численные значения в матрицу сопротивлений, столбец ЭДС и, используя программный продукт *MathCad*, рассчитаем контурные токи:

$$I_I = 2,501 \text{ А}; I_{II} = -1,191 \text{ А}; I_{III} = 2,578 \text{ А}.$$

Истинные значения токов на основании (1.1):

$$I_1 = 2,501 \text{ А}; I_2 = -1,191 \text{ А}; I_3 = 2,578 \text{ А}; I_4 = -1,31 \text{ А}; I_5 = -0,078 \text{ А}; I_6 = 1,387 \text{ А}.$$

4. Решение задачи методом узловых потенциалов. При решении данным методом воспользуемся также схемой, изображенной на рис. 1.2 и всеми обозначениями, нанесенными на нее. На первом этапе запишем уравнения для определения токов в ветвях:

$$I_1 = \frac{\varphi_a - \varphi_b + E_1}{R_1}; I_2 = \frac{\varphi_a - \varphi_d + E_2}{R_2}; I_3 = \frac{\varphi_b - \varphi_d + E_3 + E_4}{R_3};$$

$$I_4 = \frac{\varphi_a - \varphi_c}{R_4}; I_5 = \frac{\varphi_b - \varphi_c}{R_5}; I_6 = \frac{\varphi_d - \varphi_c}{R_6},$$

где  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c, \varphi_d$  – потенциалы соответствующих узлов схемы.

На втором этапе составим уравнения по второму закону Кирхгофа для каждого узла схемы с учетом потенциала данного узла. При этом будем считать потенциал точки  $d$  равный нулю, а сопротивления заменим на проводимости:

$$\varphi_a \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \right) - \varphi_b \frac{1}{R_1} - \varphi_c \frac{1}{R_4} = -\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2};$$

$$-\varphi_a \frac{1}{R_1} + \varphi_b \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} \right) - \varphi_c \frac{1}{R_5} = \frac{E_1}{R_1} - \frac{E_3 + E_4}{R_3};$$

$$-\varphi_a \frac{1}{R_4} - \varphi_b \frac{1}{R_5} + \varphi_c \left( \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) = 0.$$

Решение потенциальной системы из трех уравнений также определим матричным способом:

$$[G][\varphi] = [J],$$

для которой

$$[G] = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_4} \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} & -\frac{1}{R_5} \\ -\frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_5} & \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \end{bmatrix};$$

$$[J] = \begin{bmatrix} -\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} \\ \frac{E_1}{R_1} - \frac{E_3 + E_4}{R_3} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Подставим численные значения в матрицу проводимостей, столбец токов и, используя программный продукт *MathCad*, рассчитаем узловые потенциалы:

$$\varphi_a = -34,292 \text{ В}; \varphi_b = -29,296 \text{ В}; \varphi_c = -27,744 \text{ В}.$$

Используя вышеприведенные формулы, рассчитаем токи в ветвях:

$$I_1 = 2,501 \text{ А}; I_2 = -1,191 \text{ А}; I_3 = 2,578 \text{ А}; I_4 = -1,31 \text{ А}; I_5 = -0,078 \text{ А}; I_6 = 1,387 \text{ А}.$$

5. Сведем в табл. 1.2 токи, полученные двумя вышеупомянутыми методами.

Таблица 1.2

Расчетные токи	Метод контурных токов	Метод узловых потенциалов
Первый ток	2,501	2,501
Второй ток	-1,191	-1,191
Третий ток	2,578	2,578
Четвертый ток	-1,31	-1,31
Пятый ток	-0,078	-0,078
Шестой ток	1,387	1,387

6. Метод эквивалентного генератора. Рассчитаем ток, протекающий через ветвь, в которую включено сопротивление  $R_3$ . Для расчета схемы этим методом преобразуем первоначальную схему за счет исключения из нее сопротивления  $R_3$  (рис. 1.3). При этом в схеме остается два контура и три тока (рис. 1.4). Запишем для узла  $a$  уравнение по первому закону Кирхгофа:

$$-I_1 - I_2 - I_3 = 0 \text{ (узел } a\text{)}.$$

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для двух контуров схемы:

$$I_1(R_1 + R_5) - I_3R_4 = E_1;$$

$$I_2(R_2 + R_6) - I_3R_4 = E_2.$$

Для определения токов в схеме представим полученные уравнения в форме (1.2):

$$[R][I] = [E].$$

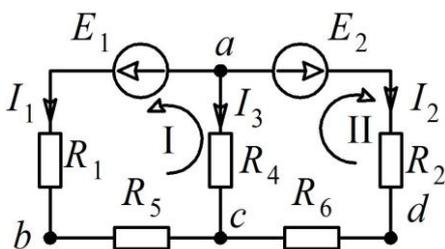


Рис. 1.4

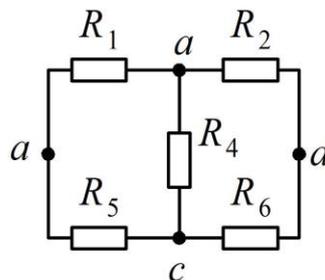


Рис. 1.5

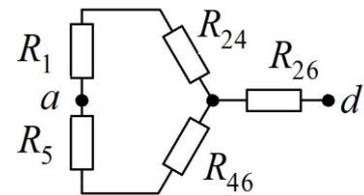


Рис. 1.6

Здесь матрица сопротивлений:

$$[R] = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ R_1 + R_5 & 0 & -R_4 \\ 0 & (R_2 + R_6) & -R_4 \end{bmatrix}.$$

Матрица-столбец ЭДС:

$$[E] = \begin{bmatrix} 0 \\ E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}.$$

Подставим численные значения в матрицу сопротивлений, столбец ЭДС и, используя программный продукт *MathCad*, рассчитаем контурные токи:

$$I_1 = 0,57 \text{ А}; I_2 = 0,463 \text{ А}; I_3 = -1,034 \text{ А}.$$

Для определения напряжения на выводах эквивалентного генератора, работающего на холостом ходу, воспользуемся уравнением, записанным по второму закону Кирхгофа:

$$-I_1 R_5 + I_2 R_6 + U_{\text{х.х.}} = 0;$$

$$U_{\text{х.х.}} = I_1 R_5 - I_2 R_6 = 0,57 \cdot 20 - 0,463 \cdot 20 = 12,193 \text{ В}.$$

Определим внутреннее сопротивление эквивалентного генератора (рис. 1.5) относительно узловых точек *a* и *d*. При определении сопротивления осуществим переход от соединения «треугольник» (образованного между узлами *a*, *c*, *d*) к эквивалентной «звезде» с соответствующими сопротивлениями (рис. 1.6):

$$R_{24} = \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4 + R_6} = \frac{12 \cdot 5}{12 + 5 + 20} = 1,622 \text{ Ом};$$

$$R_{26} = \frac{R_2 R_6}{R_2 + R_4 + R_6} = \frac{12 \cdot 20}{12 + 5 + 20} = 6,486 \text{ Ом};$$

$$R_{46} = \frac{R_4 R_6}{R_2 + R_4 + R_6} = \frac{20 \cdot 5}{12 + 5 + 20} = 2,703 \text{ Ом}.$$

Определим эквивалентное сопротивление:

$$R_{\text{эк}} = R_{26} + \frac{(R_1 + R_{24})(R_5 + R_{46})}{R_1 + R_{24} + R_5 + R_{46}} = 6,486 + \frac{(6 + 1,622)(20 + 2,703)}{6 + 1,622 + 20 + 2,703} = 12,193 \text{ Ом}.$$

На основании напряжения  $U_{\text{х.х.}}$  и сопротивления эквивалентного генератора  $R_{\text{эк}}$ , а также значения сопротивления  $R_3$ , напряжений источников ЭДС  $E_3$  и  $E_4$  определим ток, протекающий через сопротивление  $R_3$ :

$$I_3 = \frac{U_{\text{х.х.}} + E_3 + E_4}{R_{\text{эк}} + R_3} = \frac{2,139 + 22,5 + 30}{12,193 + 9} = 2,578 \text{ А}.$$

Полученное значение тока численно соответствует значению, рассчитанному с использованием других методов (методы контурных токов и узловых потенциалов).

7. Произведем расчет мощности, выдаваемой источниками и потребляемой нагрузкой:

$$P_{\text{ист}} = E_1 I_1 - E_2 I_2 + E_3 I_3 + E_4 I_3 = 20 \cdot 2,501 - 21 \cdot (-1,191) + (22,5 + 30) \cdot 2,578 = 161,549 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{нагр}} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2;$$

$$P_{\text{нагр}} = 6 \cdot 2,5^2 + 12 \cdot (-1,19)^2 + 9 \cdot 2,58^2 + 5 \cdot (-1,31)^2 + 20 \cdot (-0,078)^2 + 20 \cdot 1,39^2 = 161,549 \text{ Вт}.$$

На основании сравнения между собой двух рассчитанных мощностей:

$$P_{\text{ист}} = P_{\text{нагр}}; 161,549 \text{ Вт} = 161,549 \text{ Вт},$$

следует, что баланс мощности выполняется, а значит, расчет произведен верно.

8. Построим потенциальную диаграмму для внешнего контура схемы (рис. 1.1). Для этого заземлим одну из точек схемы (точка *d*), выберем контур обхода (по часовой

стрелке) и проставим точки, в которых происходит изменение потенциала (рис. 1.7). Так же запишем уравнения для определения потенциалов в заданных точках:

$$\begin{aligned}
 \varphi_d &= 0; \\
 \varphi_1 &= -E_4 = -30 \text{ В}; \\
 \varphi_2 &= \varphi_1 + I_3 R_3 = -30 + 2,578 \cdot 9 = -6,796 \text{ В}; \\
 \varphi_b &= \varphi_2 - E_3 = -6,796 - 22,5 = -29,296 \text{ В}; \\
 \varphi_3 &= \varphi_b + I_1 R_1 = -29,296 + 2,501 \cdot 6 = -14,292 \text{ В}; \\
 \varphi_a &= \varphi_3 - E_1 = -14,292 - 20 = -34,292 \text{ В}; \\
 \varphi_4 &= \varphi_a + E_2 = -34,292 + 21 = -14,292 \text{ В}; \\
 \varphi_d &= \varphi_4 - I_2 R_2 = -14,292 - (1,191) \cdot 12 = 0 \text{ В}.
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

На основании системы уравнений (1.3) на рис. 1.8 построена потенциальная диаграмма.

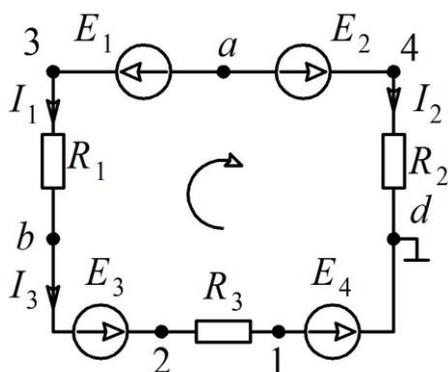


Рис. 1.7

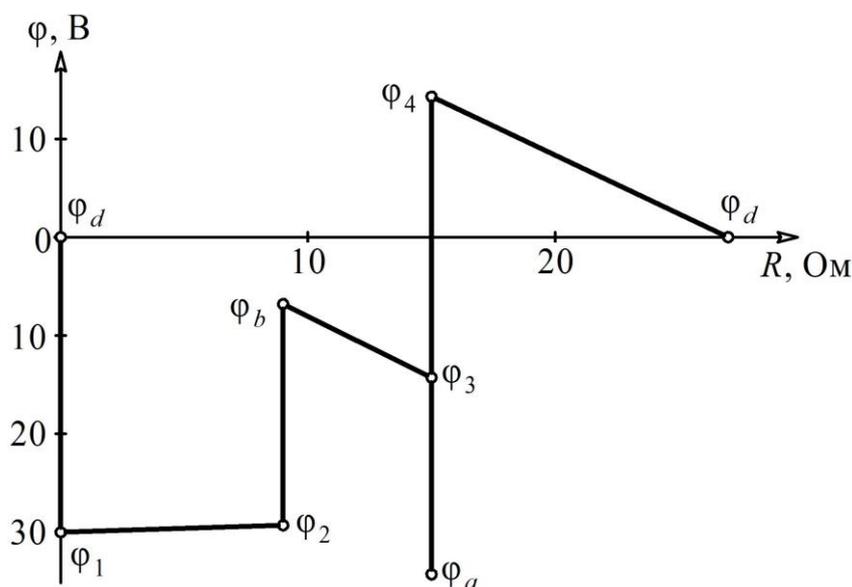


Рис. 1.8

### Задача № 2. Расчет разветвленной цепи синусоидального тока.

На рис. 2.1 представлена двухконтурная электрическая цепь переменного тока, имеющая следующие параметры элементов:  $L_1 = 24,6$  мГн;  $L_2 = 1,74$  мГн;  $L_3 = 0,87$  мГн;  $C_1 = 2,01$  мкФ;  $C_2 = 15,8$  мкФ;  $C_3 = 4,02$  мкФ;  $R_2 = 170$  Ом;  $f = 1100$  Гц.

ЭДС источников напряжения представлены в тригонометрической форме записи:

$$\begin{aligned}
 \underline{E}_1 &= 56 \sin(\omega t + 85^\circ) \text{ В}; \quad \underline{E}_2 = 80 \cos(\omega t + 17^\circ) \text{ В}; \\
 \underline{E}_3 &= 125 \sin(\omega t - 40^\circ) \text{ В}.
 \end{aligned}$$

Необходимо:

– составить уравнения для рассматриваемой схемы в мгновенных значениях и в символической форме;

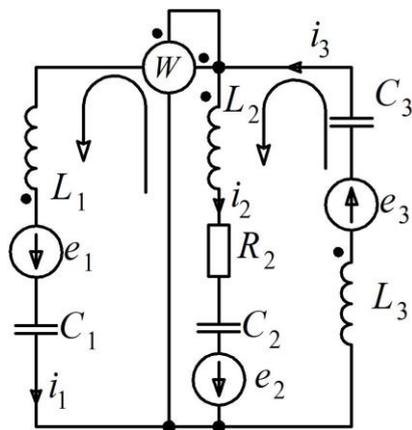


Рис. 2.1

- определить токи во всех ветвях в мгновенных и действительных значениях;
- вычислить показание ваттметра;
- составить баланс мощности;
- построить потенциальную диаграмму;
- для одного из токов схемы (на выбор) построить график его зависимости от времени.

### Решение

Зададимся условно положительными направлениями токов в ветвях схемы и выберем направления обхода контуров по окнам (рис. 2.1).

Составим уравнения электрического равновесия по законам Кирхгофа:

а) для мгновенных значений:

$$\begin{aligned}
 -i_1 - i_2 + i_3 &= 0; \\
 -R_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} - \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt &= \underline{e}_1 - \underline{e}_2; \\
 \frac{1}{C_3} \int i_3 dt + L_3 \frac{di_3}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + R_2 i_2 &= \underline{e}_3 + \underline{e}_2;
 \end{aligned}$$

б) в символической форме:

$$\begin{aligned}
 -\underline{I}_{1m} - \underline{I}_{2m} + \underline{I}_{3m} &= 0; \\
 -R_2 \underline{I}_{2m} - j\omega L_2 \underline{I}_{2m} - \frac{1}{j\omega C_2} \underline{I}_{2m} + j\omega L_1 \underline{I}_{1m} + \frac{1}{j\omega C_1} \underline{I}_{1m} &= \underline{E}_{1m} - \underline{E}_{2m}; \\
 \frac{1}{j\omega C_3} \underline{I}_{3m} + j\omega L_3 \underline{I}_{3m} + j\omega L_2 \underline{I}_{2m} + \frac{1}{j\omega C_2} \underline{I}_{2m} + R_2 \underline{I}_{2m} &= \underline{E}_{3m} + \underline{E}_{2m}.
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Комплексные сопротивления ветвей:

$$\underline{Z}_1 = j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right); \quad \underline{Z}_2 = R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right); \quad \underline{Z}_3 = j\left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right).$$

Перепишем уравнение (2.1) в виде:

$$-\underline{I}_{1m} - \underline{I}_{2m} + \underline{I}_{3m} = 0; \quad \underline{Z}_1 \underline{I}_{1m} - \underline{Z}_2 \underline{I}_{2m} = \underline{E}_{1m} - \underline{E}_{2m}; \quad \underline{Z}_2 \underline{I}_{2m} + \underline{Z}_3 \underline{I}_{3m} = \underline{E}_{3m} + \underline{E}_{2m}.$$

Для определения токов представим уравнения в матричной форме (1.2):

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ \underline{Z}_1 & -\underline{Z}_2 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_2 & \underline{Z}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{1m} \\ \underline{I}_{2m} \\ \underline{I}_{3m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{E}_{1m} - \underline{E}_{2m} \\ \underline{E}_{3m} + \underline{E}_{2m} \end{bmatrix}. \tag{2.2}$$

Определим сопротивления реактивных элементов:

$$X_{L1} = \omega L_1 = 2\pi f L_1 = 6,28 \cdot 1100 \cdot 24,6 \cdot 10^{-3} = 170,023 \text{ Ом, где } \omega = 2\pi f = 6911,5 \text{ с}^{-1};$$

$$X_{L2} = \omega L_2 = 6908 \cdot 1,74 \cdot 10^{-3} = 12,026 \text{ Ом; } X_{L3} = \omega L_3 = 6908 \cdot 0,87 \cdot 10^{-3} = 6,013 \text{ Ом; }$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1 \cdot 10^6}{6908 \cdot 2,01} = 71,983 \text{ Ом; } X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1 \cdot 10^6}{6908 \cdot 15,8} = 9,157 \text{ Ом; }$$

$$X_{C3} = \frac{1}{\omega C_3} = \frac{1 \cdot 10^6}{6908 \cdot 4,02} = 35,992 \text{ Ом.}$$

Запишем комплексные сопротивления для трех ветвей рассматриваемой схемы:

$$\underline{Z}_1 = jX_{L1} - jX_{C1} = j170,023 - j71,983 = j98,04 \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j(X_{L2} - X_{C2}) = 170 + j(12,026 - 9,157) = 170 + j2,869 \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_3 = jX_{L3} - jX_{C3} = j6,013 - j35,992 = -j29,979 \text{ Ом.}$$

Представим ЭДС источников в комплексной форме для амплитудных и действующих значений:

$$\underline{E}_{1m} = 56,5 \cos(85^\circ) + j56,5 \sin(85^\circ) = 4,881 + j55,787 = 56,5e^{j85^\circ} \text{ В;}$$

$$\underline{E}_{2m} = 80 \cos(107^\circ) + j80 \sin(107^\circ) = -23,39 + j76,504 = 80e^{j107^\circ} \text{ В;}$$

$$\underline{E}_{3m} = 125 \cos(-40^\circ) + j125 \sin(-40^\circ) = 95,756 - j80,348 = 125e^{-j40^\circ} \text{ В;}$$

$$\underline{E}_1 = \frac{4,881 + j55,787}{\sqrt{2}} = 3,451 + j39,447 \text{ В; } \underline{E}_2 = \frac{-23,39 + j76,504}{\sqrt{2}} = -16,54 + j54,1 \text{ В;}$$

$$\underline{E}_3 = \frac{95,756 - j80,348}{\sqrt{2}} = 67,71 - j56,815 \text{ В.}$$

Подставляя найденные значения  $\underline{Z}$  и  $\underline{E}_m$  в матрицу (2.2) и используя программную среду *MathCad*, определим комплексы токов ветвей в амплитудных и действующих значениях:

$$\underline{I}_{1m} = -0,066 - j1,447 \text{ А; } \underline{I}_1 = -0,047 - j1,023 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{2m} = 0,669 + j0,072 \text{ А; } \underline{I}_2 = 0,473 + j0,051 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{3m} = 0,603 - j1,374 \text{ А; } \underline{I}_3 = 0,426 - j0,972 \text{ А.}$$

Для определения показания ваттметра воспользуемся следующей формой записи:

$$P = \operatorname{Re} \left\{ \underline{U}_W \underline{I}_W^* \right\},$$

где  $\underline{U}_W$  – напряжение, на которое подключен ваттметр;  $\underline{I}_W^*$  – комплексно-сопряженный ток, протекающий через ваттметр;  $\operatorname{Re}$  – оператор, выделяющий из комплексного числа действительную часть.

Для определения  $\underline{U}_W$  запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для первого контура схемы:

$$\underline{Z}_1 \underline{I}_1 - \underline{U}_W = \underline{E}_1,$$

здесь напряжение  $\underline{U}_W$  имеет знак «-», т. к. ваттметр подключен на обратное напряжение.

$$\underline{U}_W = -\underline{E}_1 + \underline{Z}_1 \underline{I}_1 = -3,451 + j39,447 + (-0,047 - j1,023)j98,04 = 96,841 - j44,029 \text{ В.}$$

Для получения комплексно-сопряженного тока необходимо изменить знак при мнимой части тока  $\underline{I}_1$ . Ток через ваттметр протекает в прямом направлении, поэтому получим:

$$\underline{I}_W^* = \underline{I}_1 = \operatorname{Re}(-0,047) - j \operatorname{Im}(-1,447) = -0,047 + j1,023 \text{ А.}$$

$$P = \operatorname{Re}[(96,841 - j44,029)(-0,047 + j1,023)] = 40,515 \text{ Вт.}$$

Определим баланс мощности в рассматриваемой схеме:

$$S_{\text{ист}} = \underline{E}_1^* I_1 + \underline{E}_2^* I_2 + \underline{E}_3^* I_3;$$

$$S_{\text{ист}} = (3,451 + j39,447)(-0,047 + j1,023) + (-16,539 + j54,097)(0,473 - j0,051) + (67,709 - j56,815)(0,426 + j0,972) = 38,517 + j69,699 \text{ ВА.}$$

$$S_{\text{потр}} = \underline{Z}_1 |I_1|^2 + \underline{Z}_2 |I_2|^2 + \underline{Z}_3 |I_3|^2;$$

$$S_{\text{потр}} = (j98,04)1,024^2 + (170 + j2,869)0,476^2 + (-j29,979)1,061^2 = 38,517 + j69,699 \text{ ВА.}$$

Мощность  $S_{\text{ист}}$  равна мощности  $S_{\text{потр}}$ , а значит, расчет выполнен верно.

Топографическая диаграмма. Примем потенциал узла  $a$  равным нулю, т. е.  $\varphi_a = 0$  и определим соответствующие потенциалы характерных точек схемы (рис. 2.2):

$$\varphi_a = 0 \text{ В;}$$

$$\varphi_b = \varphi_a - jX_{C1} I_1 = -73,637 + j3,364 \text{ В;}$$

$$\varphi_c = \varphi_b - E_1 = (-73,637 + j3,364) - (3,451 + j39,447) = -77,088 - j36,083 \text{ В;}$$

$$\varphi_d = \varphi_c + jX_{L1} I_1 = (-77,088 - j36,083) + [(-0,047 + j1,023)j170,023] = 96,841 - j44,029 \text{ В;}$$

$$\varphi_e = \varphi_d - jX_{C3} I_3 = (96,841 - j44,029) - [(0,426 + j0,972)(-j35,992)] = 61,866 - j59,379 \text{ В;}$$

$$\varphi_f = \varphi_e - E_3 = (61,866 - j59,379) - (67,709 - j56,815) = -5,843 - j2,564 \text{ В;}$$

$$\varphi_a = \varphi_f + jX_{L3} I_3 = (-5,843 - j2,564) - [(0,426 + j0,972)j6,013] = 0 \text{ В.}$$

На основании рассчитанных потенциалов в различных точках схемы построена потенциальная диаграмма (рис. 2.3).

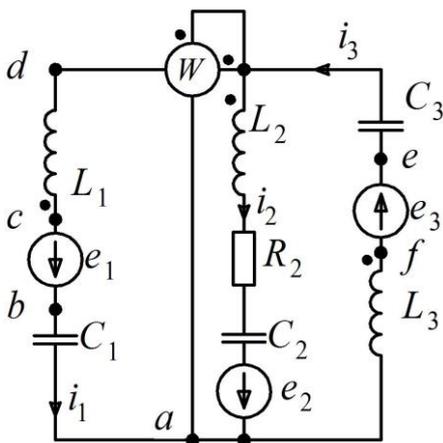


Рис. 2.2

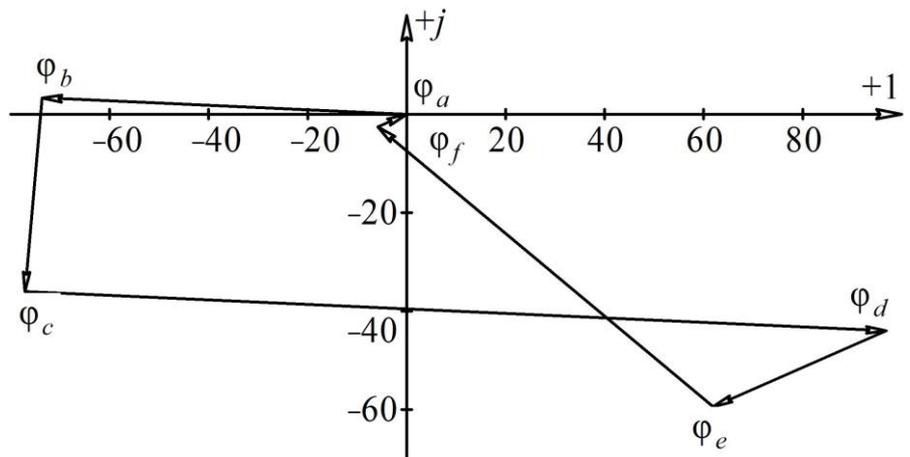


Рис. 2.3

Для построения графика изменения тока  $i_1$  по времени на первом этапе осуществим переход от показательной формы записи тока  $\underline{I}_{1m}$  к тригонометрической:

$$i_1(t) = \sqrt{(-0,066)^2 + (-1,447)^2} \sin\left(6911,5t + \arctg\left(\frac{-1,447}{-0,066}\right)\right) = 1,448 \sin(6911,5t - 92,623^\circ).$$

Задаваясь различными значениями времени, получим координаты, сведенные в табл. 2.1, для построения графика изменения тока  $i_1$  (рис. 2.4).

Таблица 2.1

$t \cdot 10^{-4}$	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4	4,4	4,8
$i_1(t)$	-1,45	-1,41	-1,27	-1,03	-0,71	-0,34	0,06	0,45	0,81	1,11	1,32	1,43	1,44
$t \cdot 10^{-4}$	5,2	5,6	6	6,4	6,8	7,2	7,6	8	8,4	8,8	9,2	9,6	10
$i_1(t)$	1,33	1,12	0,83	0,48	0,08	-0,31	0,69	1,01	-1,25	-1,4	-1,45	-1,38	-1,21

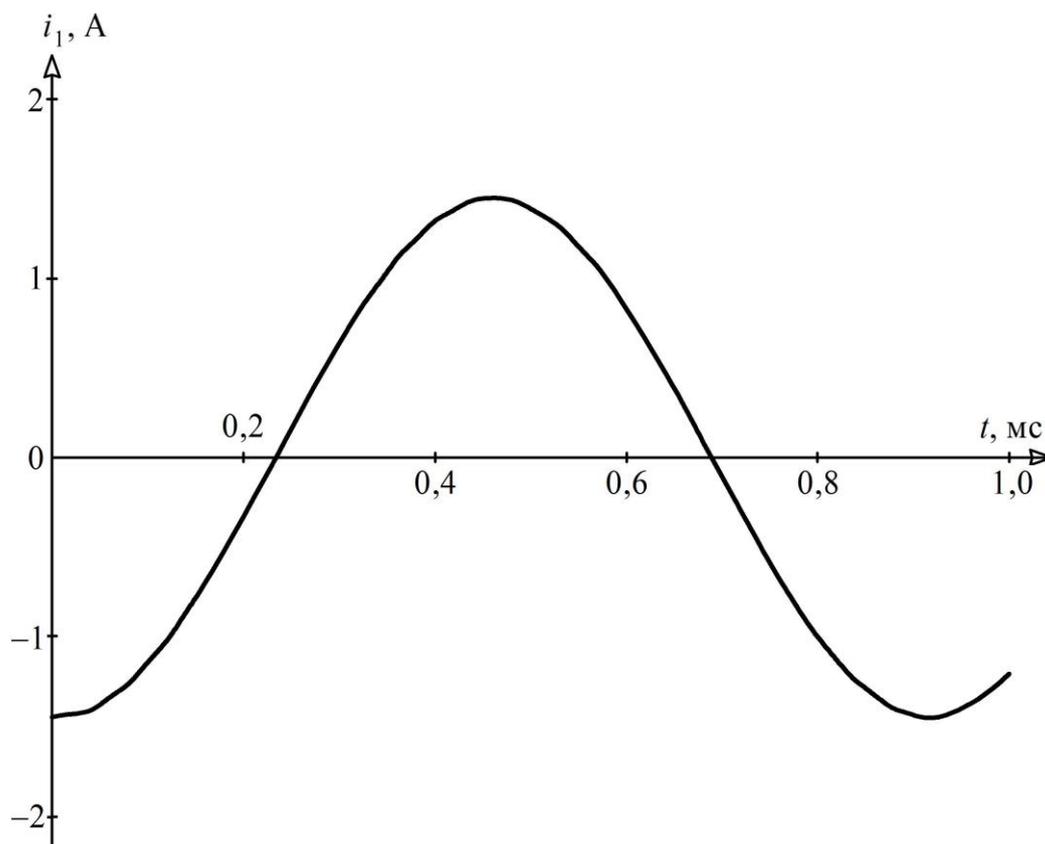


Рис. 2.4

**Задача № 3.** Расчет трехфазной цепи.

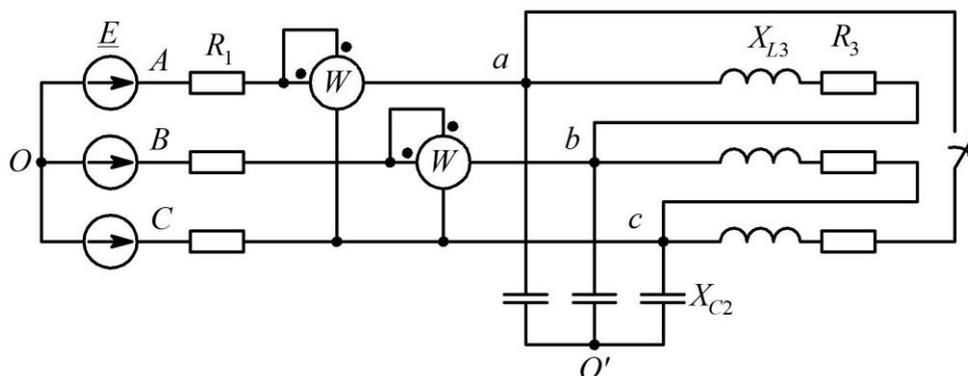


Рис. 3.1

Имеется трехфазная цепь (рис. 3.1), состоящая из симметричного трехфазного источника электрической энергии, к которому через линию электропередач ( $R_1$  и  $X_1$ ) подключены приемники, соединенные сложным образом. Электрическая схема имеет следующие параметры:  $U_{\text{л}} = 380$  В;  $R_1 = 6$  Ом;  $X_{C2} = 10$  Ом;  $R_3 = 9$  Ом;  $X_{L3} = 9$  Ом.

Электрическая цепь может работать в следующих режимах:

- симметричная нагрузка, при которой сопротивления всех фаз приемника одинаковы ( $Z_A = Z_B = Z_C$ );
- несимметричная нагрузка, при которой принудительно увеличено в три раза сопротивление фазы  $a$  (или  $ab$ ) третьего приемника;
- аварийный режим, осуществляемый за счет размыкания ключа (указанного на схеме). При этом меняется режим работы схемы.

Требуется для каждого режима:

1. Указать на схеме все необходимые для расчета цепи токи, напряжения и потенциалы;
2. Произвести расчет всех токов в схеме (фазные и линейные), а также линейные и фазные напряжения между узлами подключения нагрузки;
3. Используя метод «двух ваттметров» определить показания ваттметров, указанных на схеме, и суммарную мощность схемы;
4. Рассчитать активную мощность, потребляемую нагрузкой. При расчете не учитывается активное сопротивление линии электропередач. Сравнить полученное значение мощности со значением, полученным в п. 3 задания;
5. Рассчитать и построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

### Решение

*Симметричный режим работы цепи.* Согласно заданию укажем на схеме токи и напряжения, которые требуется определить. Поскольку источник и приемники симметричны, отобразим их на расчетной схеме по одной фазе  $A$  (рис. 3.2).

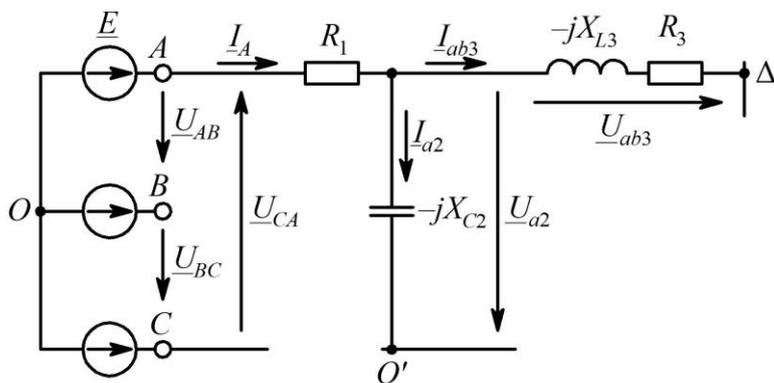


Рис. 3.2

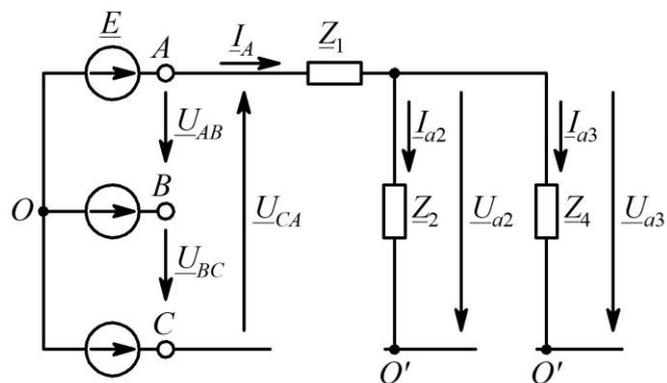


Рис. 3.3

Преобразуем третий приемник (рис. 3.1) из соединения «треугольник» в эквивалентную «звезду». Сопротивления крайних приемников  $\underline{Z}_2$  и  $\underline{Z}_4$  соединены параллельно (рис. 3.3).

Поскольку фазные сопротивления приемника  $\underline{Z}_3$  равны по условию, то по правилу преобразования можем записать:

$$\underline{Z}_4 = \frac{\underline{Z}_3}{3} = \frac{9 + j9}{3} = 3 + j3 = 4,24e^{j45^\circ} \text{ Ом.}$$

Заменяем сопротивления  $\underline{Z}_2$  и  $\underline{Z}_4$  соответствующим комплексным сопротивлением  $\underline{Z}_5$ , численное значение которого в показательной и алгебраической форме записи представляется в виде:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_5 &= \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_4}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_4} = \frac{-j10(3 + j3)}{-j10 + 3 + j3} = \frac{30 - j30}{3 - j7} = \frac{42,4e^{-j45^\circ}}{7,6e^{-j66,8^\circ}} = \\ &= 5,6e^{j21,8^\circ} = 5,2 + j2,1 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

В результате преобразований исходная схема для фазы  $A$  принимает вид, представленный на рис. 3.4, в котором эквивалентное полное комплексное сопротивление фазы  $A$ :

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_4 = 6 + (5,2 + j2,1) = 11,2 + j2,1 = 11,4e^{j10,6^\circ} \text{ Ом.}$$

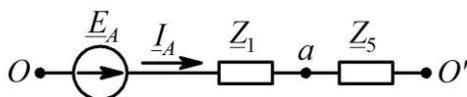


Рис. 3.4

Согласно заданию источник – симметричный генератор с линейным напряжением. Поэтому комплексы линейных напряжений источника определяются выражениями:

$$\underline{U}_{AB} = 380e^{j30^\circ} \text{ В; } \underline{U}_{BC} = 380e^{-j90^\circ} \text{ В; } \underline{U}_{CA} = 380e^{j150^\circ} \text{ В.}$$

Поскольку источник соединен по схеме «звезда», его фазные ЭДС имеют значения:

$$\underline{E}_A = 220e^{j0^\circ} \text{ В; } \underline{E}_B = 220e^{-j120^\circ} \text{ В; } \underline{E}_C = 220e^{j120^\circ} \text{ В.}$$

По заданию нагрузка симметричная  $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$ , следовательно, напряжение смещения нейтрали равно нулю  $\underline{U}_{O'O} = 0$  В и учитывая, что для соединения «звезда»  $\underline{I}_л = \underline{I}_\phi$ , находим соответствующие токи:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_a} = \frac{220e^{j0^\circ}}{11,4e^{j10,6^\circ}} = 19,3e^{-j10,6^\circ} = 19 - j3,6 \text{ А;} \\ \underline{I}_B &= \frac{\underline{E}_B}{\underline{Z}_b} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{11,4e^{j10,6^\circ}} = 19,3e^{-j130,6^\circ} = -12,6 - j14,7 \text{ А;} \\ \underline{I}_C &= \frac{\underline{E}_C}{\underline{Z}_c} = \frac{220e^{j120^\circ}}{11,4e^{j10,6^\circ}} = 19,3e^{j109,4^\circ} = -6,4 + j18,2 \text{ А.} \end{aligned}$$

Проверка:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 19 - j3,6 - 12,6 - j14,7 - 6,4 + j18,2 = 0 - j0,1 \approx 0 \text{ А.}$$

Находим фазные и линейные напряжения приведенного приемника:

$$\underline{U}_{a0'} = \underline{I}_A \underline{Z}_5 = 19,3e^{-j10,6^\circ} \cdot 5,6e^{j21,8^\circ} = 108,1e^{j11,2^\circ} = 106,4 + j21,2 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{b0'} = \underline{I}_B \underline{Z}_5 = 19,3e^{-j130,6^\circ} \cdot 5,6e^{j21,8^\circ} = 108,1e^{-j108,8^\circ} = -34,7 - j102,9 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{c0'} = \underline{I}_C \underline{Z}_5 = 19,3e^{j109,4^\circ} \cdot 5,6e^{j21,8^\circ} = 108,1e^{j131,2^\circ} = -71,5 + j81,2 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{a0'} - \underline{U}_{b0'} = 106,4 + j21,2 + 34,7 + j102,9 = 141,1 + j124,1 = 187,7e^{j41,3^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{b0'} - \underline{U}_{c0'} = -34,7 - j102,9 + 71,5 - j81,2 = 36,8 - j184,1 = 187,7e^{-j78,7^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{c0'} - \underline{U}_{a0'} = -71,5 + j81,2 - 106,4 - j21,2 = -177,9 + j60 = 187,7e^{j161,4^\circ} \text{ В}.$$

Проверка:  $\underline{U}_{a0'} + \underline{U}_{b0'} + \underline{U}_{c0'} = \underline{U}_{ab} + \underline{U}_{bc} + \underline{U}_{ca} \approx 0 \text{ В}.$

Определим токи во втором приемнике согласно заданной схеме (рис. 3.1):

$$\underline{I}_{a2} = \frac{\underline{U}_{a0'}}{\underline{Z}_2} = \frac{108,1e^{j11,2^\circ}}{10e^{-j90^\circ}} = 10,8e^{-j101,2^\circ} = -2,1 + j10,6 \text{ А};$$

$$\underline{I}_{b2} = \frac{\underline{U}_{b0'}}{\underline{Z}_2} = \frac{108,1e^{-j108,8^\circ}}{10e^{-j90^\circ}} = 10,8e^{-j18,8^\circ} = 10,3 - j3,5 \text{ А};$$

$$\underline{I}_{c2} = \frac{\underline{U}_{c0'}}{\underline{Z}_2} = \frac{108,1e^{j131,2^\circ}}{10e^{-j90^\circ}} = 10,8e^{-j138,8^\circ} = -8,1 - j7,2 \text{ А}.$$

Находим линейные токи в третьем приемнике:

$$\underline{I}_{a3} = \underline{I}_A - \underline{I}_{a2} = 19 - j3,6 + 2,1 - j10,6 = 21,1 - j14,2 = 25,5e^{-j33,9^\circ} \text{ А};$$

$$\underline{I}_{b3} = \underline{I}_B - \underline{I}_{b2} = -12,6 - j14,7 - 10,3 + j3,5 = -21,9 - j11,2 = 25,5e^{-j153,9^\circ} \text{ А};$$

$$\underline{I}_{c3} = \underline{I}_C - \underline{I}_{c2} = -6,4 + j18,2 + 8,1 + j7,2 = 1,7 + j25,4 = 25,5e^{j86,2^\circ} \text{ А}.$$

Определим фазные токи третьего приемника:

$$\underline{I}_{ab3} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_3} = \frac{187,7e^{j41,3^\circ}}{12,7e^{j45^\circ}} = 14,8e^{-j3,7^\circ} = 14,7 - j0,9 \text{ А};$$

$$\underline{I}_{bc3} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_3} = \frac{187,7e^{-j78,7^\circ}}{12,7e^{j45^\circ}} = 14,8e^{-j123,7^\circ} = -8,2 - j12,3 \text{ А};$$

$$\underline{I}_{ca3} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_3} = \frac{187,7e^{j161,4^\circ}}{12,7e^{j45^\circ}} = 14,8e^{j116,4^\circ} = -6,6 + j13,2 \text{ А}.$$

Находим фазные напряжения в третьем приемнике:

$$\underline{U}_{a3} = \underline{I}_{a3} \underline{Z}_3 = 25,5e^{-j33,9^\circ} \cdot 12,7e^{j45^\circ} = 323,9e^{j11,1^\circ} = 317,7 + j62,1 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{b3} = \underline{I}_{b3} \underline{Z}_3 = 25,5e^{-j153,9^\circ} \cdot 12,7e^{j45^\circ} = 323,9e^{-j108,9^\circ} = -105,3 - j306,9 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{c3} = \underline{I}_{c3} \underline{Z}_3 = 25,5e^{j86,2^\circ} \cdot 12,7e^{j45^\circ} = 323,9e^{j131,2^\circ} = -213,3 + j243,9 \text{ В}.$$

Проверка: по второму закону Кирхгофа имеем  $\underline{E}_A - \underline{I}_A R_1 - \underline{U}_{a0'} = 0,$

$$220 - (19 - j3,6) \cdot 6 - (106,4 + j21,2) = -0,4 + j0,4 \approx 0 \text{ В}.$$

Погрешность не превышает 1 %.

Определим показания ваттметров.

Ваттметр фазы  $A$ :

$$P_{W1} = \operatorname{Re} \left[ (-\underline{U}_{ca}) \underline{I}_A^* \right] = \operatorname{Re} \left[ -(-177,9 + j60)(19 + j3,6) \right] = \operatorname{Re} [3596,1 - j499,6] = 3596,1 \text{ Вт.}$$

Ваттметр фазы  $B$ :

$$P_{W2} = \operatorname{Re} \left[ \underline{U}_{bc} \underline{I}_B^* \right] = \operatorname{Re} \left[ (36,8 - j184,1)(-12,6 + j14,7) \right] = \operatorname{Re} [2242,6 + j2860,6] = 2242,6 \text{ Вт.}$$

Мощность, потребляемая приемниками:

$$P_W = P_{W1} + P_{W2} = 3596,1 + 2242,6 = 5838,7 \text{ Вт.}$$

Активная мощность, потребляемая нагрузкой:

$$P_H = |\underline{I}_{ab3}|^2 R_3 + |\underline{I}_{bc3}|^2 R_3 + |\underline{I}_{ca3}|^2 R_3 = 3|\underline{I}_{ab3}|^2 R_3 = 3 \cdot 14,7^2 \cdot 9 = 5834,4 \text{ Вт.}$$

Определим значения потенциальных точек цепи фазы  $A$ . Значение потенциала нулевой точки источника принимаем равным нулю  $\underline{\varphi}_0 = 0$  В и совмещаем его с началом координат комплексной плоскости:

$$\underline{\varphi}_A = \underline{\varphi}_0 + \underline{E}_A = 0 + 220 = 220 \text{ В;}$$

$$\underline{\varphi}_a = \underline{\varphi}_A - R_1 \underline{I}_A = 220 - 6 \times (19 - j3,6) = 106 + j21,6 \text{ В;}$$

$$\underline{\varphi}_{01} = \underline{\varphi}_a - (-jX_{C2}) \underline{I}_{a2} = 106 + j21,6 - (-j10) \times (-2,1 + j10,6) = 0 + j0,6 \approx 0 \text{ В;}$$

$$\underline{\varphi}_B = \underline{\varphi}_0 + \underline{E}_B = 0 - 110 - j190,5 = -110 - j190,5 \text{ В;}$$

$$\underline{\varphi}_b = \underline{\varphi}_B - R_1 \underline{I}_B = -110 - j190,5 - 6 \times (-12,6 - j14,7) = -34,4 - j102,3 \text{ В;}$$

$$\underline{\varphi}_{01} = \underline{\varphi}_b - (-jX_{C2}) \underline{I}_{b2} = -34,4 - j102,3 - (-j10) \times (10,3 - j3,5) = 0,6 + j0,7 \approx 0 \text{ В;}$$

$$\underline{\varphi}_C = \underline{\varphi}_0 + \underline{E}_C = 0 - 110 + j190,5 = -110 + j190,5 \text{ В;}$$

$$\underline{\varphi}_c = \underline{\varphi}_C - R_1 \underline{I}_C = -110 + j190,5 - 6 \times (-6,4 + j18,2) = -71,6 + j81,3 \text{ В;}$$

$$\underline{\varphi}_{01} = \underline{\varphi}_c - (-jX_{C2}) \underline{I}_{c2} = -88,4 + j143,7 + j10 \times (-14,3 - j8,8) = -0,4 + j0,7 \approx 0 \text{ В.}$$

Построим векторную диаграмму напряжений (рис. 3.5) и токов (рис. 3.6) для каждой фазы.

*Несимметричный режим работы цепи.* Увеличим значение сопротивления фазы  $ab$  третьего приемника  $\underline{Z}_3$  в 3 раза и определим его значение. Комплексное сопротивление третьего приемника включает последовательное соединение катушки индуктивности  $L_3$  и резистора  $R_3$ :  $\underline{Z}'_3 = 3(R_3 + jX_{L3}) = 27 + j27$  Ом.

Преобразуем нагрузку, соединенную «звездой», в эквивалентный «треугольник». Поскольку емкостные сопротивления фаз приемника  $X_{C2}$  равны по условию, то по правилу преобразования можем записать:

$$\underline{Z}_2 = -3jX_{C2} = -j30 \text{ Ом.}$$

В результате участок цепи, включающий в себя сопротивления второго и третьего потребителей, преобразуется в схему (рис. 3.7).

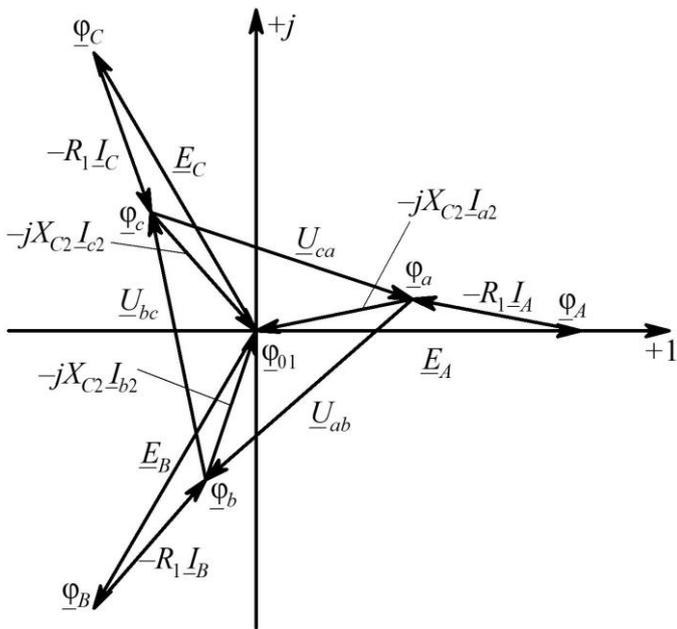


Рис. 3.5

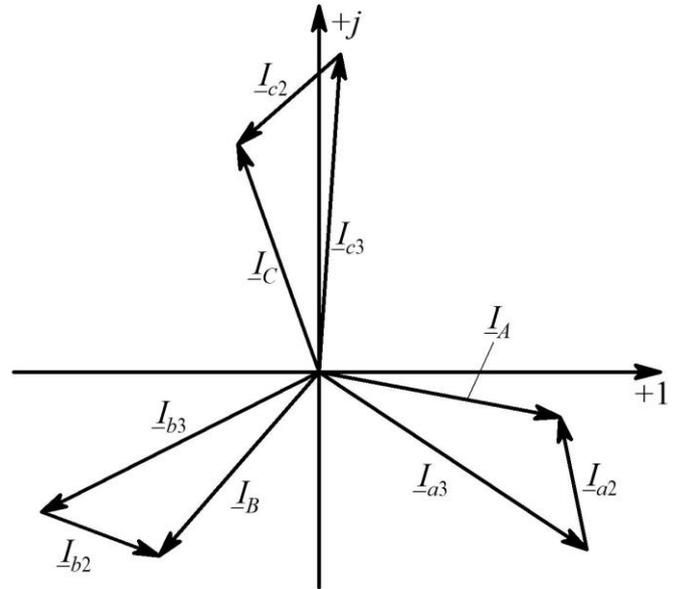


Рис. 3.6

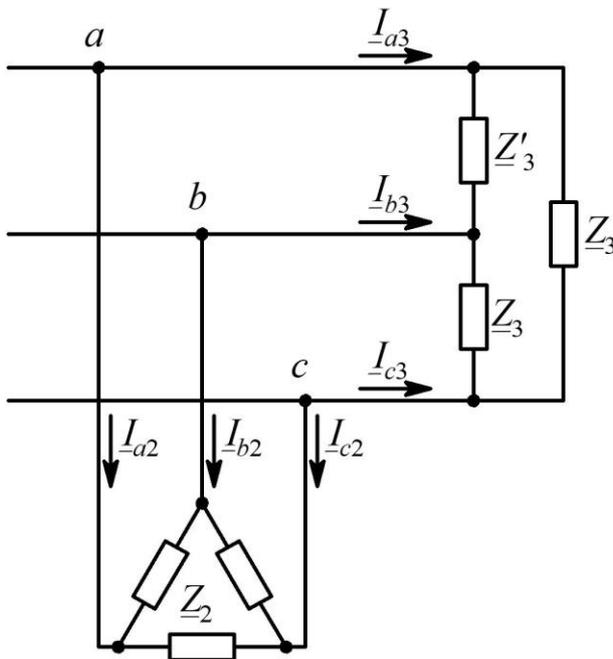


Рис. 3.7

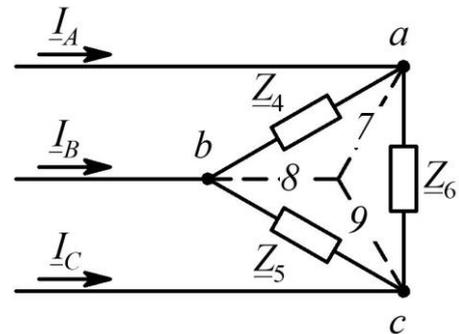


Рис. 3.8

Соединенные параллельно сопротивления  $\underline{Z}_2$  и  $\underline{Z}_3$  между узлами  $a$  и  $b$ ,  $a$  и  $c$  заменим соответствующими комплексными сопротивлениями  $\underline{Z}_4 = \underline{Z}_5$ . Численные их значения в показательной и алгебраической формах записи представляются в виде:

$$\underline{Z}_4 = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}'_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}'_3} = \frac{-j30(27 + j27)}{-j30 + 27 + j27} = 42,1e^{-j38,6^\circ} = 32,9 - j26,3 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_5 = \underline{Z}_6 = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{-j30(9 + j9)}{-j30 + 9 + j9} = 16,7e^{j21,8^\circ} = 15,5 + j6,2 \text{ Ом}.$$

Получившийся новый «треугольник» преобразуем в эквивалентную «звезду» (рис. 3.8), в лучах которой будут находиться соответствующие комплексные сопротивления  $\underline{Z}_7$ ,  $\underline{Z}_8$  и  $\underline{Z}_9$ , численные значения которых находим по выражениям:

$$\underline{Z}_7 = \underline{Z}_8 = \frac{\underline{Z}_4 \underline{Z}_6}{\underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6} = \frac{42,1e^{-j38,6^\circ} \times 16,7e^{j21,8^\circ}}{32,9 - j26,3 + 2 \cdot (15,5 + j6,2)} = 10,7e^{-j4,8^\circ} = 10,7 - j0,9 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_9 = \frac{\underline{Z}_5 \underline{Z}_6}{\underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6} = \frac{16,7e^{j21,8^\circ} \times 16,7e^{j21,8^\circ}}{32,9 - j26,3 + 2 \cdot (15,5 + j6,2)} = 4,2e^{-j55,6^\circ} = 2,4 + j3,5 \text{ Ом}.$$

В результате выполненных преобразований исходная схема (рис. 3.7) принимает вид (рис. 3.9).

При этом сопротивления фаз принимают значения:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_A = \underline{Z}_B &= R_1 + \underline{Z}_7 = 6 + 10,7 - j0,9 = \\ &= 16,7 - j0,9 = 16,7e^{-j3,1^\circ} \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_C &= R_1 + \underline{Z}_9 = 6 + 2,4 + j3,5 = \\ &= 8,4 + j3,5 = 9,1e^{j22,6^\circ} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Определим проводимость фаз:

$$\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_A} = \frac{1}{16,7 - j0,9} = 0,06 + j0,003 \text{ См};$$

$$\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C} = \frac{1}{8,4 + j3,5} = 0,101 - j0,042 \text{ См}.$$

Поскольку  $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B$ , то напряжение смещения нейтрали  $\overline{U}_{O'O}$  можно подсчитать:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{O'O} &= \frac{\underline{Y}_A \underline{E}_A + \underline{Y}_B \underline{E}_B + \underline{Y}_C \underline{E}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \frac{\underline{Y}_A (\underline{E}_A + \underline{E}_B) + \underline{Y}_C \underline{E}_C}{2\underline{Y}_A + \underline{Y}_C} = \\ &= \frac{(0,06 + j0,003) \cdot (220 - 110 - j190,5) + (0,101 - j0,042) \cdot (-110 + j190,5)}{2(0,06 + j0,003) + (0,101 - j0,042)} = \\ &= 8,7 + j60,2 = 60,8e^{j81,8^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

Находим соответствующие фазные токи:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A - \underline{U}_{O'O}}{\underline{Z}_A} = \frac{220 - 8,7 - j60,2}{16,7e^{-j3,1^\circ}} = 13,1e^{-j12,8^\circ} = 12,8 - j2,9 \text{ А};$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{E}_B - \underline{U}_{O'O}}{\underline{Z}_B} = \frac{-110 - j190,5 - 8,7 - j60,2}{16,7e^{-j3,1^\circ}} = 16,6e^{-j112,2^\circ} = -6,3 - j15,4 \text{ А};$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{E}_C - \underline{U}_{O'O}}{\underline{Z}_C} = \frac{-110 + j190,5 - 8,7 - j60,2}{9,1e^{j22,6^\circ}} = 19,3e^{j109,7^\circ} = -6,5 + j18,2 \text{ А}.$$

Проверка:  $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0 - j0,1 \approx 0 \text{ А}$ .

Находим фазные напряжения приведенного приемника:

$$\underline{U}_{a0} = \underline{I}_A \underline{Z}_7 = 13,1e^{-j12,8^\circ} \times 10,7e^{-j4,8^\circ} = 141e^{-j17,6^\circ} = 134,4 - j42,6 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{b0} = \underline{I}_B \underline{Z}_8 = 16,6e^{-j112,2^\circ} \times 10,7e^{-j4,8^\circ} = 178,7e^{-j117,1^\circ} = -81,3 - j159,1 \text{ В};$$

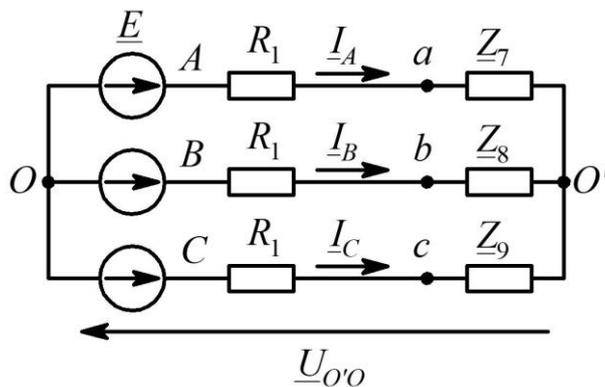


Рис. 3.9

$$\underline{U}_{c0} = \underline{I}_C \underline{Z}_9 = 19,3e^{j109,7^\circ} \times 4,2e^{-j55,6^\circ} = 82e^{-j165,2^\circ} = -79,3 + j20,9 \text{ В.}$$

Соответствующие им линейные напряжения приведенного приемника:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{a0} - \underline{U}_{b0} = 134,4 - j42,6 - (-81,3 - j159,1) = 215,7 + j116,5 = 245,2e^{j28,4^\circ} \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{b0} - \underline{U}_{c0} = -81,3 - j159,1 - (-79,3 + j20,9) = -2 - j180 = 180e^{-j90,6^\circ} \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{c0} - \underline{U}_{a0} = -79,3 + j20,9 - (134,4 - j42,6) = -213,7 + j63,5 = 222,3e^{j163,5^\circ} \text{ В.}$$

Фазные токи в «треугольнике» согласно заданной схеме (рис. 3.7):

$$\underline{I}_{ab3} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}'_3} = \frac{245,2e^{j28,4^\circ}}{38,2e^{j45^\circ}} = 6,5e^{-j16,2^\circ} = 6,2 - j1,8 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{bc3} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_3} = \frac{180e^{-j90,6^\circ}}{12,7e^{j45^\circ}} = 14,1e^{-j135,6^\circ} = -10,1 - j9,9 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{ca3} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_3} = \frac{222,3e^{j163,5^\circ}}{12,7e^{j45^\circ}} = 17,5e^{j118,3^\circ} = -8,3 + j15,4 \text{ А.}$$

Находим токи в линиях ко второму приемнику:

$$\underline{I}_{a3} = \underline{I}_{ab3} - \underline{I}_{ca3} = 6,2 - j1,8 - (-8,3 + j15,4) = 14,5 - j17,2 = 22,5e^{-j49,9^\circ} \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{b3} = \underline{I}_{bc3} - \underline{I}_{ab3} = -10,1 - j9,9 - (6,2 - j1,8) = -16,3 - j8,1 = 18,2e^{-j153,6^\circ} \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{c3} = \underline{I}_{ca3} - \underline{I}_{bc3} = -8,3 + j15,4 - (-10,1 - j9,9) = 1,8 + j25,3 = 25,4e^{j85,9^\circ} \text{ А.}$$

Фазные токи в «звезде»:

$$\underline{I}_{a2} = \underline{I}_A - \underline{I}_{a3} = 12,8 - j2,9 - (14,5 - j17,2) = -1,7 + j14,3 = 14,4e^{j96,8^\circ} \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{b2} = \underline{I}_B - \underline{I}_{b3} = -6,3 - j15,4 - (-16,3 - j8,1) = 10 - j7,3 = 12,4e^{-j36,1^\circ} \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{c2} = \underline{I}_C - \underline{I}_{c3} = -6,5 + j18,2 - (1,8 + j25,3) = -8,3 - j7,1 = 10,9e^{-j139,5^\circ} \text{ А.}$$

Проверка:  $\underline{I}_{a2} + \underline{I}_{b2} + \underline{I}_{c2} = 0 - j0,1 \approx 0 \text{ А; } \underline{I}_{a3} + \underline{I}_{b3} + \underline{I}_{c3} = 0 \text{ А.}$

Определим показания ваттметров.

Ваттметр фазы *A*:

$$P_{W1} = \text{Re}[(\underline{U}_{ca})\underline{I}_{A}^*] = \text{Re}[(-213,7 + j63,5)(12,8 + j2,9)] = \text{Re}[2919,5 - j193,1] = 2919,5 \text{ Вт.}$$

Ваттметр фазы *B*:

$$P_{W2} = \text{Re}[\underline{U}_{bc}\underline{I}_{B}^*] = \text{Re}[(-2 - j180)(-6,3 + j15,4)] = \text{Re}[2784,6 + j1103,2] = 2784,6 \text{ Вт.}$$

Мощность, отдаваемая источниками:

$$P_W = P_{W1} + P_{W2} = 2919,5 - 2784,6 = 5704,1 \text{ Вт.}$$

Активная мощность, потребляемая нагрузкой:

$$\begin{aligned} P_H &= 3R_3|\underline{I}_{ab3}|^2 + R_3|\underline{I}_{bc3}|^2 + R_3|\underline{I}_{ca3}|^2 = 3R_3|\underline{I}_{ab3}|^2 + R_3(|\underline{I}_{bc3}|^2 + |\underline{I}_{ca3}|^2) = \\ &= 27|6,2 - j1,8|^2 + 9(|-10,1 - j9,9|^2 + |-8,3 - j15,4|^2) = \\ &= 27 \cdot 6,6^2 + 9(14,1^2 + 17,5^2) = 5680 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Найдем значения потенциальных точек и построим топографическую диаграмму напряжений (рис. 3.10) и токов (рис. 3.11). Принимаем  $\underline{\varphi}_0 = 0 \text{ В}$  – нулевая точка генератора:

$$\begin{aligned} \underline{\varphi}_A &= \underline{\varphi}_0 + \underline{E}_A = 0 + 220 = 220 \text{ B}; \\ \underline{\varphi}_a &= \underline{\varphi}_A - R_1 \underline{I}_A = 220 - 6 \times (12,8 - j2,9) = 143,2 + j17,4 \text{ B}; \\ \underline{\varphi}_{01} &= \underline{\varphi}_a - (-jX_{C2}) \underline{I}_{a2} = 143,2 + j17,4 - (-j10) \times (-1,7 + j14,3) = 0,2 + j0,4 \approx 0 \text{ B}; \\ \underline{\varphi}_B &= \underline{\varphi}_0 + \underline{E}_B = 0 - 110 - j190,5 = -110 - j190,5 \text{ B}; \\ \underline{\varphi}_b &= \underline{\varphi}_B - R_1 \underline{I}_B = -110 - j190,5 - 6 \times (-6,3 - j15,4) = -72,2 - j98,1 \text{ B}; \\ \underline{\varphi}_{01} &= \underline{\varphi}_b - (-jX_{C2}) \underline{I}_{b2} = -72,2 - j98,1 - (-j10) \times (10 - j7,3) = 0,8 + j1,9 \approx 0 \text{ B}; \\ \underline{\varphi}_C &= \underline{\varphi}_0 + \underline{E}_C = 0 - 110 + j190,5 = -110 + j190,5 \text{ B}; \\ \underline{\varphi}_c &= \underline{\varphi}_C - R_1 \underline{I}_C = -110 + j190,5 - 6 \times (-6,5 + j18,2) = -71 + j81,3 \text{ B}; \\ \underline{\varphi}_{01} &= \underline{\varphi}_c - (-jX_{C2}) \underline{I}_{c2} = -71 + j81,3 + j10 \times (-8,3 - j7,1) = 0 - j1,7 \approx 0 \text{ B}. \end{aligned}$$

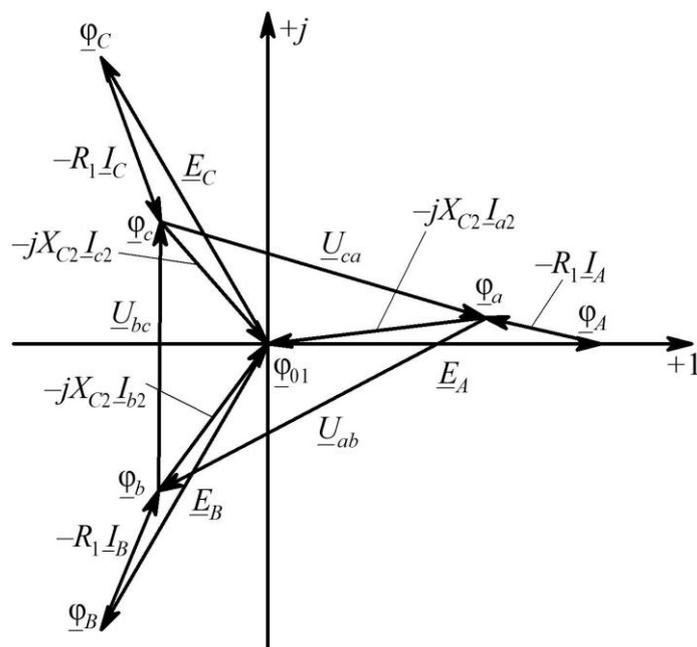


Рис. 3.10

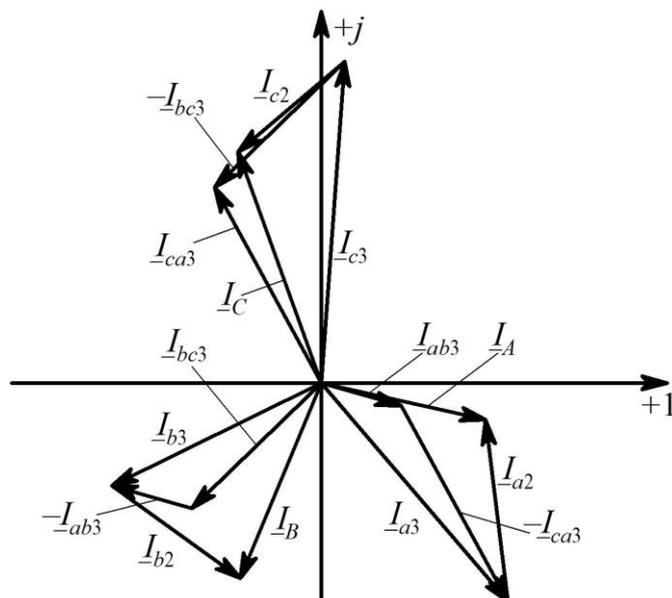


Рис. 3.11

Аварийный режим работы схемы (ключ разомкнут). Преобразуем нагрузку (второй приемник), соединенную «звездой» в эквивалентный «треугольник». Поскольку емкостные сопротивления фаз этого приемника  $X_{C2}$  равны по условию, то по правилу преобразования можем записать:

$$\underline{Z}_4 = -j3X_{C2} = -j30 \text{ Ом.}$$

Найдем значение эквивалентного комплексного сопротивления третьего приемника, состоящего из последовательного соединения катушки индуктивности  $L_3$  и резистора  $R_3$ :

$$\underline{Z}_3 = R_3 + jX_{L3} = 9 + j9 \text{ Ом.}$$

В результате участок цепи, включающий в себя второй и третий потребители, принимает вид схемы, приведенной на рис. 3.12.

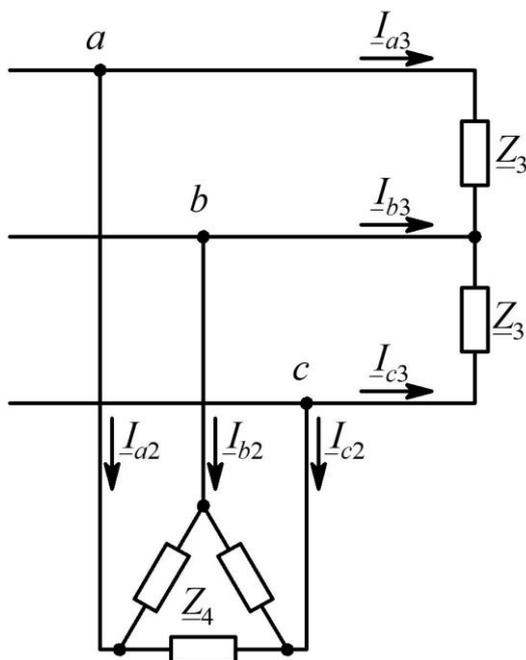


Рис. 3.12

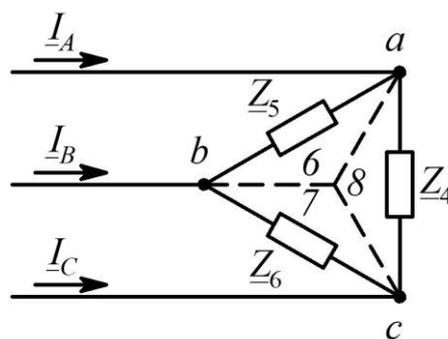


Рис. 3.13

Соединенные параллельно сопротивления  $\underline{Z}_3$  и  $\underline{Z}_4$  между узлами  $a$  и  $b$ ;  $b$  и  $c$  заменим соответствующими комплексными сопротивлениями  $\underline{Z}_5 = \underline{Z}_6$ , численные значения которых в показательной и алгебраической формах записи представляются в виде:

$$\underline{Z}_5 = \underline{Z}_6 = \frac{\underline{Z}_4 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_4 + \underline{Z}_3} = \frac{-j30(9 + j9)}{-j30 + 9 + j9} = \frac{381,8e^{-j45^\circ}}{22,8e^{-j66,8^\circ}} = 16,7e^{j21,8^\circ} = 15,5 + j6,2 \text{ Ом.}$$

Получившийся новый «треугольник» преобразуем в эквивалентную «звезду», в лучах которой будут находиться соответствующие комплексные сопротивления  $\underline{Z}_6$ ,  $\underline{Z}_7$  и  $\underline{Z}_8$  (рис. 3.13), численные значения которых находим по выражениям:

$$\underline{Z}_7 = \frac{\underline{Z}_5 \underline{Z}_6}{\underline{Z}_5 + \underline{Z}_6 + \underline{Z}_4} = \frac{16,7e^{j21,8^\circ} \times 16,7e^{j21,8^\circ}}{2(15,5 + j6,2) - j30} = \frac{278,89e^{j43,6^\circ}}{35,6e^{-j29,6^\circ}} = 7,83e^{j73,2^\circ} = 2,26 + j7,5 \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_8 = \underline{Z}_6 = \frac{\underline{Z}_5 \underline{Z}_4}{\underline{Z}_5 + \underline{Z}_6 + \underline{Z}_4} = \frac{16,7e^{j21,8^\circ} \times 30e^{-j90^\circ}}{2(15,5 + j6,2) - j30} = \frac{501e^{-j68,2^\circ}}{35,6e^{-j29,6^\circ}} = 14,1e^{-j38,6^\circ} = 11,1 - j8,8 \text{ Ом.}$$

В результате выполненных преобразований исходная схема (рис. 3.12) принимает вид (рис. 3.14).

Определим сопротивления фаз преобразованной схемы:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_A &= R_1 + \underline{Z}_6 = 6 + 11,1 - j8,8 = \\ &= 17,1 - j8,8 = 19,23e^{-j27,2^\circ} \text{ Ом;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_B &= R_1 + \underline{Z}_7 = 6 + 2,26 + j7,5 = \\ &= 8,26 + j7,5 = 11,2e^{j42,2^\circ} \text{ Ом;} \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_C = \underline{Z}_A = 17,1 - j8,8 = 19,23e^{-j27,2^\circ} \text{ Ом.}$$

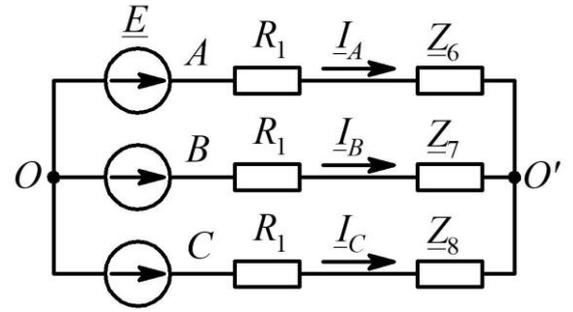


Рис. 3.14

Поскольку  $\underline{Y}_A = \underline{Y}_C$ , то напряжение смещения нейтрали  $\dot{U}_{O'O}$  можно определить:

$$\underline{U}_{O'O} = \frac{\underline{Y}_A(\underline{E}_A + \underline{E}_C) + \underline{Y}_B \underline{E}_B}{2\underline{Y}_A + \underline{Y}_B}.$$

Учитывая, что  $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$ , тогда последнее выражение принимает вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{O'O} &= \frac{\underline{E}_B(\underline{Y}_B - \underline{Y}_A)}{2\underline{Y}_A + \underline{Y}_B} = \frac{\underline{E}_B(\underline{Z}_A - \underline{Z}_B)}{2\underline{Z}_B + \underline{Z}_A} = \frac{220e^{-j120^\circ}(8,84 - j16,3)}{33,62 + j6,2} = \\ &= 119,3e^{-j12^\circ} = -116,7 + j24,8 \text{ В.} \end{aligned}$$

Находим соответствующие фазные токи:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A - \underline{U}_{O'O}}{\underline{Z}_A} = \frac{220 + 116,7 - j24,8}{19,23e^{-j27,2^\circ}} = 17,61e^{j23,1^\circ} = 16,2 + j6,9 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{E}_B - \underline{U}_{O'O}}{\underline{Z}_B} = \frac{-110 - j190,5 + 116,7 - j24,8}{11,2e^{j42,2^\circ}} = -19,36e^{j49,4^\circ} = -12,6 - j14,7 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{E}_C - \underline{U}_{O'O}}{\underline{Z}_C} = \frac{-110 + j190,5 + 116,7 - j24,8}{19,23e^{-j27,2^\circ}} = 8,59e^{-j65,2^\circ} = -3,6 + j7,8 \text{ А.}$$

Проверка:  $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$ .

Находим фазные и линейные напряжения приведенного приемника:

$$\underline{U}_{a0} = \underline{Z}_6 \underline{I}_A = 14,1e^{-j38,6^\circ} \times 17,61e^{j23,1^\circ} = 249,4e^{-j15,3^\circ} = 240,5 - j66 \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{b0} = \underline{Z}_7 \underline{I}_B = 7,83e^{j73,2^\circ} \times (-19,36e^{j49,4^\circ}) = 151,7e^{-j57,4^\circ} = 81,8 - j127,7 \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{c0} = \underline{Z}_8 \underline{I}_C = 14,1e^{-j38,6^\circ} \times 8,59e^{-j65,2^\circ} = 121,7e^{j76,4^\circ} = 28,7 + j118,3 \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{a0} - \underline{U}_{b0} = 240,5 - j66 - 81,8 + j127,7 = 158,7 + j61,7 = 170,3e^{j21,2^\circ} \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{b0} - \underline{U}_{c0} = 81,8 - j127,7 - 28,7 - j118,3 = 51,3 - j246 = 251,7e^{-j77,8^\circ} \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{c0} - \underline{U}_{a0} = 28,7 + j118,3 - 240,5 + j66 = -211,8 + j184,3 = 280,8e^{-j41^\circ} \text{ В.}$$

Ток в третьем приемнике, согласно заданной схеме (рис. 3.12):

$$\underline{I}_{ab} = \frac{U_{ab}}{\underline{Z}_3} = \frac{170,3e^{j21,2^\circ}}{12,7e^{j45^\circ}} = 13,4e^{-j23,8^\circ} = 12,2 - j5,4 \text{ A};$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{U_{bc}}{\underline{Z}_3} = \frac{251,7e^{-j77,8^\circ}}{12,7e^{j45^\circ}} = 19,8e^{-j122,8^\circ} = -10,7 - j16,6 \text{ A};$$

$$\underline{I}_{ca} = 0 \text{ A} - \text{ по условию задачи (обрыв).}$$

Находим линейные токи второго приемника:

$$\underline{I}_{a3} = \underline{I}_{ab} = 12,2 - j5,4 = 13,4e^{-j23,8^\circ} \text{ A},$$

$$\underline{I}_{c3} = -\underline{I}_{bc} = 10,7 + j16,6 = 19,8e^{-j57,2^\circ} \text{ A},$$

$$\underline{I}_{b3} = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = -10,7 - j16,6 - 12,2 + j5,4 = -22,9 - j11,2 = 25,5e^{j26^\circ} \text{ A},$$

$$\underline{I}_{a2} = \underline{I}_A - \underline{I}_{a3} = 16,2 + j6,9 - 12,2 + j5,4 = 4 + j12,3 = 12,9e^{j72^\circ} \text{ A},$$

$$\underline{I}_{b2} = \underline{I}_B - \underline{I}_{b3} = -12,6 - j14,7 + 22,9 + j11,2 = 10,3 - j3,5 = 10,9e^{-j18,8^\circ} \text{ A},$$

$$\underline{I}_{c2} = \underline{I}_C - \underline{I}_{c3} = -3,6 + j7,8 - 10,7 - j16,6 = -14,3 - j8,8 = 16,8e^{j31,6^\circ} \text{ A}.$$

Проверка:  $\underline{I}_{a2} + \underline{I}_{b2} + \underline{I}_{c2} = 0 \text{ A}$ .

Определим показания ваттметров.

Ваттметр фазы А:

$$\begin{aligned} P_{w1} &= \operatorname{Re}[\underline{U}_{ac} \underline{I}_A^*] = \operatorname{Re}[-\underline{U}_{ca} \underline{I}_A^*] = \operatorname{Re}[(211,8 - j184,3) \times (16,2 - j6,9)] = \\ &= \operatorname{Re}[2159,5 - j4447,1] = 2159,5 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Ваттметр фазы В:

$$\begin{aligned} P_{w2} &= \operatorname{Re}[\underline{U}_{bc} \underline{I}_B^*] = \operatorname{Re}[(53,1 - j246) \times (-12,6 + j14,7)] = \\ &= \operatorname{Re}[2947,2 + j3880,2] = 2947,2 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Мощность, потребляемая приемниками:

$$\sum P_w = P_{w1} + P_{w2} = 2159,5 + 2947,2 = 5106,7 \text{ Вт}.$$

Активная мощность, потребляется нагрузкой:

$$P_n = \operatorname{Re}[R_3 |I_{ab}|^2] + \operatorname{Re}[R_3 |I_{bc}|^2] = \operatorname{Re}[9 \cdot |12,2 - j5,4|^2] + \operatorname{Re}[9 \cdot |-10,7 - j16,6|^2] = 5112,5 \text{ Вт}.$$

Алгоритм к построению топографической диаграммы (рис. 3.15, 3.16):

$$\underline{\varphi}_0 = 0 \text{ В} - \text{ нулевая точка генератора};$$

$$\underline{\varphi}_A = \underline{\varphi}_0 + \underline{E}_A = 0 + 220 = 220 \text{ В};$$

$$\underline{\varphi}_a = \underline{\varphi}_A - R_1 \underline{I}_A = 220 - 6 \times (16,2 + j6,9) = 122,8 - j41,4 \text{ В};$$

$$\underline{\varphi}_{01} = \underline{\varphi}_a - (-jX_{C2}) \underline{I}_{a2} = 122,8 - j41,4 + j10 \times (4 + j12,3) = -0,2 - j1,4 \approx 0 \text{ В};$$

$$\underline{\varphi}_B = \underline{\varphi}_0 + \underline{E}_B = 0 - 110 - j190,5 = -110 - j190,5 \text{ В};$$

$$\underline{\varphi}_b = \underline{\varphi}_B - R_1 \underline{I}_B = -110 - j190,5 - 6 \times (-12,6 - j14,7) = -34,4 - j102,3 \text{ В};$$

$$\underline{\varphi}_{01} = \underline{\varphi}_b - (-jX_{C2}) \underline{I}_{b2} = -34,4 - j102,3 + j10 \times (10,3 - j3,5) = 0,6 + j0,7 \approx 0 \text{ В};$$

$$\underline{\varphi}_C = \underline{\varphi}_0 + \underline{E}_C = 0 - 110 + j190,5 = -110 + j190,5 \text{ В};$$

$$\underline{\varphi}_c = \underline{\varphi}_C - R_1 I_C = -110 + j190,5 - 6 \times (-3,6 + j7,8) = -88,4 + j143,7 \text{ В};$$

$$\underline{\varphi}_{01} = \underline{\varphi}_c - (-jX_{C2}) I_{c2} = -88,4 + j143,7 + j10 \times (-14,3 - j8,8) = -0,4 + j0,7 \approx 0 \text{ В}.$$

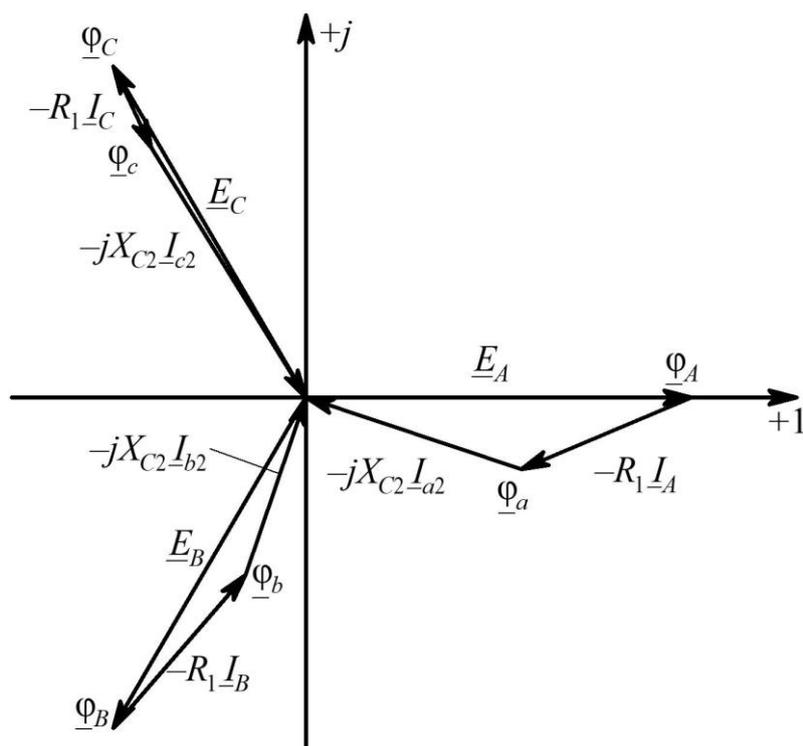


Рис. 3.15

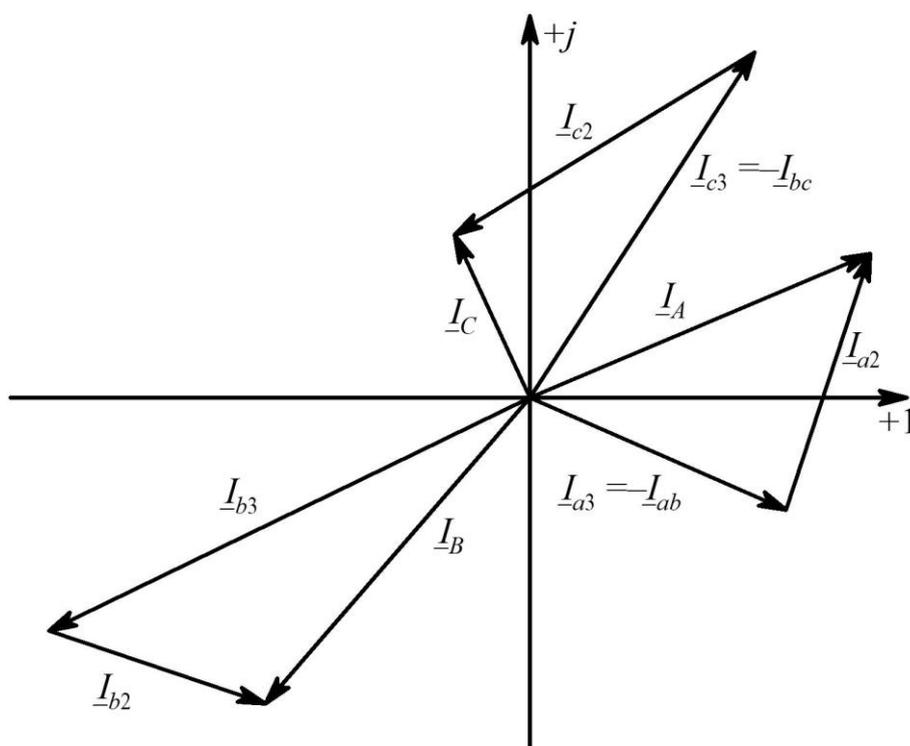


Рис. 3.16

**Задача № 4.** Выполнить расчет линейных цепей при несинусоидальных ЭДС и токах.

Дано:  $R_1 = 3 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 4 \text{ Ом}$ ;  $X_{L2} = 5 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 3 \text{ Ом}$ ;  $X_{L3} = 4 \text{ Ом}$ ;  $X_{C3} = 6 \text{ Ом}$ ;  $U_m = 100 \text{ В}$ .

Требуется:

1. Определить мгновенные значения токов в ветвях цепи (рис. 4.1);

2. Найти показание электродинамического прибора;
3. Построить график мгновенного значения измеряемой прибором величины в функции времени за период  $T = 0,02$  с;
4. Определить активную мощность цепи.

График изменения входного напряжения  $u(t)$  представлен на рис. 4.2.

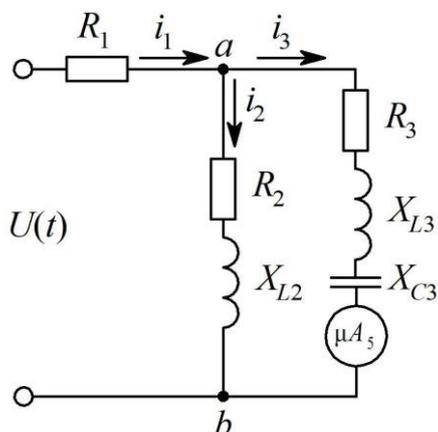


Рис. 4.1

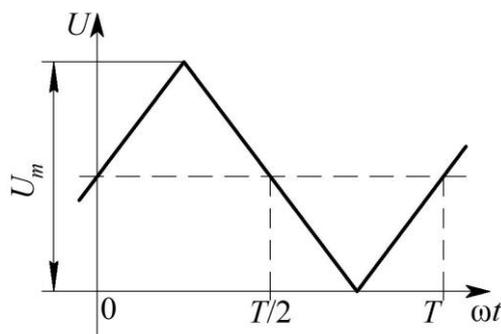


Рис. 4.2

### Решение

1. Разложим кривую  $u(t)$  в ряд Фурье:

$$U(t) = \frac{U_m}{2} + \frac{8U_m}{\pi^2} \left( \sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t \right) = 50 + 81,1 \sin \omega t - 9 \sin 3\omega t + 3,2 \sin 5\omega t.$$

Дальнейший расчет ведем, используя метод наложения:

$$i_1 = i_{1(0)} + i_{1(1)} + i_{1(3)} + i_{1(5)}; \quad i_2 = i_{2(0)} + i_{2(1)} + i_{2(3)} + i_{2(5)}; \quad i_3 = i_{3(0)} + i_{3(1)} + i_{3(3)} + i_{3(5)}.$$

2. За счет установки в третьей ветви конденсатора тока в данной ветви не будет. Постоянную составляющую тока можно определить по формуле:

$$i_{1(0)} = i_{2(0)} = \frac{U_{(0)}}{R_1 + R_2} = \frac{50}{3 + 4} = 7,17 \text{ А.}$$

3. Гармонические составляющие подсчитаем символическим методом:

$$\underline{Z}_{1(1)} = R_1 = 3 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{2(1)} = R_2 + jX_{L2} = 4 + j5 = 6,4e^{j51,3^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{3(1)} = R_3 + j(X_{L3} - X_{C3}) = 3 + j(4 - 6) = 3 - j2 = 3,6e^{-j33,7^\circ} \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ab(1)} &= \frac{\underline{Z}_{2(1)} \underline{Z}_{3(1)}}{\underline{Z}_{2(1)} + \underline{Z}_{3(1)}} = \frac{6,4e^{j51,3^\circ} \cdot 3,6e^{-j33,7^\circ}}{4 + j5 + 3 - j2} = \frac{23,04e^{j17,6^\circ}}{7 + j3} = \frac{23,04e^{j17,6^\circ}}{7,6e^{j25,2^\circ}} = \\ &= 3,03e^{-j5,6^\circ} = 3,02 - j0,29 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_{ex(1)} = \underline{Z}_{1(1)} + \underline{Z}_{ab(1)} = 3 + 3,02 - j0,29 = 6,02 - j0,29 \text{ Ом.}$$

4. Значение комплекса амплитуды тока первой гармонической составляющей в первой ветви и падение напряжение между точками  $ab$ :

$$I_{1m(1)} = \frac{U_{m(1)}}{\underline{Z}_{ex(1)}} = \frac{81,1}{6,02 - j0,29} = 13,44 + j0,65; \quad i_{1(1)} = 13,46 \sin(\omega t + 2,77^\circ) \text{ А};$$

$$\underline{U}_{m.ab(1)} = \underline{Z}_{ab(1)} \underline{I}_{1m(1)} = 40,74 - j1,98 \text{ В}; u_{ab(1)} = 40,79 \sin(\omega t - 2,78^\circ) \text{ В.}$$

5. Комплекс амплитуды тока первой гармонической составляющей во второй и третьей ветвях:

$$\underline{I}_{2m(1)} = \frac{\underline{U}_{m.ab(1)}}{\underline{Z}_{2(1)}} = \frac{40,74 - j1,98}{6,4e^{j51,3^\circ}} = 3,73 - j5,16 \text{ А}; i_{2(1)} = 6,37 \sin(\omega t - 54,14^\circ) \text{ А};$$

$$\underline{I}_{3m(1)} = \frac{\underline{U}_{m.ab(1)}}{\underline{Z}_{3(1)}} = \frac{40,74 - j1,98}{3,6e^{-j33,7^\circ}} = 9,71 + j5,81 \text{ А}; i_{3(1)} = 11,32 \sin(\omega t + 30,89^\circ) \text{ А.}$$

6. Полное комплексное сопротивление ветвей от действия третьей гармонической составляющей:

$$\underline{Z}_{1(3)} = R_1 = 3 \text{ Ом}; \underline{Z}_{2(3)} = R_2 + j3X_{L2} = 4 + j15 = 15,5e^{j75^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{3(3)} = R_3 + j\left(3X_{L3} - \frac{X_{C3}}{3}\right) = 3 + j(12 - 2) = 3 + j10 = 10,44e^{j73,3^\circ} \text{ Ом.}$$

7. Эквивалентное комплексное сопротивление параллельного участка от третьей гармонической составляющей:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ab(3)} &= \frac{\underline{Z}_{2(3)} \underline{Z}_{3(3)}}{\underline{Z}_{2(3)} + \underline{Z}_{3(3)}} = \frac{15,5e^{j75^\circ} \cdot 10,44e^{j73,3^\circ}}{4 + j15 + 3 - j10} = \frac{161,8e^{j148,3^\circ}}{7 + j25} = \frac{161,8e^{j148,3^\circ}}{25,96e^{j74,4^\circ}} = \\ &= 6,23e^{j73,9^\circ} = 1,73 + j5,99 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_{ex(3)} = \underline{Z}_{1(3)} + \underline{Z}_{ab(3)} = 3 + 1,73 + j5,99 = 4,73 + j5,99 = 7,63e^{j51,7^\circ} \text{ Ом.}$$

8. Значение комплекса амплитуды тока третьей гармонической составляющей в первой ветви и падение напряжения между точками  $ab$ :

$$\underline{I}_{1m(3)} = \frac{\underline{U}_{m(3)}}{\underline{Z}_{ex(3)}} = \frac{9}{4,73 + j5,99} = -0,73 + j0,93 \text{ А}; i_{1(3)} = 1,18 \sin(3\omega t + 128,3^\circ) \text{ А};$$

$$\underline{U}_{m.ab(3)} = \underline{Z}_{ab(3)} \underline{I}_{1m(3)} = 6,23e^{j73,9^\circ} \cdot 1,18e^{j128,3^\circ} = 7,35e^{j202,2^\circ} \text{ В}; u_{ab(3)} = 7,35 \sin(3\omega t + 202,2^\circ) \text{ В.}$$

9. Комплекс амплитудного значения тока второй ветви для третьей гармоники:

$$\underline{I}_{2m(3)} = \frac{\underline{U}_{m.ab(3)}}{\underline{Z}_{2(3)}} = \frac{7,35e^{j202,2^\circ}}{15,5e^{j75^\circ}} = 0,47e^{j127,7^\circ} \text{ А}; i_{2(3)} = 0,47 \sin(3\omega t + 127,7^\circ) \text{ А.}$$

10. Комплекс амплитудного значения тока третьей ветви для третьей гармоники:

$$\underline{I}_{3m(3)} = \frac{\underline{U}_{m.ab(3)}}{\underline{Z}_{3(3)}} = \frac{7,35e^{j202,2^\circ}}{10,44e^{j73,3^\circ}} = 0,7e^{j127,7^\circ} \text{ А}; i_{3(3)} = 0,7 \sin(3\omega t + 127,7^\circ) \text{ А.}$$

11. Аналогично определим параметры цепи для пятой гармонической составляющей приложенного напряжения:

$$\underline{Z}_{1(5)} = R_1 = 3 \text{ Ом}; \underline{Z}_{2(5)} = R_2 + j5X_{L2} = 4 + j25 = 25,3e^{j81^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{3(5)} = R_3 + j\left(5X_{L3} - \frac{X_{C3}}{5}\right) = 3 + j(20 - 1,2) = 3 + j18,8 = 19,04e^{j81^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{ab(5)} = \frac{\underline{Z}_{2(5)} \underline{Z}_{3(5)}}{\underline{Z}_{2(5)} + \underline{Z}_{3(5)}} = \frac{25,3e^{j81^\circ} \cdot 19,04e^{j81^\circ}}{4 + j25 + 3 + j18,8} = \frac{481,7e^{j162^\circ}}{7 + j4,38} = \frac{481,7e^{j162^\circ}}{44,3e^{j81^\circ}} =$$

$$= 10,9e^{j81^\circ} = 1,71 + j10,76 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{вх(5)} = \underline{Z}_{1(5)} + \underline{Z}_{ab(5)} = 3 + 1,71 + j10,76 = 4,71 + j10,76 = 11,7e^{j66^\circ} \text{ Ом}.$$

12. Значения тока пятой гармонической составляющей в первой ветви и падение напряжения между точками  $ab$ :

$$\underline{I}_{1m(5)} = \frac{\underline{U}_{m(5)}}{\underline{Z}_{вх(5)}} = \frac{3,27}{11,7e^{j66^\circ}} = 0,28e^{-j66^\circ} \text{ А}; \quad i_{1(5)} = 0,28 \sin(5\omega t - 66^\circ) \text{ А};$$

$$\underline{U}_{m.ab(5)} = \underline{Z}_{ab(5)} \underline{I}_{1m(5)} = 10,9e^{j81^\circ} \cdot 0,28e^{-j66^\circ} = 3,05e^{j15^\circ} \text{ В}; \quad u_{ab(5)} = 3,05 \sin(5\omega t + 15^\circ) \text{ В}.$$

13. Определим параметры второй и третьей ветви:

$$\underline{I}_{2m(5)} = \frac{\underline{U}_{m.ab(5)}}{\underline{Z}_{2(5)}} = \frac{3,05e^{j15^\circ}}{25,3e^{j81^\circ}} = 0,12e^{-j66^\circ} \text{ А}; \quad i_{2(5)} = 0,12 \sin(5\omega t + 66^\circ) \text{ А};$$

$$\underline{I}_{3m(5)} = \frac{\underline{U}_{m.ab(5)}}{\underline{Z}_{3(5)}} = \frac{3,05e^{j15^\circ}}{19,04e^{j81^\circ}} = 0,16e^{-j66^\circ} \text{ А}; \quad i_{3(5)} = 0,16 \sin(5\omega t - 66^\circ) \text{ А}.$$

14. Итоговый ток  $i_3$  будет равен:

$$i_3 = i_{3(0)} + i_{3(1)} + i_{3(3)} + i_{3(5)} =$$

$$= 0 + 11,32 \sin(\omega t + 33,89^\circ) + 0,7 \sin(3\omega t + 127,7^\circ) + 0,16 \sin(5\omega t - 66^\circ) \text{ А}.$$

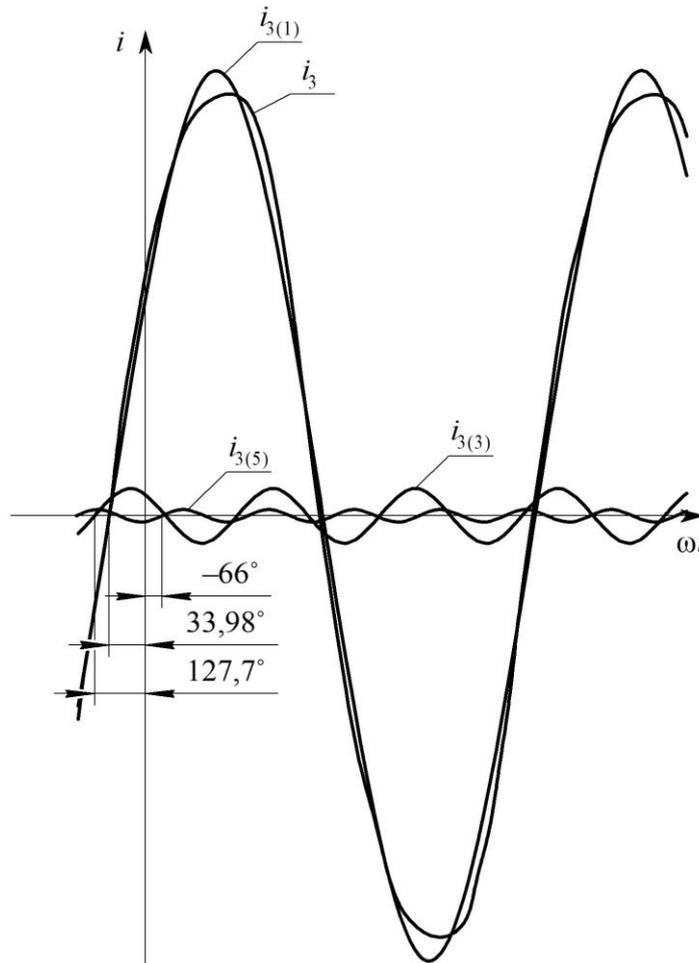


Рис. 4.3

15. Найдем показания амперметра  $A_3$ :

$$I_3 = \sqrt{\frac{|I_{3m(1)}|^2}{2} + \frac{|I_{3m(3)}|^2}{2} + \frac{|I_{3m(5)}|^2}{2}} = \sqrt{64,02 + 0,24 + 0,01} = \sqrt{64,27} = 8,02 \text{ А.}$$

16. Определим активную мощность цепи:

$$P = P_{(0)} + P_{(1)} + P_{(3)} + P_{(5)};$$

$$P_{(0)} = U_0 \times I_0 = 50 \cdot 7,14 = 357 \text{ Вт}; \quad \varphi_{(1)} = \varphi_{u(1)} - \varphi_{i(1)} = 0 - 0 = 0^\circ;$$

$$P_{(1)} = U_{(1)} |I_{1m(1)}| \cdot \cos \varphi_{(1)} = \frac{81,1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{13,46}{\sqrt{2}} \cdot \cos 0^\circ = 545,61 = 545,6 \text{ Вт};$$

$$\varphi_{(3)} = \varphi_{u(3)} - \varphi_{i(3)} = 0 - 128,3 = -128,3^\circ;$$

$$P_{(3)} = U_{(3)} |I_{1m(3)}| \cdot \cos \varphi_{(3)} = \frac{-9}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1,18}{\sqrt{2}} \cdot \cos(-128,3^\circ) = (-6,36) \cdot 0,84 \cdot (-0,62) = 3,3 \text{ Вт};$$

$$\varphi_{(5)} = \varphi_{u(5)} - \varphi_{i(5)} = 0 - (-66^\circ) = 66^\circ;$$

$$P_{(5)} = U_{(5)} |I_{1m(5)}| \cdot \cos \varphi_{(5)} = \frac{3,27}{\sqrt{2}} \cdot \frac{0,28}{\sqrt{2}} \cdot \cos 66^\circ = 2,31 \cdot 0,2 \cdot 0,407 = 0,19 \text{ Вт};$$

$$P = 357 + 545,6 + 3,3 + 0,19 = 906,1 \text{ Вт.}$$

17. Мгновенное значение тока в третьей ветви:

$$i_3(t) = i_{3(1)} + i_{3(3)} + i_{3(5)} =$$

$$= 11,32 \sin(\omega t + 30,89^\circ) + 0,7 \sin(3\omega t + 127,7^\circ) + 0,16 \sin(5\omega t - 66^\circ) \text{ А.}$$

18. На рис. 4.3 представлен график измеряемой амперметром величины тока  $I_3$  в функции времени за период  $T = 0,02$  с.

**Задача № 5.** Выполнить расчет разветвленной магнитной цепи (рис. 5.1) и определить значения магнитных потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Параметры магнитопровода:

$$l_1 = 0,195 \text{ м}; \quad S_1 = 7,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad l_2 = 0,1 \text{ м}; \quad S_2 = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad l_3 = 0,242 \text{ м}; \quad S_3 = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \\ l_B = 10^{-4} \text{ м.}$$

Значения токов и количество витков в соответствующих обмотках:

$$I_2 = 0,5 \text{ А}; \quad I_3 = 0,2 \text{ А}; \quad I_4 = 0,4 \text{ А}; \quad w_2 = 200; \quad w_3 = 500; \quad w_4 = 125.$$

Магнитные свойства стали сердечника заданы в табл. 5.1.

Таблица 5.1

$B$ , Тл	0,22	0,75	0,93	1,02	1,14	1,28	1,47	1,53	1,57	1,6
$H$ , А/м	20	40	60	80	120	200	400	600	800	1200

### Решение

Составим уравнения по законам Кирхгофа для магнитных цепей:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0; \quad (5.1)$$

$$-H_1 l_1 - H_B l_B + H_2 l_2 = I_2 w_2; \quad (5.2)$$

$$-H_2 l_2 + H_3 l_3 = -I_2 w_2 + I_3 w_3 + I_4 w_4. \quad (5.3)$$

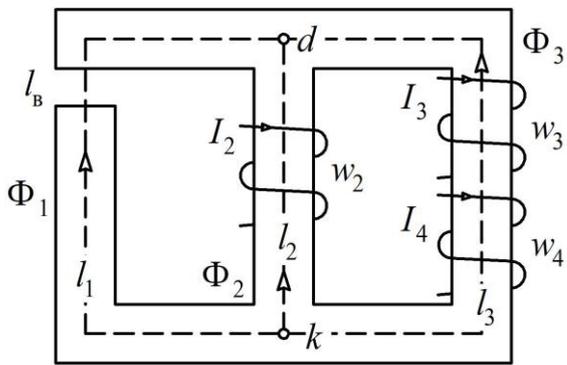


Рис. 5.1

Уравнение (5.1) составлено относительно узла  $d$ . При этом считаем, что магнитные потоки втекающие в узел берутся со знаком «плюс». При составлении уравнений (5.2) и (5.3) если контур обхода совпадает с направлением магнитного потока, то перед значением  $NI$  ставится знак «минус», в противном случае – «плюс».

Построим веберамперные характеристики участков магнитной цепи  $\Phi_1(U_{M1})$ ,  $\Phi_2(U_{M2})$  и  $\Phi_3(U_{M3})$ .

Задаваясь разными значениями магнитной индукции  $B$ ,

определяем значение  $\Phi = BS$ . В табл. 5.1  $B(H)$  сердечника каждому значению  $B$  соответствует свое значение  $H$ . Найдем магнитное напряжение для стали магнитопровода по выражению:  $U_M = NI$ . Результаты расчетов сведем в табл. 5.2:

$$\Phi_1 = BS_1, U_{M1} = H_1 l_1 + H_B l_B;$$

$$\Phi_2 = BS_2, U_{M2} = H l_2;$$

$$\Phi_3 = BS_3, U_{M3} = H l_3.$$

Напряженность  $H_B$  определяется из условия, что магнитная проницаемость  $\mu_0$  воздушного зазора изменяется пропорционально магнитной индукции [4]. При этом используем отношение:

$$H_B = B/\mu_0 = B/(125 \cdot 10^{-8}).$$

Таблица 5.2

$B$ , Тл	0,22	0,75	0,93	1,02	1,14	1,28	1,47	1,53	1,57	1,6
$H$ , А/м	20	40	60	80	120	200	400	600	800	1200
$H_B \cdot 10^5$ , А/м	1,76	6	7,44	8,16	9,12	10,24	11,76	12,24	12,56	12,8
$\Phi_1 \cdot 10^{-5}$ , Вб	16,9	57,8	71,6	78,5	87,8	98,6	113,2	117,8	120,9	123,2
$U_{M1}$ , А	$U_{M1} = H_1 l_1 + H_B l_B$									
	21,5	67,8	86,1	97,2	114,6	141,4	195,6	234,4	282	362
$\Phi_2 \cdot 10^{-5}$ , Вб	4,62	15,75	19,53	21,42	23,94	26,88	30,87	32,13	32,97	33,6
$U_{M2}$ , А	2	4	6	8	12	20	40	60	80	120
$\Phi_3 \cdot 10^{-5}$ , Вб	3,96	13,5	16,74	18,36	20,52	23,04	26,46	27,54	28,26	28,8
$U_{M3}$ , А	4,84	9,68	14,52	19,36	29,04	48,4	96,8	145,2	193,6	290,4

На рис. 5.2 представлены графики вебер-амперных характеристик  $\Phi_1(U_{M1})$ ,  $\Phi_2(U_{M2})$ , и  $\Phi_3(U_{M3})$ . Перестроим эти характеристики в функции от напряжения между узлами  $U_{Mkd}$  на рис. 5.2.

По II закону Кирхгофа:

$$U_{Mkd} - U_{M1} = 0 \Rightarrow U_{Mkd} = U_{M1};$$

$$U_{Mkd} - U_{M2} = -F_2 = -I_2 w_2, \text{ откуда } U_{Mkd} = U_{M2} - F_2;$$

$$U_{Mkd} - U_{M3} = -(F_3 + F_4) = -(I_3 w_3 + I_4 w_4), \text{ тогда } U_{Mkd} = U_{M3} - (F_3 + F_4).$$

Подставляя численные значения, имеем:

$$F_2 = I_2 w_2 = 0,5 \cdot 200 = 100 \text{ A};$$

$$F_3 + F_4 = I_3 w_3 + I_4 w_4 = 0,2 \cdot 500 + 0,4 \cdot 125 = 150 \text{ A}.$$

Таким образом, представленные соотношения позволяют с помощью графических преобразований получить:

- ВАХ  $\Phi_1(U_{M1}) = \Phi_1(U_{Mkd})$ ;
- ВАХ  $\Phi_2(U_{Mkd})$  получается смещением влево по оси абсцисс характеристики  $\Phi_2(U_{M2})$  на величину  $F_2$ ;
- ВАХ  $\Phi_3(U_{Mkd})$  простым смещением влево характеристики по оси абсцисс  $\Phi_3(U_{M3})$  на величину  $(F_3 + F_4)$ .

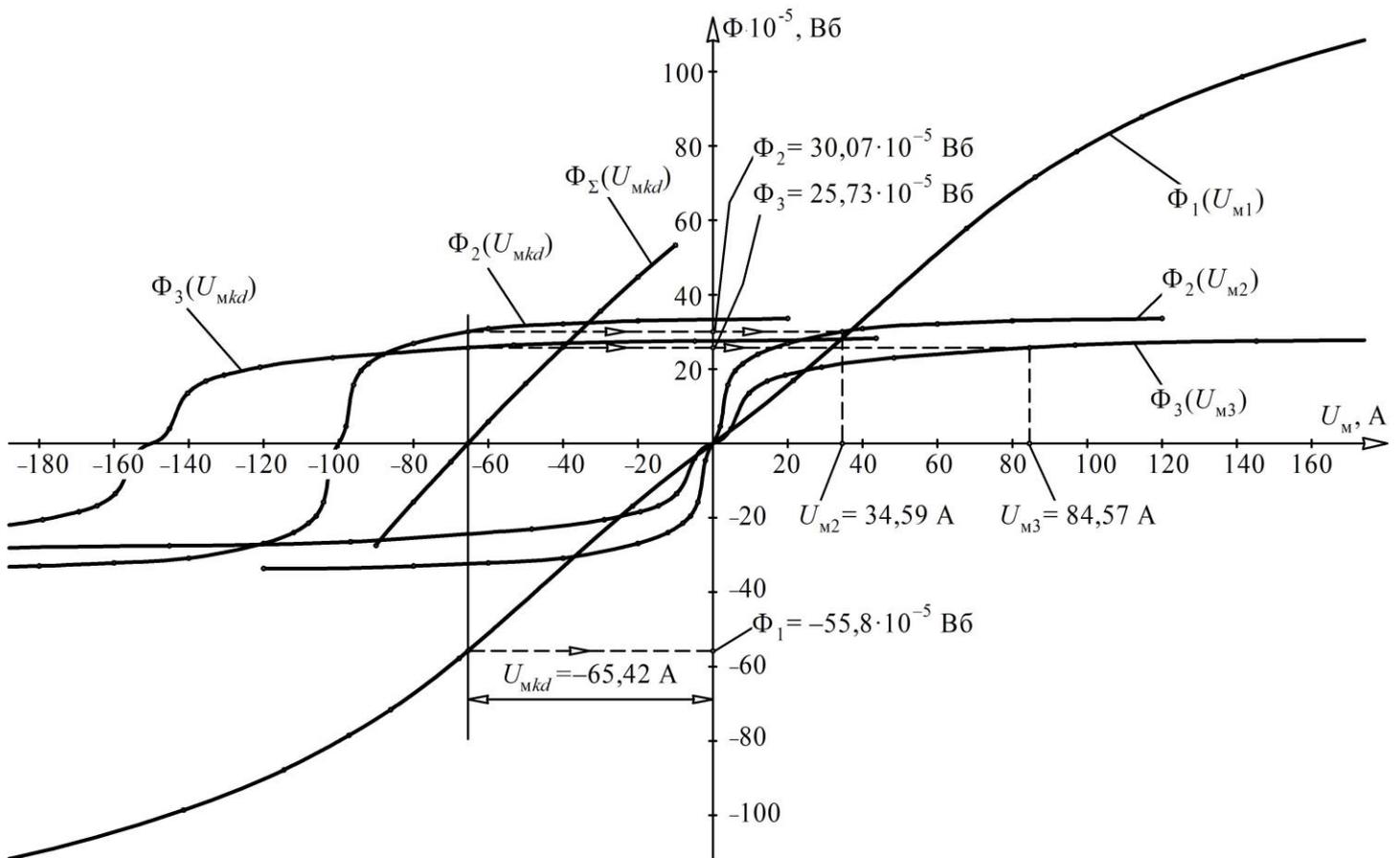


Рис. 5.2

Далее, задаваясь различными значениями  $U_{Mkd}$ , строим суммарную характеристику  $\Phi_{\Sigma}(U_{Mkd})$ , где  $\Phi_{\Sigma} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$ . При построении зададимся несколькими значениями  $U_M$  и для каждого определим значения магнитных потоков в стержнях (табл. 5.3).

Таблица 5.3

$U_M, \text{ A}$	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
$\Phi_1 \cdot 10^{-5}, \text{ Вб}$	-7,4	-15,63	-24,27	-33,21	-42,24	-51,13	-59,61	-67,35	-74,13
$\Phi_2 \cdot 10^{-5}, \text{ Вб}$	33,19	32,97	32,57	32,13	31,7	30,87	29,2	26,88	22,77
$\Phi_3 \cdot 10^{-5}, \text{ Вб}$	27,5	27,4	27,24	26,98	26,61	26,09	25,44	24,71	23,95
$\Phi_{\Sigma} \cdot 10^{-5}, \text{ Вб}$	53,29	44,74	35,54	25,9	16,07	5,83	-4,97	-15,76	-27,41

Поскольку по первому закону Кирхгофа  $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$ , искомое решение находим по точке пересечения характеристики  $\Phi_\Sigma(U_{mkd})$  с осью абсцисс (рис. 5.2). Через значение  $U_{mkd}$  проводится вертикаль. Ее пересечение с соответствующей ВАХ  $\Phi_1(U_{mkd})$ ,  $\Phi_2(U_{mkd})$ ,  $\Phi_3(U_{mkd})$  определяет значения потоков  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$ .

Из рис. 5.2 видно, что магнитное напряжение  $U_{mkd} = -65,42$  А.

Для этой величины  $U_{mkd}$  магнитные потоки принимают значения:

$$\Phi_1 = -55,8 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}; \Phi_2 = 30,07 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}; \Phi_3 = 25,73 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}.$$

Магнитное падение напряжения на соответствующих стержнях находим по характеристикам  $\Phi_1(U_{m1})$ ,  $\Phi_2(U_{m2})$  и  $\Phi_3(U_{m3})$ , которые принимают численные значения:

$$U_{m1} = -65,42 \text{ А}; U_{m2} = 34,59 \text{ А}; U_{m3} = 84,57 \text{ А}.$$

Проверка по второму закону Кирхгофа:

$$-U_{m1} + U_{m2} = I_2 w_2,$$

соответственно:  $-(-65,42) + 34,59 \approx 100$ . Погрешность 0,01 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Атабеков Г. И.* Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. – СПб.: Лань, 2010. – 592 с.
2. *Атабеков Г. И.* Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле / Г.И. Атабеков, С.Д. Купалян, А.Б. Тимофеев, С.С. Хухриков. – СПб.: Лань, 2010. – 432 с.
3. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Юрайт, 2016. – 701 с.
4. *Ионов А. А.* Теоретические основы электротехники : конспект лекций. – Самара : СамГУПС, 2017. – 113 с.
5. *Ионов А. А.* Теоретические основы электротехники. Цепи при гармоническом воздействии. Переходные процессы. Электрические цепи с взаимной индукцией. Четырехполюсники : конспект лекций / А.А. Ионов, А.С. Фадеев, М.А. Назаров. – Самара : СамГУПС, 2018. – 103 с.
6. *Ионов А. А.* Теоретические основы электротехники. цепи при гармоническом воздействии. Переходные процессы. Электрические цепи с взаимной индукцией. Четырехполюсники : конспект лекций / А.А. Ионов, А.С. Фадеев, М.А. Назаров. – Самара : СамГУПС, 2018. – 103 с.
7. *Макаров А. Г.* Теоретические основы электротехники : методические указания и задания к выполнению расчетно-графических работ / А.Г. Макаров, А.А. Ионов. – Самара : СамГУПС, 2016. – 58 с.
8. *Макаров А. Г.* Теория и примеры расчетов электрических и магнитных цепей в устройствах автоматики и системах электроснабжения железнодорожного транспорта / А.Г. Макаров, А.А. Ионов. – М. : ФГБУ ДПО «УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте», 2018. – 148 с.