

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Ю.В. Матвеев

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Учебно-методическое пособие
к выполнению контрольных работ

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 621.3.(076)
ББК 31.21я73
МЗЗ

Р е ц е н з е н т:

С.А. Конева – и.о. зав. кафедрой “Судовое электрооборудование”,
к.т.н., доцент

Матвеев Ю.В.

МЗЗ Электротехника: учеб.-метод. пособие к выполнению контрольных работ / Ю.В. Матвеев. — Севастополь: СевГУ, 2018. — 98 с.

Пособие предназначено для студентов заочной формы обучения Севастопольского государственного университета, Политехнического института, направлений подготовки: 23.03.01 — Технология транспортных средств, 23.03.03 — Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, 20.03.01 — Техносферная безопасность, 12.03.01 — Приборостроение, выполняющих контрольные работы по дисциплине “Электротехника”.

УДК 621.3.(076)
ББК 31.21я73

Рассмотрено и рекомендовано кафедрой “Судовое электрооборудование” Морского института Севастопольского государственного университета в качестве учебно-методического пособия к выполнению контрольных работ по дисциплине “Электротехника” для студентов направлений подготовки: 23.03.01 — Технология транспортных средств, 23.03.03 — Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, 20.03.01 — Техносферная безопасность, 12.03.01 — Приборостроение, протокол заседания кафедры № 12 от 14 июня 2018 г.

© Матвеев Ю.В. 2018
© ФГАОУВО «Севастопольский
государственный университет», 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
КР № 1. Расчет сложной электрической цепи постоянного тока.....	6
КР № 2. Расчет электрической цепи однофазного переменного тока.	22
КР № 3. Расчет трехфазных электрических цепей.....	38
КР № 4. Расчет магнитной цепи	69
КР № 5. Расчет электрической цепи периодического несинусоидального тока.....	85
Литература.....	98

ВВЕДЕНИЕ

Контрольные работы (КР), выполняемые студентами заочной формы обучения, имеют целью закрепить знания теоретических положений курса, привить навыки научного анализа и обобщения полученных результатов.

Для качественного усвоения теоретических положений в методических указаниях к работам приведены примеры расчета цепей.

В описании к каждой из КР предлагается примерный перечень контрольных вопросов, позволяющих проверить усвояемость учебного материала.

Выполнение КР является одним из основных видов занятий по дисциплине “Электротехника”.

К представленным на рецензию КР предъявляются следующие требования:

1) КР, выполненные студентами, являются рукописными или распечатанными на компьютере техническими документами и должна быть оформлены технически грамотно с соблюдением ЕСКД;

2) основные положения решения необходимо достаточно подробно пояснить;

3) принципиальные электрические схемы, рисунки, диаграммы и графики следует выполнять на отдельном листе бумаги, аккуратно и в удобочитаемом масштабе;

4) графики, выполненные с применением компьютерных программ, зачитываются только в том случае, если к ним даны соответствующие пояснения;

5) каждый лист работы оформляется в соответствии с требованиями ЕСКД, должен иметь окантовку и штамп. Все записи приводятся на одной стороне листа формата А4;

6) вычисления необходимо делать с точностью до третьей значащей цифры;

7) выполненную расчетную работу студент датирует и ставит свою подпись;

8) в работе, кроме результатов расчета, расчетных формул, промежуточных результатов, графиков и диаграмм, следует привести выводы в конце работы, данные расчета (данные расчета для удобства желательно свести в отдельную таблицу);

9) контрольная работа зачитывается, если в ней не содержится ошибок принципиального характера и выполнена с соблюдением требований, представленных выше.

С целью качественного выполнения работы необходимо руководствоваться следующими правилами.

1. Перед началом проведения расчетов следует указать законы и методы, используемые при решении и привести их математическую запись;
2. Руководствуясь ГОСТами, необходимо тщательно продумать буквенные и цифровые обозначения, которые предполагается использовать в работе и дать им пояснения;
3. В ходе выполнения работы не следует изменять однажды принятые обозначения, заданные в условии, направления токов и наименования сопротивлений и так далее;
4. Расчеты величин следует выполнять сначала в общем, виде, а затем в полученную формулу подставить числовые значения и привести окончательный результат с указанием единиц измерения;
5. Промежуточные и конечные результаты расчетов должны быть ясно выделены из общего текста;
6. В каждом из этапов решения задачи следует приводить необходимые пояснения;
7. При решении системы уравнений с применением известных методов расчета на компьютере следует приводить распечатку данных и результатов расчета в приложении к работе.

КР № 1

РАСЧЕТ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Цель работы

1.1.1. Усвоение методов расчета сложной электрической цепи постоянного тока.

1.1.2. Закрепление и углубление теоретических знаний по данной теме, полученных на лекционных, практических и лабораторных занятиях.

1.2. Задание на выполнение работы

Исходные данные для расчетов и схема сложной электрической цепи постоянного тока выбираются, согласно номеру варианта из таблицы 1.1.

Варианты схем сложной электрической цепи постоянного тока изображены на рисунках 1.1 - 1.30.

В соответствии со своим вариантом задания студенту требуется:

1) определить токи во всех ветвях схемы на основании законов Кирхгофа.

2) проверить выполнение баланса мощностей;

3) определить токи во всех ветвях схемы методом контурных токов;

4) определить токи во всех ветвях схемы методом узловых потенциалов (узел заземления указан в таблице 1.1);

5) определить ток в одной ветви, содержащей ЭДС, используя метод эквивалентного генератора (для вариантов с нечетными номерами ток определяется в ветви, содержащей E_1 , а для вариантов с четными номерами (0-й вариант сюда входит) - содержащей E_2);

6) результаты расчета токов ветвей, проведенные разными методами, свести в таблицу и сравнить между собой;

7) начертить потенциальную диаграмму для любого замкнутого контура, содержащего ЭДС.

В пояснительной записке к расчетно-графическому заданию следует привести:

- название и цель расчетной работы;
- текст задания с исходными данными;
- электрическую схему;
- системы уравнений, приведенные в общем виде и матричной форме расчета;
- все расчеты токов в ветвях с указанием промежуточных и конечных результатов, рассчитанных различными методами (результаты расчетов свести в таблицу и привести в конце пояснительной записки);

- потенциальную диаграмму;
- программы расчетов, выполненные на компьютере (с соответствующими пояснениями), по которым решались системы уравнений различными методами расчета цепей;
- выводы, в которых указать и обосновать наиболее рациональные методы расчета токов в электрических ветвях и практические навыки, полученные в ходе выполнения работы.

1.3. Методические указания по выполнению КР №1

В настоящее время все методы расчета электрических цепей прямо или косвенно основываются на применении законов Кирхгофа и Ома.

Используя эти законы можно найти распределение токов и потенциалов в электрической цепи при достаточном числе данных к расчету.

Исходя из цели расчетно-графического задания, основной задачей при выполнении данной работы является определение токов в ветвях электрической цепи и подтверждение правильности их расчета составлением баланса мощностей.

1.3.1. Определение токов в ветвях сложной электрической цепи с применением законов Кирхгофа

Пусть цепь, которую нужно рассчитать, содержит ***m*** ветвей и ***n*** узлов. Так как по каждой ветви проходит свой ток, то число неизвестных токов равно числу ветвей и для определения их необходимо составить ***m*** уравнений.

Последовательность операций расчета [1]:

а) обозначают токи во всех ветвях электрической схемы ($I_1, I_2, \dots, I_m$), произвольно выбирают их положительные направления и обозначают на схеме эти направления стрелками;

б) составляют по первому закону Кирхгофа уравнения для (***n***-1) узлов;

в) недостающие уравнения, в количестве ***m***-(***n***-1), получают по второму закону Кирхгофа, для чего выбирают в схеме ***m***-(***n***-1) взаимно независимых контуров;

г) выбирают направления обхода этих контуров (по движению часовой стрелки или против него) и соответственно обозначают их на схеме;

д) составляют по второму закону Кирхгофа уравнения для выбранных контуров и направлений их обхода.

В результате получается система из ***m*** уравнений.

Решение этой системы позволяет определить не только числовые значения токов, но и их действительные направления.

Таблица 1.1

Номер варианта	Рисунок	$R_1=R_2$, Ом	$R_3=R_4$, Ом	$R_5=R_6$, Ом	$R_7=R_8$, Ом	E_1 , В	E_2 , В	E_3 , В	Зазем- ленный узел
1	1.1	3,3	1,0	10,0	47,0	12	48	36	a
2	1.2	4,7	1,5	12,0	56,0	15	34	45	b
3	1.3	5,6	2,2	15,0	62,0	18	15	50	c
4	1.4	6,8	3,3	22,0	68,0	24	32	55	d
5	1.5	7,5	3,6	33,0	75,0	27	55	60	a
6	1.6	10,0	3,9	47,0	10,0	36	32	70	a
7	1.7	12,0	4,7	56,0	15,0	45	24	74	b
8	1.8	15,0	5,1	62,0	22,0	50	18	82	c
9	1.9	22,0	5,6	68,0	33,0	55	36	90	d
10	1.10	33,0	6,2	75,0	47,0	60	64	98	a
11	1.11	47,0	6,8	10,0	47,0	70	12	32	a
12	1.12	56,0	7,5	15,0	56,0	74	18	24	b
13	1.13	62,0	8,2	22,0	62,0	82	68	18	c
14	1.14	68,0	9,1	33,0	68,0	90	70	36	d
15	1.15	75,0	10,0	47,0	75,0	98	50	64	c
16	1.16	10,0	12,0	12,0	36,0	32	48	12	a
17	1.17	15,0	15,0	18,0	39,0	24	34	18	b
18	1.18	22,0	16,0	27,0	43,0	18	15	68	c
19	1.19	33,0	18,0	39,0	47,0	36	32	70	d
20	1.20	47,0	20,0	56,0	51,0	64	55	50	b
21	1.21	56,0	22,0	3,9	6,8	12	12	48	a
22	1.22	62,0	24,0	4,7	7,5	18	15	34	b
23	1.23	68,0	27,0	5,1	8,2	68	18	15	c
24	1.24	75,0	30,0	5,6	9,1	70	24	32	d
25	1.25	82,0	33,0	6,2	10,0	50	27	55	c
26	1.26	12,0	36,0	3,9	10,0	48	36	12	d
27	1.27	18,0	39,0	4,7	15,0	34	45	15	b
28	1.28	27,0	43,0	5,1	22,0	15	50	18	c
29	1.29	39,0	47,0	5,6	33,0	32	55	24	d
30	1.30	56,0	51,0	6,2	47,0	55	60	27	a
31	1.1	62,0	56,0	6,8	47,0	32	12	36	b
32	1.2	68,0	62,0	7,5	56,0	24	15	45	a
33	1.3	75,0	68,0	8,2	62,0	18	18	50	d
34	1.4	82,0	75,0	9,1	68,0	36	24	55	c
35	1.5	91,0	82,0	10,0	75,0	64	27	60	a
36	1.6	22,0	12,0	3,9	10,0	12	48	70	b
37	1.7	24,0	15,0	4,7	15,0	18	34	74	a
38	1.8	27,0	16,0	5,1	22,0	68	15	82	d
39	1.9	30,0	18,0	5,6	33,0	70	32	90	c
40	1.10	33,0	20,0	6,2	47,0	50	55	98	a

Продолжение таблицы 1.1

Номер варианта	Рисунок	$R_1=R_2$, Ом	$R_3=R_4$, Ом	$R_5=R_6$, Ом	$R_7=R_8$, Ом	E_1 , В	E_2 , В	E_3 , В	Зазем- ленный узел
41	1.11	3,3	1,0	10,0	47,0	12	32	36	a
42	1.12	4,7	1,5	12,0	56,0	15	24	45	b
43	1.13	5,6	2,2	15,0	62,0	18	18	50	c
44	1.14	6,8	3,3	22,0	68,0	24	36	55	d
45	1.15	7,5	3,6	33,0	75,0	27	64	60	a
46	1.16	10,0	3,9	47,0	10,0	36	48	70	a
47	1.17	12,0	4,7	56,0	15,0	45	34	74	b
48	1.18	15,0	5,1	62,0	22,0	50	15	82	c
49	1.19	22,0	5,6	68,0	33,0	55	32	90	d
50	1.20	33,0	6,2	75,0	47,0	60	55	98	a
51	1.21	47,0	6,8	10,0	47,0	70	12	32	a
52	1.22	56,0	7,5	15,0	56,0	74	15	24	b
53	1.23	62,0	8,2	22,0	62,0	82	18	18	c
54	1.24	68,0	9,1	33,0	68,0	90	24	36	d
55	1.25	75,0	10,0	47,0	75,0	98	27	64	c
56	1.26	10,0	12,0	12,0	36,0	32	36	12	a
57	1.27	15,0	15,0	18,0	39,0	24	45	18	b
58	1.28	22,0	16,0	27,0	43,0	18	50	68	c
59	1.29	33,0	18,0	39,0	47,0	36	55	70	d
60	1.30	47,0	20,0	56,0	51,0	64	60	50	b
61	1.1	56,0	22,0	3,9	6,8	12	70	48	a
62	1.2	62,0	24,0	4,7	7,5	18	74	34	b
63	1.3	68,0	27,0	5,1	8,2	68	82	15	c
64	1.4	75,0	30,0	5,6	9,1	70	90	32	d
65	1.5	82,0	33,0	6,2	10,0	50	98	55	c
66	1.6	12,0	36,0	3,9	10,0	48	12	12	d
67	1.7	18,0	39,0	4,7	15,0	34	18	15	b
68	1.8	27,0	43,0	5,1	22,0	15	68	18	c
69	1.9	39,0	47,0	5,6	33,0	32	70	24	d
70	1.10	56,0	51,0	6,2	47,0	55	50	27	a
71	1.11	62,0	56,0	6,8	47,0	32	48	36	b
72	1.12	68,0	62,0	7,5	56,0	24	34	45	a
73	1.13	75,0	68,0	8,2	62,0	18	15	50	d
74	1.14	82,0	75,0	9,1	68,0	36	32	55	c
75	1.15	91,0	82,0	10,0	75,0	64	55	60	a
76	1.16	22,0	12,0	3,9	10,0	12	36	70	b
77	1.17	24,0	15,0	4,7	15,0	18	45	74	a
78	1.18	27,0	16,0	5,1	22,0	68	50	82	d
79	1.19	30,0	18,0	5,6	33,0	70	55	90	c
80	1.20	33,0	20,0	6,2	47,0	50	60	98	a

Окончание таблицы 1.1

Номер варианта	Рисунок	$R_1=R_2$, Ом	$R_3=R_4$, Ом	$R_5=R_6$, Ом	$R_7=R_8$, Ом	E_1 , В	E_2 , В	E_3 , В	Заземлен- ный узел
81	1.21	3,3	1,0	10,0	47,0	12	32	36	a
82	1.22	4,7	1,5	12,0	56,0	15	24	45	b
83	1.23	5,6	2,2	15,0	62,0	18	18	50	c
84	1.24	6,8	3,3	22,0	68,0	24	36	55	d
85	1.25	7,5	3,6	33,0	75,0	27	64	60	a
86	1.26	10,0	3,9	47,0	10,0	36	12	70	a
87	1.27	12,0	4,7	56,0	15,0	45	18	74	b
88	1.28	15,0	5,1	62,0	22,0	50	68	82	c
89	1.29	22,0	5,6	68,0	33,0	55	70	90	d
90	1.30	33,0	6,2	75,0	47,0	60	50	98	a
91	1.1	47,0	6,8	10,0	47,0	70	12	32	a
92	1.2	56,0	7,5	15,0	56,0	74	15	24	b
93	1.3	62,0	8,2	22,0	62,0	82	18	18	c
94	1.4	68,0	9,1	33,0	68,0	90	24	36	d
95	1.5	75,0	10,0	47,0	75,0	98	27	64	c
96	1.6	10,0	12,0	12,0	36,0	32	36	12	a
97	1.7	15,0	15,0	18,0	39,0	24	45	18	b
98	1.8	22,0	16,0	27,0	43,0	18	50	68	c
99	1.9	33,0	18,0	39,0	47,0	36	55	70	d
100	1.10	47,0	20,0	56,0	51,0	64	60	50	b

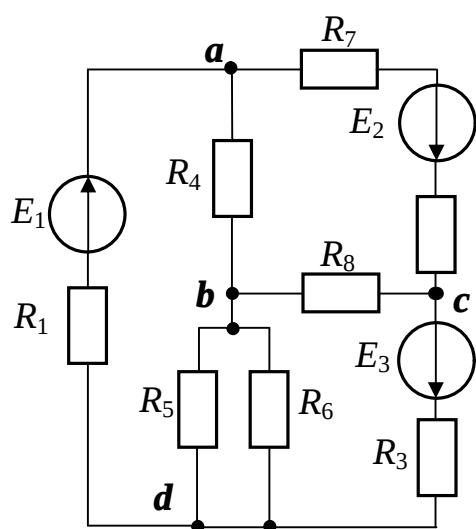


Рисунок 1.1

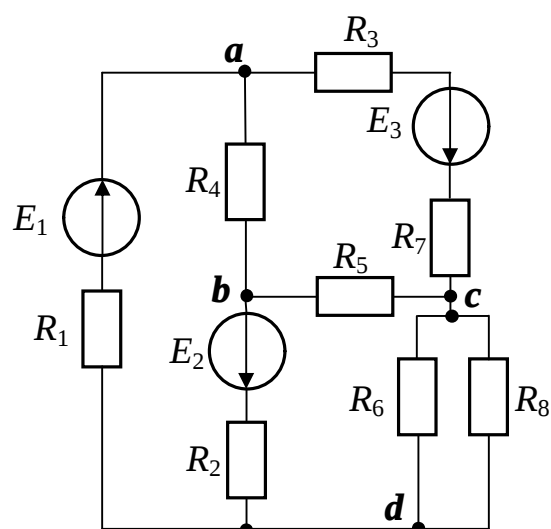


Рисунок 1.2

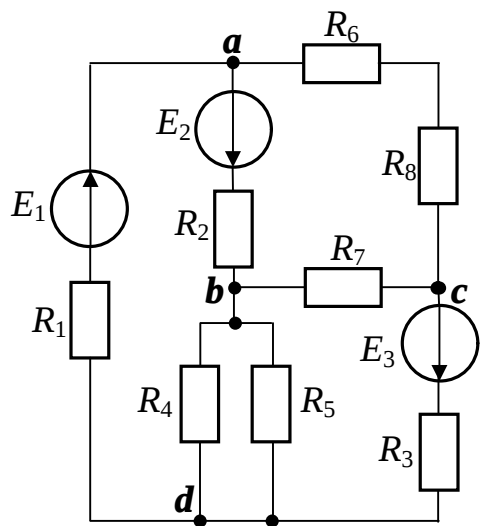


Рисунок 1.3

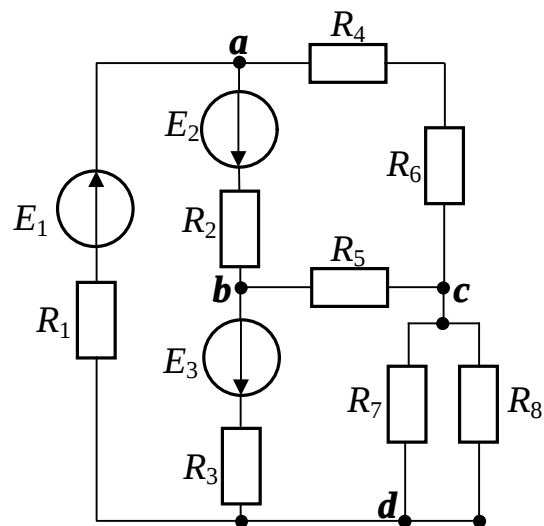


Рисунок 1.4

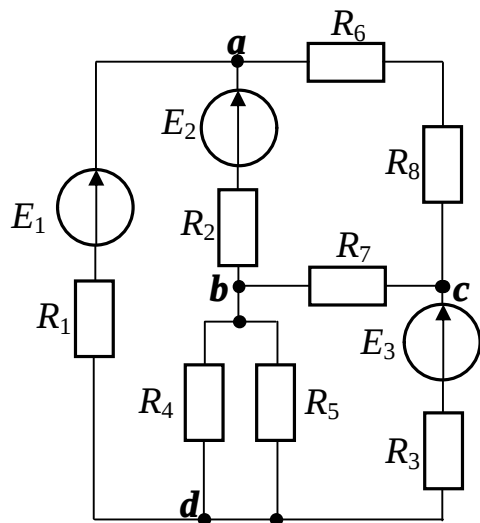


Рисунок 1.5

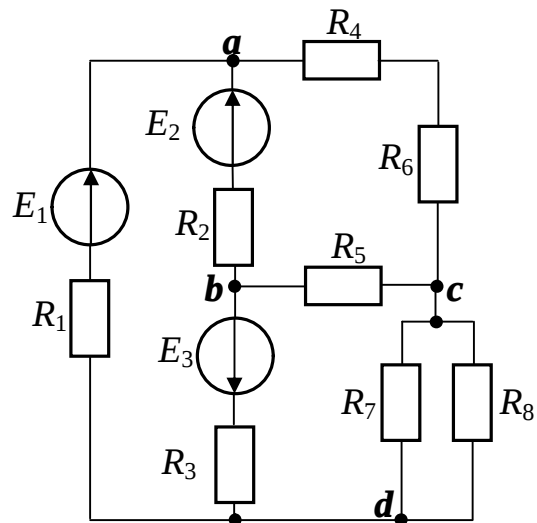


Рисунок 1.6

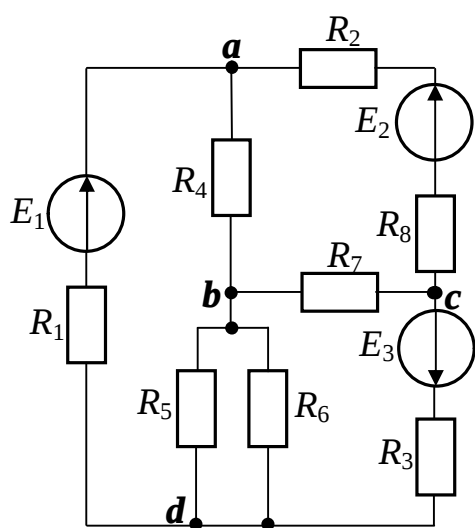


Рисунок 1.7

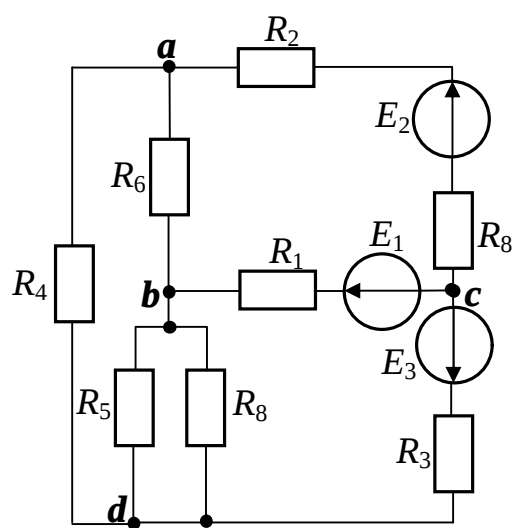


Рисунок 1.8

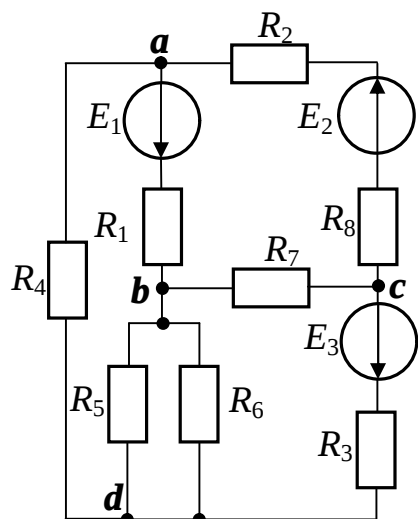


Рисунок 1.9

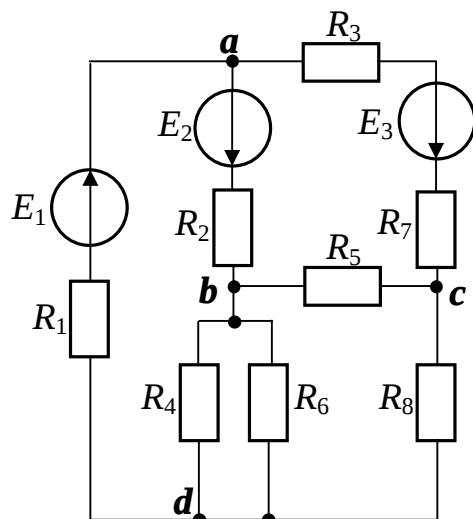


Рисунок 1.10

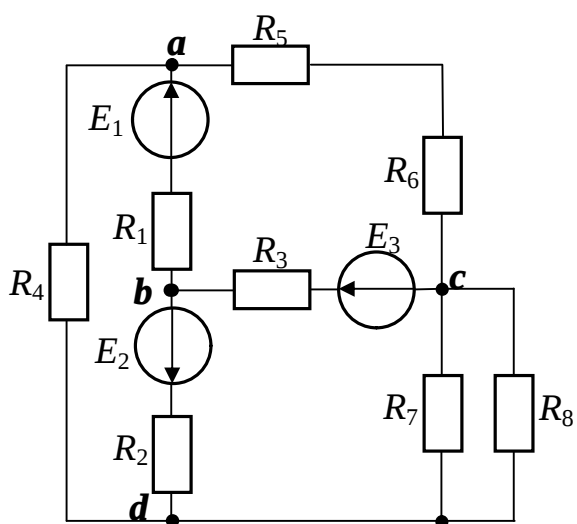


Рисунок 1.11

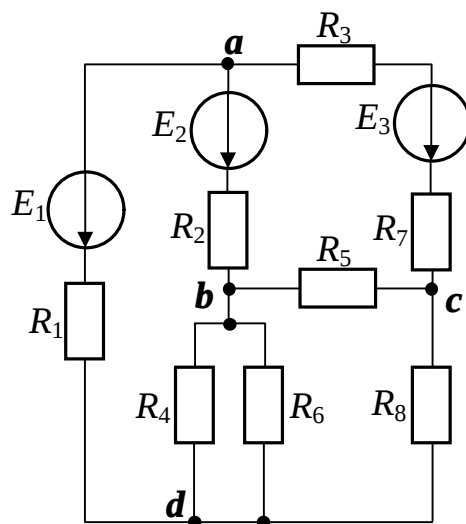


Рисунок 1.12

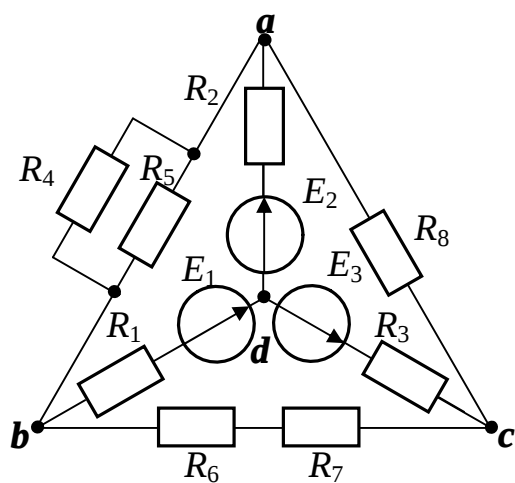


Рисунок 1.13

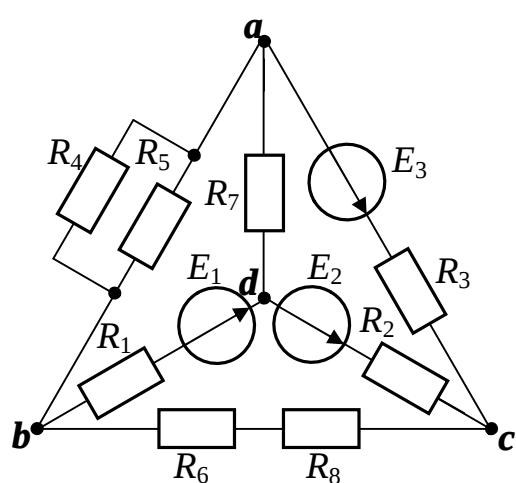


Рисунок 1.14

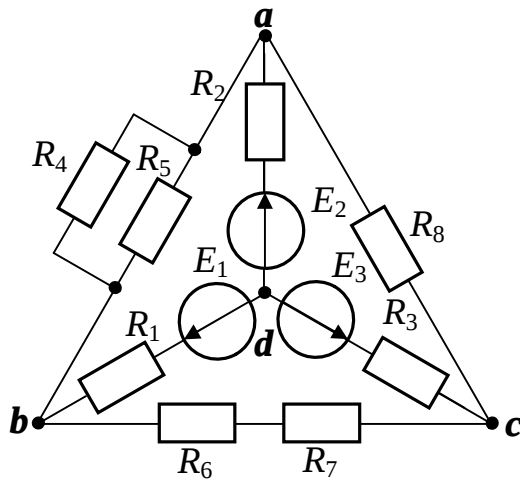


Рисунок 1.15

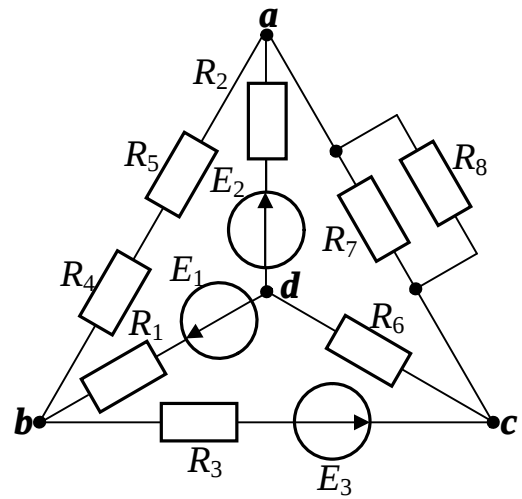


Рисунок 1.16

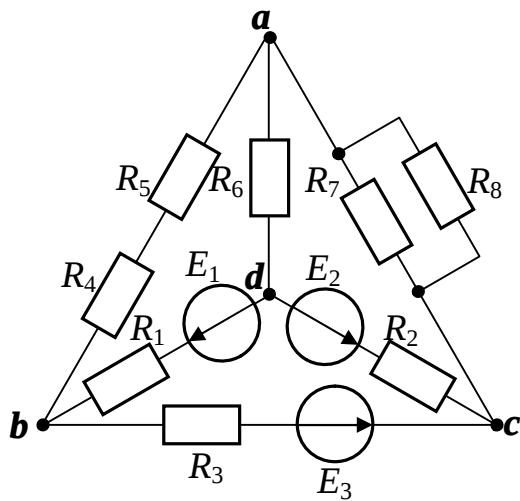


Рисунок 1.17

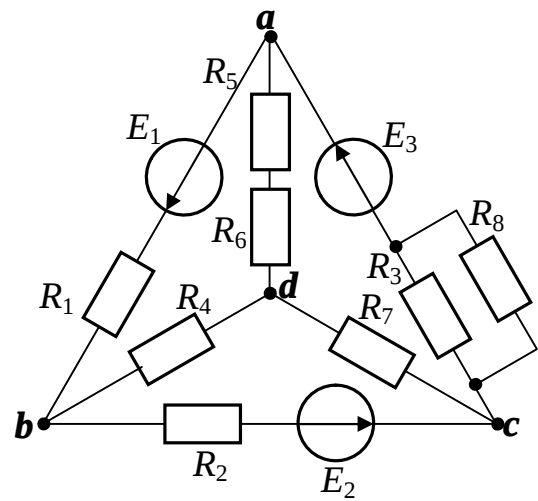


Рисунок 1.18

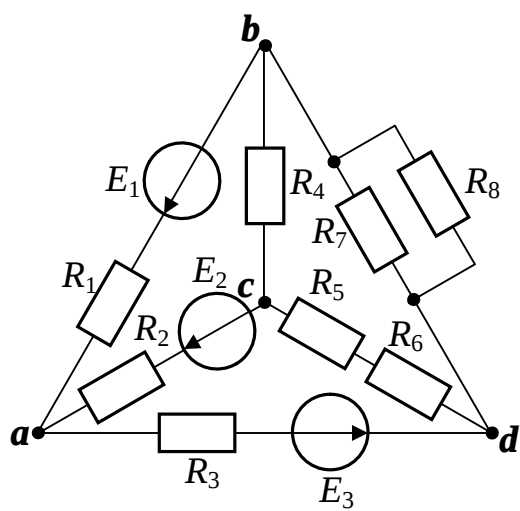


Рисунок 1.19

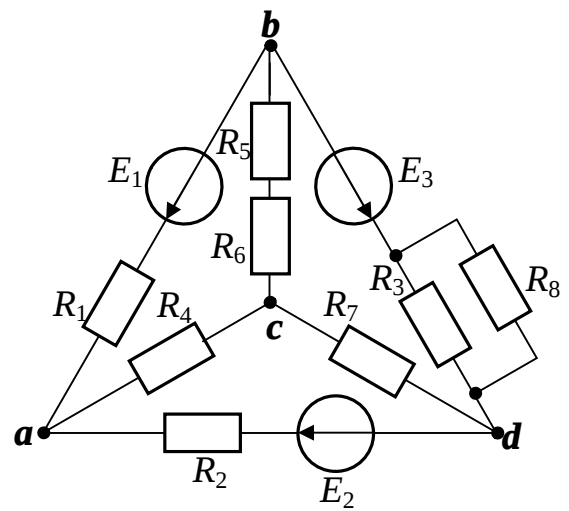


Рисунок 1.20

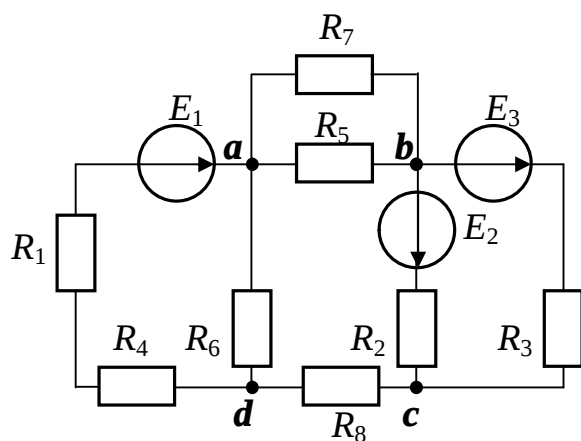


Рисунок 1.21

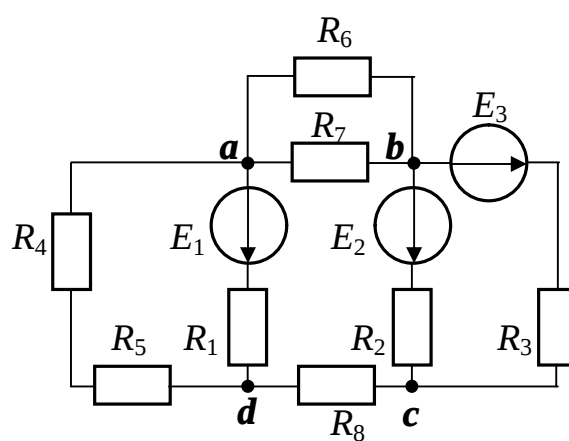


Рисунок 1.22

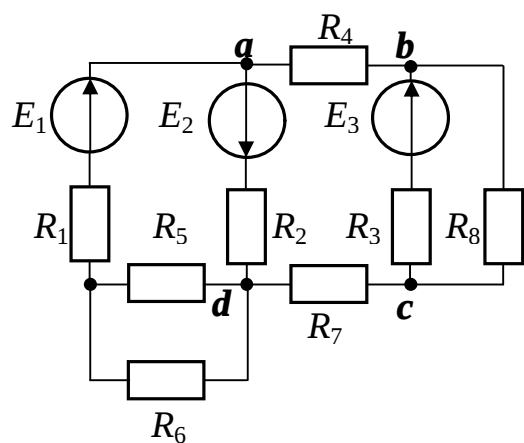


Рисунок 1.23

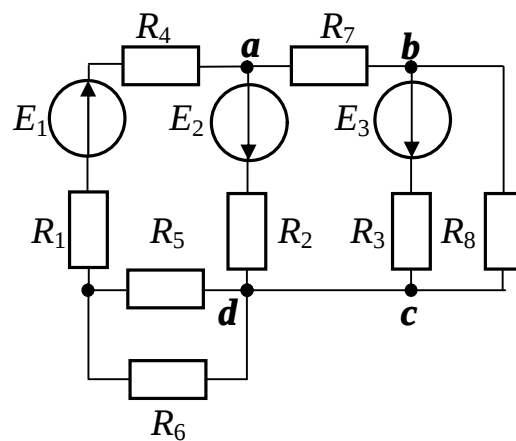


Рисунок 1.24

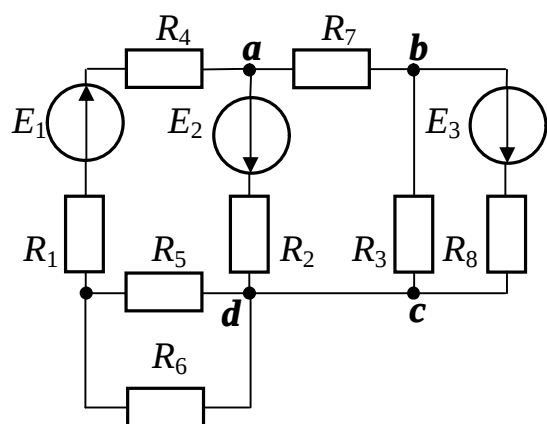


Рисунок 1.25

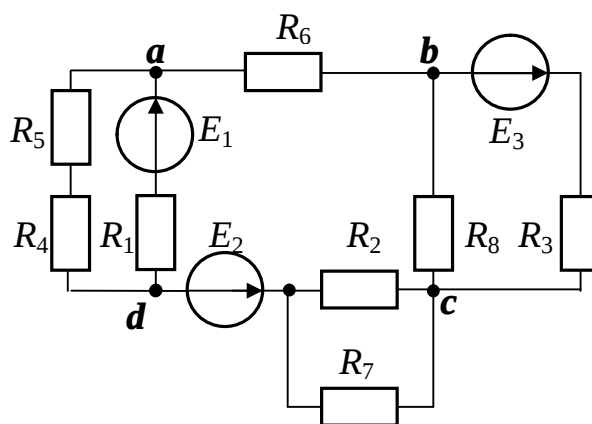


Рисунок 1.26

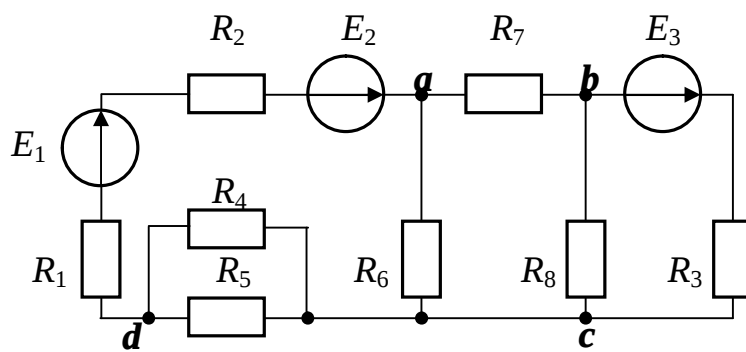


Рисунок 1.27

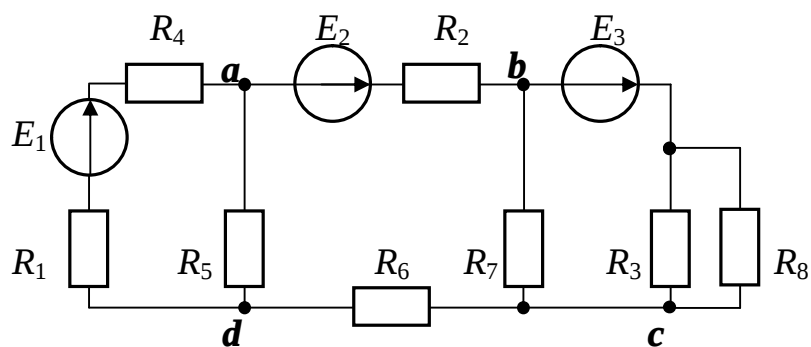


Рисунок 1.28

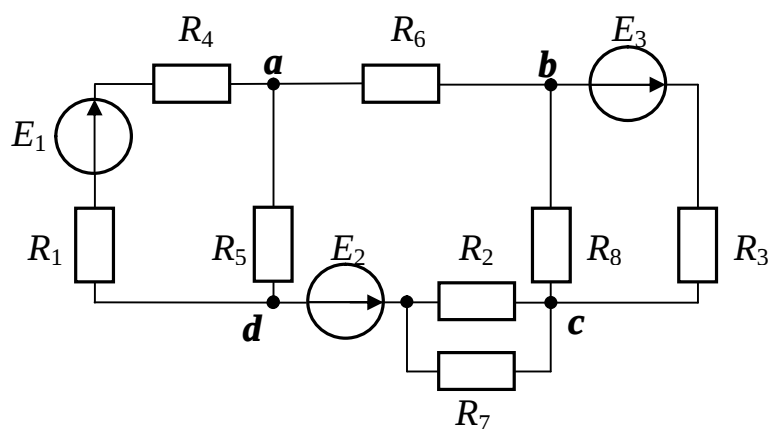


Рисунок 1.29

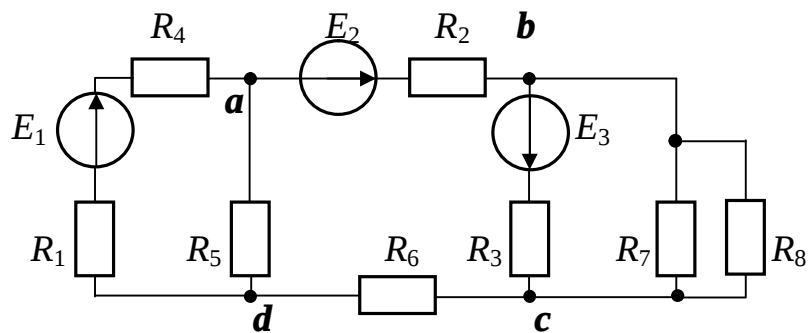


Рисунок 1.30

Если решение системы уравнений привело к отрицательному знаку, для какого либо тока, то его действительное направление противоположно произвольно выбранному вначале положительному направлению.

Рассмотрим на конкретном примере порядок составления уравнений по методу непосредственного применения законов Кирхгофа для цепи, схема которой изображена на рисунке 1.31. Схема содержит 6 ветвей и 4 узла, то есть $m=6$ и $n=4$.

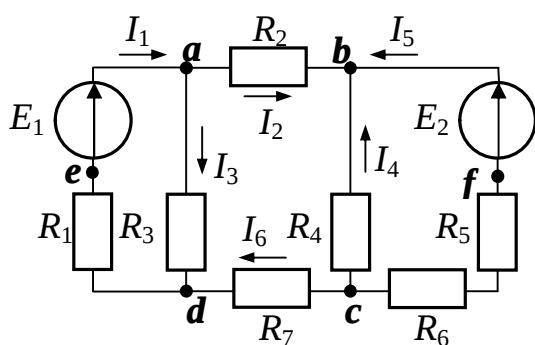


Рисунок 1.31

На схеме обозначены выбранные положительные направления всех неизвестных шести токов.

По первому закону Кирхгофа составляем $4-1=3$ уравнения для узлов **a**, **b** и **c**:

узел **a**: $I_1 - I_2 - I_3 = 0$;

узел **b**: $I_2 + I_4 + I_5 = 0$;

узел **c**: $-I_5 - I_4 - I_6 = 0$.

По второму закону Кирхгофа

составляем $6-3=3$ уравнения для контуров **adea**, **abcda**, **bfcdb** (направления обхода принимаем по движению часовой стрелки):

контур **adea**: $E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3$;

контур **abcda**: $0 = I_2 R_2 - I_4 R_4 + I_6 R_7 - I_3 R_3$;

контур **bfcdb**: $-E_2 = -I_5 (R_5 + R_6) + I_4 R_4$.

Таким образом, при расчете данной цепи по данному методу придется решать систему, состоящую из 6 уравнений.

При расчетах сильно разветвленных электрических цепей удобно пользоваться и другими методами расчета, о которых будет сказано ниже.

Рекомендация! После проведения расчета токов в ветвях любым из методов расчета следует проверить правильность их определения составлением баланса мощностей.

1.3.2. Определение токов в ветвях сложной электрической цепи с применением метода контурных токов

Одним из распространенных методов расчета сложных электрических цепей является метод контурных токов. Под контурными токами понимают условные (расчетные) токи, замыкающиеся в соответствующих контурах. Метод контурных токов позволяет сократить число совместно решаемых уравнений с m до $(m-n+1)$ (m - количество ветвей, а n - количество узлов). Последовательность операций расчета [1, 2]:

а) выбирают в схеме взаимно независимые контуры (так, чтобы одна из ветвей соответствующего контура входила только в этот контур);

б) для выбранных независимых контуров принимают произвольно направления контурных токов в них;

в) составляют для выбранных контуров уравнения по второму закону Кирхгофа относительно контурных токов.

Для электрической цепи, изображенной на рисунке 1.31, рассматриваемой в качестве примера, выбирая независимые прежние контуры и принимая указанные на рисунке 1.32 направления контурных токов, получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned} E_1 &= I_1 (R_1 + R_3) - I_{II} R_3; \quad 0 = I_{II} (R_2 + R_3 + R_4 + R_7) - I_I R_3 - I_{III} R_4; \\ -E_2 &= I_{III} (R_4 + R_5 + R_6) - I_{II} R_4. \end{aligned}$$

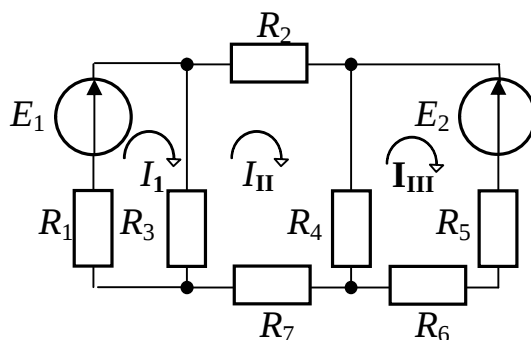


Рисунок 1.32

При составлении уравнений для данного контура следует учитывать, что если направления контурных токов в смежной ветви между контурами совпадают, то падение напряжения на сопротивлении этой ветви, обусловленное протеканием контурным током другого контура берется со знаком “минус”. В противном случае – со знаком “плюс”.

После того, как найдены контурные токи, определяют действительные токи в ветвях. В ветвях, не являющихся общими для смежных контуров (внешние цепи), найденный контурный ток будет равен действительному току ветви. В ветвях же, общих для смежных контуров, действительный ток равен алгебраической сумме контурных токов. Таким образом, в данном случае действительные токи будут равны:

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

1.3.3. Определение токов в ветвях сложной электрической цепи с применением методом узловых потенциалов

Другим из методов расчета, применяемым при расчетах электрических цепей, является метод узловых потенциалов. Дело в том, что ток в любой ветви схемы можно найти по закону Ома для участка цепи, содержащего ЭДС. А для того, чтобы можно было применить закон Ома, необходимо знать потенциалы узлов схемы. Метод расчета электрических цепей, в котором за неизвестные принимают потенциалы узлов схемы, назы-

вают методом узловых потенциалов.

Суть данного метода состоит в следующем [3]:

- а) определяем количество узлов в схеме, подлежащей расчету;
- б) потенциал одного из узлов принимаем за нуль, то есть “мысленно” этот узел заземляем (обычно “мысленно” заземляют один из узлов ветви, к которому сходится наибольшее количество ветвей);
- в) для остальных узлов схемы составляем систему линейных уравнений (если в схеме n узлов, то за счет того, что один узел заземлен, число неизвестных уравнений в системе составит $n-1$).

При составлении системы уравнений следует руководствоваться следующим:

— левая часть этих уравнений представляет слагаемые, одно из которых – произведение потенциала рассматриваемого узла на сумму проводимостей ветвей, сходящихся в этом узле, и берется со знаком “плюс”, а остальные слагаемые – произведение потенциала смежного узла (по отношению к рассматриваемому) на проводимость ветви, соединяющей смежный узел с рассматриваемым (произведение берется со знаком “минус”);

— правая часть системы уравнений: произведение ЭДС источника на проводимость ветви, в которой действует эта ЭДС, сходящееся в рассматриваемом узле (если ЭДС источника направлена к узлу, то произведение берется со знаком “плюс”, а если от узла, то со знаком “минус”).

Рассмотрим на примере для электрической цепи, изображенной на рисунке 1.31, применение метода узловых потенциалов при расчете токов в ветвях. Заземлим “мысленно” узел d . Руководствуясь вышеприведенной методикой, получим в общем виде следующие уравнения:

$$\begin{aligned} j_a g_{aa} - j_b g_{ab} &= I_{aa}; \\ -j_a g_{ba} + j_b g_{bb} - j_c g_{cc} &= I_{bb}; \\ -j_b g_{cb} + j_c g_{cc} &= I_{cc}, \end{aligned}$$

где j_a , j_b и j_c – потенциалы узлов a , b и c соответственно; g_{aa} , g_{bb} и g_{cc} – сумма проводимостей ветвей, сходящихся в узлах a , b и c соответственно; $g_{ab} = g_{ba}$ и $g_{bc} = g_{cb}$ – сумма проводимостей ветвей, соединяющих узлы a и b и b и c соответственно; I_{aa} , I_{bb} и I_{cc} – узловые токи узлов a , b и c соответственно.

Для нашей схемы проводимости равны следующим величинам:

$$\begin{aligned} g_{aa} &= g_1 + g_2 + g_3; \quad g_{bb} = g_2 + g_4 + g_5; \quad g_{cc} = g_4 + g_5 + g_7; \quad g_{ab} = g_2 = 1/R_2; \\ g_{bc} &= g_4 = 1/R_4; \quad g_7 = 1/R_7; \quad g_5 = 1/(R_5 + R_6); \quad g_1 = 1/R_1; \quad g_3 = 1/R_3. \end{aligned}$$

Узловые токи определяются по следующим выражениям:

$$I_{aa} = E_1 g_1; \quad I_{bb} = E_2 g_5 \quad \text{и} \quad I_{cc} = -E_2 g_5.$$

Определив потенциалы узлов схемы j_a , j_b и j_c , воспользовавшись законом Ома, можно найти токи в ветвях:

$$\begin{aligned} I_1 &= (j_d - j_a + E_1) g_1 = (-j_a + E_1) g_1; \quad I_2 = (j_a - j_b) g_2; \quad I_3 = (j_a - j_d) g_3; \\ I_4 &= (j_c - j_b) g_4; \quad I_5 = (j_c - j_b + E_2) g_5; \quad I_6 = j_c g_7. \end{aligned}$$

При записи последних выражений следует помнить, что ток течет от потенциала, имеющего большее значение к потенциалу, имеющему меньшее значение. ЭДС источника берется со знаком “плюс”, если ее направление совпадает с направлением тока в ветви, в противном случае - со знаком “минус”.

1.3.4. Анализ результатов расчета токов в ветвях электрической цепи с помощью баланса мощностей

Сравнение вычисленных токов в ветвях различными методами позволяет сделать вывод о совпадении значений токов с точностью до сотых долей. Для полной характеристики режима электрической цепи надо знать не только токи ветвей и потенциалы узлов, но также мощности, развиваемые источниками электрической энергии и потребляемые приемниками (нагрузками). Исходя, из закона сохранения энергии можно утверждать, что в электрической цепи алгебраическая сумма мощностей всех источников электрической энергии равна арифметической сумме мощностей всех приемников (внутреннее сопротивление источника электрической энергии следует рассматривать как приемник, если его рекомендовано учитывать).

Уравнение баланса мощностей выглядит следующим образом

$$\sum_{i=1}^n I_i E_i = \sum_{j=1}^k I_j^2 R_j,$$

где I_i и I_j – действующие значения токов в i -й и j -й ветвях цепей, содержащих источники и приемники соответственно; E_i – ЭДС i -го источника; R_j – сопротивление j -й ветви.

При составлении баланса мощностей следует учитывать, что если **действительные** направления ЭДС и тока совпадают, то мощность такого источника электрической энергии входит в уравнение с положительным знаком и источник отдает энергию в сеть (работает в режиме генератора).

В случае если **действительные** направления ЭДС и тока не совпадают, то мощность такого источника электрической энергии входит в уравнение с отрицательным знаком и источник забирает энергию из сети (работает в режиме приемника).

Внимание! Если баланс мощностей выполняется, то это говорит о правильности расчетов токов ветвях; если баланс мощностей не выполняется, то следует повторить расчет с целью выявления ошибки.

Составим уравнение баланса мощностей на примере для электрической цепи, изображенной на рисунке 1.31. Если направление токов, показанное на рисунке 1.31, является действительным, то уравнение баланса мощностей будет выглядеть следующим образом

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 (R_5 + R_6) + I_6^2 R_7.$$

1.3.5. Построение потенциальной диаграммы

Под потенциальной диаграммой понимают график распределения потенциала вдоль какого-либо участка цепи или замкнутого контура.

По оси абсцисс на нем откладывают сопротивления вдоль контура, начиная с какой-либо произвольной точки, по оси ординат – потенциалы. При этом каждой точке участка или замкнутого контура соответствует своя точка на потенциальной диаграмме. Рассмотрим последовательность построения потенциальной диаграммы на примере схемы, изображенной на рисунке 1.31, для контура **deabfcd**.

1. Произвольно примем потенциал одной из точек контура, например точки **d** ($j_d=0$), равным нулю. Эту точку поместим в начало координат.

2. Сделаем расчеты потенциалов контура **deabfcd**.

Потенциал точки **e**: $j_e = j_d - I_1 R_1$.

Потенциал точки **a**: $j_a = j_e + E_1$.

Потенциал точки **b**: $j_b = j_a - I_2 R_2$.

Потенциал точки **f**: $j_f = j_b - E_2$.

Потенциал точки **c**: $j_c = j_f + I_5 (R_5 + R_6)$.

Потенциал точки **d**: $j_d = j_c - I_6 R_7$.

3. Подсчитаем суммарное сопротивление контура:

$$R_{\text{общ.}} = R_1 + R_2 + R_5 + R_6 + R_7.$$

4. Выберем масштабы по оси абсцисс и по оси ординат.

5. Построим потенциальную диаграмму, отложив по оси абсцисс в масштабе сопротивлений сопротивления участков в той последовательности, в которой они включены в цепь, а по оси ординат – потенциалы соответствующих точек. График диаграммы изображен на рисунке 1.33.

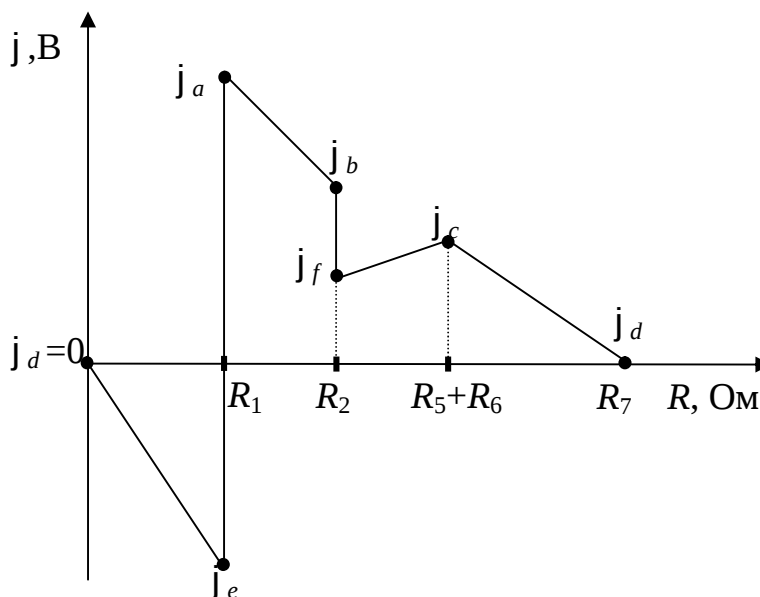


Рисунок 1.33

Если потенциалы точек контура рассчитаны правильно, то потенциальная диаграмма закончится на точке $\mathbf{d}$ с $j_d=0$.

1.4. Контрольные вопросы

1. Как формулируются и математически записываются первый и второй законы Кирхгофа, закон Ома?
2. Как рассчитать электрическую цепь по методу контурных токов? В чем его преимущество перед расчетом по законам Кирхгофа?
3. Как осуществляется расчет электрических цепей по методу узловых потенциалов?
4. В каких случаях метод узловых потенциалов предпочтительнее применять для расчета электрических цепей по сравнению с методом контурных токов?
5. Как осуществляется расчет электрических цепей по методу эквивалентного генератора?
6. Для чего и как необходимо составлять уравнение баланса мощностей?
7. В чем заключается смысл построения потенциальной диаграммы?

КР № 2
РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1. Цель работы

2.1.1. Усвоение методики расчета электрической цепи однофазного переменного тока.

2.1.2. Закрепление и углубление теоретических знаний по данной теме, полученных на лекционных, практических и лабораторных занятиях.

2.2. Задание на выполнение работы

В соответствии с номером варианта исходные данные для расчета и схема электрической цепи однофазного переменного тока выбираются из таблицы 2.1. На электрическую цепь подается напряжение $e(t) = E_m \sin \omega t$.

Значения частоты f и амплитуды E_m подаваемого на электрическую цепь напряжения приведены в таблице 2.1. Варианты схем сложной электрической цепи постоянного тока изображены на рисунках 2.1 - 2.30.

В соответствии со своим вариантом задания студенту требуется:

- 1) на основании законов Кирхгофа составить в общем виде систему уравнений для расчета токов во всех ветвях цепи, записав ее в символической форме;
 - 2) определить любым из методов расчета линейных электрических цепей комплексы действующих значений токов во всех ветвях;
 - 3) вычислить активные и реактивные мощности каждого потребителя, активную и реактивную и полную мощности всей цепи;
 - 4) проверить баланс мощностей;
 - 5) написать выражения и построить графики:
 - а) мгновенных значений токов в ветвях и неразветвленной части цепи схемы;
 - б) мгновенных значений напряжений на всех участках цепи.
 - 6) построить:
 - а) векторные диаграммы токов в ветвях и в неразветвленной части цепи схемы и напряжений на всех участках цепи схемы;
 - б) треугольники мощностей для каждого потребителя и всей цепи.
- В пояснительной записке к расчетной работе следует привести:
- название и цель расчетно-графического задания;
 - текст задания с исходными данными;
 - электрическую схему;
 - системы уравнений, по которым производились расчеты электрической цепи;

- все расчеты комплексных действующих значений токов во всех ветвях с указанием промежуточных и конечных результатов;
- графики мгновенных значений токов в ветвях и неразветвленной части, а также мгновенных значений напряжений на всех участках цепи;
- векторные диаграммы токов в ветвях и в неразветвленной части цепи схемы и напряжений на всех участках цепи схемы;
- график треугольника мощностей всей цепи;
- программы расчетов с соответствующими пояснениями, выполненные на компьютере;
- выводы, в которых следует обосновать правильность произведенных расчетов и отметить практические навыки, полученные в ходе выполнения работы.

2.3. Методические указания по выполнению КР №2

При расчете сложной цепи однофазного переменного тока в основном используют символический метод расчета. Метод называют символическим, потому что токи и напряжения заменяют их комплексными изображениями или символами.

Сущность символического метода расчета состоит в том, что при синусоидальном токе можно перейти от уравнений, составленных для мгновенных значений и являющихся дифференциальными, к алгебраическим уравнениям, составленным относительно комплексных токов и ЭДС.

Этот переход основан на том, что в любом уравнении, составленном по законам Кирхгофа для установившегося процесса, мгновенное значение тока i заменяют комплексной амплитудой тока $\underline{I}_m$; в свою очередь мгновенное значение напряжения на активном сопротивлении R_i заменяют на комплекс $R \underline{I}_m$, мгновенное значение напряжения на индуктивности u_L заменяют на комплекс $j\omega L \underline{I}_m$, а мгновенное значение напряжения на емкости u_C заменяют на комплекс $(-j/\omega C) \underline{I}_m$.

Расчет электрической цепи производят следующим образом [4]:

- а) рассчитывают комплексные сопротивления элементов электрической цепи;
- б) определяют комплексные значения токов в ветвях и неразветвленной части цепи схемы от действия источника ЭДС;
- в) определяют комплексные значения напряжений на участках цепи;
- г) находят активные мощности всех участков цепи и всей цепи по выражениям соответственно:

$$P_n = U_n I_n \cos \varphi_n = I_n^2 R_n ; P_{\text{цел}} = \sum_{n=1}^k P_n ,$$

где n — номер участка, а k — количество участков.

- д) находят реактивные мощности всех участков (Q_n) и всей цепи

($Q_{\text{целу}}$) по выражениям:

$$Q_n = U_n I_n \sin \varphi_n = I_n^2 x_n; Q_{\text{целу}} = \sum_{n=1}^k Q_n,$$

где n — номер участка, а k — количество участков;

е) определяют полную мощность всей цепи по формуле

$$S = UI = \sqrt{(P_{\text{целу}}^2 + Q_{\text{целу}}^2)},$$

где U — действующее значение напряжения, подаваемого на электрическую цепь, а I — действующее значение тока в неразветвленной части цепи или по выражению

$$S = \sum_{n=1}^k S_n,$$

где $S_n = \sqrt{(P_n^2 + Q_n^2)}$ — полная мощность n -го участка;

ж) делают проверку баланса мощностей.

Проверка баланса мощностей осуществляется отдельно для активной и реактивной мощностей.

В результате расчета электрической цепи активная мощность всей цепи должна быть равна арифметической сумме активных мощностей всех участков, а реактивная мощность всей цепи должна быть равна реактивной мощности всех участков.

Реактивная мощность емкостных сопротивлений берется со знаком минус.

При расчете символическим методом удобно проводить расчеты, определяя комплексную мощность каждого n -го участка $\tilde{S}_n$ и всей цепи $\tilde{S}_{\text{целу}}$:

$$\tilde{S}_n = \underline{U}_n I_n^* = U_n I_n e^{j(\varphi_u - \varphi_i)}; \tilde{S}_{\text{целу}} = \sum_{n=1}^k \tilde{S}_n,$$

где I_n^* — комплексно-сопряженное значение тока I_n ($I_n^* = I e^{-j\varphi_i}$); φ_u — начальная фаза напряжения, а φ_i — начальная фаза тока.

Если активная мощность измеряется в ваттах (Вт), то полная мощность измеряется в вольтамперах (ВА).

Реактивную мощность принято измерять в вольтамперах реактивных (ВАр).

На щитке любого источника электрической энергии переменного тока (генератора, трансформатора и т.д.) указывается величина S . Она характеризует ту мощность, которую этот источник может отдавать потребителю, если последний будет работать при $\cos \varphi = 1$ (т.е. будет представлять чисто активное сопротивление).

Таблица 2.1

Номер варианта	Рисунок	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	L_1 , мГн	L_2 , мГн	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	f , Гц	E_m , В
1	2.1	5	33	24	22	150	50	20	50	27
2	2.2	7	8	13	33	160	100	30	55	50
3	2.3	10	16	15	44	170	200	40	60	110
4	2.4	13	18	9	55	180	250	50	75	127
5	2.5	21	22	10	65	190	300	60	80	220
6	2.6	10	34	20	77	200	400	70	85	36
7	2.7	12	18	51	88	210	500	80	90	45
8	2.8	15	27	12	95	220	600	90	95	50
9	2.9	19	56	24	100	230	700	100	100	55
10	2.10	28	36	16	120	240	800	150	110	60
11	2.11	24	62	10	130	50	50	100	120	70
12	2.12	13	18	28	140	60	100	200	130	75
13	2.13	14	15	43	150	70	200	250	140	80
14	2.14	9	24	68	160	80	250	300	150	90
15	2.15	16	10	34	170	90	300	350	160	100
16	2.16	33	22	27	22	100	400	400	50	110
17	2.17	78	15	12	33	110	500	450	60	127
18	2.18	16	18	43	44	120	600	500	70	150
19	2.19	18	34	24	55	130	700	550	80	180
20	2.20	21	30	68	65	140	800	600	90	220
21	2.21	34	42	24	77	150	50	50	100	36
22	2.22	17	33	22	88	160	100	100	200	40
23	2.23	12	10	33	95	170	200	200	300	50
24	2.24	5	15	18	100	180	250	250	400	60
25	2.25	9	18	34	120	190	300	300	500	70
26	2.26	40	18	56	130	150	400	400	600	48
27	2.27	18	25	22	140	160	500	500	700	34
28	2.28	20	45	78	150	170	600	600	800	50
29	2.29	24	68	34	160	180	700	700	900	55
30	2.30	8	51	33	170	190	800	800	1000	80
31	2.1	22	43	27	180	200	50	50	50	36
32	2.2	15	12	18	190	210	100	100	60	40
33	2.3	18	27	43	200	220	200	200	70	50
34	2.4	34	12	82	210	230	250	250	80	60
35	2.5	30	43	22	220	240	300	300	90	75
36	2.6	24	12	15	20	50	400	350	100	80
37	2.7	36	15	24	30	60	500	400	200	90
38	2.8	12	33	51	40	70	600	500	400	100
39	2.9	20	62	10	50	80	700	600	450	110
40	2.10	15	18	28	60	90	800	700	500	120

Продолжение таблицы 2.1

Номер варианта	Рисунок	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	L_1 , мГн	L_2 , мГн	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	f , Гц	E_m , В
41	2.11	5	30	24	22	150	50	20	50	27
42	2.12	7	8	13	27	160	100	30	55	50
43	2.13	10	16	15	44	170	200	40	60	110
44	2.14	13	18	9	55	180	250	50	75	127
45	2.15	21	22	10	65	190	300	60	80	220
46	2.16	10	34	20	77	200	400	70	85	36
47	2.17	12	18	51	88	210	500	80	90	45
48	2.18	15	27	12	95	220	600	90	95	50
49	2.19	19	56	24	100	230	700	100	100	55
50	2.20	28	36	16	120	240	800	150	110	60
51	2.21	24	62	10	130	50	50	100	120	70
52	2.22	13	18	28	140	60	100	200	130	75
53	2.23	14	15	43	150	70	200	250	140	80
54	2.24	9	24	68	160	80	250	300	150	90
55	2.25	16	10	34	170	90	300	350	160	100
56	2.26	33	22	27	22	100	400	400	50	110
57	2.27	78	15	12	33	110	500	450	60	127
58	2.28	16	18	43	44	120	600	500	70	150
59	2.29	18	34	24	55	130	700	550	80	180
60	2.30	21	30	68	65	140	800	600	90	220
61	2.1	34	42	24	77	150	50	50	100	36
62	2.2	17	33	22	88	160	100	100	200	40
63	2.3	12	10	33	95	170	200	200	300	50
64	2.4	5	15	18	100	180	250	250	400	60
65	2.5	9	18	34	120	190	300	300	500	70
66	2.6	40	18	56	130	150	400	400	600	48
67	2.7	18	25	22	140	160	500	500	700	34
68	2.8	20	45	78	150	170	600	600	800	50
69	2.9	24	68	34	160	180	700	700	900	55
70	2.10	8	51	33	170	190	800	800	1000	80
71	2.11	22	43	27	180	200	50	50	50	36
72	2.12	15	12	18	190	210	100	100	60	40
73	2.13	18	27	43	200	220	200	200	70	50
74	2.14	34	12	82	210	230	250	250	80	60
75	2.15	30	43	22	220	240	300	300	90	75
76	2.16	24	12	15	20	50	400	350	100	80
77	2.17	36	15	24	30	60	500	400	200	90
78	2.18	12	33	51	40	70	600	500	400	100
79	2.19	20	62	10	50	80	700	600	450	110
80	2.20	15	18	28	60	90	800	700	500	120

Окончание таблицы 2.1

Номер варианта	Рисунок	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	L_1 , мГн	L_2 , мГн	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	f , Гц	E_m , В
81	2.11	5	30	24	22	150	50	20	50	27
82	2.12	7	10	15	27	160	100	30	55	50
83	2.13	10	16	15	44	170	200	40	60	110
84	2.14	13	18	18	55	180	250	50	75	127
85	2.15	21	22	10	65	190	300	60	80	220
86	2.16	10	34	20	77	200	400	70	85	36
87	2.17	12	18	51	88	210	500	80	90	45
88	2.18	15	27	12	95	220	600	90	95	50
89	2.19	19	56	24	100	230	700	100	100	55
90	2.20	28	36	16	120	240	800	150	110	60
91	2.21	24	62	10	130	50	50	100	120	70
92	2.22	12	18	28	140	60	100	200	130	75
93	2.23	14	15	43	150	70	200	250	140	80
94	2.24	9	24	68	160	80	250	300	150	90
95	2.25	16	10	34	170	90	300	350	160	100
96	2.26	33	22	27	22	100	400	400	50	110
97	2.27	78	15	12	33	110	500	450	60	127
98	2.28	16	18	43	44	120	600	500	70	150
99	2.29	18	34	24	55	130	700	550	80	180
100	2.30	21	30	68	65	140	800	600	90	220

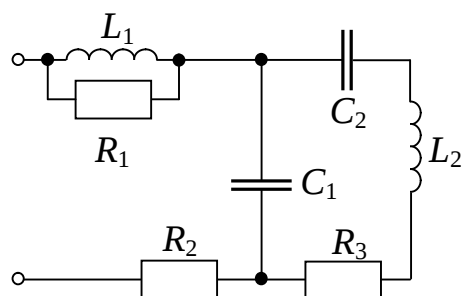


Рисунок 2.1

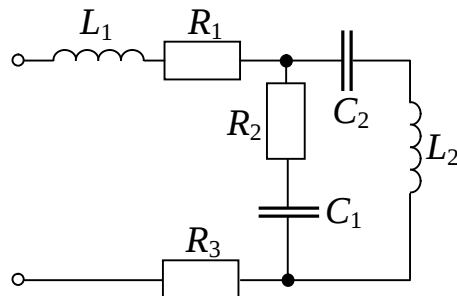


Рисунок 2.2

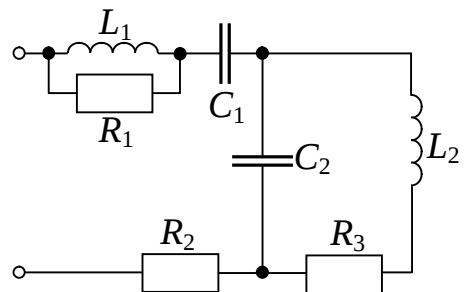


Рисунок 2.3

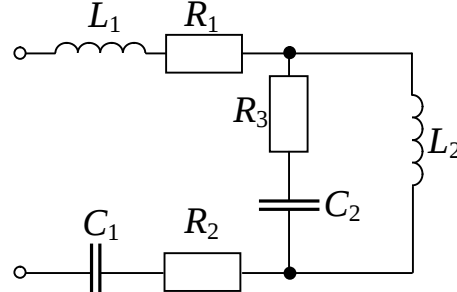


Рисунок 2.4

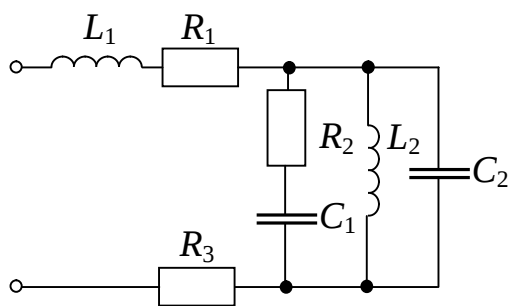


Рисунок 2.5

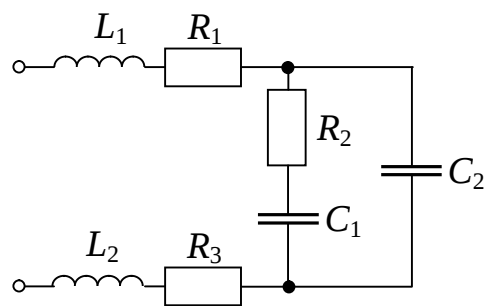


Рисунок 2.6

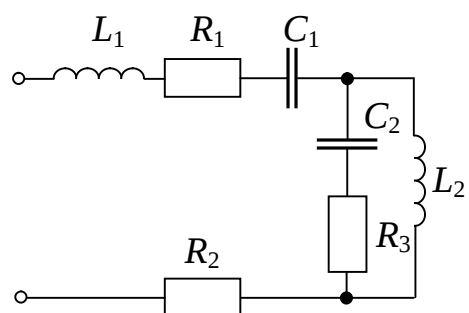


Рисунок 2.7

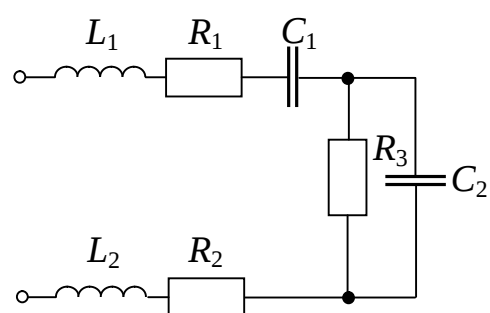


Рисунок 2.8

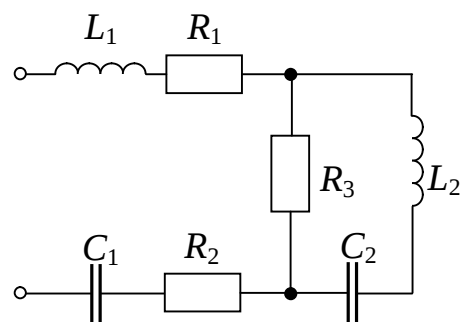


Рисунок 2.9

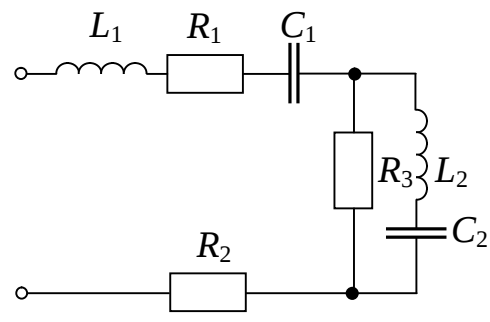


Рисунок 2.10

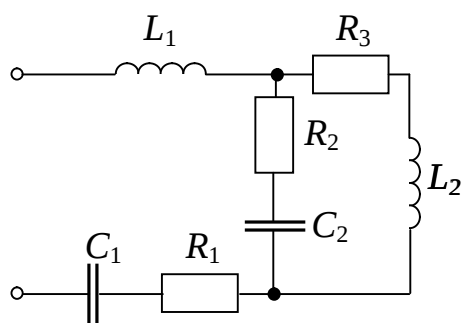


Рисунок 2.11

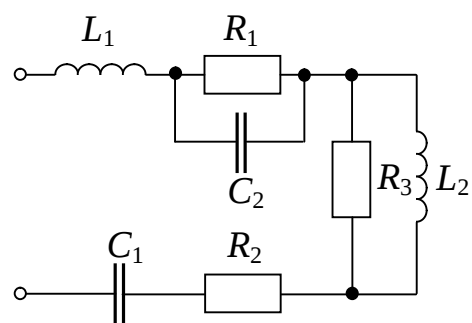


Рисунок 2.12

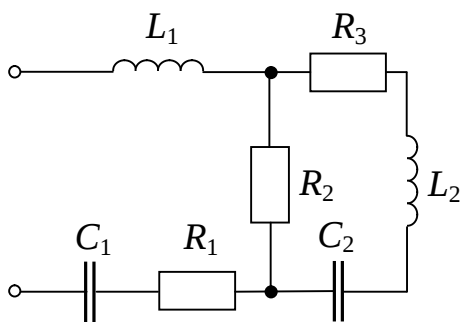


Рисунок 2.13

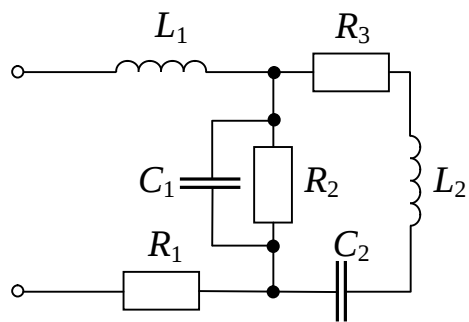


Рисунок 2.14

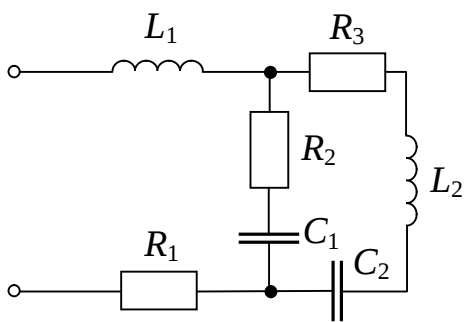


Рисунок 2.15

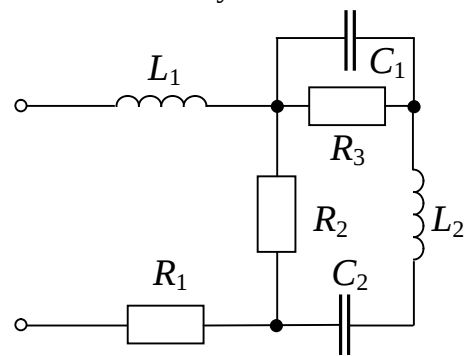


Рисунок 2.16

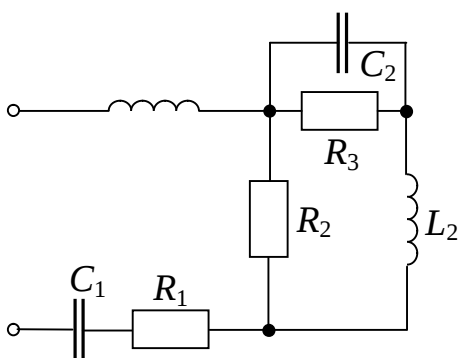


Рисунок 2.17

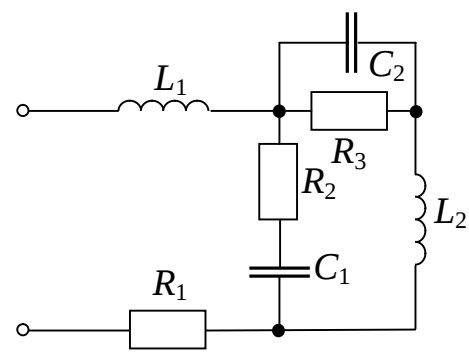


Рисунок 2.18

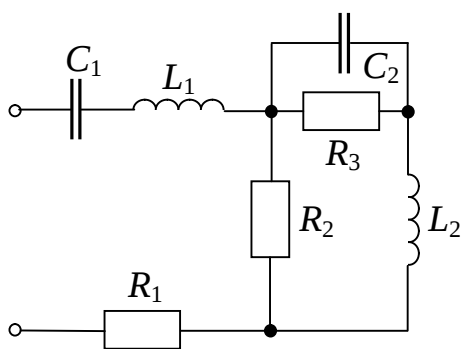


Рисунок 2.19

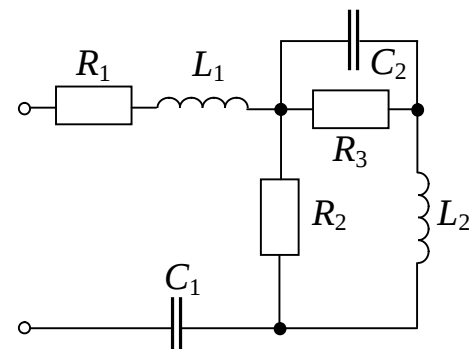


Рисунок 2.20

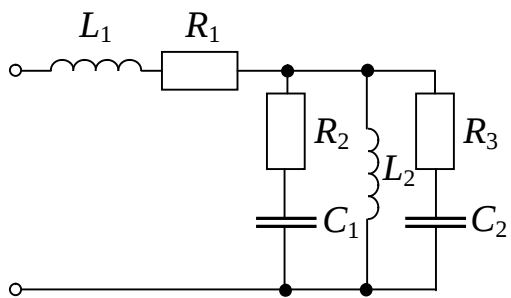


Рисунок 2.21

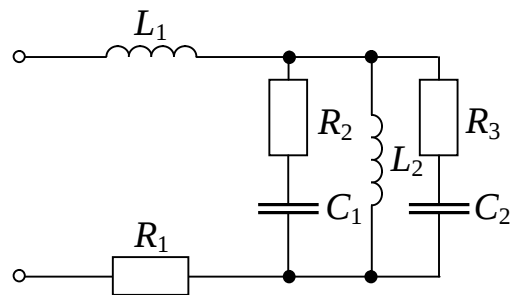


Рисунок 2.22

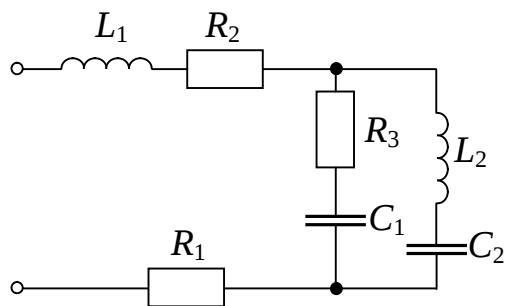


Рисунок 2.23

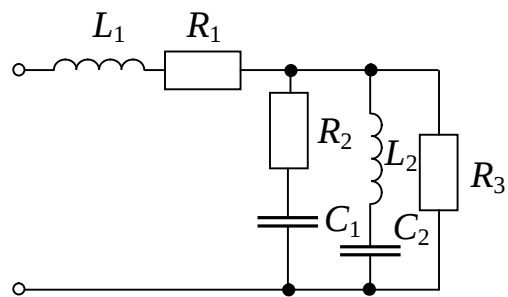


Рисунок 2.24

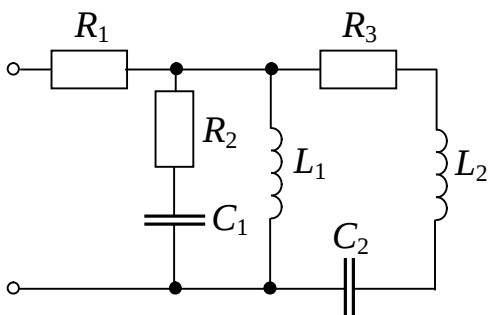


Рисунок 2.25

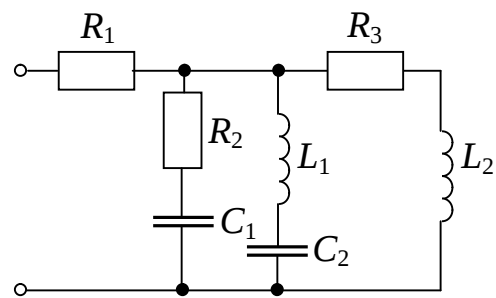


Рисунок 2.26

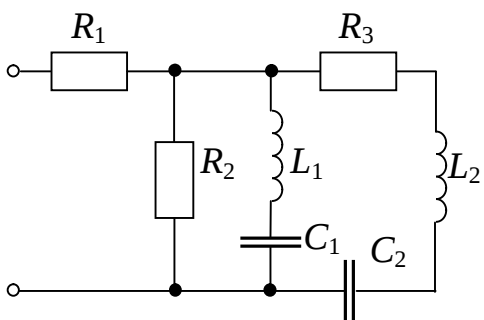


Рисунок 2.27

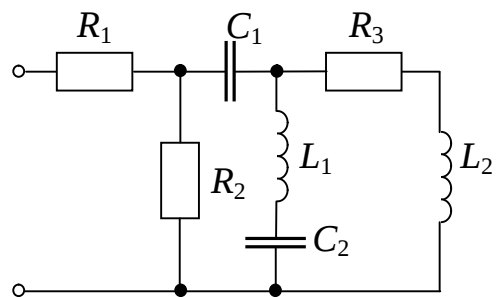


Рисунок 2.28

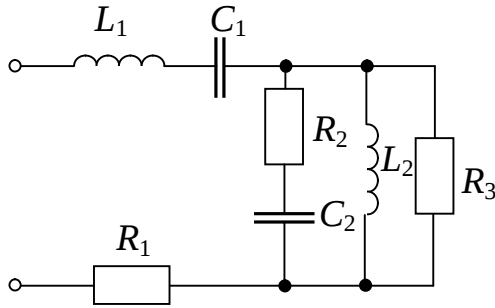


Рисунок 2.29

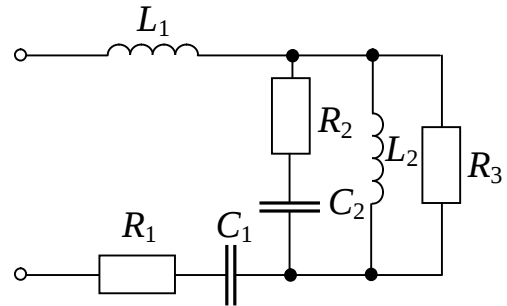


Рисунок 2.30

В качестве примера рассмотрим порядок выполнения расчета электрической цепи, схема которой изображена на рисунке 2.31.

Пусть источник напряжения, подключенный к рассчитываемой цепи, имеет вид

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u).$$

Так как реактивные параметры цепи зависят от частоты, сделаем вначале расчет комплексных сопротивлений элементов, входящих в рассматриваемую цепь.

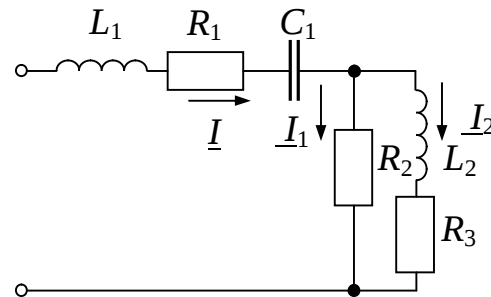


Рисунок 2.31

2.3.1. Определение комплексных сопротивлений ветвей электрической цепи

Для выполнения этого пункта расчета находим реактивные сопротивления для первой гармоники по выражениям:

$$x_{C1} = \frac{1}{\omega C_1}; x_{L1} = \omega L_1; x_{L2} = \omega L_2.$$

Найдем вначале комплексные сопротивления ветвей электрической цепи. Комплексное сопротивление ветви, содержащей R_1 , L_1 , C_1 , определится, как

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j(x_{L1} - x_{C1}).$$

Комплексное сопротивление ветви, содержащей параллельное соединение сопротивлений $\underline{Z}_2 = R_2$ и $\underline{Z}_3 = R_3 + jx_{L2}$, найдется как

$$\underline{Z}_{(2-3)} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

Окончательно комплексное сопротивление всей цепи определится как

$$\underline{Z}_{общ.} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{(2-3)}.$$

2.3.2. Определение комплексных значений токов в ветвях и неразветвлённой части цепи схемы

Вначале определим значение тока в неразветвленной части ветви схемы при воздействии напряжения на цепь схемы

$$\underline{I} = \frac{(U_m e^{j\varphi_u} / \sqrt{2})}{\underline{Z}_{\text{общ.}}}$$

Вычислив напряжение $\underline{U}_{(2-3)}$ на участке ветви, содержащей параллельное соединение $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_3$, как

$$\underline{U}_{(2-3)} = \underline{I} \underline{Z}_{(2-3)},$$

можно определить токи в ветвях

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{(2-3)}}{\underline{Z}_2}; \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{(2-3)}}{\underline{Z}_3}.$$

2.3.3. Определение комплексных значений напряжений на элементах цепи

Комплексные значения напряжения на участках цепи, содержащей $R_1, R_2, R_3, L_1, L_2, C_1$ при протекании тока по этой ветви найдем соответственно, как

$$\begin{aligned} \underline{U}_{R1} &= \underline{I} R_1; \underline{U}_{R2} = \underline{I}_1 R_2; \underline{U}_{R3} = \underline{I}_2 R_3; \\ \underline{U}_{L1} &= j \underline{I} x_{L1}; \underline{U}_{L2} = j \underline{I}_2 x_{L2}; \underline{U}_{C1} = -j \underline{I} x_{C1}. \end{aligned}$$

2.3.4. Вычисление мощности каждого потребителя

$$\begin{aligned} Q_{C1} &= I^2 x_{C1}; Q_{L1} = I^2 x_{L1}; Q_{L2} = I_2^2 x_{L2}; \\ P_{R1} &= I^2 R_1; P_{R2} = I_1^2 R_2; P_{R3} = I_2^2 R_3. \end{aligned}$$

2.3.5. Определение активной и реактивной мощностей цепи

$$P_{\text{цепи}} = P_{R1} + P_{R2} + P_{R3}; Q_{\text{цепи}} = Q_{C1} + Q_{L1} + Q_{L2}.$$

2.3.6. Проверка баланса мощностей

$$\tilde{S}_{\text{цепи}} = \underline{U} \underline{I}^* = P_{\text{цепи}} + jQ_{\text{цепи}},$$

где $\underline{U}$ и $\underline{I}^*$ — комплексное значение напряжения, подаваемого на исследуемую цепь и комплексно-сопряженное значение тока в неразветвленной части цепи схемы соответственно.

2.3.7. Построение треугольника мощностей

Проверку выполнения баланса мощностей можно проиллюстрировать и построением на одном графике треугольников мощностей каждого из потребителей и всей цепи. При правильно рассчитанной цепи значение полной мощности цепи совпадает со значением, полученным в результате суммирования на графике полных мощностей всех потребителей.

После расчета мощностей отдельных участков можно построить треугольники мощностей каждого из потребителей. В треугольнике мощностей имеются катеты, равные P и Q , а также гипотенуза S . В общем случае потребитель не имеет чистой активной или чисто реактивной мощности, но ввиду малости значения на практике могут пренебрегать значениями той или иной мощности.

Построение треугольника мощностей начинают с выбора масштаба мощностей. Затем по горизонтали откладывают в масштабе активную мощность потребителя, а по вертикали его реактивную мощность.

График треугольника мощностей цепи изображен на рисунке 2.32.

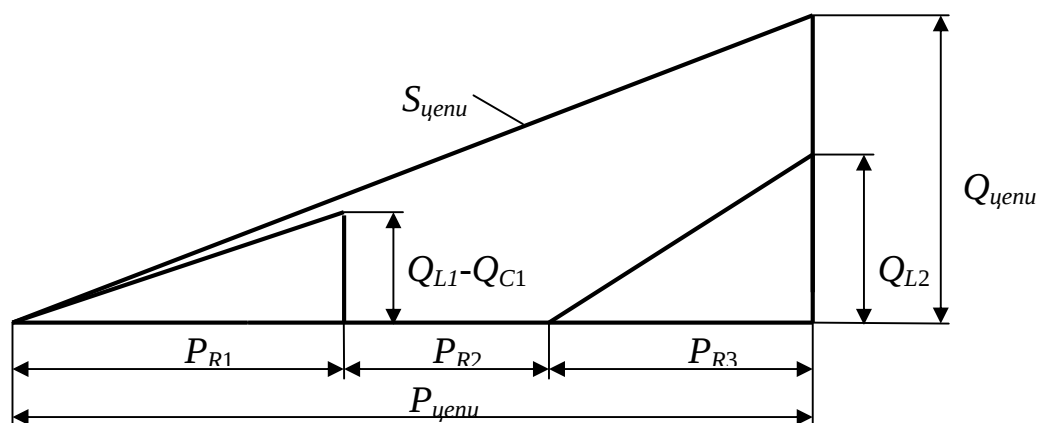


Рисунок 2.32

Для нашего примера будем считать, что у нас три потребителя: первый потребитель содержит R_1 , C_1 , L_1 , второй потребитель содержит R_2 , а третий — R_3 и L_2 .

Вначале строим треугольник мощностей первого потребителя, отложив по горизонтали значение активной мощности, а по вертикали вначале значение реактивной мощности, обусловленной действием L_1 и C_1 .

Затем откладываем значение активной мощности (на этом участке нет реактивной мощности - только потребитель с активной мощностью), а в завершении – вначале откладываем значение активной мощности, обусловленной потерями на R_3 и значение реактивной мощности на L_2 . Просуммировав активные мощности всех участков цепи и реактивные мощности участков, получим значения активной и реактивной мощностей всей

цепи соответственно. Гипотенуза, полученного треугольника, будет равна значению полной мощности всей цепи.

Внимание! При построении треугольников мощностей, следует учитывать знак реактивной мощности (реактивная мощность, обусловленная действием емкости, в цепи имеет отрицательный знак).

2.3.8. Запись выражений для мгновенных значений токов в ветвях и в неразветвленной части цепи схемы

Перед построением графиков мгновенных значений токов в ветвях переведем их значения из записи в комплексном виде в тригонометрическую форму

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i); i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_{i1}); i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \varphi_{i2}).$$

Пусть из расчета известно:

$$x_{C1} < x_{L1}; x_{L1} < x_{L2} < R_3; R_2 < |Z_1| < |Z_3|,$$

а значения начальных фаз токов соотносятся, как

$$\varphi_{i1} < \varphi_i < \varphi_{i2} < 0.$$

Для построения графиков мгновенных значений напряжений на участках цепи схемы и входного напряжения переведем их значения

$$\underline{U}_{R1}; \underline{U}_{R2}; \underline{U}_{R3}; \underline{U}_{L1}; \underline{U}_{L2}; \underline{U}_{C1}; \underline{U}$$

из записи в комплексном виде в тригонометрическую форму

$$u_{R1} = U_{R1m} \sin(\omega t + \varphi_{R1u}); u_{R2} = U_{R2m} \sin(\omega t + \varphi_{R2u});$$

$$u_{R3} = U_{R3m} \sin(\omega t + \varphi_{R3u}); u_{L1} = U_{L1m} \sin(\omega t + \varphi_{L1u});$$

$$u_{L2} = U_{L2m} \sin(\omega t + \varphi_{L2u}); u_{C1} = U_{L1m} \sin(\omega t + \varphi_{C1u});$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u).$$

Графики мгновенных значений токов и напряжений на участках цепи обычно строят все вместе на одном графике.

Для удобства работы с графиками мгновенных значений, последние следует построить следующим образом: для каждой из ветвей строится свой график, на котором приводятся графики мгновенного значения тока, протекающего через заданную ветвь и мгновенных значений напряжений на участках электрической цепи, входящих в ветвь.

Например, для нашего примера будут три графика.

При **выбранной нулевой начальной фазе приложенного напряжения** на первом графике будут кривые i , u_{R1} , u_{C1} , u_{L1} и u (рисунок 2.33, а), на втором – i_1 и u_{R2} (рисунок 2.33, б), а на третьем – i_2 , u_{R3} и u_{L2} (рисунок 2.33, в). Для наглядности на графиках достаточно отразить 1-2 периода отображаемой функции времени.

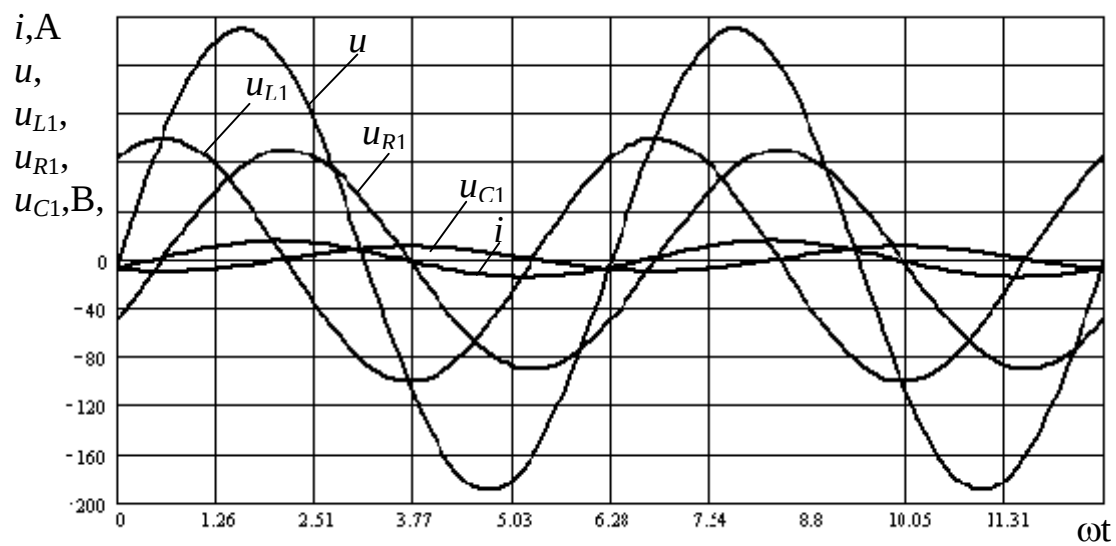


Рисунок 2.33, а

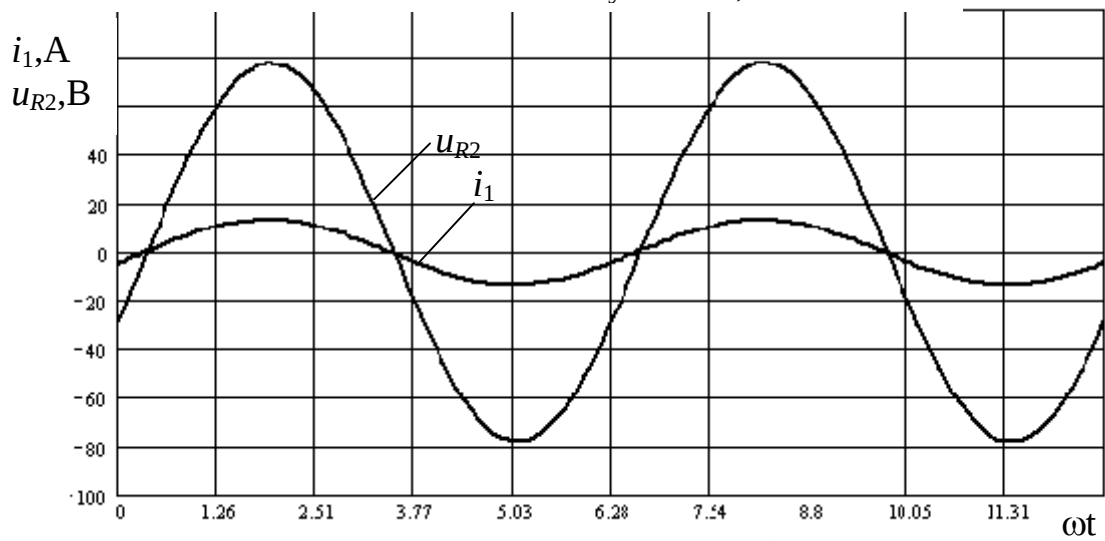


Рисунок 2.33, б

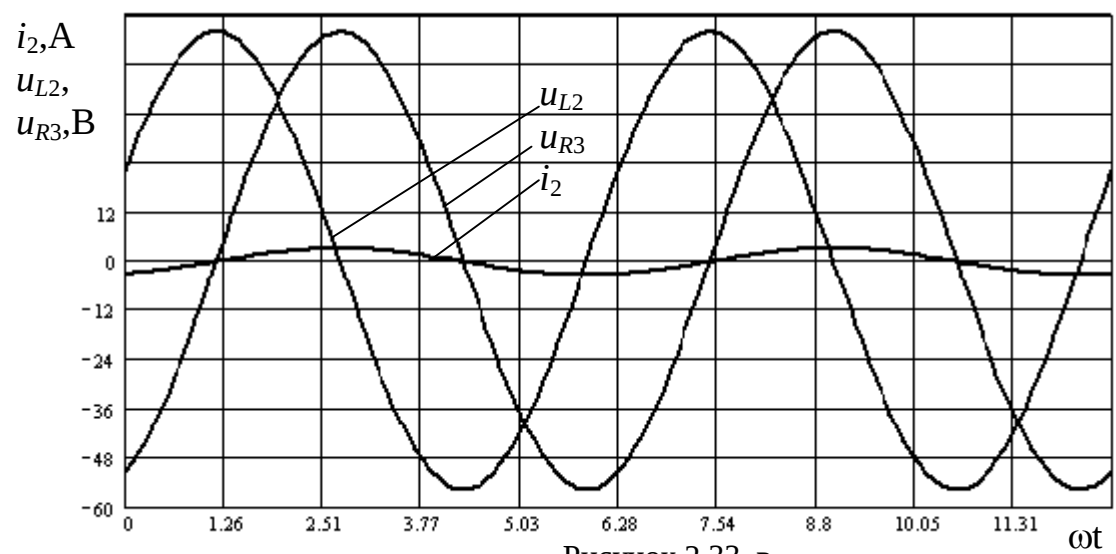


Рисунок 2.33, в

2.3.9. Построение векторных диаграмм токов и напряжений

Правильность выполненных расчетов можно определить и построением векторной диаграммы токов и напряжений.

Векторной диаграммой называют совокупность векторов на комплексной плоскости, изображающих синусоидально изменяющиеся функции времени одной и той же частоты и построенных с соблюдением правильной ориентации их относительно друг друга по фазе. Если токи в ветвях схемы рассчитаны правильно, то сумма векторов токов в ветвях цепи будет равна вектору тока в неразветвленной части цепи. По аналогии следует рассматривать и правильность расчета напряжений на участках цепи – сумма векторов напряжений на участках цепи равна вектору напряжения, подаваемого на цепь. Векторные диаграммы токов и напряжений можно построить на отдельных рисунках или вместе на одном рисунке. В последнем случае это уже будет векторная диаграмма токов и напряжений.

Внимание! В электротехнике положительные углы начальной фазы j отсчитываются против часовой стрелки, а отрицательные – наоборот.

Векторную диаграмму можно построить двумя способами. Первый способ состоит в том, что по известным значениям токов в ветвях, падениям напряжений на участках цепи и углы сдвига по фазе между ними в определенном масштабе строятся векторы токов и напряжений. По второму способу токи и напряжения раскладываются на активные и реактивные составляющие, строятся векторы этих составляющих, а затем геометрическим сложением находятся векторы полных токов и напряжений. Для схемы, изображенной на рисунке 2.31, на рисунке 2.34 и 2.35 изображены векторные диаграммы токов, и напряжений соответственно. Векторная диаграмма токов для этой схемы строилась следующим образом:

- 1) выбирается масштаб тока;
- 2) строятся векторы токов $\underline{I}$, $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_2$ (в следствие того, что начальные фазы этих токов φ_i , φ_{i1} и φ_{i2} имеют отрицательное значение, то эти вектора откладываются по часовой стрелке от действительной оси (+1) комплексной плоскости);
- 3) производится проверка правильности построения векторной диаграммы и произведенных расчетов построением векторной суммы:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2.$$

Векторная диаграмма напряжений строилась следующим образом.

1. Выбирается масштаб напряжения;
2. Строятся векторы напряжений $\underline{U}_{R1}$, $\underline{U}_{C1}$, $\underline{U}_{L1}$, $\underline{U}_{R2}$, $\underline{U}_{L2}$ и $\underline{U}_{R3}$;
3. Производится проверка правильности построения векторной диаграммы и произведенных расчетов построением векторной суммы:

$$\underline{U} = \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{L1} + \underline{U}_{R3} + \underline{U}_{L2}.$$

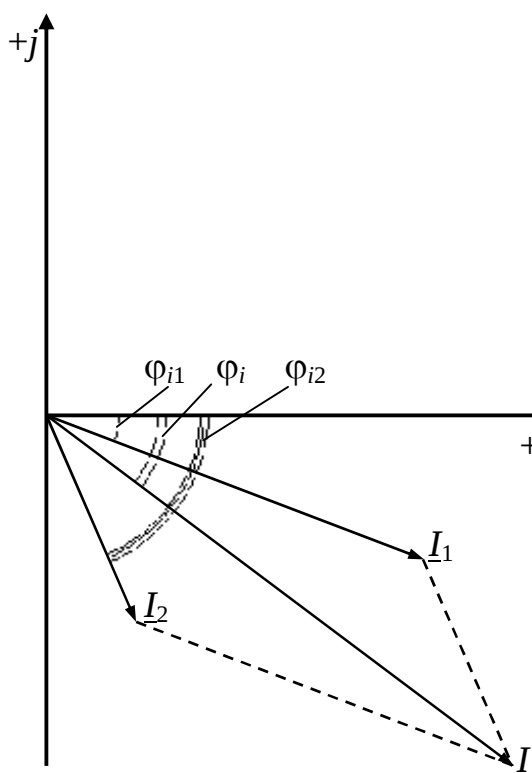


Рисунок 2.34

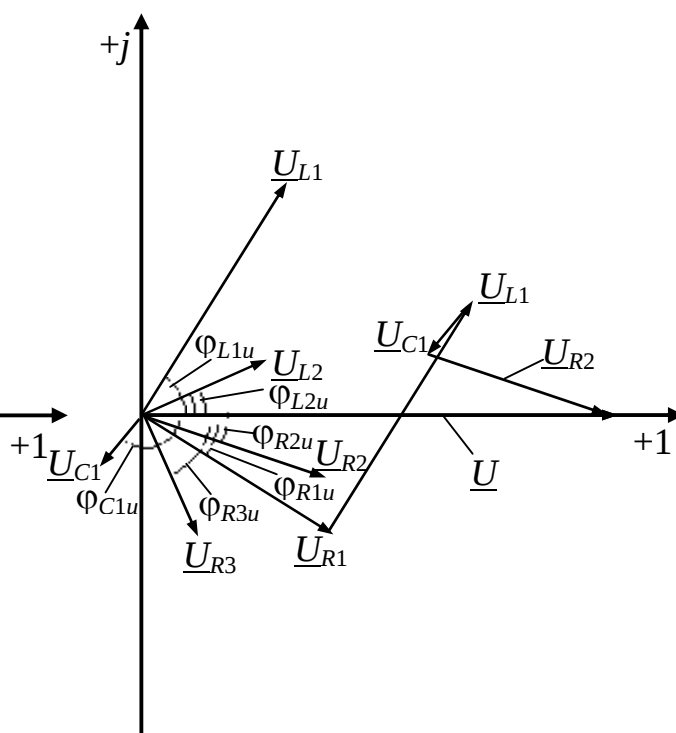


Рисунок 2.35

2.4. Контрольные вопросы

1. Как формулируются и математически записываются первый и второй законы Кирхгофа, закон Ома в символической форме записи?
2. Как рассчитать электрическую цепь переменного тока по методу контурных токов?
3. Какие основные величины характеризуют синусоидальный ток?
4. Как осуществляется расчет электрической цепи переменного тока по методу узловых потенциалов?
5. В чем заключается сущность символического метода расчета цепей переменного тока?
6. Для чего и как строятся векторные и временные диаграммы для цепей синусоидального тока?
7. Как определяется активная, реактивная, полная и комплексная мощности, а также рассчитывается баланс активных и реактивных мощностей?

КР № 3

РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

3.1. Цель работы

3.1.1. Усвоение методики расчета трехфазных электрических цепей.

3.1.2. Закрепление и углубление теоретических знаний по данной теме, полученных на лекционных, практических и лабораторных занятиях.

3.2. Задание на выполнение работы

Исходные данные для расчетов и схема трехфазной электрической цепи выбираются по номеру своего варианта из таблицы 3.1.

В каждой из схем имеются трехфазный генератор, создающий **симметричную трехфазную систему ЭДС** и симметричная нагрузка.

Нагрузка подключается к трехфазной системе ЭДС посредством электрических цепей (или проводов).

Действующее значение ЭДС фазы A E_A и частота f фазы генератора, а также номинальные значения элементов схемы приведены в таблице 3.1.

Варианты схем сложной электрической цепи постоянного тока изображены на рисунках 3.1- 3.30.

В соответствии со своим вариантом задания студенту требуется:

- 1) определить комплексы действующих значений линейных токов и токов в фазах нагрузки при **симметричной** нагрузке фаз;
- 2) рассчитать напряжение на каждой фазе **симметричной** нагрузки;
- 3) определить активные, реактивные и полные мощности **трехфазного потребителя** и всей **трехфазной системы** при **симметричной** нагрузке;
- 4) вычислить комплексы действующих значений линейных токов и токов в фазах нагрузки, а также напряжение на каждой фазе нагрузки при обрыве линейного провода (выбрать любой по усмотрению);
- 5) написать выражения и построить графики мгновенных значений токов в фазах и напряжений на фазах **симметричной** нагрузки;
- 6) построить:
 - а) векторную диаграмму напряжений генератора;
 - б) векторную диаграмму токов в фазах и линейных проводах, а также напряжений на фазах приемника при **симметричной** нагрузке фаз;
 - в) векторную диаграмму токов и напряжений в трехфазном приемнике и линии при **обрыве линейного провода**.

Указания:

- а) сопротивления обмоток генератора полагать равными нулю;
- б) при расчете символическим методом рекомендуется оперировать с

комплексными действующими значениями (не с комплексными амплитудами);

в) **только для вариантов**, в которых нагрузка, соединенная по схеме **треугольник**, подключается к генератору через электрические цепи с комплексными сопротивлениями, при расчете следует использовать **эквивалентные преобразования треугольника в эквивалентную звезду**;

г) вначале рекомендуется произвести расчет трехфазной цепи при симметричном режиме работы, а затем при аварийном режиме (обрыв линейного провода).

3.3. Методические указания по выполнению КР № 3

При выполнении задания вначале следует определить комплексные сопротивления фаз нагрузки $\underline{Z}_A$, $\underline{Z}_B$ и $\underline{Z}_C$, а также комплексные сопротивления электрических цепей (если они есть), соединяющих источник ЭДС с приемником ($\underline{Z}_{Aa}=\underline{Z}_{Bb}=\underline{Z}_{Cc}$).

Затем следует задаться положительными направлениями линейных и фазных токов и указать их стрелками на схеме.

Направления линейных токов следует выбирать от генератора к приемнику.

Если в приемнике фазы нагрузки соединены по схеме треугольник, то направления токов в ветвях нагрузки выбираются по часовой стрелке.

Далее следует записать выражения ЭДС фаз трехфазного генератора.

Если ЭДС фаз источника соединены по схеме звезда, то эти выражения примут вид для фаз А, В и С соответственно:

$$\begin{aligned}\underline{E}_A &= E_A; \\ \underline{E}_B &= E_A e^{-j120^\circ}; \\ \underline{E}_C &= E_A e^{j120^\circ}.\end{aligned}$$

В случае, если фазы в приемнике соединены по схеме треугольник, а комплексные сопротивления ветвей, соединяющих источник и приемник равны нулю ($\underline{Z}_{Aa}=\underline{Z}_{Bb}=\underline{Z}_{Cc}=0$), удобно воспользоваться линейными напряжениями:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B = \sqrt{3}E_A e^{j30^\circ}; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C = \sqrt{3}E_A e^{-j90^\circ}; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A = \sqrt{3}E_A e^{j150^\circ}.\end{aligned}$$

Векторные диаграммы токов и напряжений, приведенные ниже для несимметричных режимов работы цепей, выполнены с разным масштабом, но с привязками к соответствующим векторным диаграммам при симметричном режиме работы трехфазных цепей.

Таблица 3.1

Номер варианта	Рисунок	$R_1=R_2=R_3,$ Ом	$R_4=R_5=R_6,$ Ом	$L_1=L_2=L_3,$ мГн	$L_4=L_5=L_6,$ мГн	$C_1=C_2=C_3,$ мкФ	$C_4=C_5=C_6,$ мкФ	$f, \Gamma\text{ц}$	$E_A, \text{В}$
1	3.1	5	33	24	22	150	50	50	27
2	3.2	7	8	13	33	160	100	50	50
3	3.3	10	16	15	44	170	200	50	110
4	3.4	13	18	9	55	180	250	50	127
5	3.5	21	22	10	65	190	300	50	220
6	3.6	10	34	20	77	200	400	50	36
7	3.7	12	18	51	88	210	500	50	45
8	3.8	15	27	12	95	220	600	50	50
9	3.9	19	56	24	100	230	700	50	55
10	3.10	28	36	16	120	240	800	50	60
11	3.11	24	62	10	130	50	50	50	70
12	3.12	13	18	28	140	60	100	50	75
13	3.13	14	15	43	150	70	200	50	80
14	3.14	9	24	68	160	80	250	50	90
15	3.15	16	10	34	170	90	300	50	100
16	3.16	33	22	27	22	100	400	50	110
17	3.17	78	15	12	33	110	500	50	127
18	3.18	16	18	43	44	120	600	50	150
19	3.19	18	34	24	55	130	700	50	180
20	3.20	21	30	68	65	140	800	50	220
21	3.21	34	42	24	77	150	50	50	36
22	3.22	17	33	22	88	160	100	50	40
23	3.23	12	10	33	95	170	200	50	50
24	3.24	5	15	18	100	180	250	50	60
25	3.25	9	18	34	120	190	300	50	70
26	3.26	40	18	56	130	150	400	50	48
27	3.27	18	25	22	140	160	500	50	34
28	3.28	20	45	78	150	170	600	50	50
29	3.29	24	68	34	160	180	700	50	55
30	3.30	8	51	33	170	190	800	50	80
31	3.1	22	43	27	180	200	50	100	36
32	3.2	15	12	18	190	210	100	100	40
33	3.3	18	27	43	200	220	200	100	50
34	3.4	34	12	82	210	230	250	100	60
35	3.5	30	43	22	220	240	300	100	75
36	3.6	24	12	15	20	50	400	100	80
37	3.7	36	15	24	30	60	500	100	90
38	3.8	12	33	51	40	70	600	100	100
39	3.9	20	62	10	50	80	700	100	110
40	3.10	15	18	28	60	90	800	100	120

Продолжение таблицы 3.1

Номер варианта	Рисунок	$R_1=R_2=R_3$, Ом	$R_4=R_5=R_6$, Ом	$L_1=L_2=L_3$, мГн	$L_4=L_5=L_6$, мГн	$C_1=C_2=C_3$, мкФ	$C_4=C_5=C_6$, мкФ	f , Гц	E_A , В
41	3.11	5	30	24	22	150	50	100	50
42	3.12	7	8	13	27	160	100	100	55
43	3.13	10	16	15	44	170	200	100	60
44	3.14	13	18	9	55	180	250	100	75
45	3.15	21	22	10	65	190	300	100	80
46	3.16	10	34	20	77	200	400	100	85
47	3.17	12	18	51	88	210	500	100	90
48	3.18	15	27	12	95	220	600	100	95
49	3.19	19	56	24	100	230	700	100	100
50	3.20	28	36	16	120	240	800	100	110
51	3.21	24	62	10	130	50	50	100	120
52	3.22	13	18	28	140	60	100	100	130
53	3.23	14	15	43	150	70	200	100	140
54	3.24	9	24	68	160	80	250	100	150
55	3.25	16	10	34	170	90	300	100	160
56	3.26	33	22	27	22	100	400	100	50
57	3.27	78	15	12	33	110	500	100	60
58	3.28	16	18	43	44	120	600	100	70
59	3.29	18	34	24	55	130	700	100	80
60	3.30	21	30	68	65	140	800	100	90
61	3.1	34	42	24	77	150	50	400	100
62	3.2	17	33	22	88	160	100	400	200
63	3.3	12	10	33	95	170	200	400	300
64	3.4	5	15	18	100	180	250	400	400
65	3.5	9	18	34	120	190	300	400	500
66	3.6	40	18	56	130	150	400	400	600
67	3.7	18	25	22	140	160	500	400	700
68	3.8	20	45	78	150	170	600	400	800
69	3.9	24	68	34	160	180	700	400	900
70	3.10	8	51	33	170	190	800	400	1000
71	3.11	22	43	27	180	200	50	400	50
72	3.12	15	12	18	190	210	100	400	60
73	3.13	18	27	43	200	220	200	400	70
74	3.14	34	12	82	210	230	250	400	80
75	3.15	30	43	22	220	240	300	400	90
76	3.16	24	12	15	20	50	400	400	100
77	3.17	36	15	24	30	60	500	400	200
78	3.18	12	33	51	40	70	600	400	400
79	3.19	20	62	10	50	80	700	400	450
80	3.20	15	18	28	60	90	800	400	500

Окончание таблицы 3.1

Номер варианта	Рисунок	$R_1=R_2=R_3$, Ом	$R_4=R_5=R_6$, Ом	$L_1=L_2=L_3$, мГн	$L_4=L_5=L_6$, мГн	$C_1=C_2=C_3$, мкФ	$C_4=C_5=C_6$, мкФ	f , Гц	E_A , В
81	3.21	5	30	24	22	150	50	20	50
82	3.22	7	10	15	27	160	100	30	55
83	3.23	10	16	15	44	170	200	40	60
84	3.24	13	18	18	55	180	250	50	75
85	3.25	21	22	10	65	190	300	60	80
86	3.26	10	34	20	77	200	400	70	85
87	3.27	12	18	51	88	210	500	80	90
88	3.28	15	27	12	95	220	600	90	95
89	3.29	19	56	24	100	230	700	100	100
90	3.30	28	36	16	120	240	800	150	110
91	3.1	24	62	10	130	50	50	100	120
92	3.2	12	18	28	140	60	100	200	130
93	3.3	14	15	43	150	70	200	250	140
94	3.4	9	24	68	160	80	250	300	150
95	3.5	16	10	34	170	90	300	350	160
96	3.6	33	22	27	22	100	400	400	50
97	3.7	78	15	12	33	110	500	450	60
98	3.8	16	18	43	44	120	600	500	70
99	3.9	18	34	24	55	130	700	550	80
100	3.10	21	30	68	65	140	800	600	90

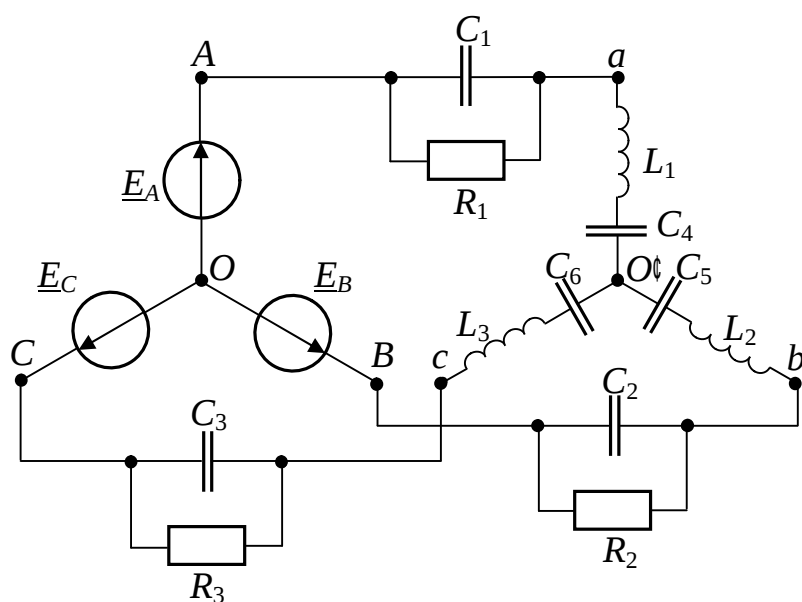


Рисунок 3.1

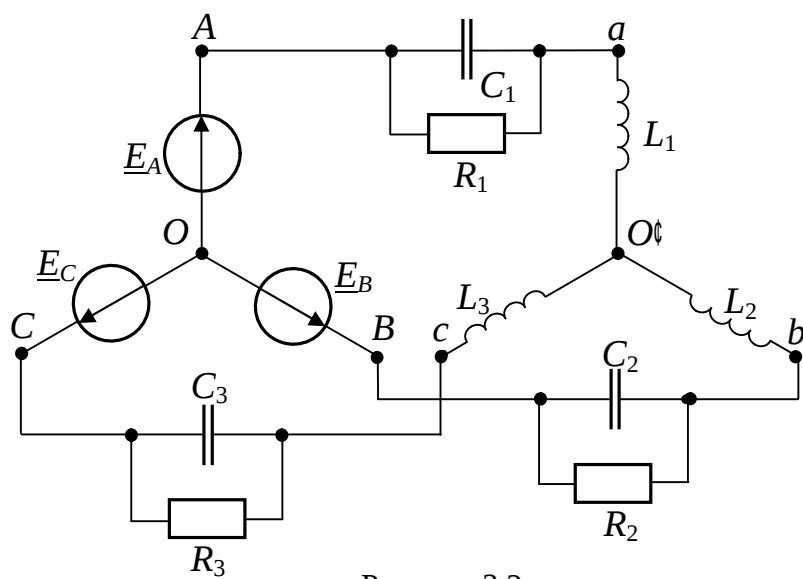


Рисунок 3.2

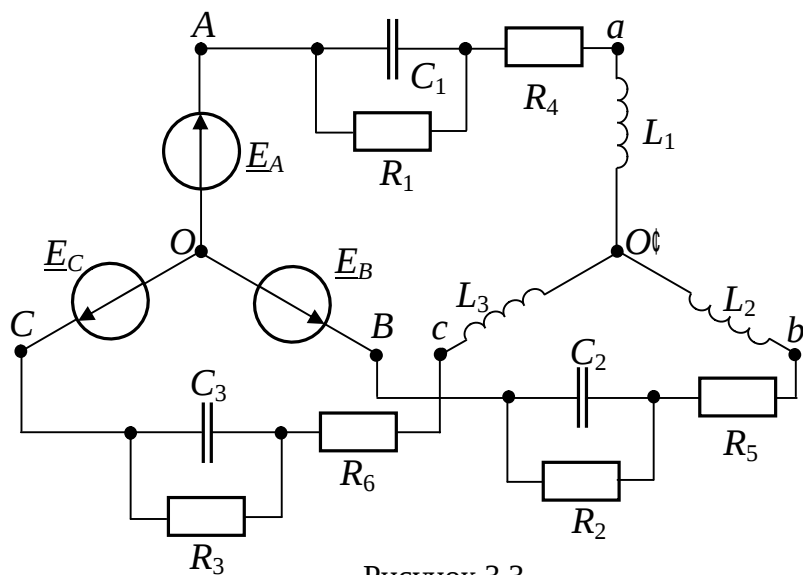


Рисунок 3.3

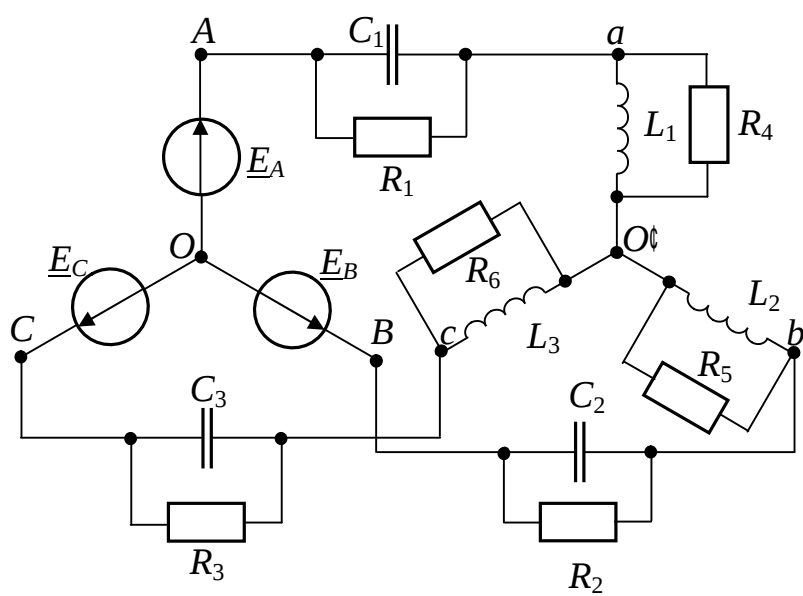


Рисунок 3.4

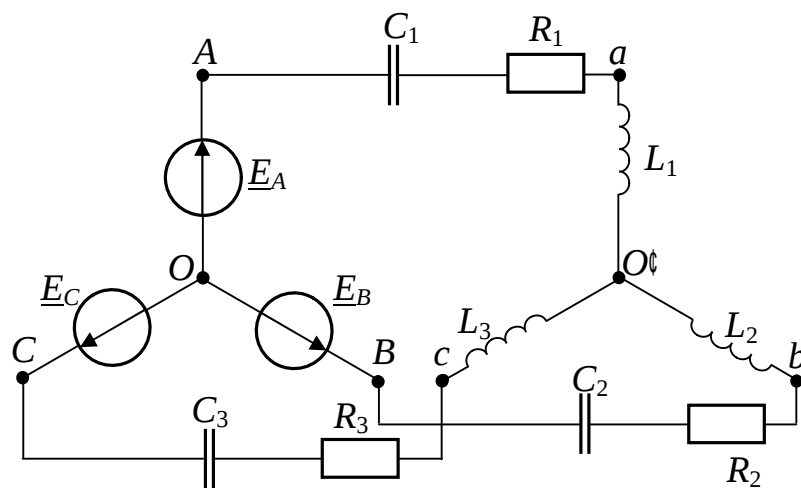


Рисунок 3.5

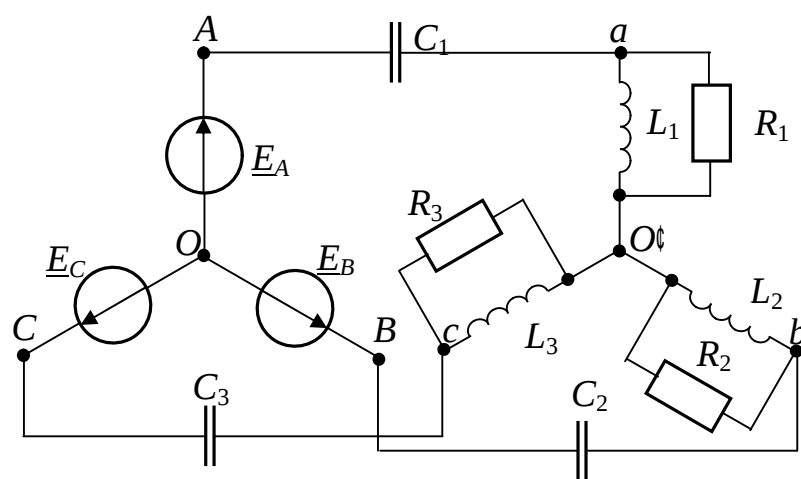


Рисунок 3.6

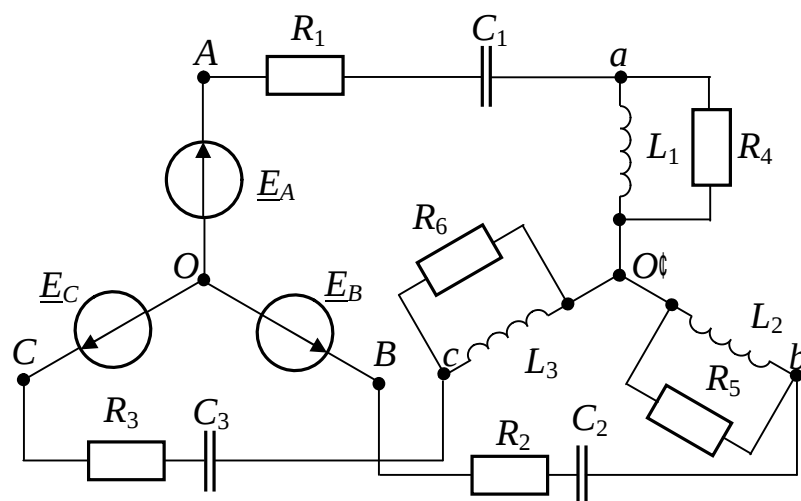


Рисунок 3.7

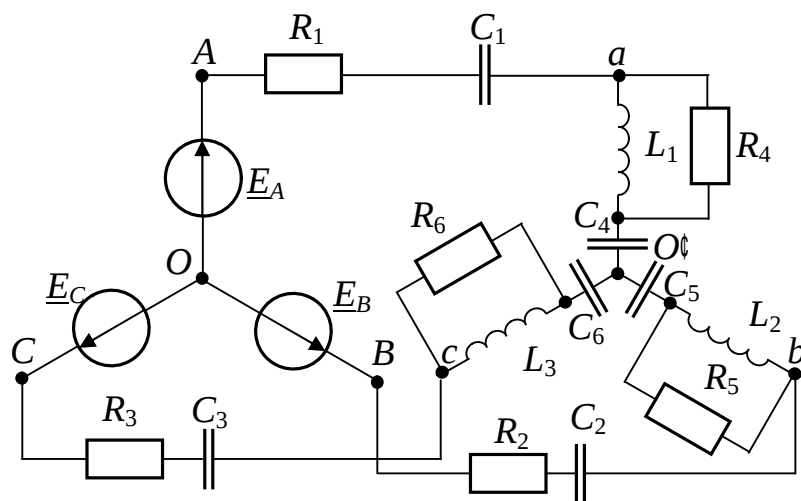


Рисунок 3.8

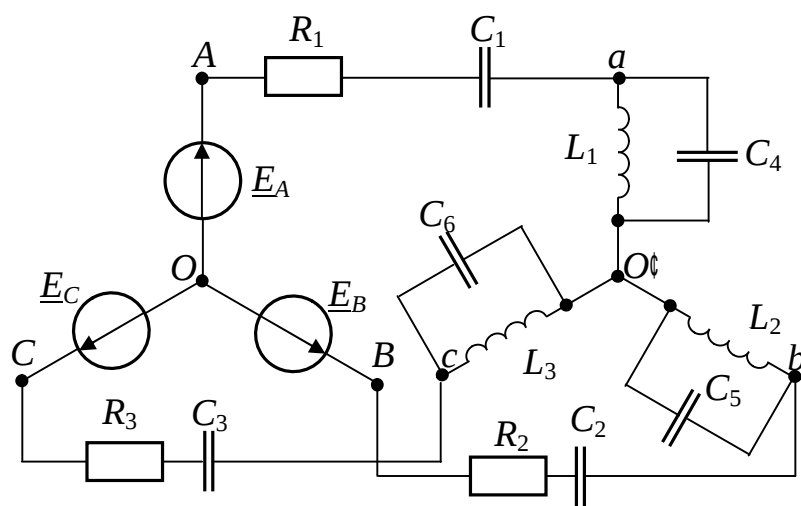


Рисунок 3.9

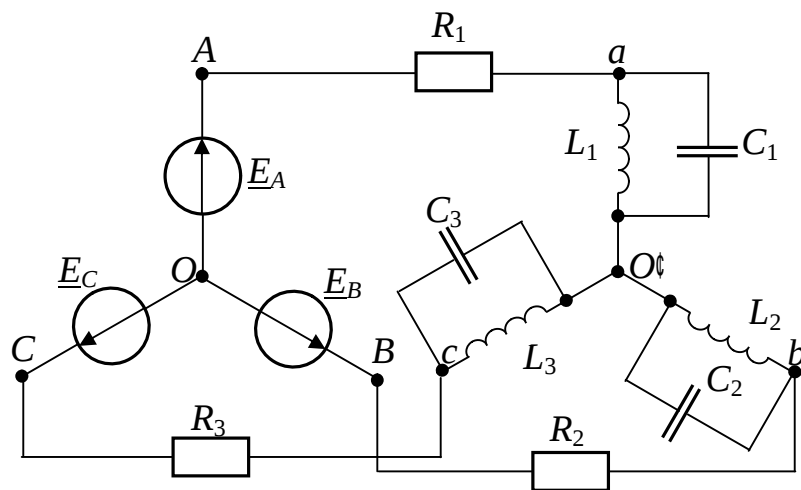


Рисунок 3.10

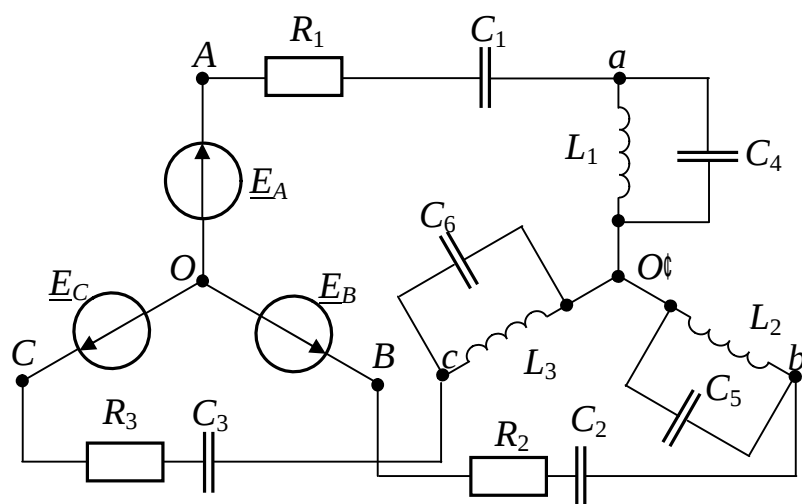


Рисунок 3.11

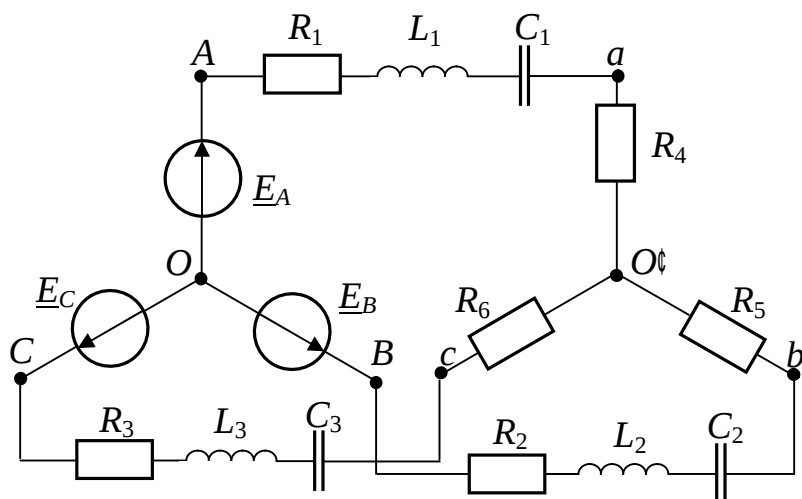


Рисунок 3.12

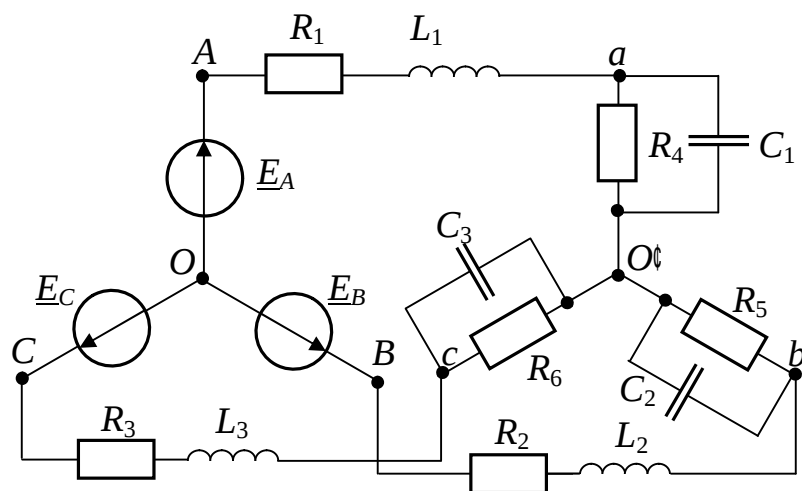


Рисунок 3.13

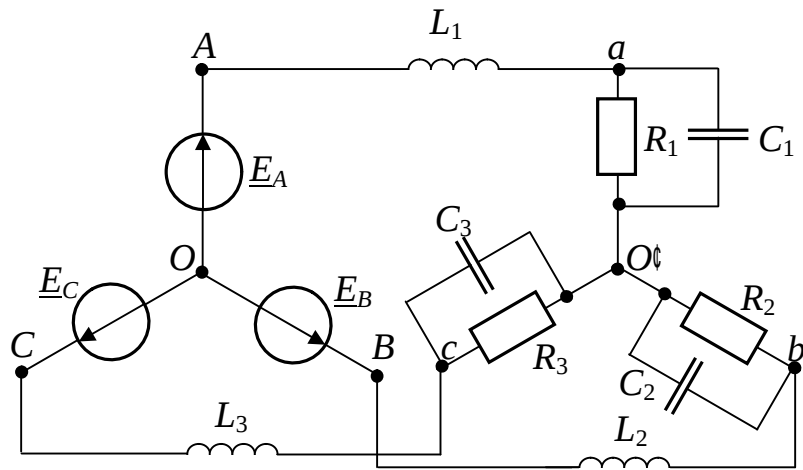


Рисунок 3.14

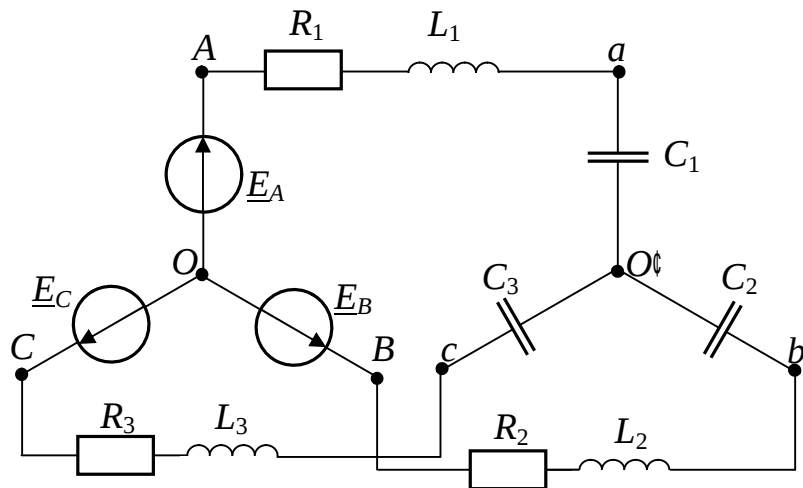


Рисунок 3.15

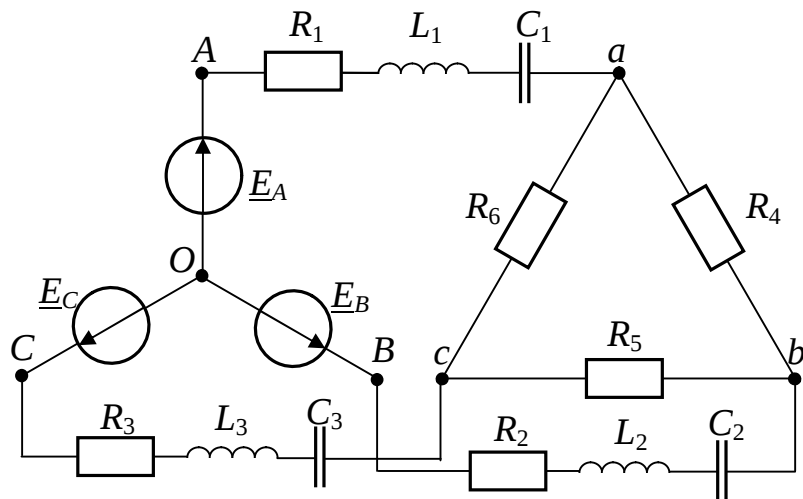


Рисунок 3.16

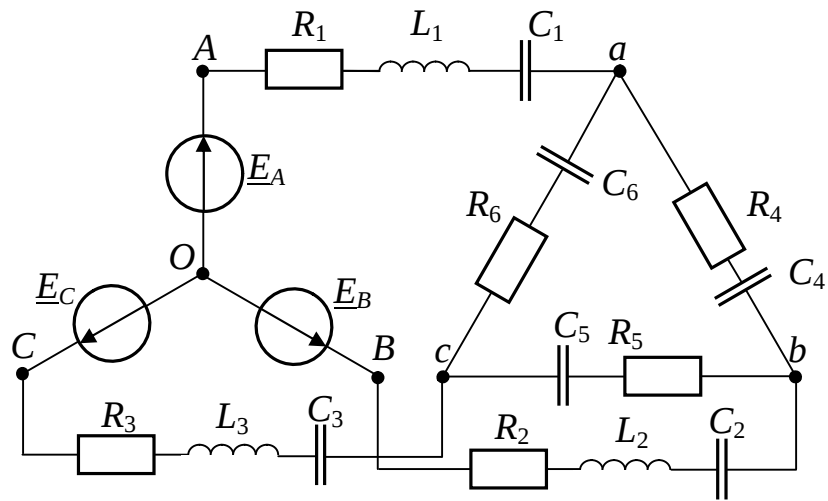


Рисунок 3.17

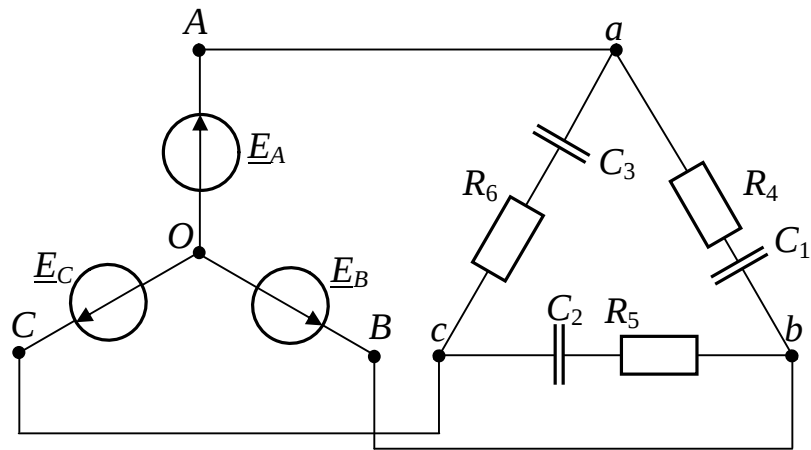


Рисунок 3.18

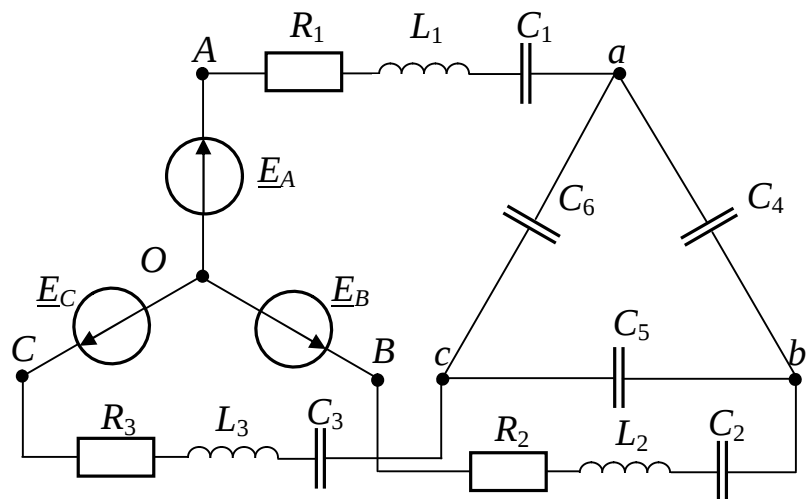


Рисунок 3.19

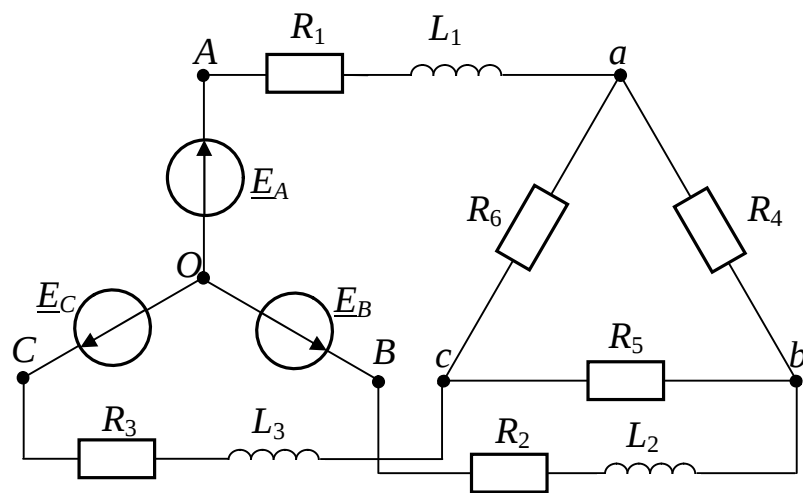


Рисунок 3.20

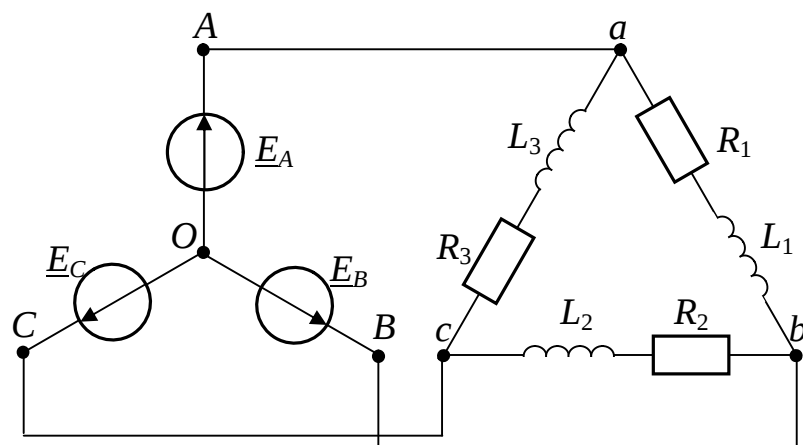


Рисунок 3.21

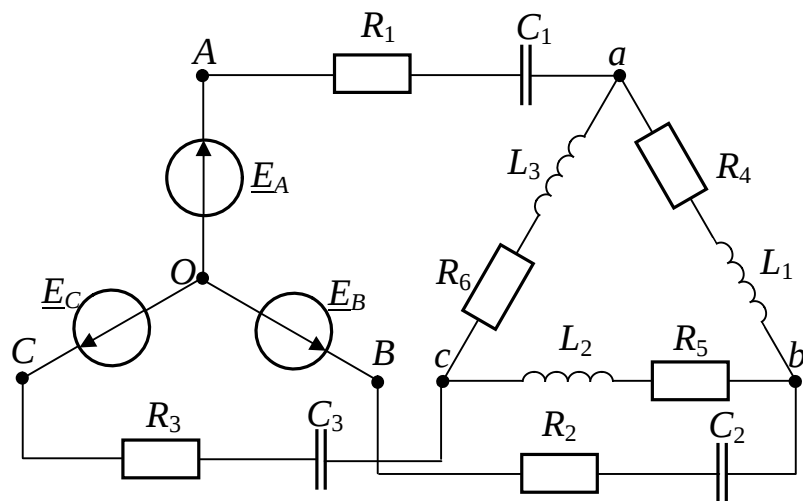


Рисунок 3.22

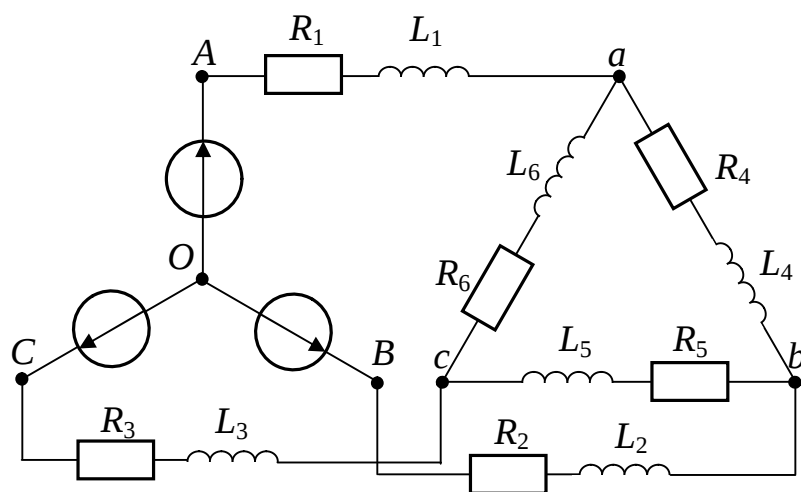


Рисунок 3.23

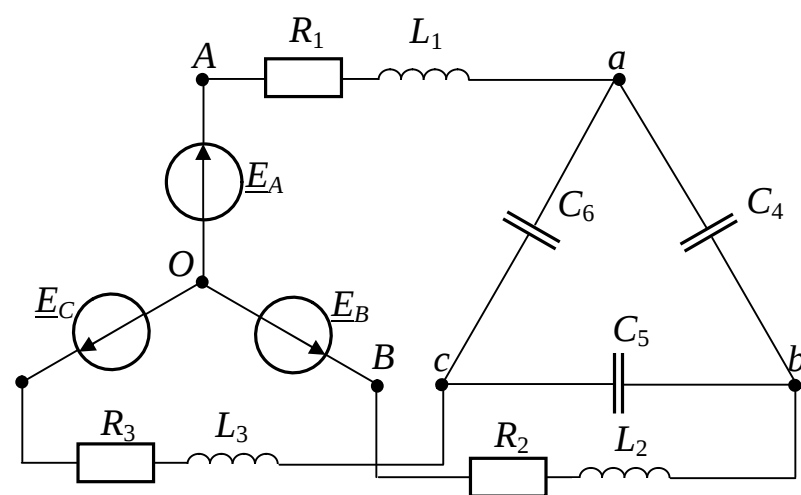


Рисунок 3.24

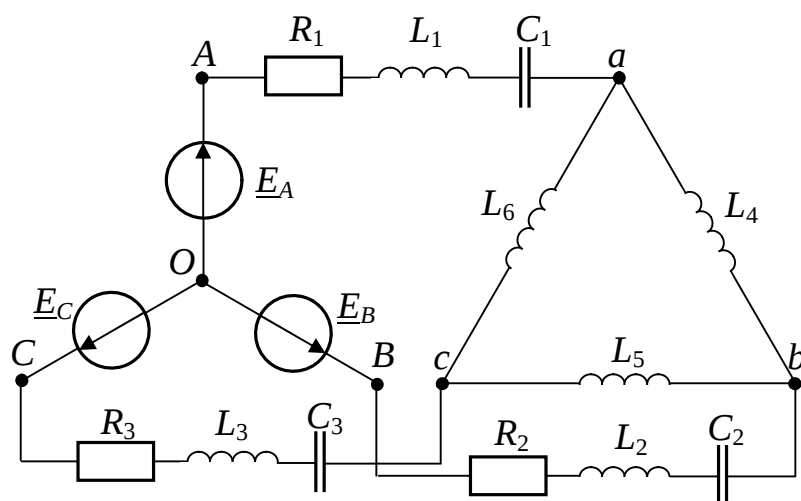


Рисунок 3.25

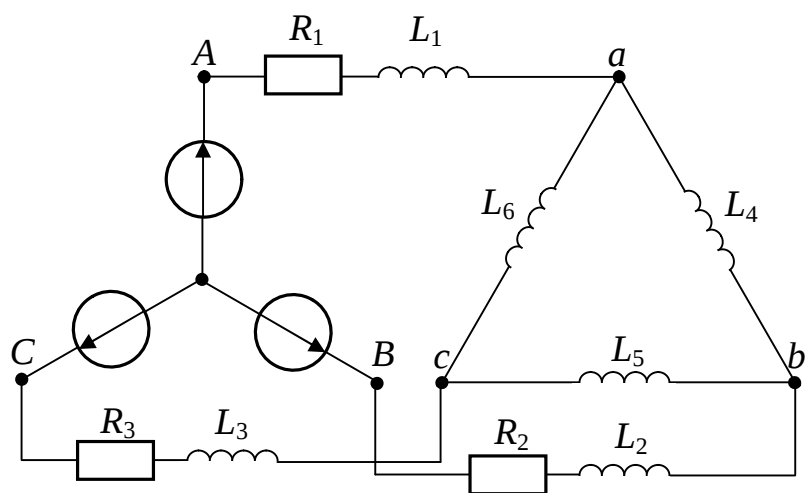


Рисунок 3.26

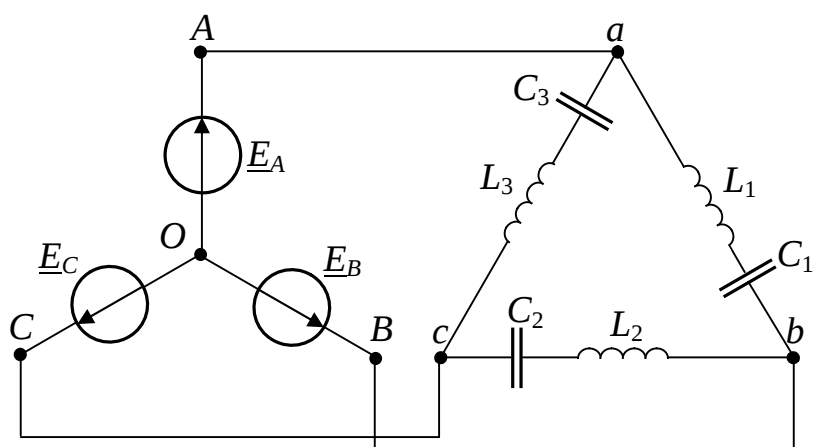


Рисунок 3.27

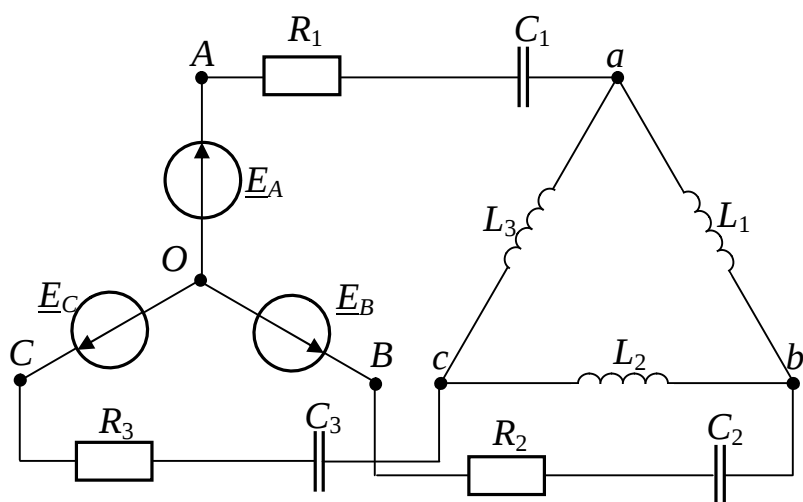


Рисунок 3.28

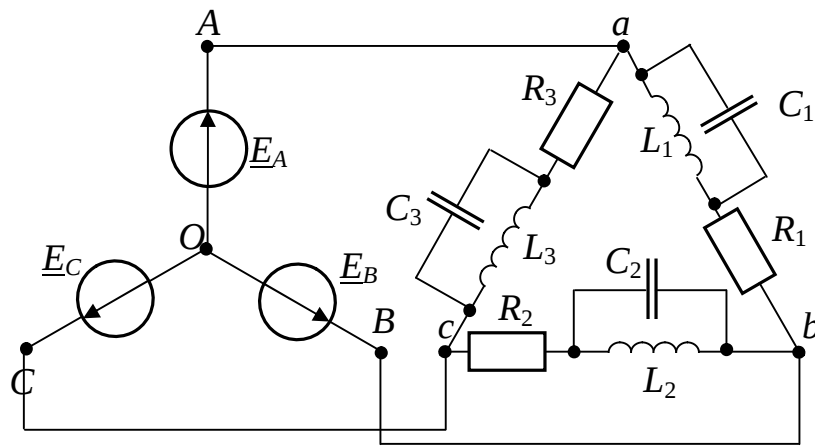


Рисунок 3.29

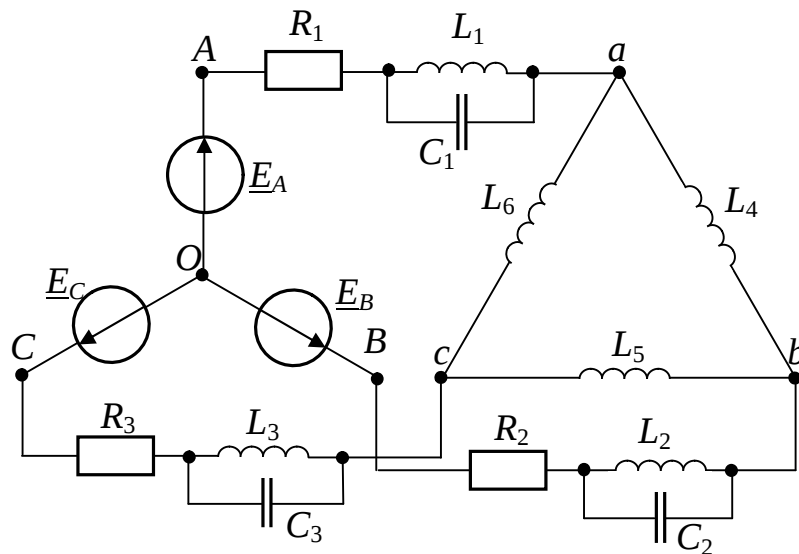


Рисунок 3.30

3.3.1. Расчет электрической цепи, соединенной по схеме звезда – звезда при симметричном режиме

На рисунке 3.31. изображена схема соединения трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой по схеме звезда – звезда с нулевым проводом. **Трехфазную цепь и трехфазный потребитель называют симметричными, если комплексные сопротивления всех фаз одинаковы, т.е.**

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C.$$

В противном случае их называют **несимметричными**.

Режим трехфазной цепи, при котором трехфазные системы напряжений и токов симметричны, называют симметричным. Если к симметричной трехфазной системе приложена **симметричная система напряжений**, то получается **симметричная система токов**.

При симметричной системе токов ток в нейтральном проводе отсутствует, то есть

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0,$$

поэтому при симметричном приемнике нейтральный провод не применяют.

Линейные напряжения определяются как разности фазных напряжений:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B;$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C;$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A.$$

Если нагрузка является **симметричной**, а комплексные сопротивления цепей, соединяющих источник с приемником, равны нулю, то

$$(\underline{Z}_{Aa} = \underline{Z}_{Bb} = \underline{Z}_{Cc} = 0).$$

Тогда напряжения на фазах приемника можно определить по выражениям:

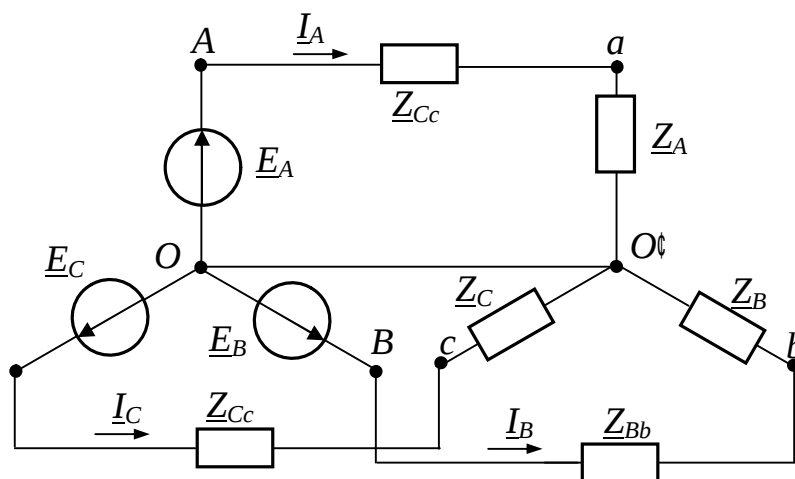


Рисунок 3.31

$$\underline{U}_{aO'} = \underline{U}_{AO'} = \underline{U}_A = \underline{E}_A;$$

$$\underline{U}_{bO'} = \underline{U}_{BO'} = \underline{U}_B = \underline{E}_B;$$

$$\underline{U}_{cO'} = \underline{U}_{CO'} = \underline{U}_C = \underline{E}_C.$$

На практике часто пренебрегают внутренним сопротивлением фаз генератора, поэтому фазные напряжения $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$ и $\underline{U}_C$ считают численно равными фазным ЭДС и изображают их симметричной системой векторов, т.е.

$$\underline{U}_A = \underline{E}_A; \underline{U}_B = \underline{E}_B; \underline{U}_C = \underline{E}_C.$$

На рисунке 3.32 приведена векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма для случая $\underline{Z}_{Aa} = \underline{Z}_{Bb} = \underline{Z}_{Cc} = 0$ при симметричной нагрузке, имеющей индуктивный характер ($\varphi > 0$) и соединенной в звезду.

В соответствии с тем, что при соединении источника с приемником по схеме **звезда-звезда** линейные токи равны фазным, последние при значениях сопротивлений цепи

$$\underline{Z}_{Aa} = \underline{Z}_{Bb} = \underline{Z}_{Cc} = 0$$

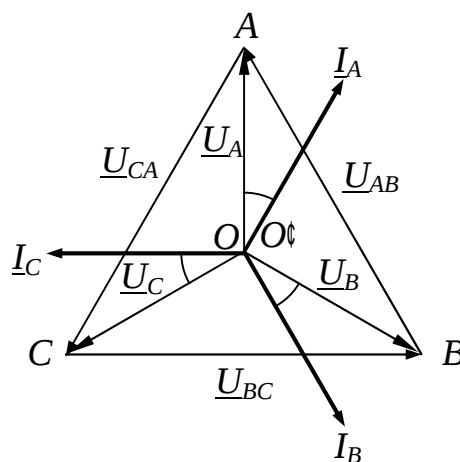


Рисунок 3.32

определяются следующим образом:

$$\underline{I}_A = \underline{E}_A \underline{Y}_{AO'}; \underline{I}_B = \underline{E}_B \underline{Y}_{BO'}; \underline{I}_C = \underline{E}_C \underline{Y}_{CO'},$$

где $\underline{Y}_{AO'} = 1/(\underline{Z}_{Aa} + \underline{Z}_A)$, $\underline{Y}_{BO'} = 1/(\underline{Z}_{Bb} + \underline{Z}_B)$ и $\underline{Y}_{CO'} = 1/(\underline{Z}_{Cc} + \underline{Z}_C)$.

Далее находим напряжения на фазах нагрузки

$$\underline{U}_{aO'} = \underline{I}_A \underline{Z}_A; \underline{U}_{bO'} = \underline{I}_B \underline{Z}_B; \underline{U}_{cO'} = \underline{I}_C \underline{Z}_C.$$

Для случая $\underline{Z}_{Aa} = \underline{Z}_{Bb} = \underline{Z}_{Cc} = 0$ (см. схему рисунок 3.31) токи в фазах приемника можно найти по выражениям

$$\underline{I}_A = \underline{E}_A / \underline{Z}_A; \underline{I}_B = \underline{E}_B / \underline{Z}_B; \underline{I}_C = \underline{E}_C / \underline{Z}_C.$$

3.3.2. Расчет трехфазной цепи, соединенной по схемам звезда – звезда с нулевым и без нулевого провода, при несимметричном режиме

Для расчета токов в фазах нагрузки при соединении **звезда-звезда без нулевого провода** целесообразно воспользоваться методом узловых потенциалов. Напряжение между двумя узлами равно [5]

$$\underline{U}_{O'O} = \frac{(\underline{U}_A \underline{Y}_{AO'} + \underline{U}_B \underline{Y}_{BO'} + \underline{U}_C \underline{Y}_{CO'})}{(\underline{Y}_{AO'} + \underline{Y}_{BO'} + \underline{Y}_{CO'})}, \quad (3.1)$$

где $\underline{Y}_{AO'} = 1/(\underline{Z}_{Aa} + \underline{Z}_A)$, $\underline{Y}_{BO'} = 1/(\underline{Z}_{Bb} + \underline{Z}_B)$ и $\underline{Y}_{CO'} = 1/(\underline{Z}_{Cc} + \underline{Z}_C)$ - комплексные проводимости нагрузки и цепей, соединяющих источник с приемником фаз А, В и С.

При $\underline{Z}_{Aa} = \underline{Z}_{Bb} = \underline{Z}_{Cc} = 0$ напряжение между двумя узлами следует определить по следующему выражению

$$\underline{U}_{O'O} = \frac{(\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C)}{(\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C)}. \quad (3.2)$$

В случае **несимметричной** нагрузки, при соединении источника с приемником по схеме **звезда-звезда без нулевого провода** $\underline{U}_{O'O} \neq 0$.

Фазные напряжения потребителя по модулю не равны друг другу и сдвиг по фазе между ними не равен 120° , т.е. они образуют несимметричную систему.

Изменение комплексного сопротивления любой фазы потребителя вызывает изменение напряжения $\underline{U}_{O'O}$, фазных напряжений и токов других фаз потребителя. При известных значениях напряжений $\underline{U}_{O'O}$, $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$ и $\underline{U}_C$ можно построить топографическую векторную диаграмму напряжений (как изображено на рисунке 3.33) и провести на ней векторы фазных напряжений нагрузки $\underline{U}_{aO'} = \underline{U}_a$, $\underline{U}_{bO'} = \underline{U}_b$ и $\underline{U}_{cO'} = \underline{U}_c$.

Для случая $\underline{Z}_{Aa} = \underline{Z}_{Bb} = \underline{Z}_{Cc} = 0$ (см. схему рисунок 3.31) напряжения на фазах приемника можно найти по выражениям

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= (\underline{U}_A - \underline{U}_{O'O}) \underline{Y}_{AO'} \underline{Z}_A; \\ \underline{U}_b &= (\underline{U}_B - \underline{U}_{O'O}) \underline{Y}_{BO'} \underline{Z}_B; \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\underline{U}_c = (\underline{U}_C - \underline{U}_{O'O}) \underline{Y}_{CO} \underline{Z}_C,$$

а при $\underline{Z}_{Aa} = \underline{Z}_{Bb} = \underline{Z}_{Cc} = 0$

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{O'O}; \quad (3.4)$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{O'O};$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{O'O}.$$

При известных напряжениях на фазах приемника, токи в фазах приемника определяются по формулам:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_a \underline{Y}_A; \underline{I}_B = \underline{U}_b \underline{Y}_B; \underline{I}_C = \underline{U}_c \underline{Y}_C. \quad (3.5)$$

В случае **несимметричной** нагрузки, при соединении источника с приемником по схеме **звезда-звезда с нулевым проводом** $\underline{U}_{O'O} = 0$.

Нулевой провод обеспечивает независимый режим работы фаз потребителя. Фазные токи образуют несимметричную систему, так как они разные по величине

$$\underline{I}_A = \underline{U}_a \underline{Y}_A; \underline{I}_B = \underline{U}_b \underline{Y}_B; \underline{I}_C = \underline{U}_c \underline{Y}_C.$$

Ток в нейтральном проводе равен сумме комплексов действующих значений фазных токов:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C \neq 0.$$

На рисунке 3.34 изображена векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений для схемы звезда – звезда с нулевым проводом при несимметричной активной нагрузке.

При работе трехфазных потребителей возможны аварийные режимы работы, например короткое замыкание в одной из фаз или обрыв фазы потребителя (обрыв линейного провода).

При коротком замыкании для схемы **звезда – звезда без нулевого провода**, к примеру **активной нагрузки** фазы А, точка O' совпадает на топографической диаграмме с точкой А. Напряжения на фазных нагрузках равны линейным напряжениям: $\underline{U}_{BO'} = \underline{U}_{BA}$ и $\underline{U}_{CO'} = \underline{U}_{CA}$ (рисунок 3.35, а). Вследствие этого токи $\underline{I}_B$ и $\underline{I}_C$ в $\sqrt{3}$ раз больше, чем в симметричном режиме. Ток $\underline{I}_A$ находим из векторной диаграммы (рисунок 3.35, б):

$$\underline{I}_A = -(\underline{I}_B + \underline{I}_C).$$

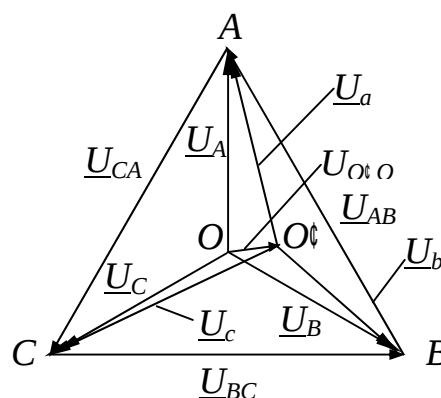


Рисунок 3.33

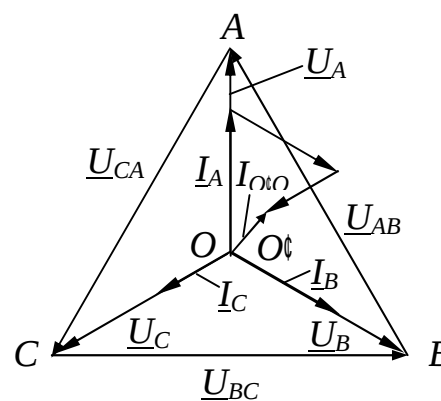


Рисунок 3.34

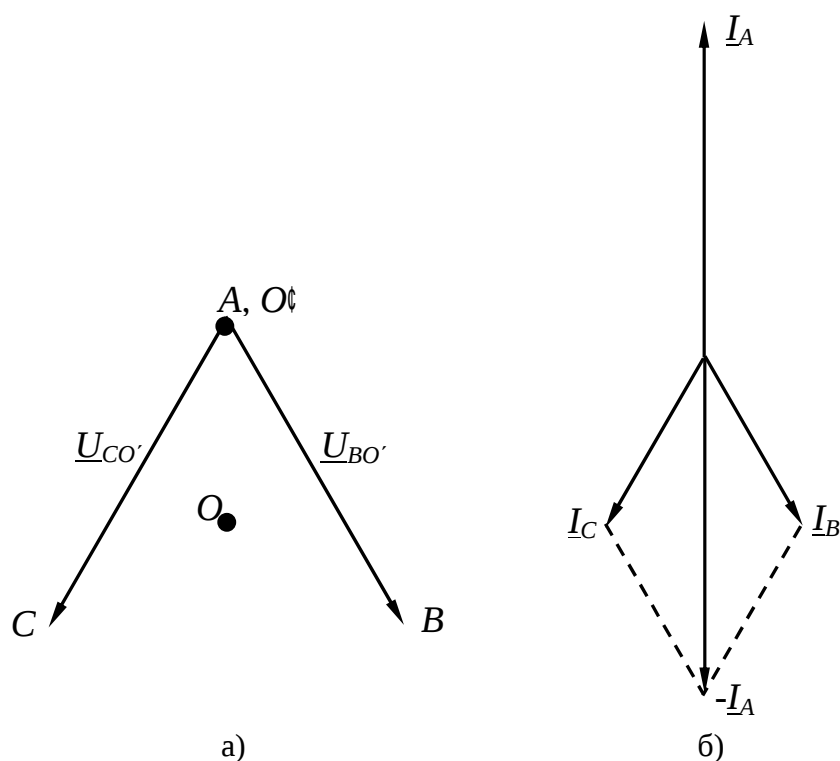


Рисунок 3.35

При обрыве фазы или линейного провода для схемы **звезда – звезда без нулевого провода**, например в фазе **A**, трехфазный симметричный **активный** потребитель превращается в однофазный.

В результате сопротивления двух оставшихся фаз оказываются включенными последовательно на линейное напряжение.

На рисунке 3.36, а приведена топографическая диаграмма напряжений, а на рисунке 3.36, б — векторная диаграмма токов для схемы звезда – звезда без нулевого провода при обрыве линейного провода от фазы **A** на грузки.

Векторные диаграммы, приведенные на последних рисунках, соответствуют случаю **активной** нагрузки и отсутствия сопротивлений цепей, соединяющих источник с нагрузкой, т.е.

$$\underline{Z}_{Aa} = \underline{Z}_{Bb} = \underline{Z}_{Cc} = 0.$$

При $\underline{Z}_A = \infty$ получим токи в фазах нагрузки $\underline{I}_A = 0$ и $\underline{I}_B = -\underline{I}_C$, поэтому

$$\underline{U}_{BO'} / \underline{U}_{CO'} = \underline{Z}_B \underline{I}_B / \underline{Z}_C \underline{I}_C.$$

В случае однородного характера нагрузки, т.е. $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$, отношение фазных напряжений будет равно $\underline{U}_{BO'} / \underline{U}_{CO'} = -z_B / z_C$, что означает отличие по фазе напряжений $\underline{U}_{BO'}$ и $\underline{U}_{CO'}$ на 180° , следовательно точка O' находится на отрезке, соединяющем точки **B** и **C**.

Ее положение на этом отрезке определяется отношением z_B / z_C (на рис. 3.36. положение точки O' при $\underline{Z}_A = \infty$ показано для случая $z_B / z_C = 1$).

Фазные напряжения потребителя по модулю примут значения

$$U_{BO'} = U_{CO'} = \frac{U_\Delta}{2},$$

где U_Δ – линейное напряжение между фазами B и C .

Напряжение на фазе A будет отсутствовать, т.е. $U_a = 0$.

Вольтметр, включенный между разомкнутыми концами фазы A покажет напряжение, соответствующее значению $U_{AO'} = \left(\frac{3}{2}\right)U_A$, а между нейтральными точками – $U_{O'O} = \frac{U_A}{2}$.

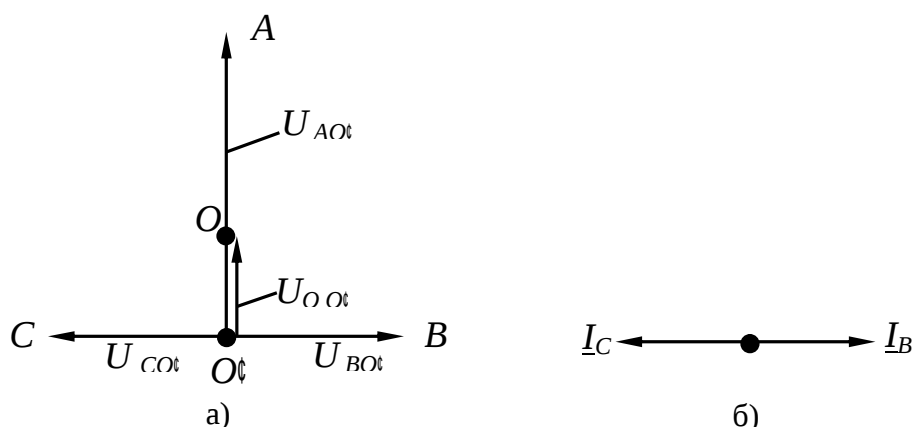


Рисунок 3.36

При определении напряжений на фазах и токах в оставшихся фазах нагрузки при обрыве фазы или линейного провода для схемы **звезда – звезда без нулевого провода** следует поступить следующим образом.

Для случая $Z_{Aa} = Z_{Bb} = Z_{Cc} \neq 0$ (см. схему рисунок 3.31) сначала следует определить $\underline{U}_{O'O}$, воспользоваться выражением (3.1), при этом в зависимости от того места где имеется обрыв линейного провода комплексная проводимость нагрузки и цепи ($\underline{Y}_{AO'}$, $\underline{Y}_{BO'}$ или $\underline{Y}_{CO'}$), соединяющей источник с приемником $\underline{Y}_{AO'}$, $\underline{Y}_{BO'}$ или $\underline{Y}_{CO'}$, в выражении будет равна нулю.

Затем, для определения напряжений на фазах нагрузки следует воспользоваться выражениями из системы (3.3), а токов в фазах нагрузки выражениями из системы (3.5).

При $Z_{Aa} = Z_{Bb} = Z_{Cc} = 0$ (см. схему рисунок 3.31) сначала следует определить $\underline{U}_{O'O}$, воспользоваться формулой (3.2), при этом в зависимости от того места где имеется обрыв линейного провода комплексная проводимость нагрузки $\underline{Y}_A$, $\underline{Y}_B$ или $\underline{Y}_C$, в выражении будет равна нулю.

Далее для определения напряжений на фазах нагрузки следует воспользоваться выражениями из системы (3.4), а токов в фазах нагрузки выражениями из системы (3.5).

3.3.3. Расчет трехфазной цепи, соединенной по схеме звезда – треугольник, при симметричном режиме

При соединении нагрузки в треугольник напряжения на фазах нагрузки определяются по закону Ома. На рисунке 3.37. показана схема соединения трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой по схеме звезда – треугольник.

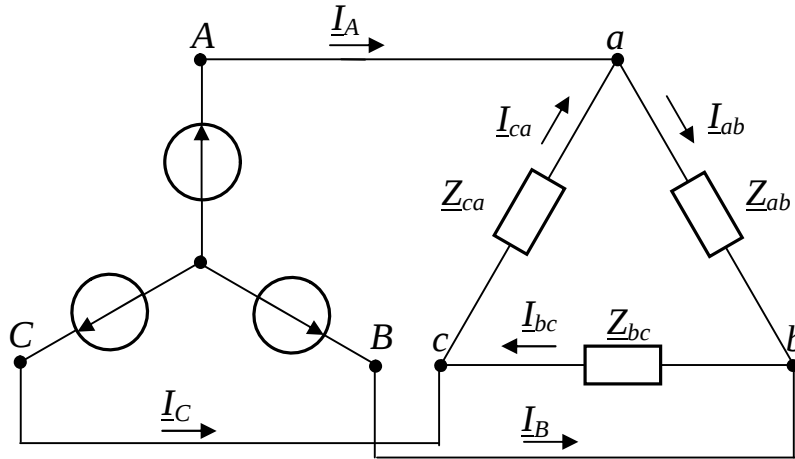


Рисунок 3.37

Если напряжения и сопротивления фаз нагрузки заданы, то фазные токи определяются по формулам:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}};$$

$$I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}};$$

$$I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}.$$

Напряжения на фазах нагрузки равны соответствующим линейным напряжениям, т.е.

$$U_{ab} = U_{AB}; U_{bc} = U_{BC} \text{ и } U_{ca} = U_{CA}.$$

Линейные токи находятся через фазные токи нагрузки по первому закону Кирхгофа:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; I_B = I_{bc} - I_{ab}; I_C = I_{ca} - I_{bc}.$$

При этом $I_A + I_B + I_C = 0$.

При равномерной нагрузке фаз модули комплексных сопротивлений фаз являются одинаковыми, но не всегда начальные фазы этих сопротивлений совпадают. Для этого случая линейные токи по модулю в $\sqrt{3}$ раз больше фазовых токов нагрузки.

При неравномерной нагрузке линейные токи могут быть и больше и меньше фазовых токов нагрузки.

На рисунке 3.38, а приведена топографическая векторная диаграмма напряжений, а на рисунке 3.38, б — векторная диаграмма токов для случая $Z_{Aa} = Z_{Bb} = Z_{Cc} = 0$ при симметричной нагрузке, имеющей индуктивный характер ($\varphi > 0$) и соединенной в треугольник.

При симметричной нагрузке фазные токи равны по величине, а углы сдвига фаз токов по отношению к соответствующим фазным напряжениям одинаковы. Только при чисто активной нагрузке фазные напряжения и токи будут совпадать по фазе.

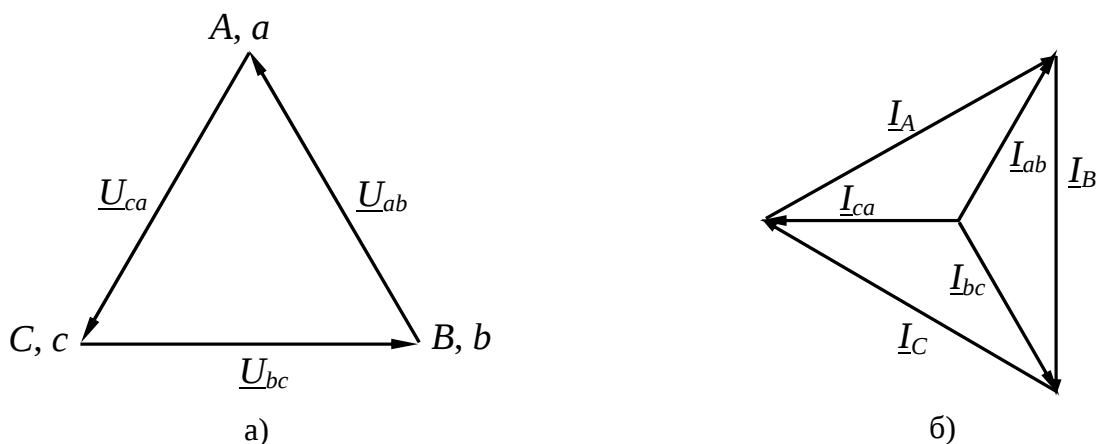


Рисунок 3.38

3.3.4. Расчет трехфазной цепи, соединенной по схеме звезда – треугольник, при несимметричном режиме

При несимметричной нагрузке, соединенной по схеме треугольник, расчет фазных и линейных токов проводится по тем же формулам, что и для симметричной нагрузки, но при этом фазные и линейные токи уже не образуют симметричной системы векторов. На рисунке 3.39, а приведена топографическая векторная диаграмма напряжений, а на рисунке 3.39,б — векторная диаграмма токов для случая $Z_{Aa}=Z_{Bb}=Z_{Cc}=0$ при несимметричной нагрузке.

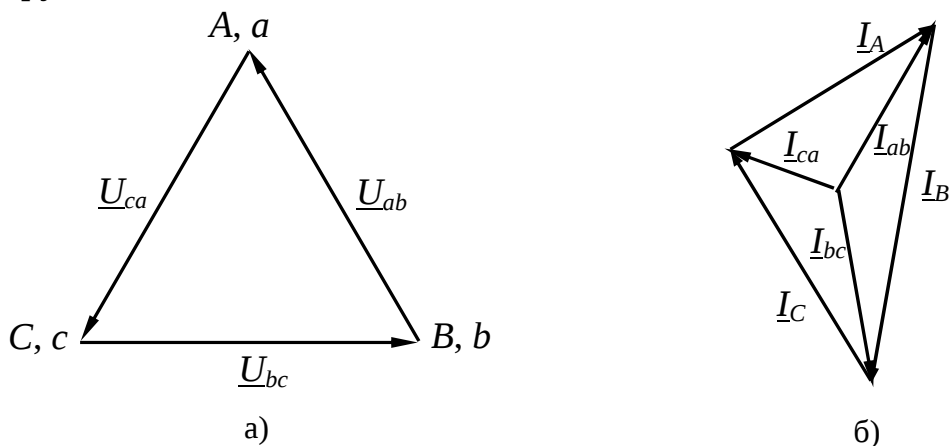


Рисунок 3.39

Важной особенностью соединения фаз нагрузки в треугольник является то, что при изменении сопротивления одной из фаз будут изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах, соединенных с этой фазой.

При работе трехфазных потребителей возможны аварийные режимы работы, например, обрыв фазы потребителя, обрыв линейного провода или короткое замыкание в одной из фаз.

В случае обрыва, например, в ветви **в-с** нагрузки, ток $\underline{I}_{bc}=0$, а токи $\underline{I}_{ab}$ и $\underline{I}_{ca}$ остаются без изменения, поэтому прежнее значение имеет и ток $\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}$. Токи $\underline{I}_B$ и $\underline{I}_C$ изменяются: $\underline{I}_B = -\underline{I}_{ab}$; $\underline{I}_C = \underline{I}_{ca}$ [6]. Векторная диаграмма токов для этого случая приведена на рисунке 3.40 (до обрыва нагрузка была симметричной, сравните с векторной диаграммой токов, изображенной на рисунке 3.38, б).

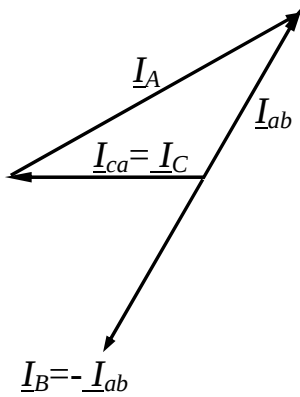


Рисунок 3.40

При обрыве линейного провода, например провода, соединяющего узлы **A** и **a** сети и потребителя, трехфазный потребитель превращается в однофазный, а комплексные сопротивления фаз нагрузки $\underline{Z}_{ca}$ и $\underline{Z}_{ab}$ соединяются последовательно.

На каждое из этих сопротивлений приходится половина линейного напряжения U_{bc} . На топографической векторной диаграмме напряжений, приведенной на рисунке 3.41, а точка **a** располагается на середине отрезка **б-с**. Согласно рисунку, напряжения на комплексных сопротивлениях ветвей **с-а** ($\underline{U}_{ca}$) и **а-б** ($\underline{U}_{ab}$) уменьшаются **по модулю** в 2 раза по сравнению с симметричным режимом. Начальные фазы этих напряжений будут одинаковыми по значению и противоположными по знаку начальной фазы напряжения $\underline{U}_{bc}$. Во столько же раз уменьшаются токи в этих ветвях: $\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca}$.

При построении векторной диаграммы следует вначале отложить вектор тока фазы, оставшейся под линейным напряжением (для нашего случая это ток $\underline{I}_{bc}$). Далее следует отложить токи $\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca}$ направленные на 180° относительно тока $\underline{I}_{bc}$. Линейные ток $\underline{I}_A=0$, а токи $\underline{I}_B$ и $\underline{I}_C$ находим по векторной диаграмме (рисунок 3.41, б): $\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}$; $\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}$; $\underline{I}_B = \underline{I}_C$.

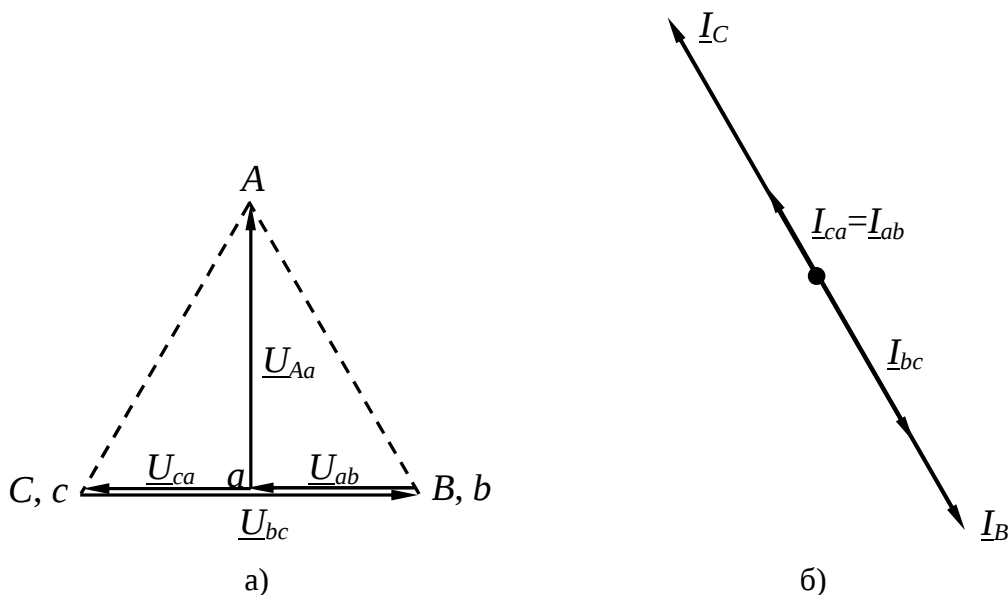


Рисунок 3.41

3.3.5. Расчет активной, реактивной и полной мощности трехфазного потребителя и всей трехфазной системы

Под **активной мощностью трехфазного потребителя** понимают сумму активных мощностей фаз нагрузки [1]:

$$P = P_A + P_B + P_C,$$

где P_A , P_B и P_C являются активными мощностями фаз нагрузки.

Для **трехфазной системы** активные мощностей фаз нагрузки, соединенной по схеме **звезда – звезда** определяются по следующим выражениям:

$$P_A = U_a I_A \cos \varphi_A; P_B = U_b I_B \cos \varphi_B; P_C = U_c I_C \cos \varphi_C,$$

где U_a , U_b и U_c напряжения на фазах; I_a , I_b и I_c токи в фазах, а φ_A ; φ_B и φ_C углы между напряжениями на фазах нагрузки и токами фаз нагрузок A , B и C соответственно.

Для **трехфазной системы**, соединенной по схеме **звезда – треугольник** активные мощностей фаз нагрузки определяются по следующим выражениям:

$$P_A = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_A; P_B = U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_B; P_C = U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_C,$$

где U_{ab} , U_{bc} и U_{ca} — напряжения на фазах; I_{ab} , I_{bc} и I_{ca} — токи в фазах, а φ_A ; φ_B и φ_C — углы между напряжениями на фазах нагрузки и токами фаз нагрузок A , B и C соответственно.

Под **реактивной мощностью трехфазного потребителя** понимают сумму реактивных мощностей фаз нагрузки [1]:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C,$$

где Q_A , Q_B и Q_C являются реактивными мощностями фаз нагрузки.

Для **трехфазной системы**, соединенной по схеме **звезда – звезда** реактивные мощности фаз нагрузки определяются по следующим выражениям:

$$Q_A = U_a I_A \sin \varphi_A; Q_B = U_b I_B \sin \varphi_B; Q_C = U_c I_C \sin \varphi_C,$$

где U_a , U_b и U_c напряжения на фазах; I_a , I_b и I_c токи в фазах, а φ_A ; φ_B и φ_C углы между напряжениями на фазах нагрузки и токами фаз нагрузок A , B и C соответственно.

Для **трехфазной системы**, соединенной по схеме **звезда – треугольник** реактивные мощности фаз нагрузки определяются по следующим выражениям:

$$Q_A = U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_A; Q_B = U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_B; Q_C = U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_C,$$

где U_{ab} , U_{bc} и U_{ca} напряжения на фазах; I_{ab} , I_{bc} и I_{ca} токи в фазах, а φ_A ; φ_B и φ_C углы между напряжениями на фазах нагрузки и токами фаз нагрузок A , B и C соответственно.

Полная мощность трехфазного потребителя определится следующим образом

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)}.$$

Если нагрузка **симметричная**, то

$$P_A = P_B = P_C = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi; Q_A = Q_B = Q_C = U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi,$$

где φ_ϕ — сдвиг по фазе между фазным напряжением U_ϕ и фазным током I_ϕ .

В результате при **симметричной** нагрузке фаз:

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi; Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi; S = 3U_\phi I_\phi.$$

Независимо от способа ее соединения в звезду или в треугольник при **симметричной** нагрузке фаз:

$$3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}\sqrt{3}U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_L I_L,$$

где U_L — линейное напряжение на нагрузке; I_L — линейный ток нагрузки, поэтому при определении мощностей часто используют следующие формулы:

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi; Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi; S = \sqrt{3}U_L I_L.$$

Определим активную, реактивную и полную мощности всей **трехфазной системы**.

Под **активной мощностью трехфазной системы**, соединенной по схеме **звезда – звезда**, следует понимать сумму активных мощностей всех фаз нагрузки (P), активных мощностей цепей, соединяющих источник и приемник ($P_{\text{цепи}}$) и активной мощности в сопротивлении, включенном в нулевом проводе (P_0) (если оно есть в наличии):

$$P_\Sigma = P + P_{\text{цепи}} + P_0,$$

где

$$P_{\text{цепи}} = U_{Aa} I_A \cos \varphi_{\text{цепи}(A)} + U_{Bb} I_B \cos \varphi_{\text{цепи}(B)} + U_{Cc} I_C \cos \varphi_{\text{цепи}(C)}$$

и

$$P_0 = U_{O\phi O} I_N \cos \varphi_0,$$

причем $\varphi_{\text{цепи}(A)}$; $\varphi_{\text{цепи}(B)}$ и $\varphi_{\text{цепи}(C)}$ — углы между напряжениями на комплексных сопротивлениях Z_{Aa} , Z_{Bb} и Z_{Cc} , соединяющих источник с приемником и токами фаз нагрузок A , B и C соответственно, а $U_{O\phi O}$ — напряжение между нейтральными точками; I_N — ток в нейтральном проводе, а φ_0 — сдвиг по фазе между фазным напряжением $U_{O\phi O}$ и током в нейтральном проводе.

Под **реактивной мощностью трехфазной системы**, соединенной по схеме **звезда – звезда**, следует понимать сумму реактивных мощностей всех фаз нагрузки (Q), реактивных мощностей цепей, соединяющих источник и приемник ($Q_{\text{цепи}}$) и реактивной мощности в сопротивлении, вклю-

ченном в нулевом проводе (Q_0):

$$Q_{\Sigma} = Q + Q_{\text{цепи}} + Q_0,$$

где

$$Q_{\text{цепи}} = U_{Aa} I_A \sin \varphi_{\text{цепи}(A)} + U_{Bb} I_B \sin \varphi_{\text{цепи}(B)} + U_{Cc} I_C \sin \varphi_{\text{цепи}(C)}$$

и

$$Q_0 = U_{O\delta} I_N \sin \varphi_0.$$

Под **активной мощностью трехфазной системы**, соединенной по схеме **звезда – треугольник**, следует понимать сумму активных мощностей всех фаз нагрузки (P), активных мощностей цепей, соединяющих источник и приемник ($P_{\text{цепи}}$) (если они есть в наличии):

$$P_{\Sigma} = P + P_{\text{цепи}},$$

где

$$P_{\text{цепи}} = U_{Aa} I_A \cos \varphi_{\text{цепи}(A)} + U_{Bb} I_B \cos \varphi_{\text{цепи}(B)} + U_{Cc} I_C \cos \varphi_{\text{цепи}(C)},$$

причем $\varphi_{\text{цепи}(A)}$; $\varphi_{\text{цепи}(B)}$ и $\varphi_{\text{цепи}(C)}$ углы между напряжениями на комплексных сопротивлениях $\underline{Z}_{Aa}$, $\underline{Z}_{Bb}$ и $\underline{Z}_{Cc}$, соединяющих источник с приемником и токами фаз нагрузок A , B и C соответственно (в схеме на рисунок 3.33 эти сопротивления $\underline{Z}_{Aa}$, $\underline{Z}_{Bb}$ и $\underline{Z}_{Cc}$ в линейных проводах отсутствуют).

Под **реактивной мощностью трехфазной системы**, соединенной по схеме **звезда – треугольник**, следует понимать сумму реактивных мощностей всех фаз нагрузки (Q), реактивных мощностей цепей, соединяющих источник и приемник ($Q_{\text{цепи}}$) (если они есть в наличии):

$$Q_{\Sigma} = Q + Q_{\text{цепи}},$$

где

$$Q_{\text{цепи}} = U_{Aa} I_A \sin \varphi_{\text{цепи}(A)} + U_{Bb} I_B \sin \varphi_{\text{цепи}(B)} + U_{Cc} I_C \sin \varphi_{\text{цепи}(C)}.$$

Полная мощность трехфазной системы определится следующим образом

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}.$$

При определении активной, реактивной и полной мощностей всей **трехфазной системы**, соединенной по схеме **звезда – звезда**, при **симметричной** нагрузке можно воспользоваться следующими выражениями:

$$P_{\Sigma} = 3U_A I_A \cos \varphi_{\phi\Sigma}; \quad Q_{\Sigma} = 3U_A I_A \sin \varphi_{\phi\Sigma}; \quad S_{\Sigma} = 3U_A I_A,$$

где $\varphi_{\phi\Sigma} = \varphi_{u(A)} - \varphi_{i(A)}$, причем $\varphi_{u(A)}$ — начальная фаза фазного напряжения, а $\varphi_{i(A)}$ — начальная фаза фазного тока.

Активная, реактивная и полная мощности всей **трехфазной системы** при значениях сопротивлений $\underline{Z}_{Aa} = \underline{Z}_{Bb} = \underline{Z}_{Cc} = 0$ совпадают по значениям с соответствующими активной, реактивной и полной мощностью всего **трехфазного потребителя**.

В случае аварийных режимов для трехфазного потребителя при обрыве фазы для схем **звезда – звезда без нулевого провода** и **звезда – тре-**

угольник активная и реактивная мощности этой оборванной фазы в расчетах, приведенных выше, **не учитываются**.

При обрыве линейного провода, например провода, соединяющего узлы **A** и **a** сети и потребителя для схемы **звезда – треугольник** активная и реактивная мощности рассчитываются следующим образом

$$P = P_A + P_B + P_C = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_A + U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_B + U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_C ,$$

причем в последних выражениях надо учитывать, что $U_{ab} = U_{ca} = U_{\Delta}/2 = U_{bc}/2$, а начальные фазы напряжений U_{ab} и U_{ca} будут отличаться от начальной фазы напряжения U_{bc} на 180° при расчете $\cos \varphi$.

3.3.6. Пример расчета трехфазной электрической цепи

Рассмотрим порядок выполнения расчета электрической цепи, схема которой изображена на рисунок 3.42.

1. Вначале определяем комплексные сопротивления фаз нагрузки $\underline{Z}_A$, $\underline{Z}_B$ и $\underline{Z}_C$

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = R_1 + jx_{L1} = R_2 + jx_{L2} = R_3 + jx_{L3}.$$

2. Затем находим комплексные сопротивления электрических цепей, соединяющих источник ЭДС с приемником (если они есть)

$$\underline{Z}_{Aa} = \underline{Z}_{Bb} = \underline{Z}_{Cc} = -jx_{C1} = -jx_{C2} = -jx_{C3}.$$

3. Записываем выражения ЭДС фаз трехфазного генератора: для **A** — $\underline{E}_A = E_A$; для **B** — $\underline{E}_B = E_A e^{-j120^\circ}$; для **C** — $\underline{E}_C = E_A e^{j120^\circ}$.

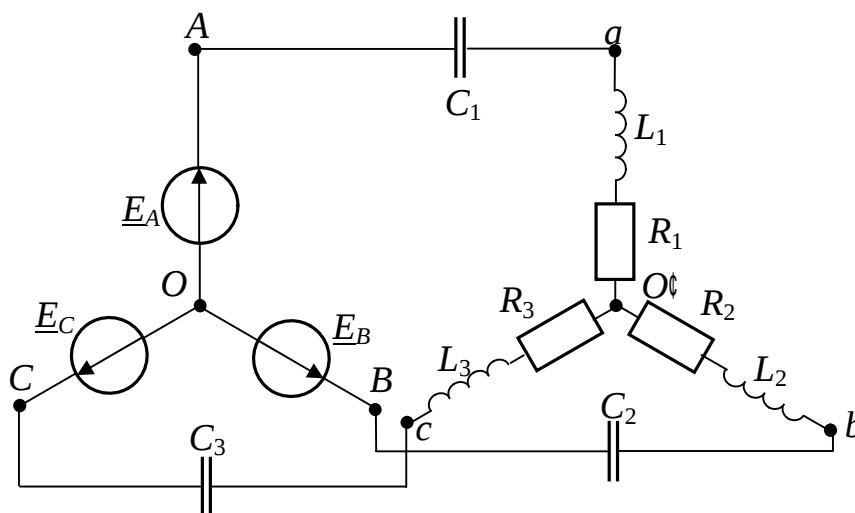


Рисунок 3.42

4. В соответствии с тем, что линейные токи равны фазным при соединении источника с приемником по схеме **звезда-звезда**, фазные токи определяются следующим образом:

$$\underline{I}_a = \underline{I}_A = \underline{E}_A \underline{Y}_{AO'} ;$$

$$\underline{I}_b = \underline{I}_B = \underline{E}_B \underline{Y}_{BO'} ;$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_C = \underline{E}_C \underline{Y}_{CO'} ,$$

где $\underline{Y}_{AO'} = 1/(\underline{Z}_{Aa} + \underline{Z}_A)$, $\underline{Y}_{BO'} = 1/(\underline{Z}_{Bb} + \underline{Z}_B)$ и $\underline{Y}_{CO'} = 1/(\underline{Z}_{Cc} + \underline{Z}_C)$.

5. Находим напряжения на фазах нагрузки

$$\underline{U}_{aO'} = \underline{I}_A \underline{Z}_A ; \underline{U}_{bO'} = \underline{I}_B \underline{Z}_B ; \underline{U}_{cO'} = \underline{I}_C \underline{Z}_C .$$

6. Вычисляем активную, реактивную и полную мощности **трехфазного потребителя**

$$P = 3U_{aO'} I_A \cos \varphi_\Phi ;$$

$$Q = 3U_{aO'} I_A \sin \varphi_\Phi ;$$

$$S = 3U_{aO'} I_A ,$$

где $\varphi_\Phi = \varphi_u(aO') - \varphi_i(A)$, причем $\varphi_u(aO')$ — начальная фаза фазного напряжения, а $\varphi_i(A)$ — начальная фаза фазного тока.

7. Определяем активную, реактивную и полную мощности всей **трехфазной цепи**

$$P_\Sigma = 3U_A I_A \cos \varphi_{\Phi\Sigma} ;$$

$$Q_\Sigma = 3U_A I_A \sin \varphi_{\Phi\Sigma} ;$$

$$S_\Sigma = 3U_A I_A ,$$

где $\varphi_{\Phi\Sigma} = \varphi_{e(A)} - \varphi_{i(A)}$, причем $\varphi_{e(A)}$ — начальная фаза фазного напряжения, а $\varphi_{i(A)}$ — начальная фаза фазного тока. Значения этих мощностей можно определить и по другим выражениям

$$P_\Sigma = P + P_{\text{цепи}} ; Q_\Sigma = Q + Q_{\text{цепи}} ; S_\Sigma = \sqrt{(P_\Sigma^2 + Q_\Sigma^2)} ,$$

где P , Q и S — соответственно активная, реактивная и полная мощности трехфазного потребителя, а $P_{\text{цепи}}$ и $Q_{\text{цепи}}$ — активная и реактивная мощности трехфазных цепей, соединяющих источник с приемником соответственно ($P_{\text{цепи}} = 3U_{Aa} I_A \cos \varphi_{\text{цепи}}$; $Q_\Sigma = 3U_{Aa} I_A \sin \varphi_{\text{цепи}}$, а $\varphi_\Phi \text{ цепи} = \varphi_{u(Aa)} - \varphi_{i(A)}$).

8. Вычислим комплексы действующих значений линейных токов и токов в фазах нагрузки, а также напряжение на каждой фазе нагрузки при обрыве одной из фаз (например, фазы А). В этом случае комплексная проводимость нагрузки фазы А будет равна нулю, т.е. $\underline{Y}_{AO'} = 0$.

Для выполнения этих расчетов вначале по формуле 3.1 определим напряжение между нейтральными точками

$$\underline{U}_{O'O} = \frac{(\underline{E}_B \underline{Y}_{BO'} + \underline{E}_C \underline{Y}_{CO'})}{(\underline{Y}_{BO'} + \underline{Y}_{CO'})} ,$$

затем по выражениям 3.3 определим напряжения на фазах

$$\underline{U}_b = (\underline{E}_B - \underline{U}_{O'O}) \underline{Y}_{BO'} \underline{Z}_B ;$$

$$\underline{U}_c = (\underline{E}_C - \underline{U}_{O'O}) \underline{Y}_{CO'} \underline{Z}_C$$

и токи в фазах нагрузки по выражениям (3.5)

$$\underline{I}_B = \underline{U}_b \underline{Y}_B; \underline{I}_C = \underline{U}_c \underline{Y}_C.$$

9. Построим графики мгновенных значений токов в фазах (рисунок 3.43) и напряжений на фазах (рисунок 3.44) **симметричной** нагрузки.

10. Построим:

а) векторную диаграмму линейных токов и напряжений фаз генератора (рисунок 3.45);

б) векторную диаграмму токов в фазах и напряжений на фазах приемника при симметричной нагрузке фаз (рисунок 3.45);

в) векторную диаграмму фазных напряжений (рисунок 3.46, а) и фазных токов (рисунок 3.46, б) в трехфазном приемнике при **обрыве линейного провода в фазе А**.

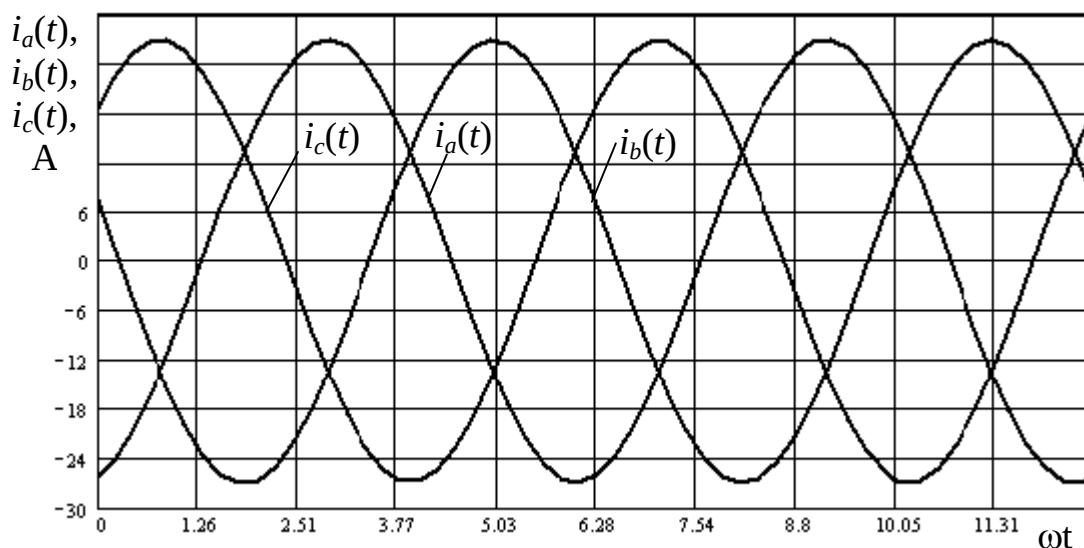


Рисунок 3.43

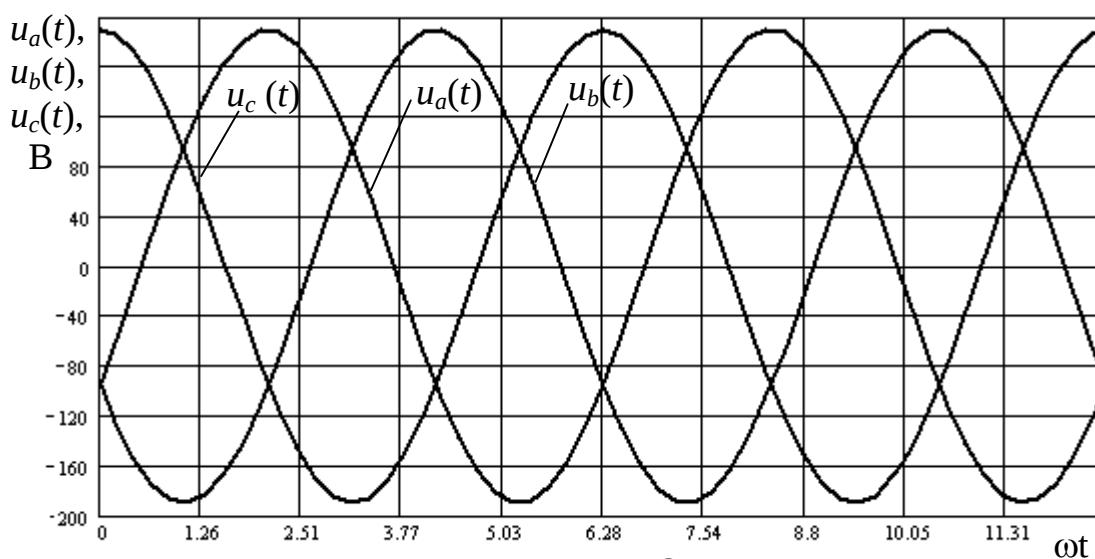


Рисунок 3.44

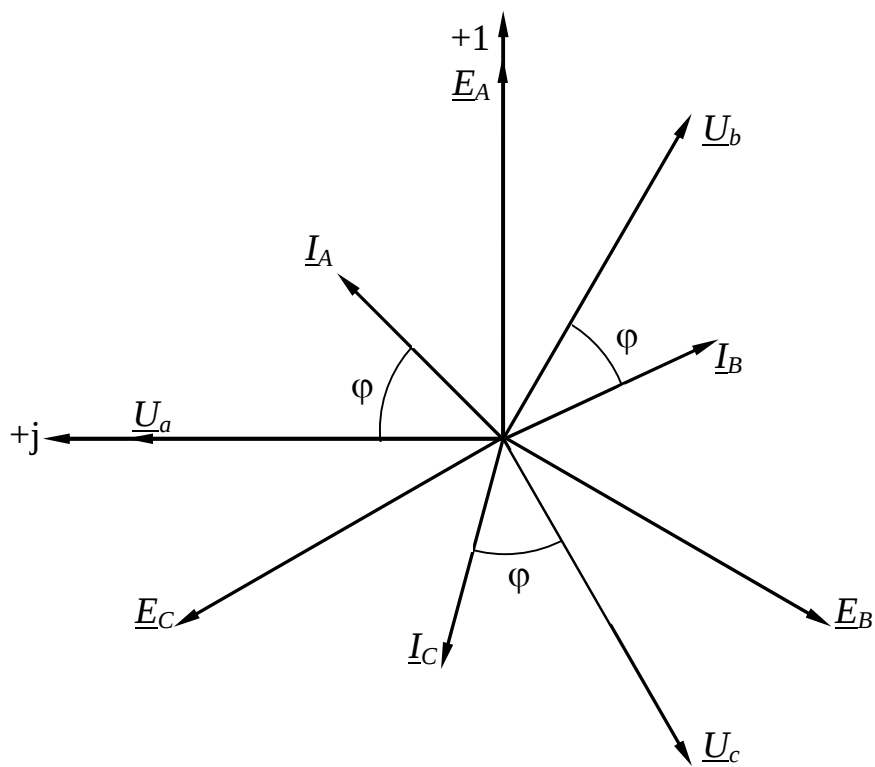


Рисунок 3.45

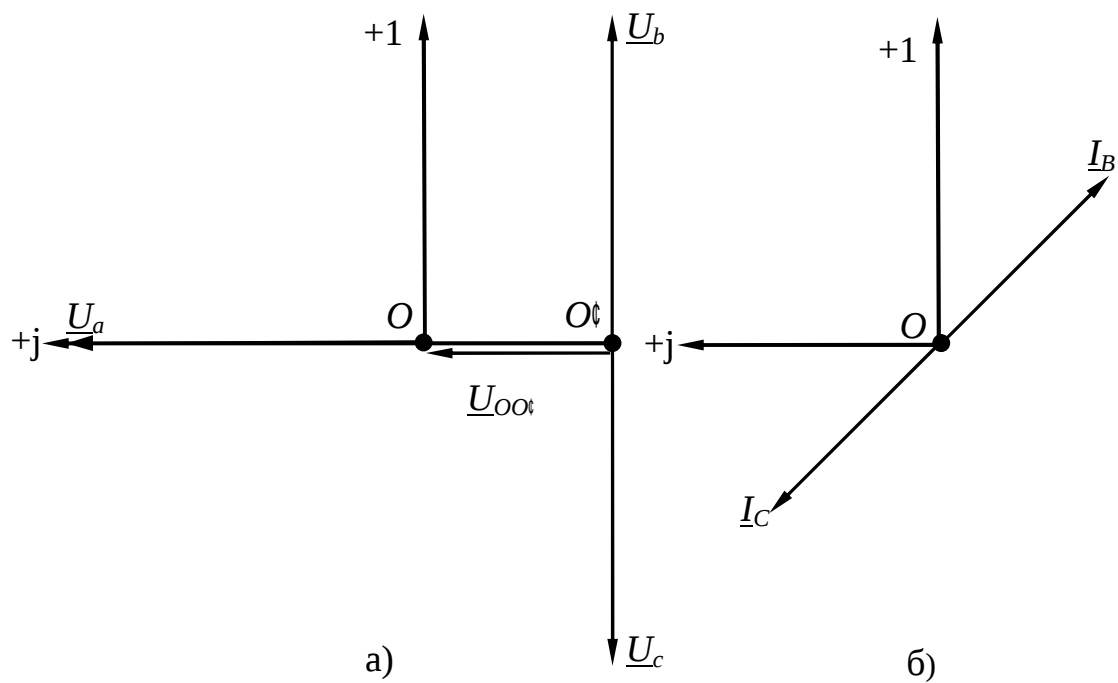


Рисунок 3.46

3.4. Контрольные вопросы

1. Какая нагрузка трехфазного генератора называется симметричной?
2. Какие напряжения называются фазными, а какие линейными?
3. Какие токи называются фазными, а какие линейными?
4. В каком соотношении находятся линейные и фазные токи при соединении нагрузки звездой?
5. В каком соотношении находятся линейные и фазные напряжения при соединении нагрузки звездой?
6. В каком соотношении находятся линейные и фазные токи при соединении нагрузки треугольником?
7. В каком соотношении находятся линейные и фазные напряжения при соединении нагрузки треугольником?

КР № 4 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

4.1. Цель работы

4.1.1. Усвоение методов расчета магнитных цепей постоянного тока.

4.1.2. Закрепление и углубление теоретических знаний по данной теме, полученных на лекционных, практических и лабораторных занятиях.

4.2. Задание на выполнение работы

Задана магнитная цепь. По номеру варианта, исходные данные для расчетов: I_1 и I_2 — значения постоянного тока в первой и второй катушках соответственно; ϖ_1 и ϖ_2 — количество витков в первой и второй катушках соответственно; марка стали и величины воздушных зазоров δ_1 и δ_2 выбираются из таблицы 4.1.

Из таблицы 4.1. выбирается и схема магнитной цепи.

Геометрические размеры магнитопровода приведены в таблице 4.2.

Варианты схем магнитных цепей изображены на рисунках 4.1— 4.18.

На этих рисунках: а — вид спереди; б — вид сбоку.

По данным таблицы 4.1, необходимо выполнить следующее.

1. Для заданной магнитной цепи составить эквивалентную расчетную схему.

2. Составить систему уравнений по законам Кирхгофа для расчета магнитных потоков.

3. Определить магнитные потоки в цепи.

4. Рассчитать статические индуктивности обмоток при значениях потоков, полученных в расчете.

Указания к выбору варианта:

В таблице 4.1 приняты следующие обозначения:

L — длина средней магнитной линии одной ветви магнитной цепи;

l_δ — длина воздушного зазора (его положение в магнитной цепи дано на схемах магнитопровода);

S — сечение участков магнитопровода;

ϖ — число витков катушек;

I — ток в катушке.

Обозначения величин даются с индексами, которые указывают, к какой ветви магнитной цепи относится та или иная величина; индекс 1 — к левой магнитной ветви, 2 — к правой ветви, 3 — к средней ветви.

Магнитные свойства сталей, из которых изготовлены магнитопроводы, приведены в таблице 4.3.

4.3. Методические указания по выполнению КР №4

При расчете магнитных цепей может быть поставлена задача определения магнитодвижущей силы, необходимой для создания заданного магнитного потока Φ на участке магнитопровода (прямая задача), или обратная задача, когда по заданной магнитодвижущей силе необходимо определить потоки в отдельных участках цепи.

В данной работе решается обратная задача расчета магнитной цепи.

В расчетах магнитных цепей, используют первый и второй законы Кирхгофа, закон Ома. Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи имеет следующую формулировку: **алгебраическая сумма магнитных потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю** [2]:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0.$$

Этот закон следует из принципа непрерывности магнитного потока.

Второй закон Кирхгофа для магнитной цепи формулируется следующим образом: **алгебраическая сумма магнитодвижущих сил (МДС) в контуре магнитной цепи равна алгебраической сумме магнитных напряжений на участках магнитной цепи в том же контуре** [3]:

$$\sum_{j=1}^m (I_j \varpi_j) = \sum_{k=1}^n (\Phi_k R_{mk}) = \sum_{k=1}^n (H_k l_k),$$

где R_{mk} — магнитное сопротивление k -го участка магнитной цепи; H_k и l_k — напряженность и длина средней магнитной линии k -й ветви магнитной цепи. Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей, по сути, есть иная форма записи закона полного тока. Перед записью уравнений по законам Кирхгофа следует произвольно выбрать положительные направления потоков в ветвях магнитной цепи и положительные направления обхода контуров. Если направление магнитного потока на некотором участке совпадает с направлением обхода, то падение магнитного на-

пряжения этого участка входит в сумму $\sum_{k=1}^n (\Phi_k R_{mk})$ со знаком плюс; если встречно ему, то со знаком минус. Аналогично, если МДС совпадает с направлением обхода, она входит в выражение суммы МДС $\sum_{j=1}^m (I_j \varpi_j)$ со

знаком плюс, в противном случае — со знаком минус.

Закон Ома для магнитной цепи записывается в следующем виде [4]:

$$\Phi = \frac{I \varpi}{R_m},$$

где $I \varpi$ — магнитодвижущая сила, а R_m — магнитное сопротивление магнитопровода.

Таблица 4.1

Номер варианта	Рисунок	I_1, A	I_2, A	ϖ_1	ϖ_2	$\delta_1, \text{мм}$	$\delta_2, \text{мм}$	Марка стали
1	4.1	1,0	2,1	200	520	0,5	2,1	1211
2	4.2	1,2	2,2	220	540	0,6	2,2	1211
3	4.3	1,3	2,3	240	560	0,7	2,3	1211
4	4.4	1,4	2,4	260	580	0,8	2,4	1211
5	4.5	1,5	2,5	280	600	0,9	2,5	1211
6	4.6	1,6	2,6	690	200	1,0	2,6	1411
7	4.7	1,7	2,7	700	220	1,2	2,7	1411
8	4.8	1,8	2,8	720	240	1,3	2,8	1411
9	4.9	1,9	2,9	740	260	1,4	2,9	1411
10	4.10	2,0	3,0	760	280	1,5	3,0	1411
11	4.11	2,1	3,1	780	300	1,6	0,1	1511
12	4.12	2,2	3,2	800	320	1,7	0,2	1511
13	4.13	2,3	3,4	820	340	1,8	0,3	1511
14	4.14	2,4	3,5	840	360	1,9	0,4	1511
15	4.15	2,5	3,6	860	380	2,0	0,5	1511
16	4.16	2,6	3,7	880	400	2,1	0,1	1514
17	4.17	2,7	3,8	900	410	2,2	0,2	1514
18	4.18	2,8	3,9	920	430	2,3	0,3	1514
19	4.1	2,9	4,0	940	440	2,4	0,4	1514
20	4.2	3,0	4,1	960	450	2,5	0,5	1514
21	4.3	3,1	4,2	520	500	2,6	0,6	1411
22	4.4	3,2	4,3	540	510	2,7	0,7	1411
23	4.5	3,4	4,4	560	530	2,8	0,8	1411
24	4.6	3,5	4,5	580	550	2,9	0,9	1411
25	4.7	3,6	4,6	600	570	3,0	1,0	1411
26	4.8	3,7	5,3	690	610	0,1	2,1	1211
27	4.9	3,8	5,4	700	630	0,2	2,2	1211
28	4.10	3,9	5,5	720	650	0,3	2,3	1211
29	4.11	4,0	5,6	740	670	0,4	2,4	1211
30	4.12	4,1	5,7	760	680	0,5	2,5	1211
31	4.13	4,2	5,8	780	880	0,6	2,6	1514
32	4.14	4,3	5,9	800	900	0,7	2,7	1514
33	4.15	4,4	6,0	820	920	0,8	2,8	1514
34	4.16	4,5	6,1	840	940	0,9	2,9	1514
35	4.17	4,6	6,2	860	960	1,0	3,0	1514
36	4.18	4,7	0,5	400	520	1,1	0,1	1511
37	4.1	4,8	0,6	420	540	1,2	0,2	1511
38	4.2	4,9	0,7	440	560	1,3	0,3	1511
39	4.3	5,1	0,8	460	580	1,4	0,4	1511
40	4.4	5,2	0,9	480	600	1,5	0,5	1511

Продолжение таблицы 4.1

Номер варианта	Рисунок	I_1, A	I_2, A	ϖ_1	ϖ_2	$\delta_{1, мм}$	$\delta_{2, мм}$	Марка стали
41	4.4	5,3	1,0	500	100	1,6	0,5	1211
42	4.5	5,4	1,2	520	120	1,7	0,6	1211
43	4.6	5,5	1,3	540	140	1,8	0,7	1211
44	4.7	5,6	1,4	560	160	1,9	0,8	1211
45	4.8	5,7	1,5	580	180	2,0	0,9	1211
46	4.9	5,8	1,6	600	200	2,1	1,0	1411
47	4.10	5,9	1,7	620	220	2,2	1,2	1411
48	4.11	6,0	1,8	640	240	2,3	1,3	1411
49	4.12	6,1	1,9	650	260	2,4	1,4	1411
50	4.13	6,2	2,0	670	280	2,5	1,5	1411
51	4.14	0,5	2,1	300	690	2,6	0,1	1511
52	4.15	0,6	2,2	320	700	2,7	0,2	1511
53	4.16	0,7	2,3	340	720	2,8	0,3	1511
54	4.17	0,8	2,4	360	740	2,9	0,4	1511
55	4.18	0,9	2,5	380	760	3,0	0,5	1511
56	4.1	1,0	2,6	400	780	3,1	0,6	1514
57	4.2	1,2	2,7	420	800	0,1	0,7	1514
58	4.3	1,3	2,8	440	820	0,2	0,8	1514
59	4.4	1,4	2,9	460	840	0,3	0,9	1514
60	4.5	1,5	3,0	480	860	0,4	1,0	1514
61	4.6	1,6	3,1	500	880	0,5	1,1	1211
62	4.7	1,7	3,2	520	900	0,6	1,2	1211
63	4.8	1,8	3,4	540	920	0,7	1,3	1211
64	4.9	1,9	3,5	560	940	0,8	1,4	1211
65	4.10	2,0	3,6	580	960	0,9	1,5	1211
66	4.11	2,1	3,7	600	520	1,0	1,6	1511
67	4.12	2,2	3,8	620	540	1,2	1,7	1511
68	4.13	2,3	3,9	640	560	1,3	1,8	1511
69	4.14	2,4	4,0	650	580	1,4	1,9	1511
70	4.15	2,5	4,1	670	600	1,5	2,0	1511
71	4.16	2,6	4,2	690	200	1,6	2,1	1514
72	4.17	2,7	4,3	700	220	1,7	2,2	1514
73	4.18	2,8	4,4	720	240	1,8	2,3	1514
74	4.1	2,9	4,5	740	260	1,9	2,4	1514
75	4.2	3,0	4,6	760	280	2,0	2,5	1514
76	4.3	3,1	4,7	780	300	2,1	0,5	1411
77	4.4	3,2	4,8	800	320	2,2	0,6	1411
78	4.5	3,4	4,9	820	340	2,3	0,7	1411
79	4.6	3,5	5,1	840	360	2,4	0,8	1411
80	4.7	3,6	5,2	860	380	2,5	0,9	1411

Окончание таблицы 4.1

Номер варианта	Рисунок	I_1, A	I_2, A	ϖ_1	ϖ_2	$\delta_1, \text{мм}$	$\delta_2, \text{мм}$	Марка стали
81	4.8	3,7	5,3	880	300	2,6	0,5	1514
82	4.9	3,8	5,4	900	320	2,7	0,6	1514
83	4.10	3,9	5,5	920	340	2,8	0,7	1514
84	4.11	4,0	5,6	940	360	2,9	0,8	1514
85	4.12	4,1	5,7	960	380	3,0	0,9	1514
86	4.13	4,2	5,8	520	400	3,1	1,0	1211
87	4.14	4,3	5,9	540	420	3,2	1,2	1211
88	4.15	4,4	6,0	560	440	3,3	1,3	1211
89	4.16	4,5	6,1	580	460	3,4	1,4	1211
90	4.17	4,6	6,2	600	480	3,5	1,5	1211
91	4.18	4,7	0,5	400	500	3,6	0,5	1411
92	4.19	4,8	0,6	420	520	3,7	0,6	1411
93	4.20	4,9	0,7	440	540	3,8	0,7	1411
94	4.1	5,1	0,8	460	560	3,9	0,8	1411
95	4.2	5,2	0,9	480	580	4,0	0,9	1411
96	4.3	5,3	1,0	500	300	1,0	1,0	1511
97	4.4	5,4	1,2	520	320	1,2	1,2	1511
98	4.5	5,5	1,3	540	340	1,3	1,3	1511
99	4.6	5,6	1,4	560	360	1,4	1,4	1511
100	4.7	5,7	1,5	580	380	1,5	1,5	1511

Таблица 4.2

Номера вариантов	Геометрические размеры магнитопровода, мм								
	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И
1-10	10	55	20	55	10	12	10	40	10
11-20	12	60	24	60	12	16	12	44	12
21-30	14	65	28	65	14	20	14	48	14
31-40	16	70	32	70	16	24	16	52	16
41-50	18	75	36	75	18	28	18	56	18
51-60	20	80	40	80	20	10	20	60	20
61-70	22	85	44	85	22	12	22	64	22
71-80	24	90	48	90	24	14	24	68	24
81-90	26	95	52	95	26	16	26	72	26
91-100	28	100	56	100	28	18	28	76	28

Таблица 4.3

Листовая электротехниче- ская сталь 1211		Листовая электротехниче- ская сталь 1411		Листовая электротехниче- ская сталь 1511		Листовая электротехниче- ская сталь 1514	
H , А/м	B , Тл	H , А/м	B , Тл	H , А/м	B , Тл	H , А/м	B , Тл
0	0	0	0	0	0	0	0
20	0,03	20	0,04	20	0,14	20	0,12
40	0,11	40	0,18	40	0,35	40	0,34
100	0,53	100	0,67	60	0,55	60	0,53
140	0,73	140	0,8	80	0,62	80	0,60
180	0,9	180	0,92	100	0,76	100	0,74
240	1,1	240	1,05	140	0,88	140	0,86
400	1,2	400	1,14	180	0,98	180	0,96
600	1,3	600	1,23	240	1,03	240	1,01
800	1,38	800	1,3	500	1,09	400	1,07
1000	1,42	1000	1,38	600	1,17	600	1,15
1200	1,45	1200	1,42	800	1,23	800	1,21
1400	1,48	1400	1,46	1000	1,30	1000	1,29
1800	1,54	1800	1,5	2500	1,46	2500	1,441
2200	1,57	2200	1,53	5000	1,57	5000	,55
2400	1,59	2400	1,54	10000	1,70	10000	1,69
4000	1,64	4000	1,59	30000	1,90	30000	1,89
8000	1,75	8000	1,69				

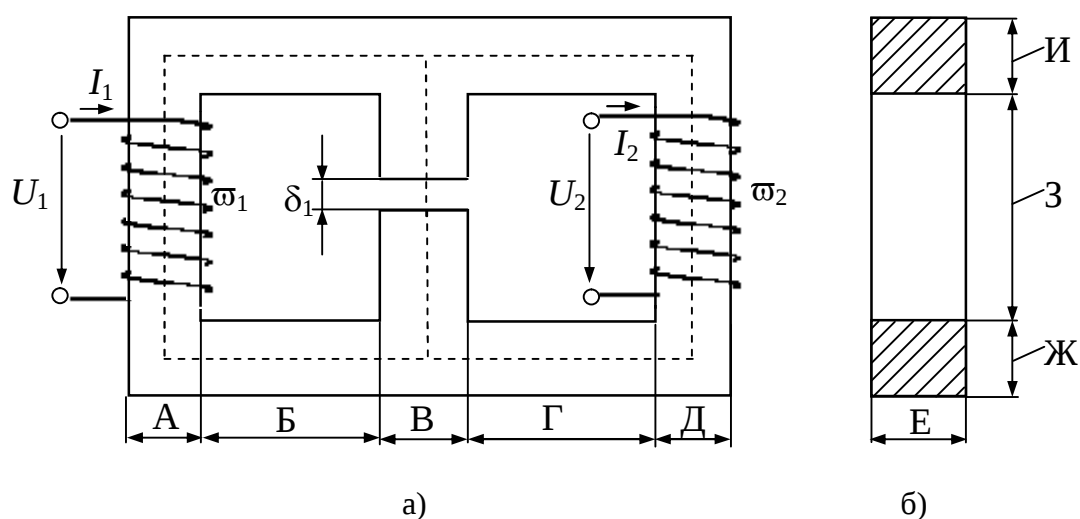


Рисунок 4.1

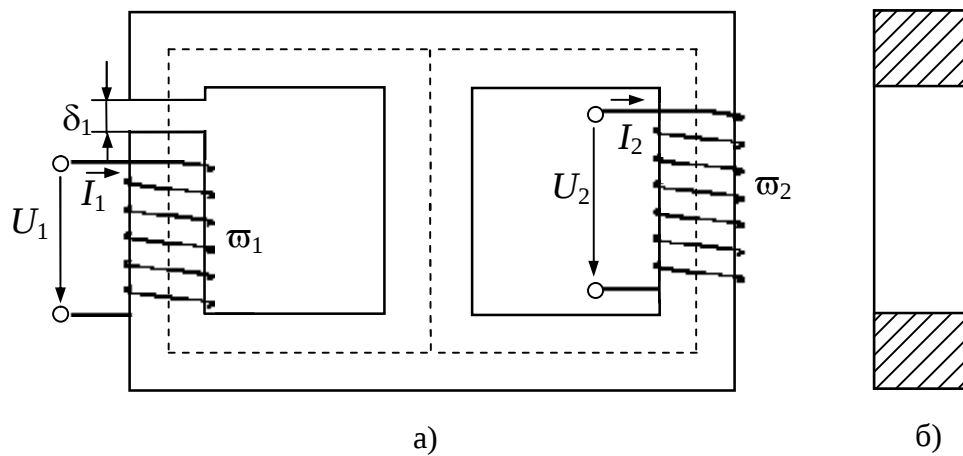


Рисунок 4.2

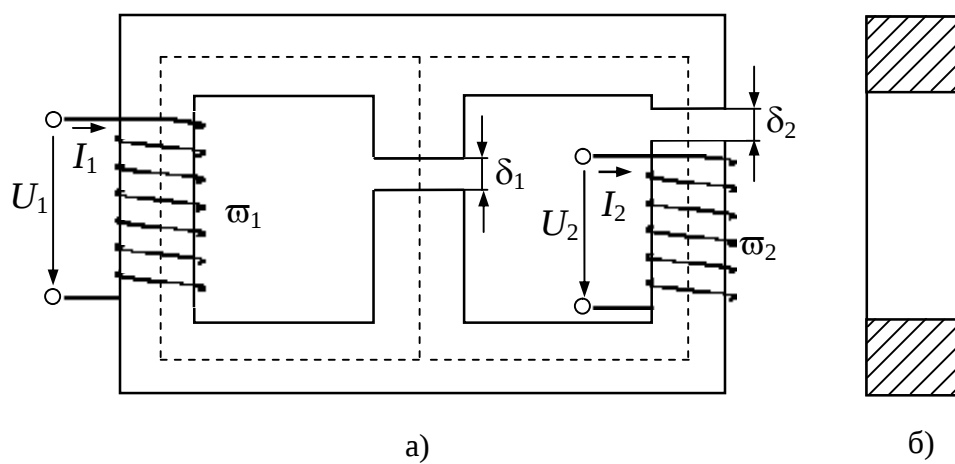


Рисунок 4.3

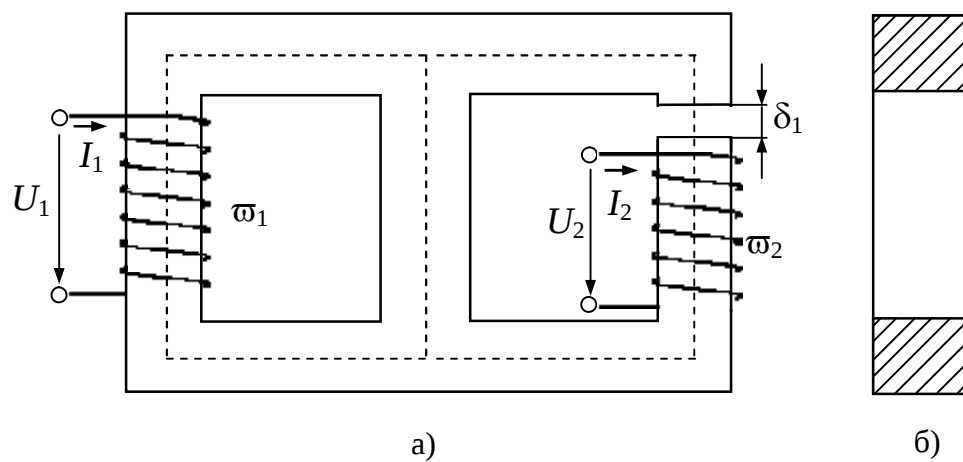


Рисунок 4.4

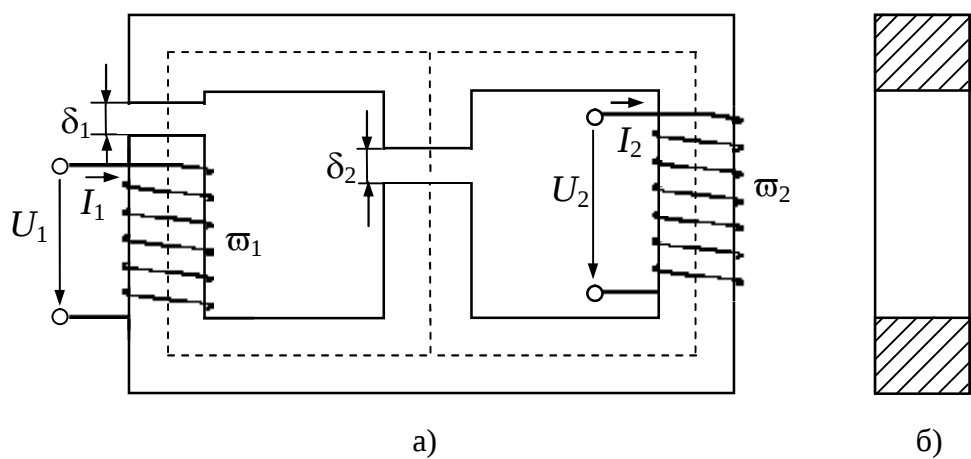


Рисунок 4.5

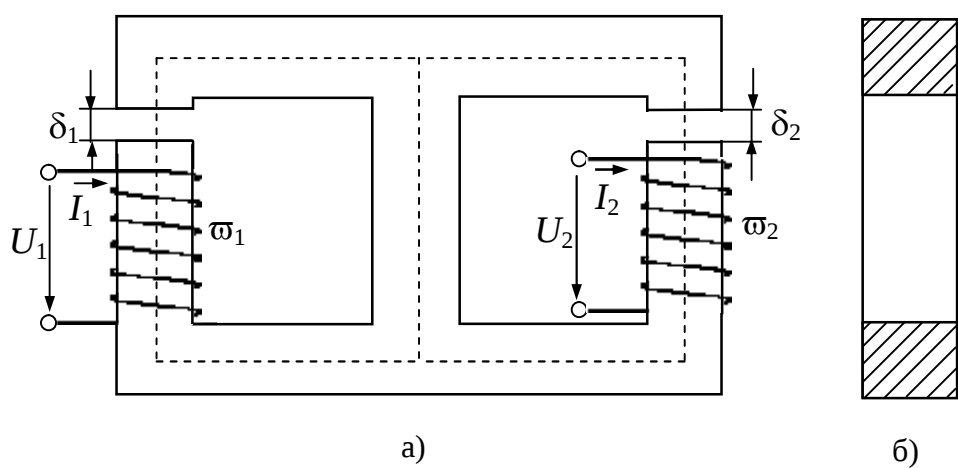


Рисунок 4.6

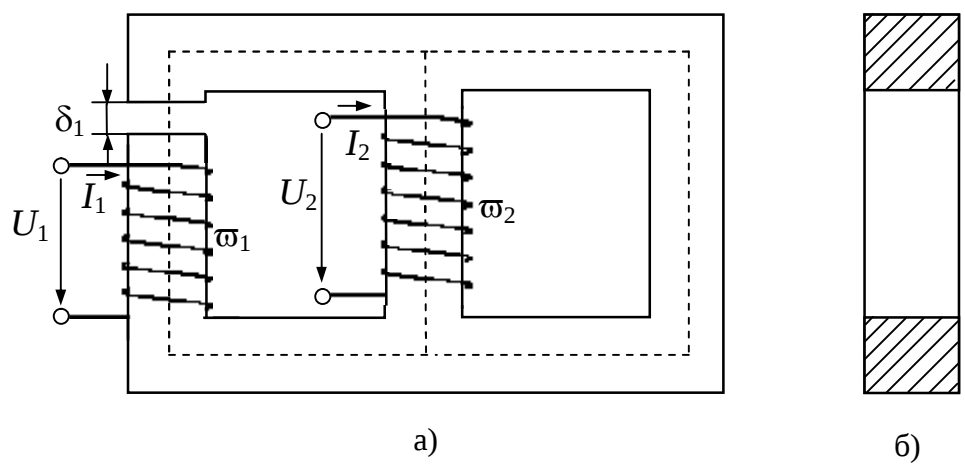


Рисунок 4.7

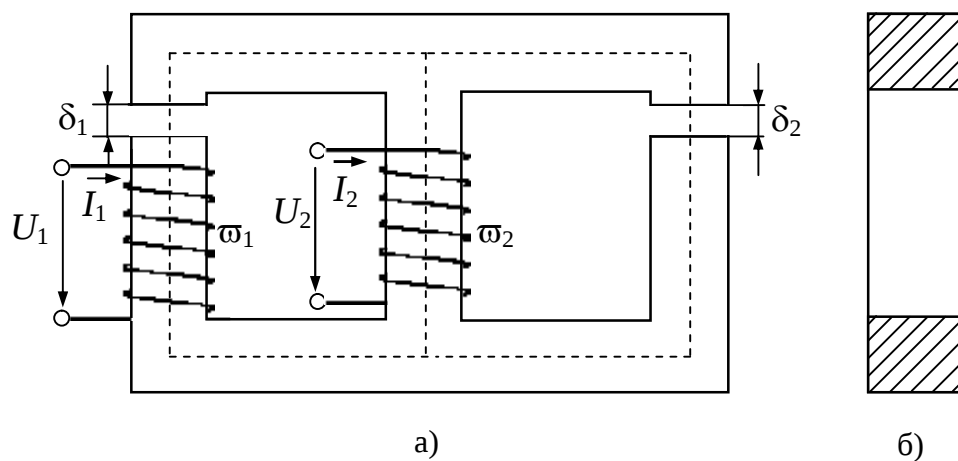


Рисунок 4.8

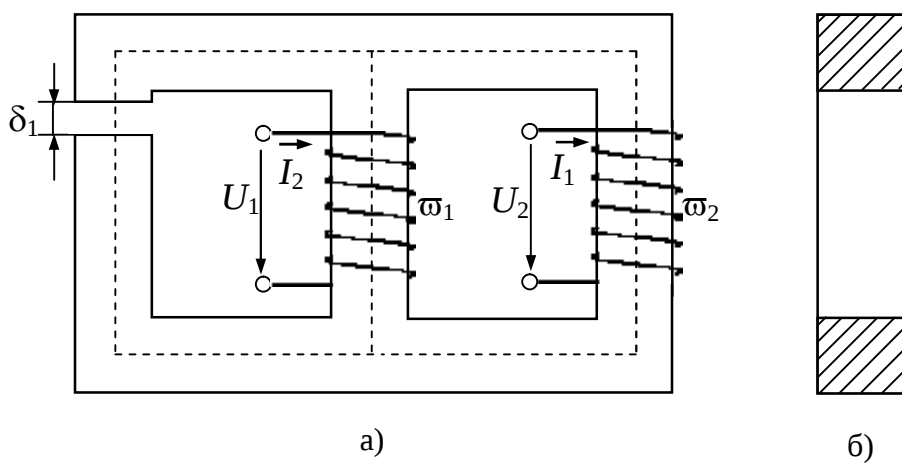


Рисунок 4.9

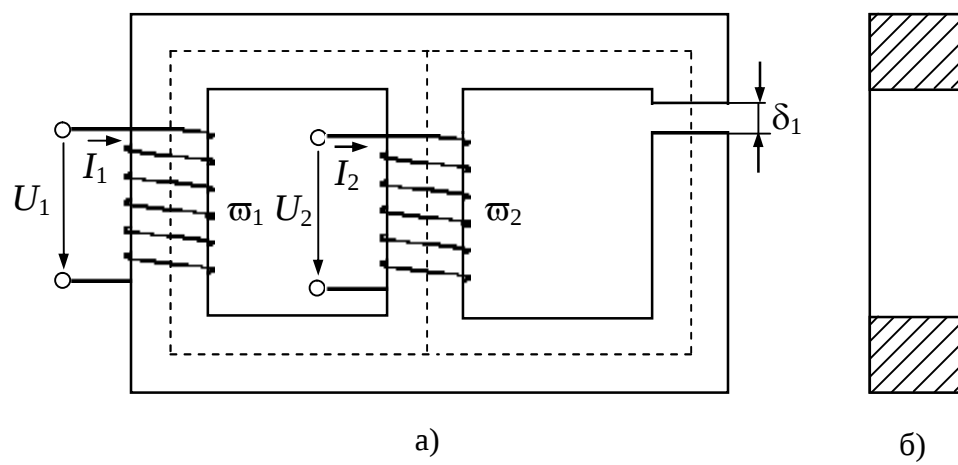


Рисунок 4.10

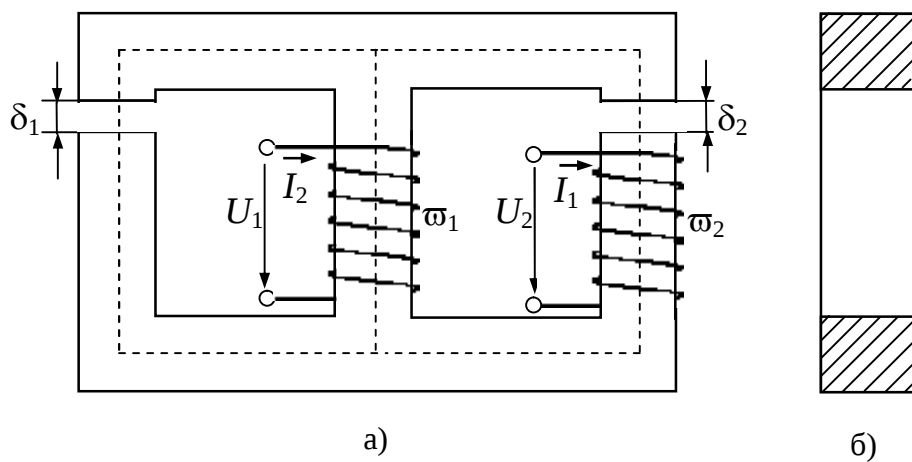


Рисунок 4.11

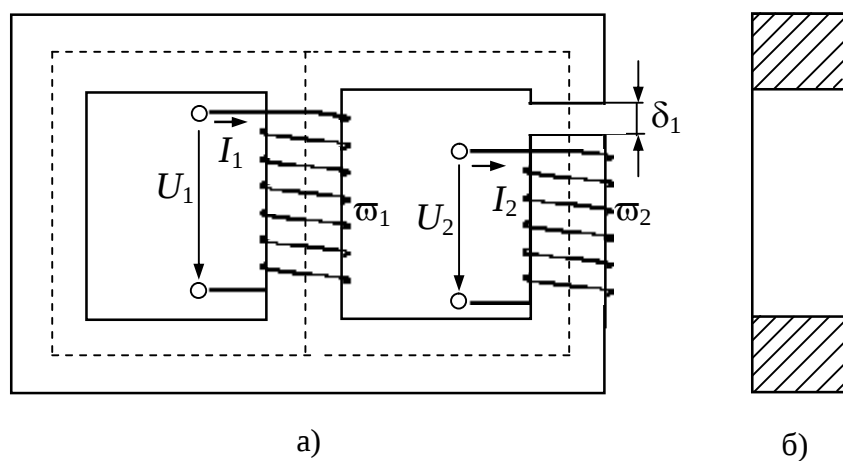


Рисунок 4.12

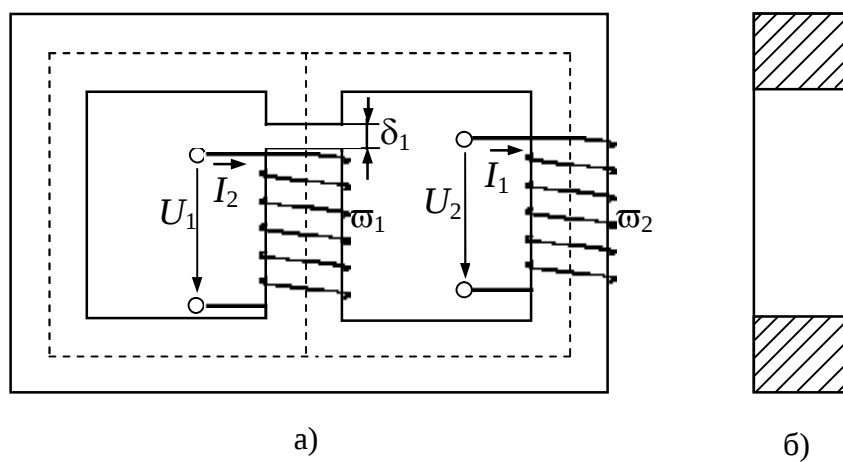
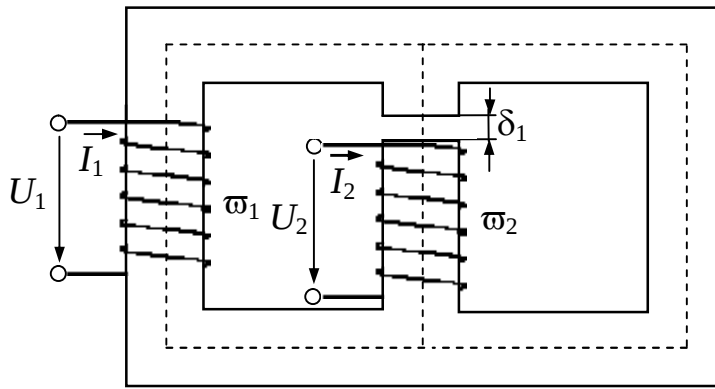


Рисунок 4.13

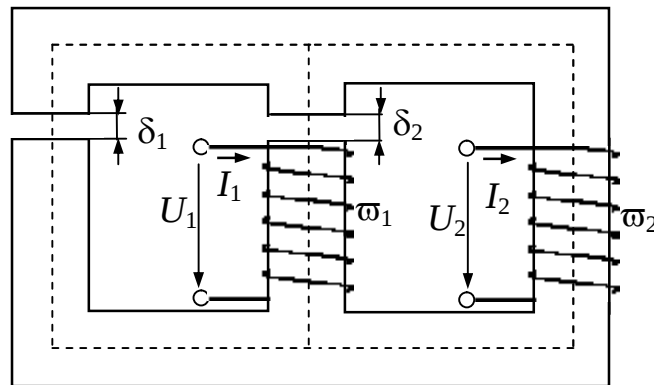


а)

Рисунок 4.14

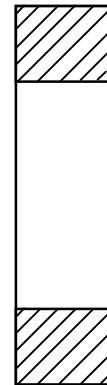


б)

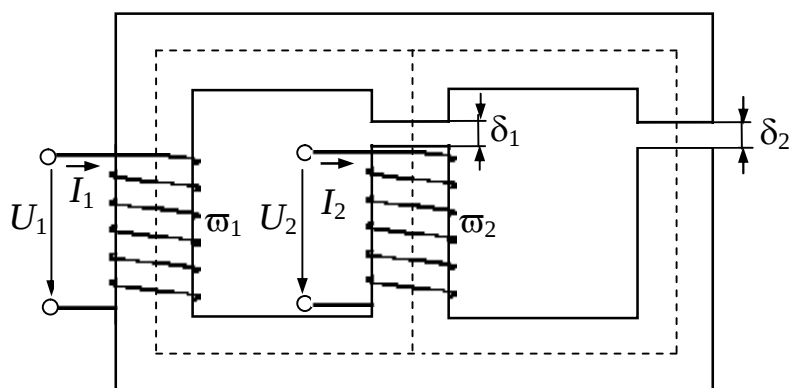


а)

Рисунок 4.15

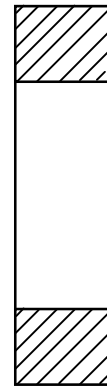


б)

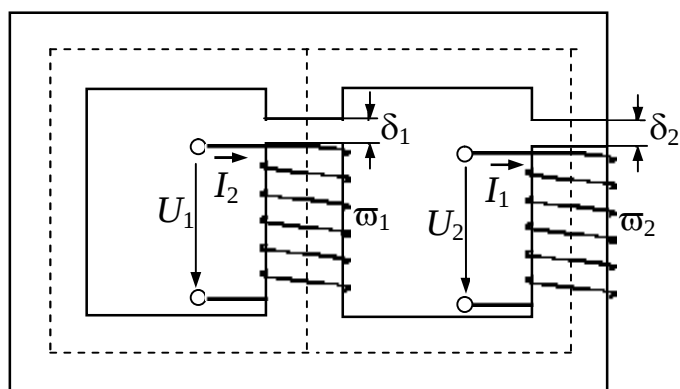


а)

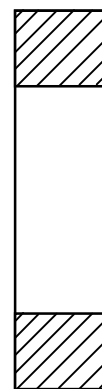
Рисунок 4.16



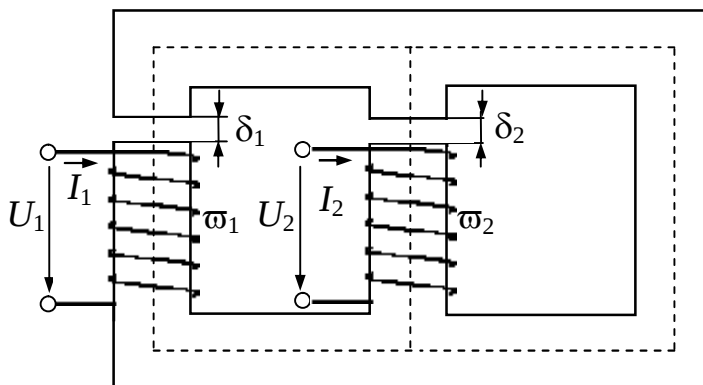
б)



а)
Рисунок 4.17



б)



а)
Рисунок 4.18



б)

Как следует из закона Ома, чем меньшее сопротивление имеет магнитопровод в машинах или в аппаратах, тем меньший ток требуется пропускать по намагничивающей катушке для получения заданного магнитного потока.

В качестве примера составим уравнения для магнитной цепи, изображенной на рисунке 4.19. При этом рекомендуется следующий порядок расчета разветвленных магнитных цепей.

1. Вначале разбиваем заданную магнитную цепь на однородные участки. Участок магнитной цепи является **однородным** при выполнении двух условий:

- площадь сечения участка одинаковая по всей его длине, то есть напряженность магнитного поля по всей его длине есть величина постоянная;
- весь участок магнитной цепи выполнен только из одного материала.

В нашем примере таких участков будет четыре. Первый, второй и третий участки изготовлены из одинакового материала, а четвертый участок является воздушным.

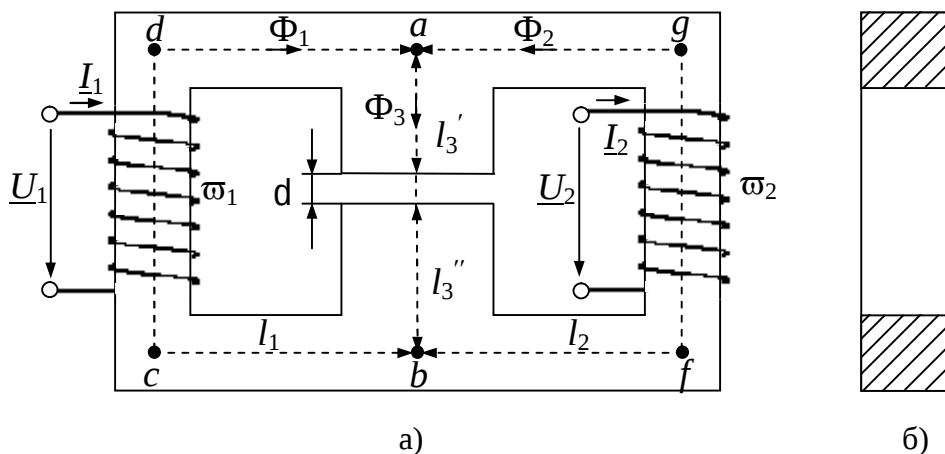


Рисунок 4.19. Магнитная цепь: а — вид спереди; б — вид сбоку

Левую ветвь назовем первой и все относящиеся к ней величины обозначим с индексом 1 (поток Φ_1 , напряженность поля H_1 , длина пути в стали l_1 , МДС $I_1 v_1$).

Правую ветвь назовем второй, и все относящиеся к ней величины обозначим с индексом 2 (поток Φ_2 , напряженность поля H_2 , длина пути в стали l_2 , МДС $I_2 v_2$).

Все величины, относящиеся к средней ветви, имеют индекс 3 (поток Φ_3 , напряженность поля H_3 , длина пути в стали l_3).

2. Отмечаем на схеме среднюю силовую линию и, зная геометрические размеры магнитопровода, определяем ее длину на однородных участках магнитопровода:

$$l_{abcd}=l_1; l_{agfb}=l_2; l_{ab}=l_3=l_3'+l_3''+\delta.$$

Для удобства построения средней силовой линии следует поступать следующим образом:

- по середине всех участков прочертить средние линии;
- в местах пересечений средних линий проставить точки пересечений (a, b, c, d, g, f);
- пользуясь определением однородного участка определить среднюю длину линии однородного участка.

3. Рассчитываем величины поперечных сечений магнитопровода на однородных участках: S_1 ; S_2 ; S_3 . Точный расчет распределения магнитного поля в воздушном зазоре является сложной задачей, но при малой длине зазора и параллельности плоскостей ферромагнитных участков, ограничивающих зазор, магнитное поле в воздушном зазоре можно считать одно-

родным, а его сечение S_δ — равным сечению сердечника. В нашем примере можно положить $S_{ab} = S_\delta$.

4. Для заданной магнитной цепи составим эквивалентную расчетную схему. На рисунке 4.20 изображена эквивалентная расчетная схема для нашего примера с обозначениями

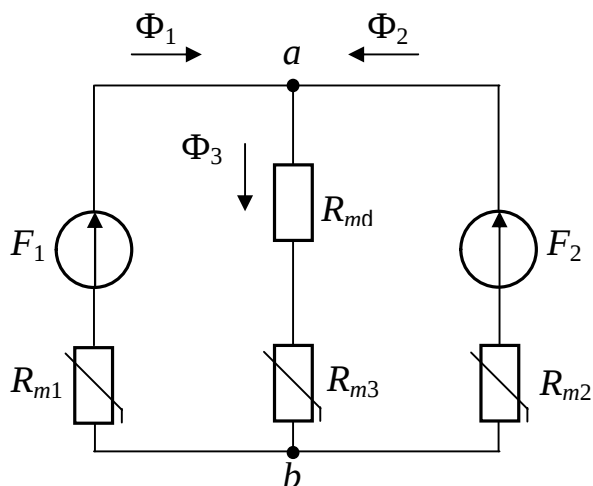


Рисунок 4.20

$$\begin{aligned} F_1 &= I_1 \varpi_1; \\ F_2 &= I_2 \varpi_2; \\ R_{m1} &= \frac{l_{abcd}}{\mu_{a1} S_1}, \end{aligned}$$

где μ_{a1} — абсолютная магнитная проницаемость 1-го участка; F_1 и F_2 — магнитодвижущие силы, возникающие в обмотках катушек;

$$R_{m2} = \frac{l_{agfb}}{\mu_{a2} S_2},$$

где μ_{a2} — абсолютная магнит-

ная проницаемость 2-го участка;

$$R_{m3} = \frac{l_{ab} - \delta}{\mu_{a3} S_3},$$

где μ_{a1} — абсолютная магнитная проницаемость 1-го участка;

$$R_{m\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная.

5. По законам Кирхгофа запишем для нашей магнитной цепи систему уравнений:

$$\begin{aligned} \Phi_3 &= \Phi_1 + \Phi_2; \\ I_1 \varpi_1 &= H_1 l_1 + U_{mab}; \\ I_2 \varpi_2 &= H_2 l_2 + U_{mab}; \\ U_{mab} &= H_3 l_3 + H_\delta l_\delta. \end{aligned}$$

6. С применением графического метода решить поставленную задачу. Для решения графически данной системы уравнений необходимо **вначале** построить характеристики всех участков магнитной цепи:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= f(I_1 \varpi_1 - H_1 l_1) \text{ или } \Phi_1 = f(U_{mab}); \\ \Phi_2 &= f(I_2 \varpi_2 - H_2 l_2) \text{ или } \Phi_2 = f(U_{mab}); \\ \Phi_3 &= f(H_3 l_3 + H_\delta l_\delta) \text{ или } \Phi_3 = f(U_{mab}). \end{aligned}$$

С этой целью все расчеты, необходимые для построения графиков, удобно свести в таблицу 4.4.

При выполнении расчетов рекомендуется задаться **произвольными** значениями магнитных индукций B_1 , B_2 и B_3 на этих участках. Для точности построения характеристик количество этих значений должно составлять порядка 15 - 20. Для удобства расчета можно принять значения магнитных индукций на этих участках B_1 и B_2 равными.

Таблица 4.4

B_1	B_2	$B_3 = B_\delta$	$\Phi_1 = B_1 S_1;$	$\Phi_2 = B_2 S_2$	$\Phi_3 = B_3 S_3$	$H_1 = H_2$	H_3	$H_\delta = B_3 / \mu_0$	$H_1 l_1$	$H_2 l_2$	$H_3 l_3$	$H_3 l_3 + H_\delta l_\delta$	$I_1 \varpi_1 - H_1 l_1$	$I_2 \varpi_2 - H_2 l_2$
Тл	Тл	Тл	Вб	Вб	Вб	А/м	А/м	А/м	А	А	А	А	А	А

Зная значения площадей участков, следует определить значения магнитных потоков Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 на этих участках.

По табличным данным кривой намагничивания $B=f(H)$ материала магнитопровода далее необходимо построить график кривой намагничивания на миллиметровой бумаге, а по ней определить напряженности магнитного поля H_1 , H_2 и H_3 .

По известным значениям напряженности магнитного поля вычислим магнитные напряжения на участках для различных потоков.

Далее по расчетным данным таблицы 4.2 построим кривые:

$$\Phi_1 = f(U_{mab}); \Phi_2 = f(U_{mab}); \Phi_3 = f(U_{mab}).$$

Окончательно, для того, чтобы решить систему уравнений следует построить еще одну вспомогательную кривую $\Phi_1 + \Phi_2 = f(U_{mab})$, так как значения магнитных потоков должны удовлетворять уравнению $\Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2$.

Для этого на графике просуммируем ординаты кривых $\Phi_1 = f(U_{mab})$ и $\Phi_2 = f(U_{mab})$ для одних и тех же значений магнитного напряжения U_{mab} .

Графическое решение поставленной задачи изображено на рисунке 4.21.

Ордината точки **О** пересечения кривых $\Phi_1 + \Phi_2 = f(U_{mab})$ и $\Phi_3 = f(U_{mab})$ определит величину потока Φ_3 , так как для этой точки справедливы следующие уравнения:

$$I_1 \varpi_1 - H_1 l_1 = I_2 \varpi_2 - H_2 l_2 = H_3 l_3 + H_\delta l_\delta = U_{mab} \text{ и } \Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2.$$

Для определения потоков Φ_1 и Φ_2 следует провести прямую через точку **О**, параллельную оси ординат, до пересечения с кривыми $\Phi_1 = f(U_{mab})$ и $\Phi_2 = f(U_{mab})$.

Окончательно, по значениям ординат полученных точек **О**₁ и **О**₂ можно определить потоки Φ_1 и Φ_2 .

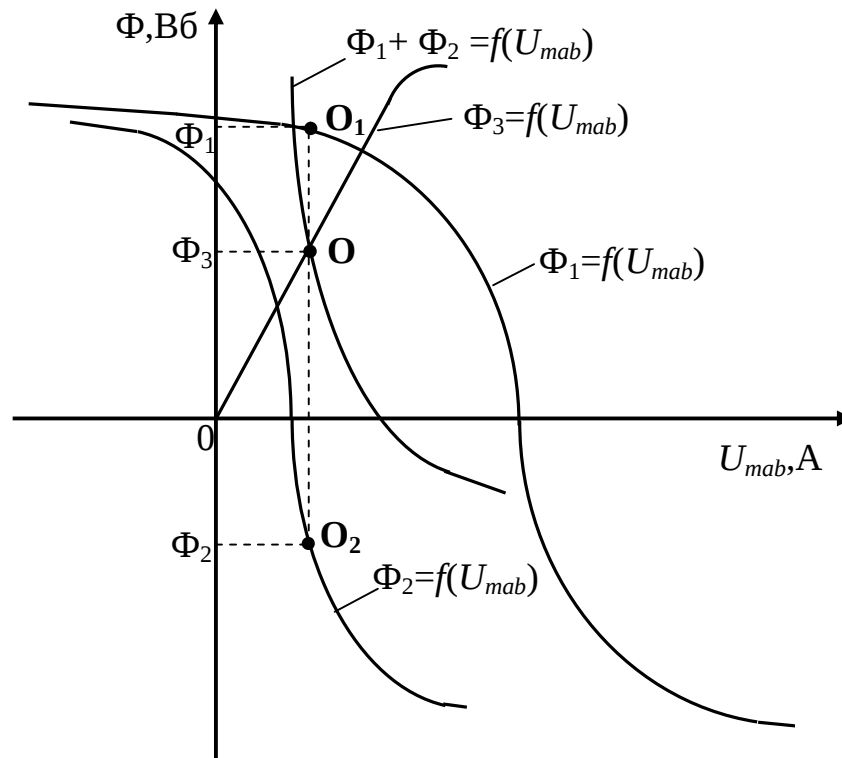


Рисунок 4.21

По известным значениям магнитного потока, числу витков обмотки и току в катушке статическая индуктивность n -й обмотки определится следующим образом

$$L_n = \frac{(\Phi_n \varpi_n)}{I_n}.$$

4.4. Контрольные вопросы

1. Какие магнитные цепи называются однородными и неоднородными?
2. В чем заключается физический смысл закона Ома для магнитной цепи.
3. Сформулируйте законы Кирхгофа для магнитной цепи.
4. Как осуществляется расчет магнитного поля с помощью закона полного тока?
5. Что такое прямая и обратная задачи расчета магнитной цепи?
6. Назовите отличие характеристик магнитномягких материалов от характеристик магнитножестких ферромагнитных материалов?
7. Как определяется величина магнитного сопротивления?

КР № 5

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

5.1. Цель работы

5.1.1. Усвоить методику расчета токов и напряжений в линейной электрической цепи, возникающих от действия источника с периодической несинусоидальной ЭДС.

5.1.2. Закрепление и углубление теоретических знаний, полученных на лекционных, практических и лабораторных занятиях при изучении данной темы.

5.2. Задание на выполнение работы

По номеру варианта, исходные данные для расчетов (номинальные значения элементов электрической цепи- $R_1, R_2, R_3, L_1, L_2, C_1$ и C_2 , а также частота основной гармоники — f) выбираются из таблицы 2.1.

Из той же таблицы 2.1 выбирается схема электрической цепи.

Варианты схем линейной электрической цепи изображены на рисунках 2.1— 2.30. В соответствии с номером варианта из таблицы 5.1 выбирается мгновенное значение напряжения, подаваемое на вход двухполюсника.

В соответствии со своим вариантом задания студенту требуется:

1. Определить:

— комплексы действующих значений токов отдельных гармоник во всех ветвях и в неразветвленной части цепи, воспользовавшись символическим методом;

— действующие значения токов во всех ветвях и в неразветвленной части цепи;

— комплексы действующих значений гармоник напряжения на **элементах** цепи;

— комплексы действующих значений гармоник напряжения на **ветвях** цепи;

— активные, реактивные и полные мощности каждого потребителя и всей цепи;

— мощность искажения.

2. Написать:

— выражения мгновенных значений гармоник токов в ветвях и неразветвленной части цепи схемы;

— выражения мгновенных значений гармоник напряжения на всех ветвях цепи.

5. Построить:

— графики мгновенных значений **всех гармонических составляющих тока** во всех ветвях и неразветвленной части цепи схемы ;

— графики мгновенных значений **токов** во всех ветвях и неразветвленной части цепи схемы;

— графики мгновенных значений **всех гармонических составляющих напряжения** на всех участках цепи;

— графики мгновенных значений **напряжений** на всех участках цепи;

— график мгновенного значения **входного напряжения**.

В пояснительной записке к расчетной работе следует привести:

— название и цель расчетной работы;

— текст задания с исходными данными для расчета электрической цепи;

— электрическую схему;

— расчеты гармонических составляющих тока во всех ветвях и неразветвленной части цепи схемы;

— расчеты токов во всех ветвях и неразветвленной части цепи схемы токов в ветвях;

— расчеты гармонических составляющих напряжения на всех **элементах** цепи;

— расчеты напряжений на всех **ветвях** цепи;

— расчеты **действующих** значений несинусоидального тока во всех ветвях и неразветвленной части цепи схемы;

— расчеты **действующих** значений напряжений на всех **ветвях** цепи;

— расчеты активных, реактивных мощностей каждого потребителя и активной, реактивной и полной мощностей всей цепи;

— расчет мощности искажения.

— графики мгновенных значений гармонических составляющих тока в ветвях и неразветвленной части цепи;

— графики мгновенных значений токов в ветвях и неразветвленной части цепи;

— графики мгновенных значений всех гармонических составляющих напряжения на всех участках цепи;

— графики мгновенных значений напряжений на всех участках цепи;

— график мгновенного значения входного напряжения.

— выводы, в которых следует отразить:

а) результаты расчетов;

б) пояснения к построенным графикам и диаграммам;

в) практические навыки, полученные в ходе выполнения работы.

Указания:

— при выполнении работы следует **однозначно** определиться с индексами рассчитываемых величин.

Таблица 5.1

Номер варианта	Мгновенное значение напряжения на входе двухполюсника
С 1-го по 5-й	$u = 10 + 23,4\sin(\omega t - 20^\circ) + 40,3\sin(\omega t + 15^\circ)$
С 6-го по 10-й	$u = 15 + 32,5\sin(\omega t - 45^\circ) + 10,4\sin(\omega t + 10^\circ)$
С 11-го по 15-й	$u = 20 + 15,6\sin(\omega t - 54^\circ) + 20,8\sin(\omega t + 15^\circ)$
С 16-го по 20-й	$u = 10 - 43,4\sin(\omega t - 20^\circ) + 20,2\sin(\omega t - 45^\circ)$
С 21-го по 25-й	$u = 8 + 13,6\sin(\omega t + 17^\circ) + 51,2\sin(\omega t - 15^\circ)$
С 26-го по 30-й	$u = 12 + 27,8\sin(\omega t - 20^\circ) - 10\sin(\omega t - 5^\circ)$
С 31-го по 35-й	$u = 16 + 18,2\sin(\omega t - 1^\circ) - 2,25\sin(3\omega t + 1^\circ)$
С 36-го по 40-й	$u = 25 - 48,5\sin(\omega t - 32^\circ) - 22,5\sin(\omega t + 45^\circ)$
С 41-го по 45-й	$u = 10 + 23,4\sin(\omega t - 24^\circ) + 40,5\sin(\omega t + 12^\circ)$
С 46-го по 50-й	$u = 14 + 9,3\cos(2\omega t - 0,5^\circ) - 1,9\cos(4\omega t + 1,5^\circ)$
С 51-го по 55-й	$u = 15 + 73,4\sin(\omega t + 20^\circ) + 35,3\sin(\omega t + 18^\circ)$
С 56-го по 60-й	$u = 31 + 84,5\cos(\omega t + 54^\circ) + 41,7\cos(\omega t + 19^\circ)$
С 61-го по 65-й	$u = 4 - 33,4\cos(\omega t - 35^\circ) - 11,3\cos(\omega t - 12^\circ)$
С 66-го по 70-й	$u = 40 + 10,1\cos(3\omega t + 0,5^\circ) - 2,3\cos(6\omega t + 0,8^\circ)$
С 71-го по 75-й	$u = 50 + 160,2\cos(\omega t - 24^\circ) + 41,3\cos(\omega t + 17^\circ)$
С 76-го по 80-й	$u = 36 + 180,2\sin(\omega t - 0,4^\circ) + 60,1\sin(3\omega t - 1,6^\circ)$
С 81-го по 85-й	$u = 46 + 153,2\sin(\omega t + 23^\circ) + 100,4\sin(\omega t + 58^\circ)$
С 86-го по 90-й	$u = 30 + 190,1\sin(\omega t + 70^\circ) + 70,3\sin(\omega t + 45^\circ)$
С 91-го по 95-й	$u = 40 - 200,2\sin(\omega t - 74^\circ) - 44,1\sin(\omega t - 84^\circ)$
С 96-го по 100-й	$u = 22 + 89,5\sin(\omega t - 12^\circ) + 20,3\sin(\omega t + 36^\circ)$

5.3. Методические указания по выполнению КР №5

5.3.1. Порядок выполнения расчета электрической цепи

Расчет токов и напряжений, возникающих от действия периодической несинусоидальной ЭДС, осуществляется с использованием метода наложения (суперпозиции).

Согласно этому принципу мгновенное значение тока любой ветви схемы равно сумме мгновенных значений токов отдельных гармоник. Аналогично, мгновенное значение напряжения на любом участке схемы равно сумме мгновенных значений напряжений отдельных гармоник на этом участке.

Этот расчет производят для каждой из гармоник **в отдельности** следующим образом [2]:

а) рассчитывают токи и напряжения от действия постоянной составляющей источника ЭДС (если она есть);

б) рассчитывают токи и напряжения от действия **первой** гармонической составляющей источника ЭДС (если она есть), затем **второй** гармонической составляющей источника ЭДС (если она есть), от третьей и т.д.;

в) для определения тока в любой ветви схемы суммируют постоянную составляющую тока (если она есть) и мгновенные значения токов отдельных гармоник в этой ветви;

г) для определения мгновенного значения напряжения на отдельном участке суммируют значение постоянного напряжения на этом участке (если оно есть) с мгновенными значениями напряжений отдельных гармоник на этом участке;

д) действующее значение несинусоидального тока определяют по формуле

$$I = \sqrt{I_{(0)}^2 + I_{(1)}^2 + I_{(2)}^2 + \dots},$$

где $I_{(0)}$; $I_{(1)}$; $I_{(2)}$ — действующие значения постоянной составляющей, первой и второй гармоник несинусоидального тока соответственно, а действующее значение несинусоидального напряжения определяют по выражению:

$$U = \sqrt{U_{(0)}^2 + U_{(1)}^2 + U_{(2)}^2 + \dots},$$

где $U_{(0)}$; $U_{(1)}$; $U_{(2)}$ — действующие значения постоянной составляющей, первой и второй гармоник несинусоидального тока соответственно;

е) активные и реактивные мощности для каждой гармоники находят **отдельно** по выражениям соответственно:

$$P_{(k)} = U_{(k)} I_{(k)} \cos \varphi_{(k)};$$

$$Q_{(k)} = U_{(k)} I_{(k)} \sin \varphi_{(k)},$$

где k — номер гармоники;

ж) определяют полную мощность всей цепи по формуле

$$S = UI;$$

з) находят мощность искажения, характеризующую степень искажения кривой тока по сравнению с кривой напряжения:

$$T = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)},$$

где активная и реактивная мощности от действия всех гармоник определяются соответственно как

$$P = P_{(0)} + P_{(1)} + P_{(2)} + \dots, Q = Q_{(0)} + Q_{(1)} + Q_{(2)} + \dots$$

При проведении расчетов следует иметь ввиду следующее:

а) падение напряжения на индуктивности от постоянного тока равно нулю, а постоянный ток через конденсатор не проходит;

б) индуктивное сопротивление растет прямо пропорционально частоте, а емкостное сопротивление с ростом частоты уменьшается.

5.3.2. Пример расчета электрической цепи

Рассмотрим на конкретном примере порядок выполнения расчета электрической цепи, схема которой изображена на рисунке 5.1.

Пусть источник напряжения, подключенный к рассчитываемой цепи, содержит только **первую** и **третью** гармоники и имеет следующий вид

$$u = U_{m(1)} \sin(\omega t - \varphi_1) + U_{m(3)} \sin(3\omega t - \varphi_2).$$

Так как реактивные параметры цепи зависят от частоты, сделаем сразу расчет комплексных сопротивлений элементов, входящих в рассматриваемую цепь.

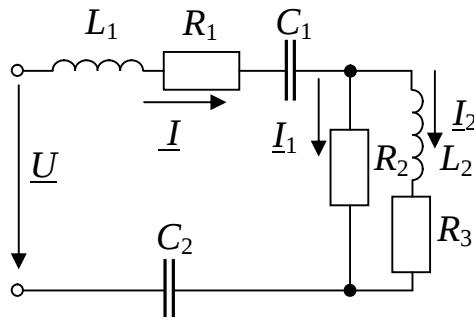


Рисунок 5.1

5.3.2.1. Определение комплексных сопротивлений ветвей электрической цепи

Для выполнения этого пункта расчетов вначале находим реактивные сопротивления для первой гармоники:

$$x_{C1(1)} = \frac{1}{\omega C_1}; x_{C2(1)} = \frac{1}{\omega C_2}; x_{L1(1)} = \omega L_1; x_{L2(1)} = \omega L_2,$$

а затем третьей гармоники

$$x_{C1(3)} = \frac{1}{3\omega C_1}; x_{C2(3)} = \frac{1}{3\omega C_2}; x_{L1(3)} = 3\omega L_1; x_{L2(3)} = 3\omega L_2,$$

Найдем вначале комплексные сопротивления ветвей электрической цепи для **первой** гармоники.

Для ветви, содержащей R_1, L_1, C_1 , комплексное сопротивление определится как

$$\underline{Z}_{1(1)} = R_1 + j(x_{L1(1)} - x_{C1(1)}).$$

Комплексное сопротивление ветви, содержащей параллельное соединение сопротивлений $\underline{Z}_{2(1)} = R_2$ и $\underline{Z}_{3(1)} = R_3 + jx_{L2(1)}$, найдется как

$$\underline{Z}_{(2-3)(1)} = \frac{\underline{Z}_{2(1)} \underline{Z}_{3(1)}}{\underline{Z}_{2(1)} + \underline{Z}_{3(1)}}.$$

С учетом комплексного сопротивления емкости C_2 - $\underline{Z}_{4(1)} = -jx_{C2(1)}$ комплексное сопротивление всей цепи определится как

$$\underline{Z}_{общ.(1)} = \underline{Z}_{1(1)} + \underline{Z}_{(2-3)(1)} + \underline{Z}_{4(1)}.$$

Далее определим комплексные сопротивления ветвей электрической цепи для **третьей** гармоники.

Для ветви, содержащей R_1, L_1, C_1 , комплексное сопротивление определяется как

$$\underline{Z}_{1(3)} = R_1 + j(x_{L1(3)} - x_{C1(3)}).$$

Комплексное сопротивление ветви, содержащей параллельное соединение сопротивлений $\underline{Z}_{2(3)} = R_2$ и $\underline{Z}_{3(3)} = R_3 + jx_{L2(3)}$, найдется как

$$\underline{Z}_{(2-3)(3)} = \frac{\underline{Z}_{2(3)} \underline{Z}_{3(3)}}{\underline{Z}_{2(3)} + \underline{Z}_{3(3)}}.$$

С учетом комплексного сопротивления емкости C_2 - $\underline{Z}_{4(3)} = -jx_{C2(3)}$ комплексное сопротивление всей цепи определится как

$$\underline{Z}_{\text{общ.}(3)} = \underline{Z}_{1(3)} + \underline{Z}_{(2-3)(3)} + \underline{Z}_{4(3)}.$$

Зная комплексные сопротивления ветвей цепи при различных гармониках можно найти действующие значения токов в ветвях схемы и в неразветвленной части цепи.

5.3.2.2 Определение комплексных значений токов в ветвях и неразветвленной части цепи схемы

Вначале определим действующее значение тока в неразветвленной части ветви схемы при воздействии **первой** гармоники напряжения на цепь схемы

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{(U_{m(1)} e^{-j\varphi_1} / \sqrt{2})}{\underline{Z}_{\text{общ.}(1)}}.$$

Вычислив напряжение $\underline{U}_{(2-3)(1)}$ на участке ветви, содержащей параллельное соединение $\underline{Z}_{2(1)}$ и $\underline{Z}_{3(1)}$, как

$$\underline{U}_{\underline{Z}_{(2-3)(1)}} = \underline{I}_{(1)} \underline{Z}_{(2-3)(1)},$$

можно определить токи в ветвях

$$\underline{I}_{1(1)} = \frac{\underline{U}_{\underline{Z}_{(2-3)(1)}}}{\underline{Z}_{2(1)}}; \underline{I}_{2(1)} = \frac{\underline{U}_{\underline{Z}_{(2-3)(1)}}}{\underline{Z}_{3(1)}}.$$

Далее найдем действующее значение тока в неразветвленной части ветви схемы при воздействии **третьей** гармоники напряжения на цепь схемы

$$\underline{I}_{(3)} = \frac{(U_{m(3)} e^{-j\varphi_2} / \sqrt{2})}{\underline{Z}_{\text{общ.}(3)}}.$$

Вычислив напряжение $\underline{U}_{(2-3)(3)}$ на участке ветви, содержащей параллельное соединение $\underline{Z}_{2(1)}$ и $\underline{Z}_{3(1)}$, как

$$\underline{U}_{\underline{Z}_{(2-3)(3)}} = \underline{I}_{(3)} \underline{Z}_{(2-3)(3)},$$

можно определить токи в ветвях

$$\underline{I}_{1(3)} = \frac{\underline{U}_{Z(2-3)(3)}}{\underline{Z}_{2(3)}}; \underline{I}_{2(3)} = \frac{\underline{U}_{Z(2-3)(3)}}{\underline{Z}_{3(3)}}$$

и в неразветвленной части цепи.

5.3.2.3. Определение комплексных значений напряжений на участках цепи схемы

Комплексные значения напряжения на участках цепи, содержащей R_1 , L_1 , C_1 , C_2 при протекании **первой** гармоники тока по этой ветви найдем соответственно как

$$\begin{aligned}\underline{U}_{R1(1)} &= \underline{I}_{(1)} R_1; \\ \underline{U}_{L1(1)} &= j \underline{I}_{(1)} x_{L1(1)}; \\ \underline{U}_{C1(1)} &= -j \underline{I}_{(1)} x_{C1(1)}; \\ \underline{U}_{C2(1)} &= -j \underline{I}_{(1)} x_{C2(1)}.\end{aligned}$$

Комплексные значения напряжения на участках цепи, содержащей R_1 , L_1 , C_1 , C_2 при протекании **третьей** гармоники тока по этой ветви найдем соответственно как

$$\begin{aligned}\underline{U}_{R1(3)} &= \underline{I}_{(3)} R_1; \underline{U}_{L1(3)} = j \underline{I}_{(3)} x_{L1(3)}; \underline{U}_{C1(3)} = -j \underline{I}_{(3)} x_{C1(3)}; \\ \underline{U}_{C2(3)} &= -j \underline{I}_{(3)} x_{C2(3)}.\end{aligned}$$

Для построения графиков мгновенных значений токов и напряжений участков цепи необходимо рассчитать комплексы действующих значений напряжений на ветвях электрической цепи при воздействии каждой из гармоник, то есть

$$\underline{U}_{Z1(1)} = \underline{I}_{(1)} \underline{Z}_{Z1(1)}; \underline{U}_{Z1(3)} = \underline{I}_{(3)} \underline{Z}_{Z1(3)}; \underline{U}_{Z4(1)} = \underline{I}_{(1)} \underline{Z}_{Z1(4)}; \underline{U}_{Z4(3)} = \underline{I}_{(3)} \underline{Z}_{Z4(3)}.$$

5.3.2.4. Определение действующих значений токов в ветвях и неразветвленной части цепи схемы и действующего значения напряжения на входе схемы

Действующие значения тока в неразветвленной части цепи и напряжения, подаваемого на вход схемы, определим по следующим выражениям соответственно:

$$I = \sqrt{(I_{(1)}^2 + I_{(3)}^2)}; U = \sqrt{(U_{(1)}^2 + U_{(3)}^2)},$$

$$\text{где } U_{(1)} = \frac{U_{m(1)}}{\sqrt{2}}, \text{ а } U_{(3)} = \frac{U_{m(3)}}{\sqrt{2}}.$$

Зная эти значения можно определить полную мощность цепи

$$S = UI.$$

Действующие значения тока в ветвях можно определить по аналогии по следующим выражениям

$$I_1 = \sqrt{(I_{1(1)}^2 + I_{1(3)}^2)}; I_2 = \sqrt{(I_{2(1)}^2 + I_{2(3)}^2)},$$

а действующие значения напряжений на ветвях цепи по формулам

$$U_{\underline{Z}1} = \sqrt{(U_{\underline{Z}1(1)}^2 + U_{\underline{Z}1(3)}^2)}; U_{\underline{Z}4(1)} = \sqrt{(U_{\underline{Z}4(1)}^2 + U_{\underline{Z}4(3)}^2)};$$

$$U_{\underline{Z}(2-3)} = \sqrt{(U_{\underline{Z}(2-3)(1)}^2 + U_{\underline{Z}(2-3)(3)}^2)}.$$

5.3.2.5. Определение активной и реактивной мощностей от действия всех гармоник входного напряжения

Вначале определим мощности потребителей при воздействии гармонических составляющих входного напряжения

$$Q_{C1(1)} = I_{(1)}^2 x_{c1}; Q_{C2(1)} = I_{(1)}^2 x_{c2}; Q_{L1(1)} = I_{(1)}^2 x_{L1}; Q_{L2(1)} = I_{2(1)}^2 x_{L2};$$

$$Q_{C1(3)} = I_{(3)}^2 x_{c1}; Q_{C2(3)} = I_{(3)}^2 x_{c2}; Q_{L1(3)} = I_{(3)}^2 x_{L1}; Q_{L2(3)} = I_{2(3)}^2 x_{L2};$$

$$P_{R1(1)} = I_{(1)}^2 R_1; P_{R1(3)} = I_{(3)}^2 R_1; P_{R2(1)} = I_{1(1)}^2 R_2; P_{R2(3)} = I_{1(3)}^2 R_2; P_{R3(1)} = I_{2(1)}^2 R_3;$$

$$P_{R3(3)} = I_{2(3)}^2 R_3.$$

Затем определим мощности потребителей при суммарном воздействии всех гармонических составляющих

$$Q_{C1} = Q_{C1(1)} + Q_{C1(3)}; Q_{C2} = Q_{C2(1)} + Q_{C2(3)};$$

$$Q_{L1} = Q_{L1(1)} + Q_{L1(3)}; Q_{L2} = Q_{L2(1)} + Q_{L2(3)};$$

$$P_{R1} = P_{R1(1)} + P_{R1(3)}; P_{R2} = P_{R2(1)} + P_{R2(3)}; P_{R3} = P_{R3(1)} + P_{R3(3)}.$$

5.3.2.6. Определение активной и реактивной мощностей цепи

Для определения активной мощности цепи суммируем активные мощности всех активных элементов

$$P = P_{R1} + P_{R2} + P_{R3}.$$

Для определения реактивной мощности цепи суммируем реактивные мощности всех реактивных элементов

$$Q = Q_{L1} + Q_{L2} - Q_{C1} - Q_{C2}.$$

5.3.2.7. Определение “мощности искажений”

Определив активную и реактивную мощности можно определить “мощность искажения”

$$T = \sqrt{(S^2 - (P^2 + Q^2))}.$$

5.3.2.8. Построение векторных диаграмм токов и напряжений для всех гармоник

Если необходимо построить векторные диаграммы токов и напряжений на участках схемы, то они строятся для каждой гармоники отдельно.

Внимание! При построении векторных диаграмм складывать токи и напряжения разных частот на комплексной плоскости недопустимо, поскольку угловые скорости вращения векторов разных частот неодинаковы!

5.3.2.9. Запись выражений мгновенных значений токов в ветвях и в неразветвлённой части цепи схемы

Перед записью мгновенных значений токов и напряжений, необходимо вначале перевести комплексы **действующих** значений в комплексы **амплитудных** значений указанных величин умножением на $\sqrt{2}$. Переведем значения гармоник этих токов в ветвях из записи в комплексном виде в тригонометрическую форму

$$\begin{aligned} i_{(1)} &= I_{m(1)} \sin(\omega t + \varphi_{i(1)}); i_{(3)} = I_{m(3)} \sin(3\omega t + \varphi_{i(3)}) \\ i_{1(1)} &= I_{m1(1)} \sin(\omega t + \varphi_{i1(1)}); i_{1(3)} = I_{m1(3)} \sin(3\omega t + \varphi_{i1(3)}); i_{2(1)} = I_{m2(1)} \sin(\omega t + \varphi_{i2(1)}); \\ i_{2(3)} &= I_{m2(3)} \sin(3\omega t + \varphi_{i2(3)}). \end{aligned}$$

Такие же операции проводятся и с напряжениями на ветвях цепи

$$\begin{aligned} u_{\underline{Z}1(1)} &= U_{m\underline{Z}1(1)} \sin(\omega t + \varphi_{u\underline{Z}1(1)}); u_{\underline{Z}1(3)} = U_{m\underline{Z}1(3)} \sin(\omega t + \varphi_{u\underline{Z}1(3)}); \\ u_{\underline{Z}4(1)} &= U_{m\underline{Z}4(1)} \sin(\omega t + \varphi_{u\underline{Z}4(1)}); u_{\underline{Z}4(3)} = U_{m\underline{Z}4(3)} \sin(\omega t + \varphi_{u\underline{Z}4(3)}); \\ u_{\underline{Z}(2-3)(1)} &= U_{m\underline{Z}(2-3)(1)} \sin(\omega t + \varphi_{u\underline{Z}(2-3)(1)}); \\ u_{\underline{Z}(2-3)(3)} &= U_{m\underline{Z}(2-3)(3)} \sin(\omega t + \varphi_{u\underline{Z}(2-3)(3)}). \end{aligned}$$

Для построения графиков мгновенных значений токов в ветвях сложим гармоники токов в этих ветвях, пользуясь методом наложения

$$\begin{aligned} i &= I_{m(1)} \sin(\omega t + \varphi_{i(1)}) + I_{m(3)} \sin(3\omega t + \varphi_{i(3)}); \\ i_1 &= I_{m1(1)} \sin(\omega t + \varphi_{i1(1)}) + I_{m1(3)} \sin(3\omega t + \varphi_{i1(3)}); \\ i_2 &= I_{m2(1)} \sin(\omega t + \varphi_{i2(1)}) + I_{m2(3)} \sin(3\omega t + \varphi_{i2(3)}). \end{aligned}$$

По аналогии такие же операции проведем и с напряжениями на ветвях цепи

$$u_{\underline{Z}_1} = U_{m\underline{Z}_1(1)} \sin(\omega t + \varphi_{u\underline{Z}_1(1)}) + U_{m\underline{Z}_1(3)} \sin(\omega t + \varphi_{u\underline{Z}_1(3)});$$

$$u_{\underline{Z}_4} = U_{m\underline{Z}_4(1)} \sin(\omega t + \varphi_{u\underline{Z}_4(1)}) + U_{m\underline{Z}_4(3)} \sin(\omega t + \varphi_{u\underline{Z}_4(3)});$$

$$u_{\underline{Z}(2-3)} = U_{m\underline{Z}(2-3)(1)} \sin(\omega t + \varphi_{u\underline{Z}(2-3)(1)}) + U_{m\underline{Z}(2-3)(3)} \sin(\omega t + \varphi_{u\underline{Z}(2-3)(3)}).$$

5.3.2.10. Построение графика мгновенного значения входного напряжения

При **выбранной нулевой начальной фазе приложенного напряжения** на первом графике изображена кривая напряжения u (рисунок 5.2).

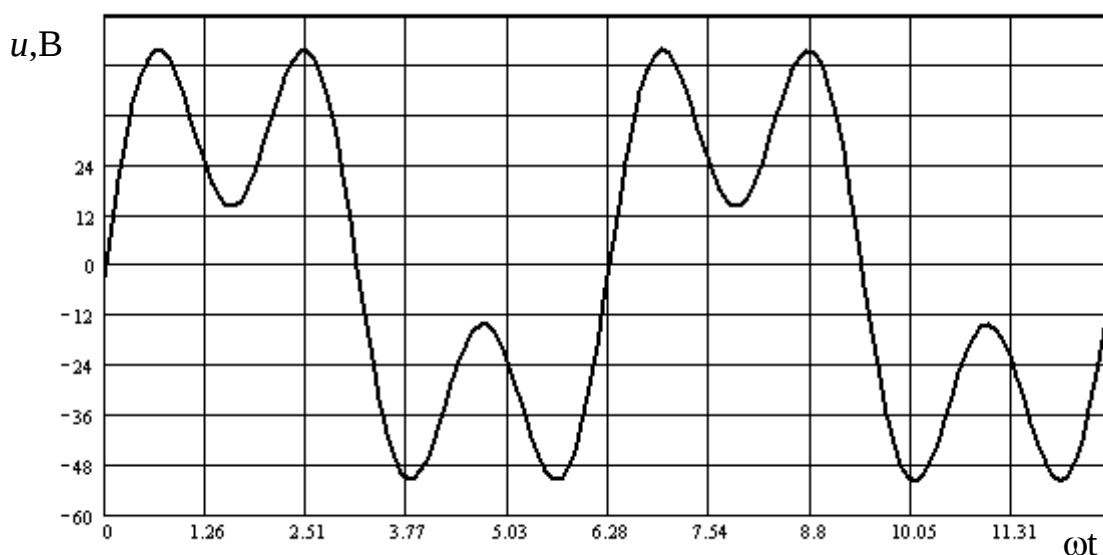


Рисунок 5.2

5.3.2.11. Построение графиков мгновенных значений токов в ветвях схемы и напряжений на ветвях цепи схемы

Кривые первой гармоники напряжения ($u_{\underline{Z}_1(1)}$), третьей гармоники напряжения ($u_{\underline{Z}_1(3)}$) и суммарного напряжения ($u_{\underline{Z}_1}$) на сопротивлении $\underline{Z}_1$ изображены на рисунок 5.3. На рисунке 5.4 изображены кривые первой гармоники напряжения ($u_{\underline{Z}_2(1)}$), третьей гармоники напряжения ($u_{\underline{Z}_2(3)}$) и суммарного напряжения ($u_{\underline{Z}_2}$) на сопротивлении $\underline{Z}_2$, а на рисунке 5.5 изображены кривые первой гармоники напряжения ($u_{\underline{Z}_4(1)}$), третьей гармоники напряжения ($u_{\underline{Z}_4(3)}$) и суммарного напряжения ($u_{\underline{Z}_4}$) на сопротивлении $\underline{Z}_4$.

На рисунке 5.6 изображены кривые первой гармоники тока ($i_{(1)}$), третьей гармоники тока ($i_{(3)}$) и суммарного тока (i) в неразветвленной части цепи схемы.

Кривые первой гармоники тока ($i_{1(1)}$), третьей гармоники тока ($i_{1(3)}$) и

суммарного тока (i_1) в ветви с сопротивлением Z_2 изображены на рисунке 5.7.

Кривые первой гармоники тока ($i_{2(1)}$), третьей гармоники тока ($i_{2(3)}$) и суммарного тока (i_2) в ветви с сопротивлением Z_3 изображены на рисунке 5.8.

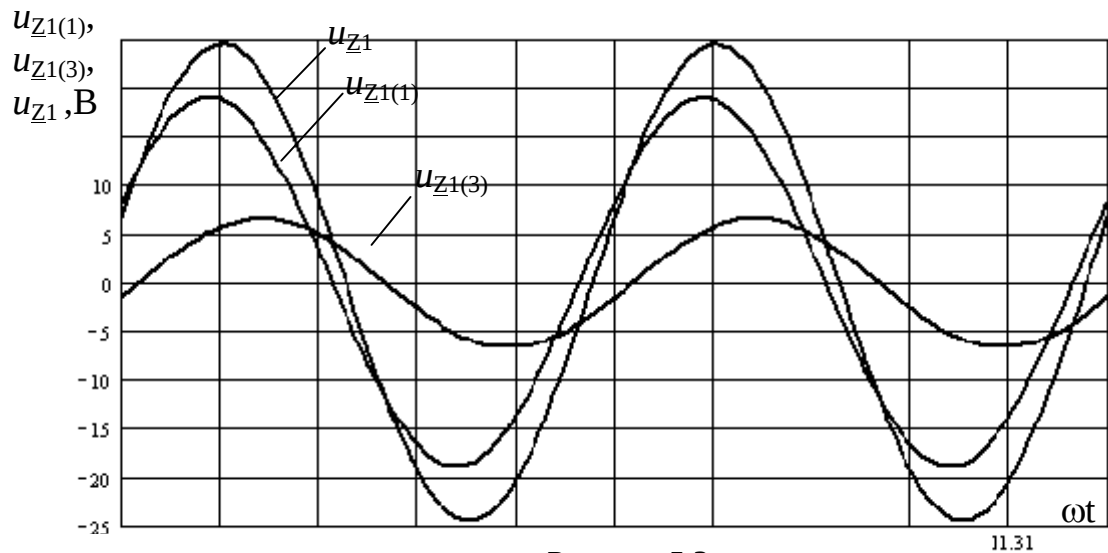


Рисунок 5.3

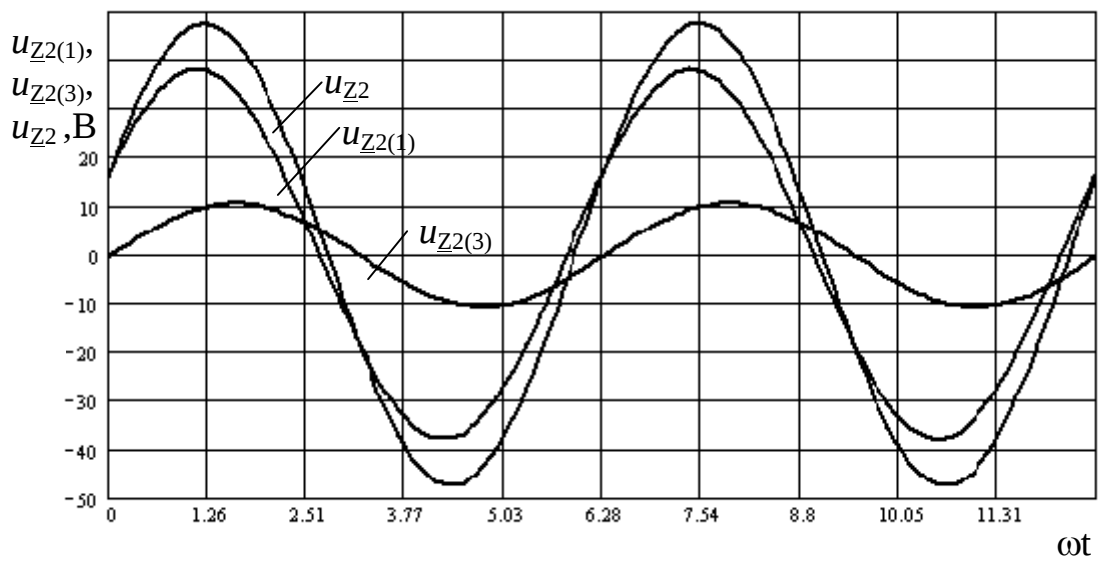


Рисунок 5.4

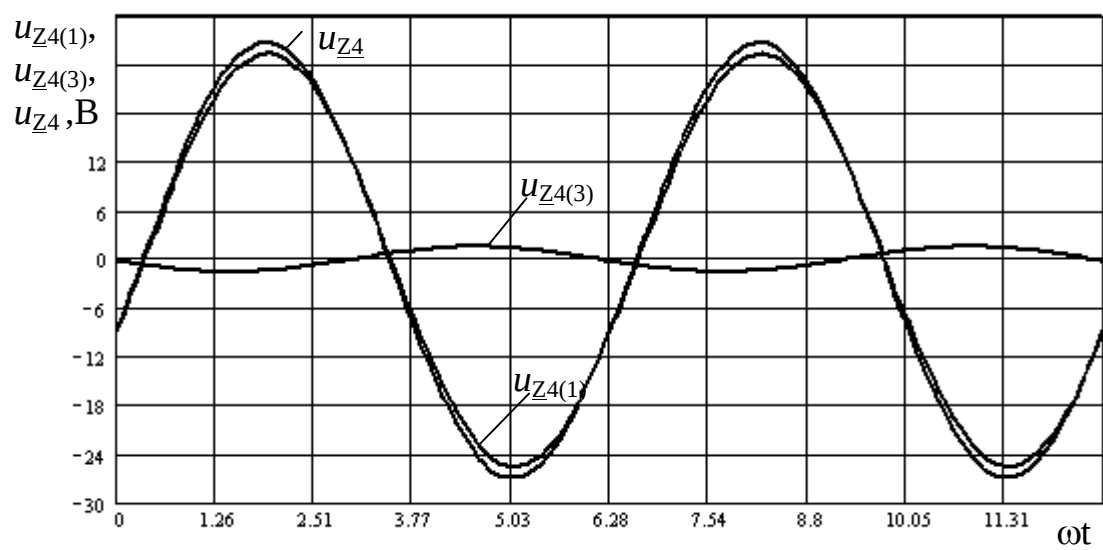


Рисунок 5.5

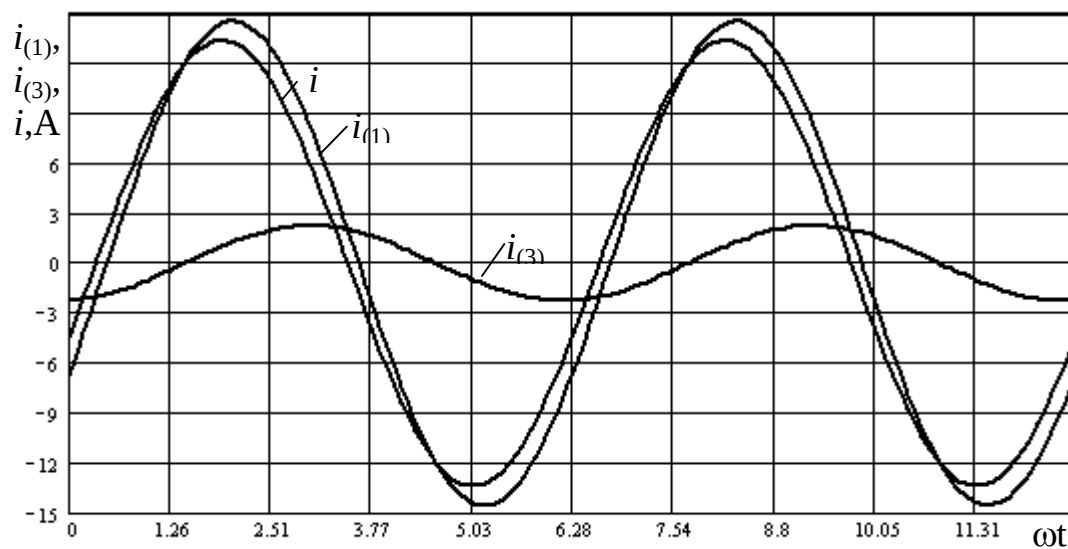


Рисунок 5.6

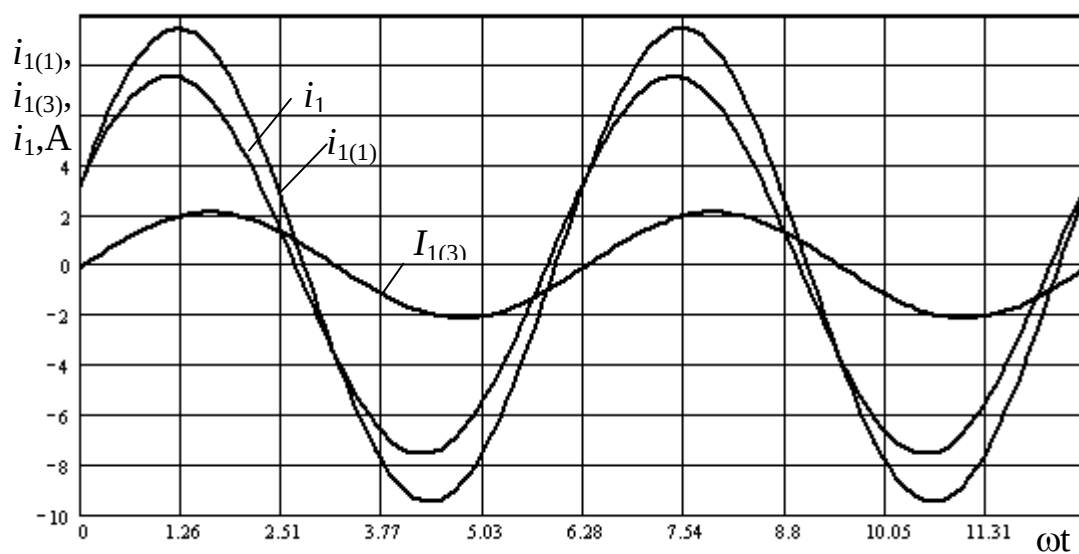


Рисунок 5.7

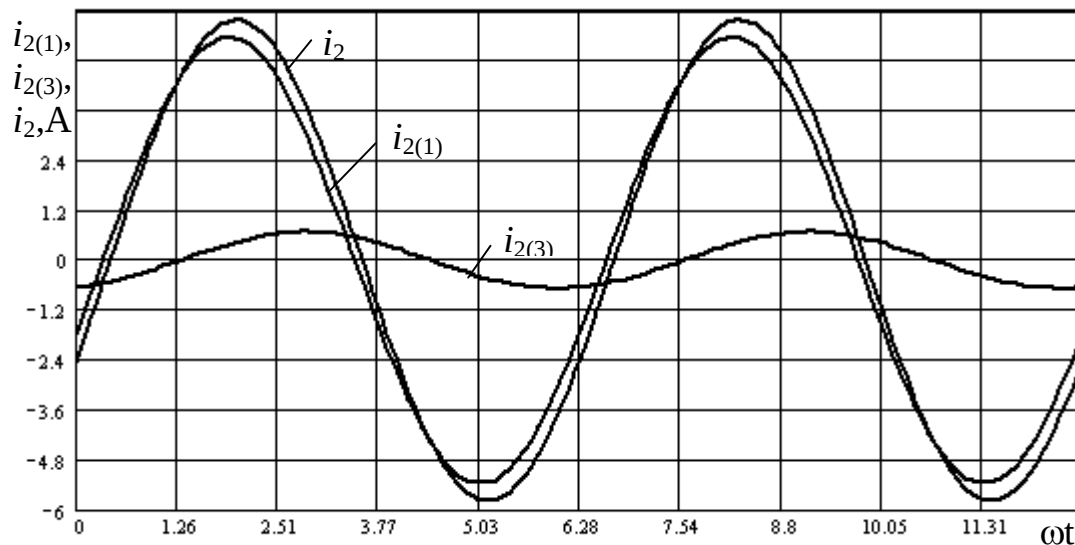


Рисунок 5.8

5.4. Контрольные вопросы

1. В каких случаях в электрической цепи возникают периодические несинусоидальные токи и напряжения?
2. Как разложить в ряд Фурье несинусоидальную кривую?
3. В каком порядке ведется расчет электрических цепей с несинусоидальными токами и напряжениями?
4. Как определяются действующие значения несинусоидальных токов и напряжений?
5. Как влияют полосовой, резонансный, заградительный и сглаживающий фильтры на гармоники тока?
6. Как изменяются с ростом частоты напряжения, подаваемого на цепь, реактивные сопротивления емкости и индуктивности этой цепи?
8. Как определяется “мощность искажений” в электрической цепи с несинусоидальными токами и напряжениями?

ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник для бакалавров техн. вузов по направлениям: "Электротехника", "Электротехнологии", "Электромеханика", "Электроэнергетика", "Приборостроение" / Л.А. Бессонов. - 11-е изд. - М.: Юрайт, 2012. - 317 с.
2. Касаткин А.С. Электротехника: учебник / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. - 9-е изд., стереотип. - М.: Академия, 2005. - 539 с.
3. Евдокимов Ф.Е. Общая электротехника / Ф.Е. Евдокимов. – М.: Высш. шк., 2004. – 367 с.
4. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника: учеб. пособие / М. А. Жаворонков, А.В. Кузин. — 4-е изд., испр. — М.: Академия, 2011. — 394 с.
5. Матвеев Ю. В. Метрология и электрические измерения: учеб. пособие / Ю.В. Матвеев. — Севастополь: СевНТУ, 2014. — 232 с.
6. Подкин Ю.Г. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х т. / Ю.Г. Подкин, Т.Г. Чикуров, Ю.В. Данилов. — М.: Академия. — Т. 1: Электротехника / Т.Г. Чикуров, Ю.В. Данилов. — 2011. — 399 с.

Учебное издание

Матвеев Юрий Валентинович

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

*Учебно-методическое пособие
к выполнению контрольных работ*

В авторской редакции

Изд. № 122/18. Объем 6,25 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»