

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электротехники

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

*Контрольные задания и методические указания
для студентов-заочников специальности 1-74 06 05
«Энергетическое обеспечение сельского хозяйства»*

**МИНСК
2008**

УДК 621.3.01(07)
ББК 31.2я7
Т 33

Контрольные задания и методические указания для студентов-заочников специальности 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства» по дисциплине «Теоретические основы электротехники» рассмотрены на заседании методической комиссии агроэнергетического факультета и рекомендованы к изданию на ротапринте БГАТУ.

Протокол № 6 от 13 февраля 2008 г.

Составители: к.т.н., доцент Крутов Анатолий Викторович,
к.т.н., доцент Корко Виктор Станиславович,
к.т.н., доцент Кочетова Эмма Леонидовна,
ст. преподаватель Гузанова Татьяна Федоровна.

УДК 621.3.01 (07)
ББК 31.2я7

© Крутов А. В., Корко В. С., Кочетова Э. Л.
и др. и составление, 2008
© БГАТУ, 2008

Общие методические указания и
требования к оформлению контрольных заданий

В соответствии с учебным планом дисциплина “Теоретические основы электротехники” изучается на II и III курсах заочного факультета.

Полная программа курса ТОЭ приведена в разделе 6 настоящего пособия. Примерное распределение времени по темам на лекции и лабораторно-практические занятия в период сессий представлено таблице 1.

1. Структура курса

№ темы	Наименование темы	Лекций час	Практич. час	Лабор. час	Количество контр. заданий
1.	Линейные электрические цепи постоянного тока	6	6	2	1
2.	Однофазные цепи синусоидального тока	4	4	2	1
3.	Мощности, резонансные явления, индуктивно-связанные цепи, четырехполюсники	4	2	2	-
4.	Трехфазные цепи	4	2	4	1
5.	Линейные цепи с периодическими несинусоидальными напряжениями и токами	2	-	-	0,5
6.	Переходные процессы в электрических цепях	2	2	2	1
7.	Нелинейные электрические цепи постоянного и переменного тока	4	2	4	0,5
8.	Магнитные цепи постоянного тока	2	2	-	-
9.	Электромагнитное поле	2	2	2	-
	Итого	30	22	18	5

Сроки выдачи контрольных заданий приведены в табл. 2.

Номер варианта задания определяется двумя последними цифрами шифра зачетной книжки студента.

2. Сроки выдачи и сдачи заданий

Задания	Курс, сессия	
	Срок выдачи	Срок защиты
1	II курс, 1 сессия	II курс, 2 сессия
2	II курс, 1 сессия	II курс, 2 сессия
3	II курс, 2 сессия	III курс, 1 сессия
4	III курс, 1 сессия	III курс, 2 сессия
5	II курс, 2 сессия	III курс, 1 сессия

В соответствии со сроками защиты контрольные задания должны быть представлены на проверку до начала соответствующих сессий.

К выполнению контрольных заданий следует приступать только после изучения теоретического материала по соответствующим разделам, изложенным в учебниках.

В настоящем пособии даны краткие методические указания и примеры решения аналогичных задач.

К представленным на проверку контрольным заданиям предъявляются следующие требования:

- основные положения решения должны иметь достаточно подробные пояснения;

- при необходимых преобразованиях следует вычерчивать все промежуточные схемы электрических цепей;

- текст, формулы и все числовые выкладки должны быть написаны чернилами четко и аккуратно. В тетради следует оставлять поля, шириной не менее 3 см для замечаний рецензента. Обозначения в схемах и по ходу изложения должны соответствовать ГОСТам (см. приложение 3), а все величины - выражаться в единицах СИ. Схемы, векторные диаграммы и графики должны вычерчиваться с помощью чертежных принадлежностей;

- при решении задачи разными методами все напряжения и токи должны сохранять свои буквенные обозначения и направления. Расчеты проводить до 3-й значащей цифры;

- в конце работы следует указать использованную литературу, расписаться, поставить дату.

Если работа не допущена к защите, то студент выполняет все исправления в конце той же тетради после подписи рецензента под заголовком «Исправление ошибок», добавляя нужное число листов. Какие-либо исправления в тексте, уже проверенном рецензентом, не допускаются.

1. ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Контрольное задание 1

Первое задание состоит из двух задач: первая – по расчету электрической цепи с одним источником энергии и смешанным соединением приемников; вторая – по расчету разветвленной электрической цепи с несколькими ЭДС.

Задача 1.1. Для электрической схемы (рис. 1.1... 1.20), соответствующей номеру варианта, выполнить следующее:

1. Рассчитать токи в ветвях цепи, используя метод преобразования электрических схем.

2. Составить баланс мощностей, вычислив мощность источника и суммарную мощность приемников.

Величины ЭДС и сопротивлений даны в таблице 1.1.

1.1. Варианты и исходные данные задачи 1.1

Вариант	Рисунок	E	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
		В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.1	750	20	400	30	40	180	36
2	1.2	100	14	15	4	12	36	18
3	1.3	180	4	100	5	30	20	40
4	1.4	240	20	15	25	16	72	36
5	1.5	330	5	300	18	90	50	60
6	1.6	850	5	240	480	10	200	600
7	1.7	350	10	100	30	40	100	400
8	1.8	640	4	100	180	360	40	120
9	1.9	550	10	100	150	200	150	75
10	1.10	120	5	15	60	22	12	24
11	1.11	330	10	60	120	100	40	110
12	1.12	320	15	100	300	240	80	10
13	1.13	100	3	5	12	12	24	30
14	1.14	600	240	480	200	150	25	50
15	1.15	120	12	20	4	15	5	30
16	1.16	600	200	600	50	250	40	20
17	1.17	120	12	24	20	30	60	30
18	1.18	300	120	60	40	55	65	40
19	1.19	140	80	20	30	8	7	5
20	1.20	480	18	12	300	30	20	10

Продолжение таблицы 1.1

Вариант	Рисунок	E	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
		В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
21	1.1	450	5	200	9	20	30	70
22	1.2	500	20	75	10	80	400	100
23	1.3	80	2	15	2,5	10	14	16
24	1.4	600	10	20	30	25	150	75
25	1.5	300	9	30	10	70	110	90
26	1.6	400	19	140	60	12	40	120
27	1.7	250	5	25	20	50	50	75
28	1.8	420	20	300	36	72	90	60
29	1.9	470	4	140	60	120	400	100
30	1.10	100	1	3	5	14	10	15
31	1.11	240	12	80	20	36	3	15
32	1.12	220	18	200	50	140	60	10
33	1.13	240	7	8	7,5	15	75	60
34	1.14	240	48	96	120	400	40	60
35	1.15	200	10	15	25	110	50	40
36	1.16	400	50	200	180	60	60	20
37	1.17	150	10	15	20	5	60	120
38	1.18	750	60	300	200	80	100	90
39	1.19	520	40	120	200	50	80	70
40	1.20	210	6	9	60	8	12	10
41	1.1	700	10	150	10	15	100	300
42	1.2	120	8	18	20	48	40	60
43	1.3	650	5	150	50	60	200	100
44	1.4	300	6	25	35	10	40	120
45	1.5	140	5	120	10	40	35	50
46	1.6	500	10	240	120	20	90	180
47	1.7	500	8	60	30	60	150	75
48	1.8	220	4	200	100	25	50	75
49	1.9	500	12	30	45	40	50	200
50	1.10	150	3	1	10	2,5	15	75
51	1.11	600	10	40	120	100	220	180
52	1.12	200	6	70	30	80	20	7
53	1.13	450	7	3	12	80	120	30
54	1.14	350	20	60	40	50	70	130
55	1.15	225	30	90	60	20	130	75
56	1.16	180	140	60	35	45	70	50
57	1.17	900	30	150	100	300	150	75
58	1.18	84	60	40	48	25	35	15

Продолжение таблицы 1.1

Вариант	Рисунок	E	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
		B	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
59	1.19	250	100	25	75	14	20	16
60	1.20	540	250	15	300	10	30	20
61	1.1	660	6	80	50	70	200	300
62	1.2	108	3	90	15	5	10	30
63	1.3	400	4	90	20	60	40	80
64	1.4	600	12	40	80	26	90	135
65	1.5	400	5	20	24	60	120	45
66	1.6	280	5	240	80	6	135	90
67	1.7	225	10	120	20	24	48	24
68	1.8	140	5	120	24	48	40	60
69	1.9	660	20	240	480	200	300	60
70	1.10	250	4	8	10	16	40	60
71	1.11	440	8	140	60	80	200	40
72	1.12	180	5	40	60	24	48	15
73	1.13	450	12	8	6	90	135	120
74	1.14	300	90	180	200	300	20	40
75	1.15	600	120	100	80	70	50	80
76	1.16	225	90	135	40	20	35	55
77	1.17	180	40	10	60	12	36	18
78	1.18	480	75	150	200	35	25	40
79	1.19	300	90	60	60	10	5	25
80	1.20	150	6	14	20	10	3	7
81	1.1	180	6	18	10	6	30	60
82	1.2	240	10	90	15	50	100	300
83	1.3	100	2,8	18	6	10	7	8
84	1.4	280	20	100	200	40	240	480
85	1.5	300	6	60	10	50	130	36
86	1.6	240	15	150	75	8	140	60
87	1.7	150	6	60	15	13	20	30
88	1.8	100	2	40	10	30	3	15
89	1.9	600	11	70	30	10	60	120
90	1.10	300	2	4	60	15	30	150
91	1.11	660	20	200	50	240	100	380
92	1.12	150	2	20	30	12	24	3
93	1.13	200	9	7	8	160	40	60
94	1.14	300	18	36	10	60	70	50
95	1.15	400	50	60	140	130	110	80
96	1.16	120	24	48	15	25	40	20
97	1.17	204	10	30	3	15	72	36
98	1.18	150	100	400	120	20	40	15
99	1.19	216	40	60	120	16	20	4
100	1.20	600	6	6	120	24	26	30

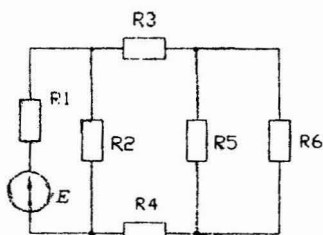


Рис. 1.1

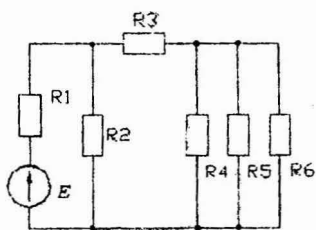


Рис. 1.2

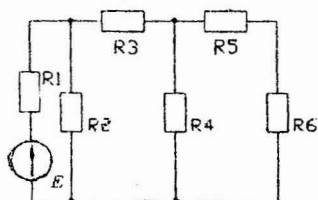


Рис. 1.3

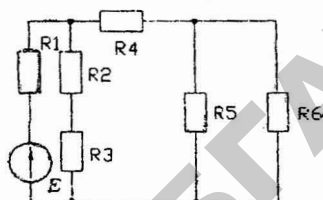


Рис. 1.4

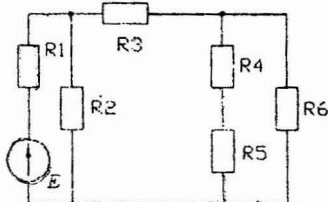


Рис. 1.5

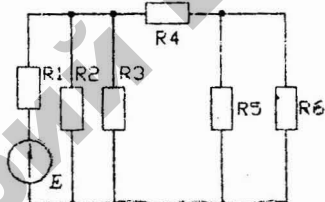


Рис. 1.6

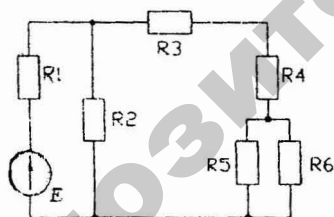


Рис. 1.7

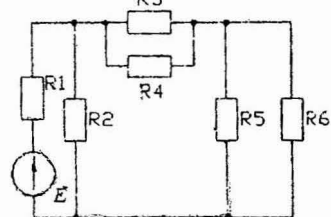


Рис. 1.8

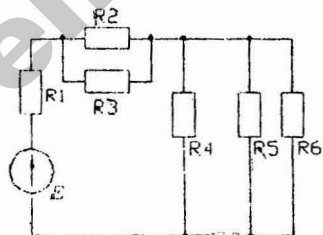


Рис. 1.9

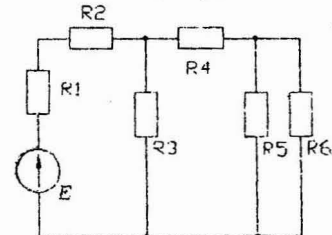


Рис. 1.10

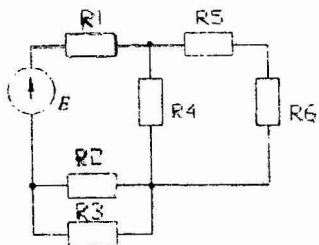


Рис. 1.11

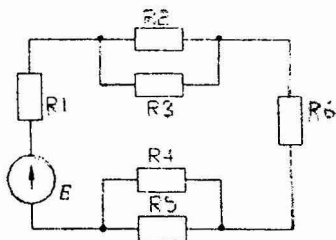


Рис. 1.12

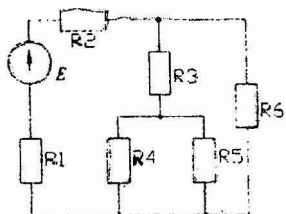


Рис. 1.13

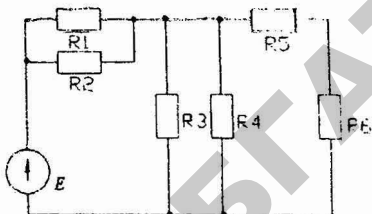


Рис. 1.14

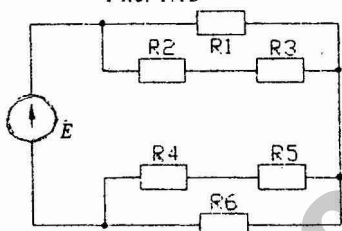


Рис. 1.15

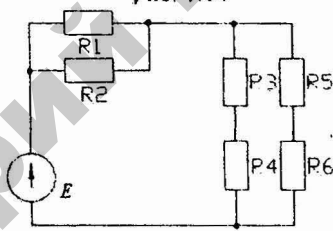


Рис. 1.16

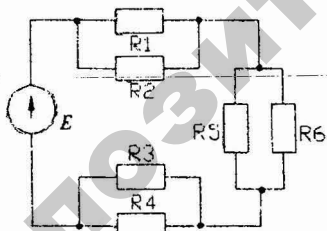


Рис. 1.17

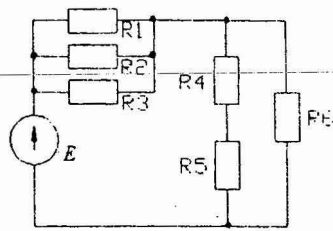


Рис. 1.18

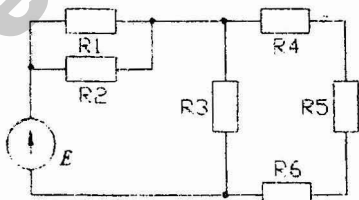


Рис. 1.19

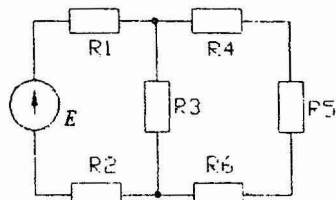


Рис. 1.20

Задача 1.2. Для электрической схемы (рис. 1.21...1.40), соответствующей номеру варианта, выполнить следующее:

1. Составить систему уравнений для расчета токов во всех ветвях методом уравнений Кирхгофа.
 2. Рассчитать все токи методом контурных токов.
 3. Составить баланс мощностей.
 4. Определить ток I_1 методом эквивалентного генератора.
- Величины ЭДС и сопротивлений даны в таблице 1.2.

1.2. Варианты и исходные данные задачи 1.2

Вариант	Рисунок	E_1	E_2	E_3	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
		В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	1.21	-	12	16	13	5	2	8	11	15
2	1.22	25	-	14	8	10	6	15	21	26
3	1.23	-	16	8	4	13	9	10	5	6
4	1.24	-	20	7	12	35	22	6	10	15
5	1.25	25	45	-	4	11	5	12	7	8
6	1.26	-	15	13	5	10	12	7	8	15
7	1.27	12	13	-	30	40	60	80	110	45
8	1.28	-	25	10	55	80	100	40	70	120
9	1.29	-	20	8	7	12	4	9	15	8
10	1.30	25	8	-	110	60	45	150	80	50
11	1.31	-	100	150	20	80	100	35	150	40
12	1.32	13	14	-	15	12	10	9	8	7
13	1.33	-	20	10	4	7	10	12	20	5
14	1.34	-	30	10	9	20	16	40	30	22
15	1.35	-	10	21	13	5	9	7	10	4
16	1.36	-	30	9	4	8	6	10	13	10
17	1.37	-	20	30	10	18	5	10	8	6
18	1.38	-	23	9	30	40	22	10	14	50
19	1.39	15	-	20	5	7	10	4	15	20
20	1.40	-	20	14	6	5	8	14	7	8
21	1.21	-	12	30	19,5	7,5	3	12	16,5	22,5
22	1.22	25	-	30	12	15	9	22,5	31,5	39
23	1.23	-	16	15	6	19,5	13,5	15	7,5	9

Вариант	Рисунок	E_1	E_2	E_3	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
		В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
24	1.24	-	9	18	18	52,5	33	9	15	22,5
25	1.25	25,5	15	-	6	16,5	7,5	18	10,5	12
26	1.26	-	15	37,5	7,5	15	18	10,5	12	22,5
27	1.27	5	12,5	-	65	20	30	40	55	22
28	1.28	-	25,5	22	32,5	120	150	60	105	180
29	1.29	-	12	15	10,5	18	6	13,5	22,5	12
30	1.30	21	21	-	165	90	67,5	225	120	75
31	1.31	-	90	37,5	30	120	150	52	225	60
32	1.32	15	30	-	22,5	18	15	13,5	12	10,5
33	1.33	-	9	30	6	10,5	15	18	30	8,5
34	1.34	-	15	27	13,5	30	24	60	45	33
35	1.35	-	4	15	6,5	2,5	4,5	3,5	5	2
36	1.36	-	21	22	6	12	9	15	19	15
37	1.37	-	16	52	15	27	7	15	12	9
38	1.38	-	16	22	45	60	33	15	21	75
39	1.39	15	-	45	7,5	10,5	15	6	22,5	30
40	1.40	-	15	33	9	7,5	12	21	10,5	12
41	1.21	-	5	10	6,5	2,5	1	4	5,5	7,5
42	1.22	10	-	1	4	5	3	7,5	10,5	13
43	1.23	-	7	5	2	6,5	4,5	5	2,5	3
44	1.24	-	6,5	6	6	17,5	11	3	5	7,5
45	1.25	10,5	5	-	2	5,5	2,5	6	3,5	4
46	1.26	-	6	12	2,5	5	6	3,5	4	7,5
47	1.27	10	37,5	-	195	60	90	120	165	67
48	1.28	-	6,5	7,5	27,5	40	50	20	35	60
49	1.29	-	7	5	3,5	6	2	4,5	7,5	4
50	1.30	8	7	-	55	30	22,5	75	40	25
51	1.31	-	34	125	10	40	50	17,5	75	20
52	1.32	5	10	-	7,5	6	5	4,5	4	3,5
53	1.33	-	6,5	10	2	3,5	5	6	10	2,5
54	1.34	-	10	9	4,5	10	8	20	15	11
55	1.35	-	9	45	19,5	7,5	13,5	10,5	15	6
56	1.36	-	11	7,5	2	4	3	5	6,5	5
57	1.37	-	8	16	5	9	2,5	5	4	3
58	1.38	-	7,5	7,5	15	20	11	5	7	25
59	1.39	7	-	15	2,5	3,5	5	2	7,5	16
60	1.40	-	7,5	11	3	2,5	4	7	3,5	4
61	1.21	-	24	32	26	10	4	16	22	30
62	1.22	50	-	34	16	20	12	30	42	52
63	1.23	-	40	10	8	14	20	24	40	11
64	1.24	-	40	19	24	70	44	12	20	30
65	1.25	50	16	-	8	22	10	24	14	16

Вариант	Рисунок	E_1	E_2	E_3	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
		В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
66	1.26	-	30	38	10	20	24	14	16	30
67	1.27	200	200	-	40	160	200	70	300	30
68	1.28	-	50	22	110	160	200	80	140	240
69	1.29	-	40	12	14	24	8	18	30	16
70	1.30	50	22	-	220	120	90	300	160	100
71	1.31	-	24	34	260	80	120	160	220	90
72	1.32	26	28	-	30	24	20	18	16	14
73	1.33	-	32	11	8	26	18	20	10	12
74	1.34	-	60	28	18	40	32	80	60	44
75	1.35	-	20	24	26	10	18	14	20	8
76	1.36	-	60	24	8	16	12	20	26	26
77	1.37	-	40	40	20	36	10	20	16	12
78	1.38	-	46	8	60	80	44	20	28	100
79	1.39	30	-	20	10	14	20	8	30	40
80	1.40	-	40	12	12	10	16	28	14	16
81	1.21	-	25	50	32,5	12,5	5	20	27,5	37,5
82	1.22	50	-	50	20	25	15	37,5	52	65
83	1.23	-	27	25	10	32,5	22,5	25	12,5	15
84	1.24	-	15	30	30	87,5	55	15	25	37,5
85	1.25	32,5	25	-	10	27,5	12,5	30	17,5	20
86	1.26	-	35	62,5	12,5	25	30	17,5	20	37,5
87	1.27	17	62	-	325	100	150	200	275	110
88	1.28	-	34	37	137	200	250	100	175	300
89	1.29	-	26	25	17,5	30	10	22,5	37,5	20
90	1.30	625	150	-	50	200	250	87	37	100
91	1.31	-	24	35	275	150	112	375	200	225
92	1.32	25	50	-	37,5	30	25	22,5	20	17,5
93	1.33	-	15	50	10	17,5	25	30	50	13,5
94	1.34	-	35	45	22,5	50	40	100	75	55
95	1.35	-	20	75	32,5	12,5	22,5	17,5	25	10
96	1.36	-	37	37,5	10	20	15	25	32	25
97	1.37	-	32	87,5	25	40	12,5	25	20	15
98	1.38	-	32	37	75	100	55	25	35	125
99	1.39	30	-	75	12,5	17,5	25	10	37,5	50
100	1.40	-	25	55	15	12,5	20	35	17,5	20

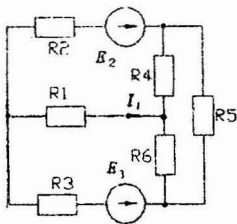


Рис. 1.21

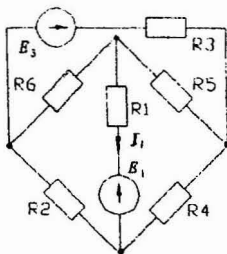


Рис. 1.22

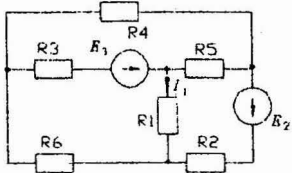


Рис. 1.23

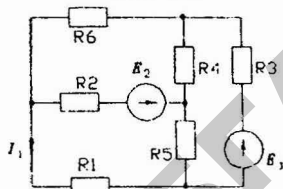


Рис. 1.24

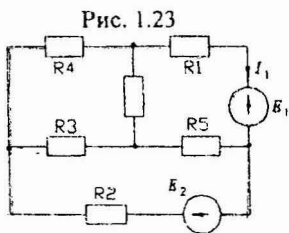


Рис. 1.25

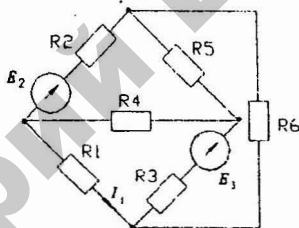


Рис. 1.26

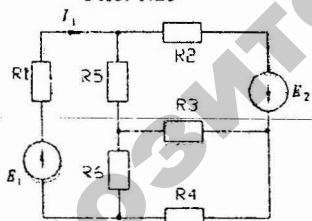


Рис. 1.27

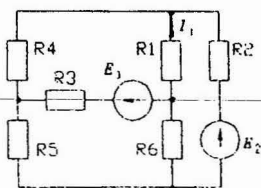


Рис. 1.28

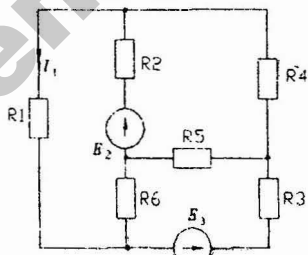


Рис. 1.29

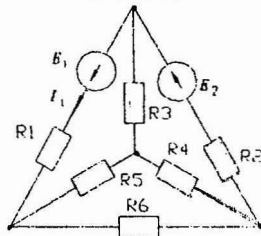


Рис. 1.30

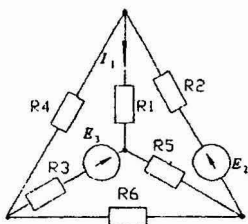


Рис. 1.31

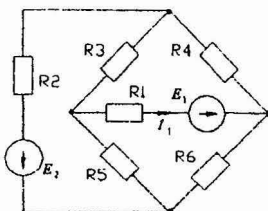


Рис. 1.32

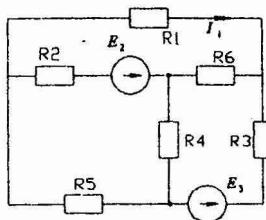


Рис. 1.33

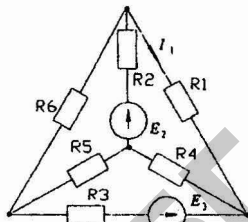


Рис. 1.34

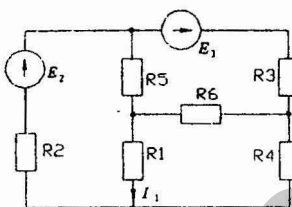


Рис. 1.35

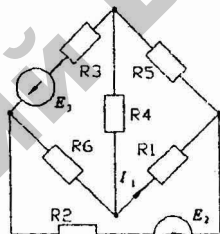


Рис. 1.36

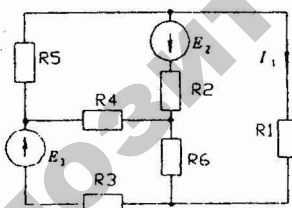


Рис. 1.37

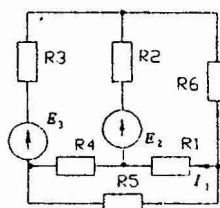


Рис. 1.38

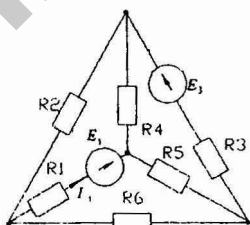


Рис. 1.39

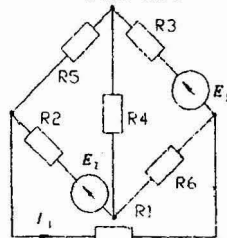


Рис. 1.40

1.2. Методические указания

Для выполнения задания необходимо иметь понятие об электрической цепи, токе, напряжении, источнике ЭДС, схеме электрических цепей (ветвь, узел, контур) и знать законы Ома и Кирхгофа, закон Джоуля-Ленца, формулы для расчета мощностей источников и приемников электрической энергии. Изучить составление уравнений для расчета токов в схемах с помощью законов Кирхгофа, методы контурных токов, двух узлов, эквивалентного генератора, преобразование соединения звездой в эквивалентное соединение треугольником и обратно. Указанные вопросы можно изучить по учебникам [1], [3], глава первая.

В цепи с одним источником энергии и смешанным соединением сопротивлений при расчете токов используют преобразование последовательно и параллельно соединенных сопротивлений в эквивалентное сопротивление.

Элемент электрической цепи, предназначенный для использования его электрического сопротивления называется резистором.

Последовательным соединением резисторов называют соединение, при котором через все резисторы проходит один и тот же ток, так как между резисторами нет ответвлений тока.

Эквивалентное сопротивление

$$R_{\text{эк}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

Параллельным соединением резисторов называют соединение, при котором все резисторы присоединены к одной паре узлов и находятся под одним и тем же напряжением.

Эквивалентное сопротивление

$$R_{\text{эк}} = \frac{1}{g_{\text{эк}}},$$

где $g_{\text{эк}} = g_1 + g_2 + \dots + g_n$ – эквивалентная проводимость.

Проводимость резистора $\frac{1}{R} = g$.

В случае двух параллельно соединенных резисторов R_1 и R_2

$$R_{\text{эк}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Узлом электрической цепи называют место соединения трех и более ветвей.

Ветвью называют участок электрической цепи, вдоль которого протекает один и тот же ток. В ветви все элементы соединены последовательно,

вств находится между двумя узлами. По числу ветвей в цепи определяют число разных токов.

Контур – замкнутый путь, проходящий в общем случае по нескольким ветвям электрической цепи.

Токи в цепях находят по законам Ома и Кирхгофа.

Закон Ома: ток через сопротивление R равен напряжению на этом сопротивлении, деленному на величину этого сопротивления:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю:

$$\sum I = 0.$$

Подтекающие к узлу токи считают положительными, утекающие – отрицательными.

Вторая формулировка первого закона Кирхгофа: сумма токов, подтекающих к узлу, равна сумме токов, утекающих от узла:

$$\sum I_{\text{подт}} = \sum I_{\text{утек}}.$$

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма ЭДС в контуре равна алгебраической сумме напряжений на сопротивлениях этого контура:

$$\sum E = \sum IR.$$

В каждую из сумм соответствующие слагаемые входят со знаком плюс, если их направления совпадают с направлением обхода контура, и со знаком минус, если они не совпадают с ним. Направление напряжения на резисторе совпадает с направлением тока через резистор.

Мощность источника постоянной ЭДС

$$P = EI.$$

Мощность тока в резисторе

$$P = UI \quad \text{или} \quad P = I^2 R.$$

Формула $P = I^2 R$ есть закон Джоуля-Ленца, согласно которому вся энергия электрического тока в резисторе преобразуется в теплоту.

1.3. Примеры

1.3.1. Расчет электрической цепи со смешанным соединением резисторов.

В схеме электрической цепи (рис. 1. 41) $E = 140 \text{ В}$, $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 100 \text{ Ом}$, $R_3 = 30 \text{ Ом}$, $R_4 = 300 \text{ Ом}$, $R_5 = 200 \text{ Ом}$.

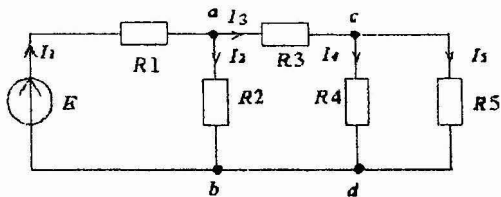


Рис. 1.41

Определить токи в ветвях цепи, составить баланс мощностей.

Решение.

1. Отмечаем в схеме узлы и указываем направления токов в ветвях-ответствии с направлением ЭДС.

2. Для определения токов в ветвях используем метод эквивалентных преобразований. Найдем эквивалентное сопротивление цепи относительно источника ЭДС. Рекомендуется поэтапное преобразование последовато и параллельно соединенных резисторов, начиная с ветвей наиболее удаленных от источника ЭДС.

Резисторы R_4 и R_5 соединены параллельно, поэтому их эквивалентное сопротивление

$$R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} = \frac{300 \cdot 200}{500} = 120 \text{ Ом.}$$

После преобразования схема имеет вид (рис. 1.42).

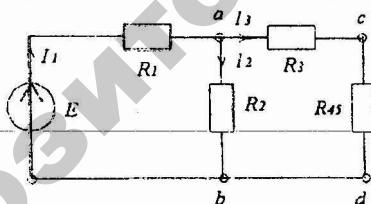


Рис. 1.42

В схеме цепи резисторы R_3 и R_{45} соединены последовательно. Их эквивалентное сопротивление

$$R_{345} = R_3 + R_{45} = 150 \text{ Ом.}$$

Схема преобразованной цепи представлена на рис. 1.43.

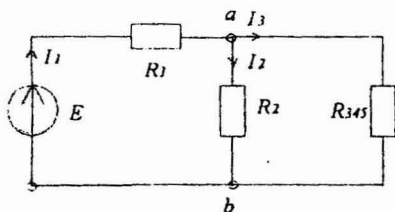


Рис. 1.43

Так как резисторы R_2 и R_{345} соединены параллельно, то их эквивалентное сопротивление

$$R_{2345} = \frac{R_2 R_{345}}{R_2 + R_{345}} = \frac{100 \cdot 150}{250} = 60 \text{ Ом.}$$

В результате получаем схему цепи (рис. 1.44), в которой резисторы R_1 и R_{2345} соединены последовательно, значит

$$R_{\text{эк}} = R_1 + R_{2345} = 10 + 60 = 70 \text{ Ом.}$$

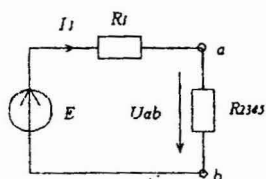


Рис. 1.44

3. Определяем токи в ветвях электрической цепи.

По второму закону Кирхгофа для схемы цепи (рис. 1.44)

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_{2345}} = \frac{E}{R_{\text{эк}}} = \frac{140}{70} = 2 \text{ А.}$$

Для определения других токов находим напряжения на этих ветвях цепи. В соответствии со схемой цепи (рис. 1.44) по закону Ома напряжение

$$U_{ab} = I_1 R_{2345} = 2 \cdot 60 = 120 \text{ В.}$$

Тогда токи в параллельных ветвях (рис. 1.43)

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{120}{100} = 1,2 \text{ А,} \quad I_3 = \frac{U_{ab}}{R_{345}} = \frac{120}{150} = 0,8 \text{ А.}$$

Аналогично для схемы цепи (рис. 1.42) определим напряжение

$$U_{cd} = I_3 R_{45} = 0,8 \cdot 120 = 96 \text{ В.}$$

Токи в параллельных ветвях

$$I_4 = \frac{U_{cd}}{R_4} = \frac{96}{300} = 0,32 \text{ А,} \quad I_5 = \frac{U_{cd}}{R_5} = \frac{96}{200} = 0,48 \text{ А.}$$

4. Составляем баланс мощностей.

Мощность источника энергии

$$P_{\text{ист}} = EI_1 = 140 \cdot 2 = 280 \text{ Вт.}$$

Мощность приемников энергии рассчитываем по закону Джоуля-Ленца:

$$P_{\text{пр}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 = 2^2 \cdot 10 +$$

$$+ 1,2^2 \cdot 100 + 0,8^2 \cdot 30 + 0,32^2 \cdot 300 + 0,48^2 \cdot 200 = 280 \text{ Вт.}$$

$$P_{\text{ист}} = P_{\text{пр}}.$$

Баланс мощностей соблюдается, следовательно, токи определены правильно.

1.3.2. Расчет разветвленной электрической цепи с несколькими ЭДС.

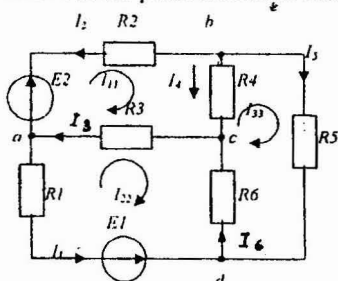


Рис. 1.45

В электрической цепи (рис. 1.45)

$$\begin{aligned} E_1 &= 40 \text{ В,} & E_2 &= 20 \text{ В,} \\ R_1 &= 15 \text{ Ом,} & R_2 &= 27 \text{ Ом,} \\ R_3 &= 5 \text{ Ом,} & R_4 &= 15 \text{ Ом,} \\ R_5 &= 12 \text{ Ом,} & R_6 &= 10 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Составить систему уравнений для расчета токов методом уравнений Кирхгофа. Рассчитать токи методом контурных токов. Составить баланс мощностей в схеме. Определить ток I_1 методом эквивалентного генератора.

Решение

1. Выбираем произвольно направления токов в ветвях (рис. 1.45).

2. Составляем систему уравнений по законам Кирхгофа для определения токов в ветвях.

Так как в схеме 6 ветвей, то необходимо составить 6 уравнений: по первому закону Кирхгофа – три уравнения (на единицу меньше числа узлов) и по второму закону Кирхгофа недостающее число уравнений, т.е. также три уравнения.

Система уравнений для расчета токов имеет вид:

$$\begin{cases} I_2 + I_3 - I_1 = 0; & \text{(для узла a)} & (1.1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} -I_4 - I_2 - I_5 = 0; & \text{(для узла b)} & (1.2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_4 + I_6 - I_3 = 0; & \text{(для узла c)} & (1.3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} -I_2 R_2 + I_4 R_4 + I_3 R_3 = E_2; & \text{(для контура abca)} & (1.4) \end{cases}$$

$$\begin{cases} -I_3 R_3 - I_6 R_6 - I_1 R_1 = -E_1; & \text{(для контура acda)} & (1.5) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_5 R_5 + I_6 R_6 - I_4 R_4 = 0. & \text{(для контура bdc b)} & (1.6) \end{cases}$$

В уравнениях (1.1...1.3) притекающие к узлу токи принимали положительными, оттекающие от узла токи – отрицательными. В уравнениях (1.4...1.6) все ЭДС и напряжения, совпадающие с направлением обхода по контуру (по часовой стрелке), записывали положительными, не совпадающие – отрицательными.

Решая полученную систему уравнений (1.1...1.6), можем найти токи в ветвях.

Рассмотренный метод в большинстве случаев является достаточно громоздким, при большом числе уравнений для решения системы целесообразно применять ЭВМ.

Для упрощения расчета разработаны методы в основе которых также положены уравнения Кирхгофа, но количество уравнений значительно сокращено.

3. Определяем токи в ветвях методом контурных токов. Считаем, что в каждом независимом контуре схемы (рис. 1.45) течет свой контурный ток: I_{11} , I_{22} , I_{33} . Для единообразия контурные токи направляют в одну сторону, в нашем случае по часовой стрелке.

Составляем уравнения по второму закону Кирхгофа относительно контурных токов. Направления обхода контуров примем также по часовой стрелке.

Система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} I_{11}(R_2 + R_3 + R_4) - I_{22}R_3 - I_{33}R_4 = E_2; \\ I_{22}(R_1 + R_3 + R_6) - I_{11}R_3 - I_{33}R_6 = -E_1; \\ I_{33}(R_4 + R_5 + R_6) - I_{11}R_4 - I_{22}R_6 = 0. \end{cases} \quad (1.7)$$

Подставляем известные значения сопротивлений и ЭДС:

$$\begin{cases} 47I_{11} - 5I_{22} - 15I_{33} = 20; \\ -5I_{11} + 30I_{22} - 10I_{33} = -40; \\ -15I_{11} - 10I_{22} + 37I_{33} = 0. \end{cases} \quad (1.8)$$

Дальнейший расчет можно вести или методом последовательного исключения неизвестных или методом определителей. Выбираем последний, как более упорядоченный.

Находим главный определитель, используя разложение по элементам столбца,

$$\Delta = \begin{vmatrix} 47 & -5 & -15 \\ -5 & 30 & -10 \\ -15 & -10 & 37 \end{vmatrix} = 47 \cdot \begin{vmatrix} 30 & -10 \\ -10 & 37 \end{vmatrix} + 5 \cdot \begin{vmatrix} -5 & -15 \\ -10 & 37 \end{vmatrix} - 15 \cdot \begin{vmatrix} -5 & -15 \\ 30 & -10 \end{vmatrix} =$$

$$= 47 \cdot (1110 - 100) + 5 \cdot (-185 - 150) - 15 \cdot (50 + 450) = 38295.$$

Для нахождения контурного тока I_{11} заменяем в главном определителе первый столбец на свободные члены системы (1.8):

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 20 & -5 & -15 \\ -40 & 30 & -10 \\ 0 & -10 & 37 \end{vmatrix} = 6800; \quad I_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{6800}{38295} = 0,177 \text{ А.}$$

Для контурного тока I_{22}

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 47 & 20 & -15 \\ -5 & -40 & -10 \\ -15 & 0 & 37 \end{vmatrix} = -53860; \quad I_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-53860}{38295} = -1,4 \text{ А.}$$

Для контурного тока I_{33}

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 47 & -5 & 20 \\ -5 & 30 & -40 \\ -15 & -10 & 0 \end{vmatrix} = -11800; \quad I_{33} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{-11800}{38295} = -0,308 \text{ А.}$$

Чтобы убедиться в правильности расчета, подставим найденные контурные токи в первое уравнение системы (1.8):

$$47 \cdot 0,177 - 5 \cdot (-1,4) - 15 \cdot (-0,308) = 19,93.$$

Полученное значение $19,93 \approx 20$ равно правой части первого уравнения системы (1.8), т.е. система уравнений решена правильно.

Определяем истинные токи в ветвях. Ток в ветви равен алгебраической сумме контурных токов, протекающих в этой же ветви.

Рассчитываем значения токов в ветвях схемы (рис. 1.45), сравнивая направления контурных токов в ветвях с направлением истинных токов:

$$I_1 = -I_{22} = 1,4 \text{ А;}$$

$$I_2 = -I_{11} = -0,177 \text{ А;}$$

$$I_3 = I_{11} - I_{22} = 0,177 + 1,4 = 1,577 \text{ А;}$$

$$I_4 = -I_{33} + I_{11} = 0,308 + 0,177 = 0,485 \text{ А;}$$

$$I_5 = I_{33} = -0,308 \text{ А;}$$

$$I_6 = I_{33} - I_{22} = -0,308 + 1,4 = 1,09 \text{ А.}$$

Действительные направления токов I_2 и I_5 противоположны принятым для них на рис. 1.45 за положительные.

4. Составляем баланс мощностей.

На основании закона сохранения энергии количество теплоты, выделяющееся в единицу времени в сопротивлениях цепи, должно равняться

энергии, доставляемой за то же время источниками питания.

Уравнение энергетического баланса имеет вид:

$$\sum I^2 R = \sum EI.$$

Мощность источника энергии EI записывается со знаком плюс, если ток в источнике совпадает с направлением ЭДС. Если же ток противоположен направлению ЭДС, то этот источник ЭДС является потребителем энергии и его мощность записываем со знаком минус.

В нашем случае

$$\sum EI = E_1 I_1 - E_2 I_2 = 40 \cdot 1,4 - 20 \cdot (-0,177) = 59,54 \text{ Вт.}$$

Мощность тепловых потерь в резисторах

$$\begin{aligned} \sum I^2 R &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 = 1,4^2 \cdot 15 + \\ &+ 0,177^2 \cdot 27 + 1,577^2 \cdot 5 + 0,485^2 \cdot 15 + 0,308^2 \cdot 12 + 1,09^2 \cdot 10 = 59,22 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Расхождения в результатах вычислений не превышает 1%, это означает, что токи рассчитаны правильно.

5. Определяем ток I_1 методом эквивалентного генератора.

По отношению к резистору R_1 всю остальную часть схемы можно заменить эквивалентным генератором, ЭДС которого равна напряжению холостого хода на зажимах разомкнутой ветви, а внутреннее сопротивление равно входному сопротивлению двухполюсника при закороченных ЭДС.

Размыкаем ветвь с резистором R_1 и находим напряжение холостого хода U_x (рис. 1.46).

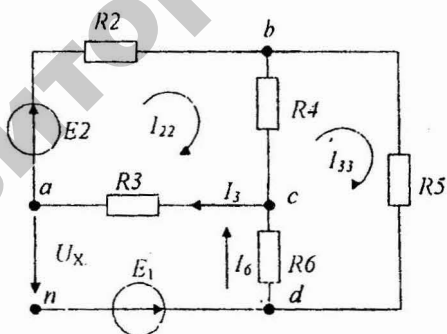


Рис. 1.46

Для определения напряжения U_x необходимо найти токи в схеме (рис. 1.46). Воспользуемся методом контурных токов:

$$\begin{cases} I_{22}(R_2 + R_3 + R_4) - I_{33}R_4 = E_2; \\ I_{33}(R_4 + R_5 + R_6) - I_{22}R_4 = 0. \end{cases}$$

Подставим известные величины:

$$\begin{cases} 47/_{22} - 15/_{33} = 20; \\ 37/_{33} - 15/_{22} = 0. \end{cases}$$

Решив систему уравнений, определим контурные токи:

$$I_{22} = 0,488 \text{ A}; \quad I_{33} = 0,197 \text{ A}.$$

$$\text{Тогда токи в ветвях } I_3 = I_{22} = 0,488 \text{ A}; \quad I_6 = I_{33} = 0,197 \text{ A}.$$

Составляем уравнение по второму закону Кирхгофа для контура *andca*, в который входит участок между разомкнутыми зажимами:

$$U_x + I_6 R_6 + I_3 R_3 = E_1;$$

$$U_x = E_1 - I_6 R_6 - I_3 R_3 = 40 - 0,197 \cdot 10 - 0,488 \cdot 5 = 35,59 \text{ В}.$$

Определяем входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ всей схемы по отношению к разомкнутым зажимам при замкнутых ЭДС (рис. 1.47).

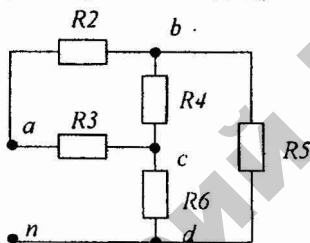


Рис. 1.47

Резисторы R_2 , R_3 , R_4 , соединенные треугольником, преобразуем в эквивалентное соединение звездой с сопротивлениями R_a , R_b , R_c :

$$R_a = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{27 \cdot 5}{27 + 5 + 15} = 2,87 \text{ Ом},$$

$$R_b = \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{27 \cdot 15}{27 + 15 + 5} = 8,61 \text{ Ом},$$

$$R_c = \frac{R_3 R_4}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{5 \cdot 15}{47} = 1,59 \text{ Ом}.$$

Схему цепи (рис. 1.47) преобразуем в схему с последовательно-параллельным соединением резисторов (рис. 1.48).

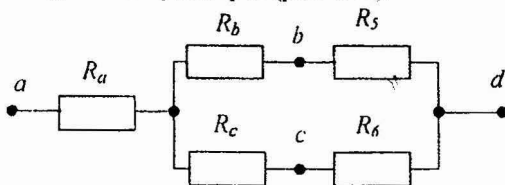


Рис. 1.48

Сопротивление относительно зажимов *ad*:

$$R_{вх} = R_{a1} + \frac{(R_b + R_5) \cdot (R_c + R_6)}{R_b + R_5 + R_c + R_6} = 2,87 + \frac{(8,61 + 12) \cdot (1,59 + 10)}{8,61 + 12 + 1,59 + 10} = 10,28 \text{ Ом.}$$

В результате замены по отношению к резистору R_1 всей остальной схемы цепи (рис. 1.45) эквивалентным генератором с ЭДС, равной напряжению холостого хода U_x , и внутренним сопротивлением, равным входному сопротивлению $R_{вх}$, получаем схему (рис. 1.49).

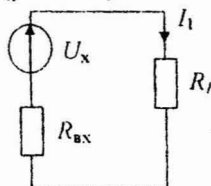


Рис. 1.49

Определяем ток I_1 по формуле

$$I_1 = \frac{U_x}{R_{вх} + R_1} = \frac{35,59}{10,28 + 15} = 1,4 \text{ А.}$$

Получено такое же значение тока I_1 , как и при расчете по методу контурных токов.

2. ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

2.1. Контрольное задание 2

Второе задание состоит из двух задач: первая – по расчету электрической цепи синусоидального тока с одним источником энергии; вторая – по расчету разветвленной электрической цепи с несколькими ЭДС.

Задача 2.1. Для электрической схемы (рис. 2.1... 2.20), соответствующей номеру варианта, выполнить следующее:

1. Рассчитать токи и напряжения во всех ветвях цепи.
2. Определить мощность на входе цепи по формуле $P = UI \cos \varphi$, проверить полученный результат по закону Джоуля-Ленца.
3. Построить векторную диаграмму токов и напряжений, проверить графически выполнение первого и второго законов Кирхгофа.

Величины действующего значения напряжения U , сопротивлений R , индуктивности L , емкости C для каждого варианта даны в таблице 2.1. Частота синусоидального изменяющегося напряжения $f = 50$ Гц.

2.1. Варианты и исходные данные задачи 2.1

Вариант	Рисунок	U	R_1	R_2	R_3	L	C
		В	Ом	Ом	Ом	МГн	мкФ
		3	4	5	6	7	8
1	2.1	80	2	4	-	6,37	636
2	2.2	160	2	4	-	16	1592
3	2.3	100	1,8	2	2	6,37	723,7
4	2.4	80	2	1	2	9,55	796
5	2.5	40	0,4	4	-	25,5	530
6	2.6	500	1	3	20	127,6	176,8
7	2.7	136	2	10	10	63,8	318
8	2.8	100	20	15	5	127,6	159
9	2.9	100	10	10	-	31,9	318
10	2.10	250	30	20	50	159,4	63,6
11	2.11	400	5	15	-	63,8	79,5
12	2.12	130	50	50	-	159,4	106
13	2.13	100	3	7	5	16	636
14	2.14	100	25	15	-	63,8	318
15	2.15	500	2	20	-	51	53
16	2.16	160	15	6	4	79,7	318
17	2.17	250	8	20	20	44,6	159
18	2.18	260	7	7	20	89,2	79,5
19	2.19	180	10	10	-	16	318
20	2.20	200	4	20	40	63,8	398
21	2.1	410	1	3	-	19,2	318
22	2.2	260	2	5	-	47,8	636
23	2.3	100	3	4	4	25,5	353
24	2.4	400	20	10	20	95,6	79,5
25	2.5	64	0,8	2	-	38,3	393
26	2.6	200	0,6	0,4	10	95,6	244
27	2.7	170	6	20	10	63,8	106
28	2.8	200	20	15	25	159,4	318
29	2.9	50	20	10	-	31,9	318
30	2.10	50	2	3	5	6,37	636
31	2.11	150	4	6	-	31,9	159
32	2.12	90	5	5	-	16	318
33	2.13	340	13	7	40	63,8	227
34	2.14	80	30	70	-	159,4	159
35	2.15	200	1	10	-	41,5	106
36	2.16	200	10	10	10	95,6	159
37	2.17	250	10	50	50	127,6	63,6
38	2.18	500	6	6	10	44,6	159
39	2.19	450	3	30	-	31,9	530
40	2.20	130	5	20	30	159,4	636
41	2.1	130	2	5	-	16	212
42	2.2	205	1	3	-	31,9	530
43	2.3	100	1	5	15	31,9	579
44	2.4	300	10	30	40	31,9	159
45	2.5	80	0,8	8	-	25,5	796

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
46	2.6	200	6	3	30	31,9	167,6
47	2.7	160	4	10	20	31,9	159
48	2.8	400	4	25	15	95,6	318
49	2.9	200	50	50	-	63,8	63,6
50	2.10	100	8	2	20	63,8	318
51	2.11	250	7	3	-	51	106
52	2.12	260	10	20	-	31,9	318
53	2.13	500	25	25	50	159,4	63,6
54	2.14	100	4	16	-	31,9	636
55	2.15	100	4	5	-	25,5	318
56	2.16	200	5	25	25	47,8	63,6
57	2.17	400	8	20	20	76,6	159
58	2.18	500	6	5	10	41,5	106
59	2.19	400	4	10	-	63,8	159
60	2.20	180	10	30	70	159,4	318
61	2.1	100	2	6	-	19,11	530
62	2.2	329	4	8	-	31,9	796
63	2.3	100	2	8	8	51	398
64	2.4	50	3	3	4	3,19	1592
65	2.5	160	0,8	8	-	19,2	318
66	2.6	180	3	1	40	63,8	318
67	2.7	320	4	10	20	63,8	318
68	2.8	250	10	20	10	79,7	212
69	2.9	100	10	20	-	63,8	318
70	2.10	340	15	5	40	44,6	159
71	2.11	100	3	2	-	16	318
72	2.12	170	20	20	-	63,8	176,8
73	2.13	400	40	60	100	319	79,5
74	2.14	100	10	20	-	31,9	636
75	2.15	200	2	10	-	44,6	159
76	2.16	250	20	60	40	31,9	63,6
77	2.17	400	4	40	20	89,2	159
78	2.18	200	2	4	5	38,3	318
79	2.19	340	6	40	-	63,8	796
80	2.20	450	10	70	30	319	159
81	2.1	160	4	8	-	12,8	318
82	2.2	200	2	6	-	19,11	530
83	2.3	200	2	10	10	31,9	398
84	2.4	180	4	1	6	22,3	398
85	2.5	85	0,6	4	-	38,3	796
86	2.6	250	3	2	20	63,8	159
87	2.7	170	10	50	50	191,2	318
88	2.8	250	10	8	22	31,9	159
89	2.9	250	5	5	-	16	636
90	2.10	100	7	3	10	31,9	318
91	2.11	100	25	15	-	31,9	159
92	2.12	400	40	20	-	63,8	159

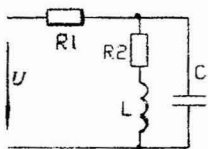


Рис. 2.1

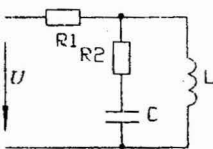


Рис. 2.2

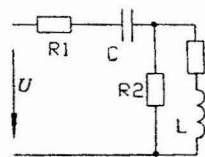


Рис. 2.3

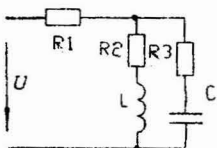


Рис. 2.4

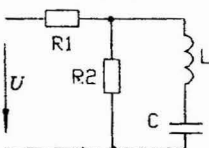


Рис. 2.5

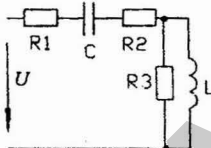


Рис. 2.6

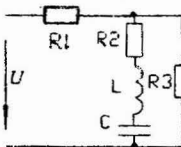


Рис. 2.7

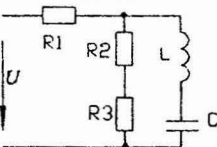


Рис. 2.8

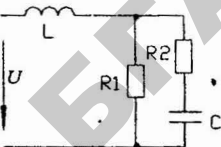


Рис. 2.9

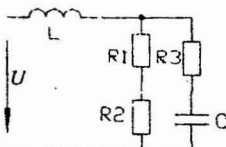


Рис. 2.10

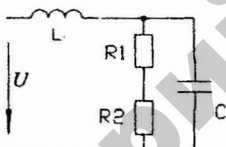


Рис. 2.11

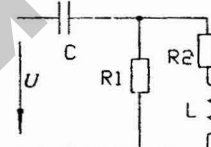


Рис. 2.12

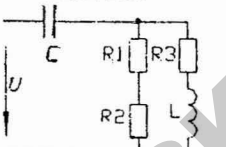


Рис. 2.13

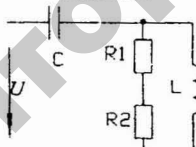


Рис. 2.14

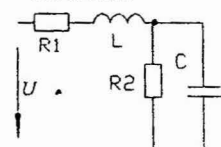


Рис. 2.15

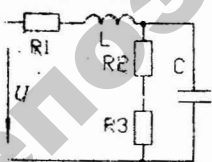


Рис. 2.16

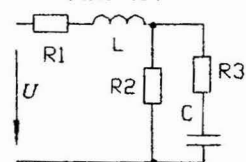


Рис. 2.17

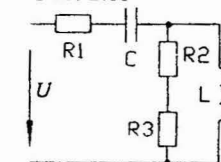


Рис. 2.18

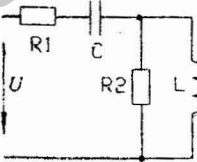


Рис. 2.19

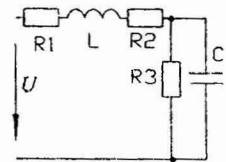


Рис. 2.20

1	2	3	4	5	6	7	8
93	2.13	200	20	80	50	159,4	79,5
94	2.14	170	35	15	-	159,4	318
95	2.15	250	4	20	-	57,4	79,5
96	2.16	400	10	50	50	95,6	31,8
97	2.17	500	20	100	100	255	31,8
98	2.18	250	4	6	20	63,8	159
99	2.19	100	14	20	-	127,6	176,8
100	2.20	100	3	4	6	31,9	289

Задача 2.2. Для электрической схемы (рис. 2.21...2.40), соответствующей номеру варианта, выполнить следующее:

1. Рассчитать токи в ветвях цепи методом двух узлов и проверить полученный результат по первому закону Кирхгофа.
2. Составить баланс активных мощностей.
3. Записать мгновенное значение (синусоидальную функцию времени) тока любой ветви и построить график зависимости этого тока от времени.

Величины мгновенных значений ЭДС, сопротивлений R , индуктивности L , емкости C для каждого варианта даны в таблице 2.2. Частота ЭДС $f = 50$ Гц.

2.2. Варианты и исходные данные задачи 2.2

Вариант	Рисунок	ЭДС		R_1	R_2	L	C
		В	В	Ом	Ом	мГн	мкФ
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2.21	$e_1 = 169 \sin \omega t$	$e_2 = 169 \sin (\omega t + 90^\circ)$	10	8	19,11	318
2	2.22	$e_1 = 113 \sin \omega t$	$e_2 = 127 \sin (\omega t - 90^\circ)$	20	20	63,8	79,5
3	2.23	$e_1 = 141 \sin (\omega t + 90^\circ)$	$e_2 = 282 \sin \omega t$	25	40	127,6	212
4	2.24	$e_1 = 705 \sin (\omega t - 45^\circ)$	$e_2 = 440 \sin \omega t$	40	-	79,7	63,6
5	2.25	$e_1 = 536 \sin \omega t$	$e_2 = 113 \sin (\omega t + 120^\circ)$	30	50	127,6	31,8
6	2.26	$e_1 = 705 \sin \omega t$	$e_2 = 536 \sin (\omega t + 90^\circ)$	70	80	255	318
7	2.27	$e_1 = 100 \sin (\omega t + 90^\circ)$	$e_2 = 42 \sin \omega t$	10	20	95,6	159
8	2.28	$e_1 = 536 \sin \omega t$	$e_2 = 310 \sin (\omega t + 90^\circ)$	-	50	319	39,8
9	2.29	$e_1 = 70,5 \sin \omega t$	$e_2 = 85 \sin (\omega t + 45^\circ)$	8	10	19,11	636
10	2.30	$e_1 = 282 \sin \omega t$	$e_2 = 169 \sin (\omega t + 60^\circ)$	50	50	159,4	63,6
11	2.31	$e_1 = 70,5 \sin (\omega t + 90^\circ)$	$e_2 = 113 \sin \omega t$	25	40	191,2	79,5
12	2.32	$e_1 = 127 \sin (\omega t + 60^\circ)$	$e_2 = 127 \sin \omega t$	15	-	47,8	106
13	2.33	$e_1 = 282 \sin (\omega t + 90^\circ)$	$e_2 = 211 \sin \omega t$	40	60	63,8	53
14	2.34	$e_1 = 56,4 \sin (\omega t + 60^\circ)$	$e_2 = 70,5 \sin \omega t$	25	50	79,7	63,6
15	2.35	$e_1 = 42,3 \sin \omega t$	$e_2 = 100 \sin (\omega t + 90^\circ)$	10	20	95,6	159
16	2.36	$e_1 = 141 \sin \omega t$	$e_2 = 100 \sin (\omega t + 120^\circ)$	10	-	25,5	159
17	2.37	$e_1 = 282 \sin \omega t$	$e_2 = 211,5 \sin (\omega t + 60^\circ)$	50	20	127,6	79,5
18	2.38	$e_1 = 127 \sin (\omega t + 90^\circ)$	$e_2 = 113 \sin \omega t$	20	20	63,8	79,5
19	2.39	$e_1 = 705 \sin (\omega t - 120^\circ)$	$e_2 = 620 \sin \omega t$	100	125	319	63,6
20	2.40	$e_1 = 536 \sin (\omega t + 120^\circ)$	$e_2 = 179 \sin \omega t$	50	-	159,4	31,8
21	2.21	$e_1 = 211 \sin (\omega t + 60^\circ)$	$e_2 = 282 \sin \omega t$	50	20	127,6	79,5
22	2.22	$e_1 = 56,4 \sin (\omega t + 60^\circ)$	$e_2 = 70,5 \sin \omega t$	25	50	79,7	63,6
23	2.23	$e_1 = 197,4 \sin (\omega t + 90^\circ)$	$e_2 = 141 \sin \omega t$	100	200	319	127

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6	7
24	2.24	$e_1 = 423 \sin \omega t$, $e_2 = 282 \sin(\omega t + 90^\circ)$	200	-	638	31,8
25	2.25	$e_1 = 310 \sin \omega t$, $e_2 = 169 \sin(\omega t + 120^\circ)$	20	80	191,2	39,8
26	2.26	$e_1 = 113 \sin \omega t$, $e_2 = 100 \sin(\omega t + 45^\circ)$	6	10	63,8	398
27	2.27	$e_1 = 705 \sin \omega t$, $e_2 = 620 \sin(\omega t - 120^\circ)$	100	125	319	63,6
28	2.28	$e_1 = 100 \sin(\omega t + 120^\circ)$, $e_2 = 84 \sin \omega t$	-	10	25,5	159
29	2.29	$e_1 = 169 \sin \omega t$, $e_2 = 169 \sin(\omega t + 90^\circ)$	40	60	63,8	53
30	2.30	$e_1 = 70,5 \sin \omega t$, $e_2 = 113 \sin(\omega t + 120^\circ)$	25	50	159,4	127
31	2.31	$e_1 = 310 \sin \omega t$, $e_2 = 155 \sin(\omega t - 90^\circ)$	20	20	127,6	159
32	2.32	$e_1 = 325 \sin \omega t$, $e_2 = 423 \sin(\omega t + 30^\circ)$	100	-	191,2	39,8
33	2.33	$e_1 = 169 \sin(\omega t + 120^\circ)$, $e_2 = 113 \sin \omega t$	80	70	31,9	79,5
34	2.34	$e_1 = 127 \sin(\omega t - 90^\circ)$, $e_2 = 127 \sin \omega t$	20	20	63,8	79,5
35	2.35	$e_1 = 56,4 \sin(\omega t - 90^\circ)$, $e_2 = 113 \sin \omega t$	10	10	63,8	318
36	2.36	$e_1 = 282 \sin(\omega t + 60^\circ)$, $e_2 = 310 \sin \omega t$	20	-	47,8	106
37	2.37	$e_1 = 310 \sin(\omega t + 120^\circ)$, $e_2 = 179 \sin \omega t$	10	8	19,11	318
38	2.38	$e_1 = 705 \sin \omega t$, $e_2 = 440 \sin(\omega t + 60^\circ)$	100	80	159,4	53
39	2.39	$e_1 = 440 \sin(\omega t + 60^\circ)$, $e_2 = 310 \sin \omega t$	50	70	319	106
40	2.40	$e_1 = 310 \sin(\omega t + 60^\circ)$, $e_2 = 282 \sin \omega t$	20	-	47,8	127
41	2.21	$e_1 = 197 \sin(\omega t + 120^\circ)$, $e_2 = 423 \sin \omega t$	20	10	95,6	63,6
42	2.22	$e_1 = 440 \sin \omega t$, $e_2 = 705 \sin(\omega t + 45^\circ)$	100	80	159,4	53
43	2.23	$e_1 = 113 \sin \omega t$, $e_2 = 169 \sin(\omega t - 60^\circ)$	50	40	63,8	31,8
44	2.24	$e_1 = 100 \sin(\omega t + 90^\circ)$, $e_2 = 127 \sin \omega t$	80	-	127,6	39,8
45	2.25	$e_1 = 282 \sin \omega t$, $e_2 = 169 \sin(\omega t - 90^\circ)$	30	50	31,9	79,5
46	2.26	$e_1 = 179 \sin \omega t$, $e_2 = 127 \sin(\omega t + 60^\circ)$	40	60	159,4	106
47	2.27	$e_1 = 410 \sin(\omega t + 120^\circ)$, $e_2 = 310 \sin \omega t$	50	70	319	63,6
48	2.28	$e_1 = 310 \sin \omega t$, $e_2 = 282 \sin(\omega t + 60^\circ)$	-	20	47,8	106
49	2.29	$e_1 = 179 \sin \omega t$, $e_2 = 179 \sin(\omega t + 90^\circ)$	80	40	191,2	39,8
50	2.30	$e_1 = 141 \sin(\omega t + 120^\circ)$, $e_2 = 141 \sin \omega t$	30	30	95,6	318
51	2.31	$e_1 = 620 \sin(\omega t + 45^\circ)$, $e_2 = 500 \sin \omega t$	100	200	638	31,8
52	2.32	$e_1 = 197 \sin(\omega t - 120^\circ)$, $e_2 = 211 \sin \omega t$	35	-	31,9	127
53	2.33	$e_1 = 620 \sin(\omega t - 30^\circ)$, $e_2 = 440 \sin \omega t$	100	60	255	31,8
54	2.34	$e_1 = 705 \sin(\omega t + 60^\circ)$, $e_2 = 440 \sin \omega t$	100	80	159,4	53
55	2.35	$e_1 = 169 \sin(\omega t + 120^\circ)$, $e_2 = 113 \sin \omega t$	50	40	63,8	31,8
56	2.36	$e_1 = 325 \sin \omega t$, $e_2 = 423 \sin(\omega t + 60^\circ)$	100	-	191,2	39,8
57	2.37	$e_1 = 440 \sin \omega t$, $e_2 = 282 \sin(\omega t - 120^\circ)$	20	10	95,6	63,6
58	2.38	$e_1 = 70,5 \sin(\omega t + 60^\circ)$, $e_2 = 56,4 \sin \omega t$	2,5	50	79,7	63,6
59	2.39	$e_1 = 310 \sin(\omega t - 90^\circ)$, $e_2 = 169 \sin \omega t$	40	60	159,4	31,8
60	2.40	$e_1 = 141 \sin(\omega t + 120^\circ)$, $e_2 = 113 \sin \omega t$	50	-	127,6	79,5
61	2.21	$e_1 = 705 \sin(\omega t + 45^\circ)$, $e_2 = 325 \sin \omega t$	50	60	191,2	159
62	2.22	$e_1 = 84,6 \sin \omega t$, $e_2 = 100 \sin(\omega t - 45^\circ)$	10	6	31,9	398
63	2.23	$e_1 = 70,5 \sin \omega t$, $e_2 = 141 \sin(\omega t - 60^\circ)$	20	40	63,8	79,5
64	2.24	$e_1 = 440 \sin(\omega t + 120^\circ)$, $e_2 = 100 \sin \omega t$	50	-	127,6	63,6
65	2.25	$e_1 = 705 \sin \omega t$, $e_2 = 620 \sin(\omega t + 90^\circ)$	80	40	191,2	79,5
66	2.26	$e_1 = 620 \sin \omega t$, $e_2 = 536 \sin(\omega t - 90^\circ)$	100	80	255	31,8
67	2.27	$e_1 = 310 \sin(\omega t + 90^\circ)$, $e_2 = 169 \sin \omega t$	40	60	159,4	318
68	2.28	$e_1 = 378 \sin(\omega t + 180^\circ)$, $e_2 = 282 \sin \omega t$	-	50	79,7	63,6
69	2.29	$e_1 = 113 \sin \omega t$, $e_2 = 113 \sin(\omega t + 120^\circ)$	10	20	95,6	127

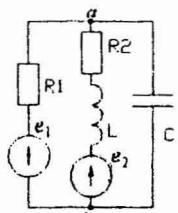


Рис. 2.21

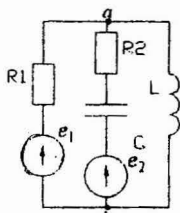


Рис. 2.22

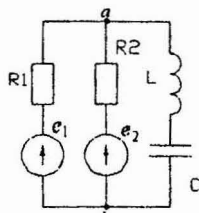


Рис. 2.23

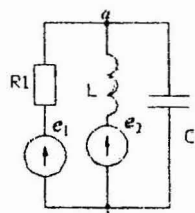


Рис. 2.24

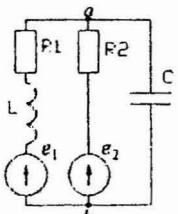


Рис. 2.25

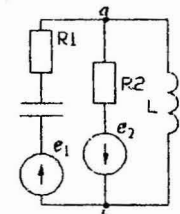


Рис. 2.26

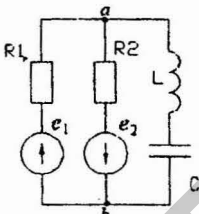


Рис. 2.27

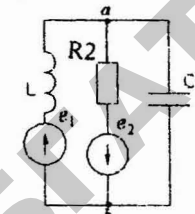


Рис. 2.28

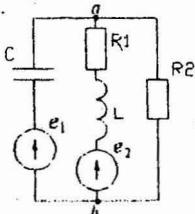


Рис. 2.29

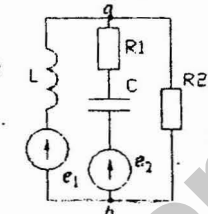


Рис. 2.30

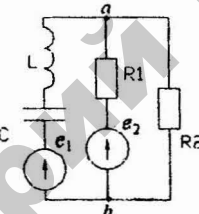


Рис. 2.31

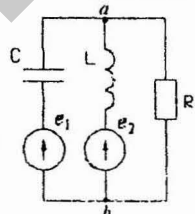


Рис. 2.32

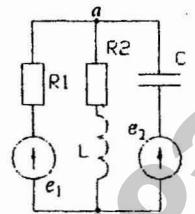


Рис. 2.33

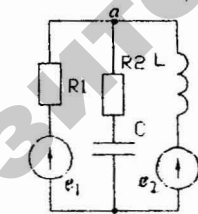


Рис. 2.34

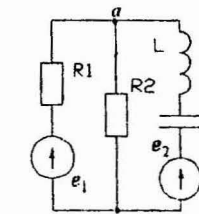


Рис. 2.35

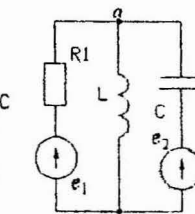


Рис. 2.36

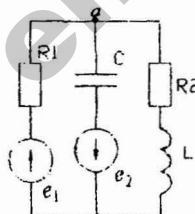


Рис. 2.37

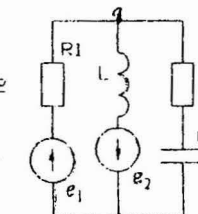


Рис. 2.38

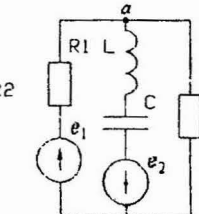


Рис. 2.39

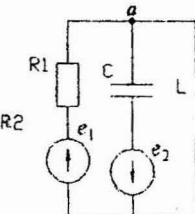


Рис. 2.40

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6	7
70	2.30	$e_1 = 211 \sin \omega t$, $e_2 = 197 \sin (\omega t - 90^\circ)$	60	80	255	159
71	2.31	$e_1 = 705 \sin (\omega t + 90^\circ)$, $e_2 = 440 \sin \omega t$	50	50	255	106
72	2.32	$e_1 = 179 \sin (\omega t - 90^\circ)$, $e_2 = 310 \sin \omega t$	25	-	63,8	79,5
73	2.33	$e_1 = 100 \sin (\omega t + 120^\circ)$, $e_2 = 70,5 \sin \omega t$	70	50	159,4	63,6
74	2.34	$e_1 = 536 \sin (\omega t + 90^\circ)$, $e_2 = 620 \sin \omega t$	80	100	255	31,8
75	2.35	$e_1 = 169 \sin \omega t$, $e_2 = 310 \sin (\omega t + 90^\circ)$	40	60	159,4	31,8
76	2.36	$e_1 = 282 \sin \omega t$, $e_2 = 141 \sin (\omega t + 60^\circ)$	100	-	638	31,8
77	2.37	$e_1 = 211 \sin (\omega t - 120^\circ)$, $e_2 = 127 \sin \omega t$	40	30	127,6	31,8
78	2.38	$e_1 = 98,7 \sin (\omega t + 120^\circ)$, $e_2 = 42,3 \sin \omega t$	10	6	31,9	398
79	2.39	$e_1 = 282 \sin (\omega t + 60^\circ)$, $e_2 = 141 \sin \omega t$	50	40	127,6	53
80	2.40	$e_1 = 211 \sin (\omega t - 120^\circ)$, $e_2 = 423 \sin \omega t$	100	-	319	16
81	2.21	$e_1 = 211 \sin \omega t$, $e_2 = 127 \sin (\omega t - 90^\circ)$	40	30	127,6	31,8
82	2.22	$e_1 = 42,3 \sin (\omega t + 30^\circ)$, $e_2 = 98,7 \sin \omega t$	5	3	16	796
83	2.23	$e_1 = 705 \sin (\omega t - 90^\circ)$, $e_2 = 423 \sin \omega t$	100	80	255	106
84	2.24	$e_1 = 423 \sin \omega t$, $e_2 = 282 \sin (\omega t + 45^\circ)$	40	-	159,4	39,8
85	2.25	$e_1 = 310 \sin \omega t$, $e_2 = 141 \sin (\omega t + 90^\circ)$	25	50	79,7	63,6
86	2.26	$e_1 = 141 \sin (\omega t - 60^\circ)$, $e_2 = 169 \sin \omega t$	80	100	319	53
87	2.27	$e_1 = 282 \sin (\omega t + 30^\circ)$, $e_2 = 141 \sin \omega t$	50	40	127,6	159
88	2.28	$e_1 = 423 \sin (\omega t + 90^\circ)$, $e_2 = 211 \sin \omega t$	-	30	95,6	53
89	2.29	$e_1 = 141 \sin (\omega t - 45^\circ)$, $e_2 = 141 \sin \omega t$	20	20	63,8	79,5
90	2.30	$e_1 = 325 \sin \omega t$, $e_2 = 423 \sin (\omega t + 90^\circ)$	40	25	79,7	159
91	2.31	$e_1 = 100 \sin (\omega t - 120^\circ)$, $e_2 = 100 \sin \omega t$	20	40	63,8	79,5
92	2.32	$e_1 = 310 \sin \omega t$, $e_2 = 310 \sin (\omega t + 90^\circ)$	40	-	127,6	39,8
93	2.33	$e_1 = 536 \sin \omega t$, $e_2 = 705 \sin (\omega t - 90^\circ)$	100	200	638	31,8
94	2.34	$e_1 = 98,7 \sin \omega t$, $e_2 = 84,6 \sin (\omega t + 30^\circ)$	5	3	16	796
95	2.35	$e_1 = 423 \sin \omega t$, $e_2 = 705 \sin (\omega t - 90^\circ)$	100	80	255	106
96	2.36	$e_1 = 353 \sin (\omega t + 180^\circ)$, $e_2 = 282 \sin \omega t$	40	-	638	63,6
97	2.37	$e_1 = 705 \sin (\omega t + 60^\circ)$, $e_2 = 564 \sin \omega t$	50	60	191,2	159
98	2.38	$e_1 = 100 \sin (\omega t - 45^\circ)$, $e_2 = 84,6 \sin \omega t$	10	6	31,9	398
99	2.39	$e_1 = 100 \sin (\omega t + 90^\circ)$, $e_2 = 141 \sin \omega t$	10	20	95,6	159
100	2.40	$e_1 = 169 \sin (\omega t - 90^\circ)$, $e_2 = 169 \sin \omega t$	20	-	63,8	159

2.2. Методические указания

Для выполнения задания необходимо изучить по учебникам следующие разделы: синусоидальный ток и основные характеризующие его величины (период T , частота f , угловая частота ω , амплитуда I_m , начальная фаза ψ); действующее значение тока; изображение синусоидально изменяющихся величин векторами на комплексной плоскости, синусоидальный ток в активном сопротивлении; индуктивность в цепи синусоидального тока; конденсатор в цепи синусоидального тока; основы символического метода расчета цепей синусоидального тока; комплексное сопротивление; закон Ома для цепи синусоидального тока; законы Кирхгофа в символической форме записи; активная, реактивная и полная мощности ([1], [3], глава третья).

При расчете цепей синусоидального тока необходимо учитывать не только активное сопротивление резистора R , но и индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$, создаваемое индуктивной катушкой, и емкостное сопротивление $X_C = \frac{1}{\omega C}$, создаваемое конденсатором.

Кроме того, синусоидальное напряжение на активном сопротивлении R совпадает по фазе с током, напряжение на индуктивности L опережает ток по времени на четверть периода T или по фазе на $\frac{\pi}{2}$, напряжение на емкости C отстает от тока по времени на четверть периода T или по фазе на $\frac{\pi}{2}$. Поэтому для расчета разветвленных цепей синусоидального тока наиболее целесообразным является комплексный метод (см. приложение 1).

Закон Ома в комплексной форме: комплексный ток \dot{I} через комплексное сопротивление \underline{Z} равен комплексному напряжению \dot{U} на этом комплексном сопротивлении, деленному на это комплексное сопротивление:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}}$$

Для участка цепи с последовательным соединением элементов R, L, C комплексное сопротивление $\underline{Z} = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}$, поэтому, закон Ома имеет

вид:
$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}} \quad \text{или} \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + jX_L - jX_C}$$

Первый закон Кирхгофа в комплексной форме: алгебраическая сумма комплексных токов в узле равна нулю:

$$\sum \dot{I} = 0$$

Второй закон Кирхгофа в комплексной форме: алгебраическая сумма комплексных ЭДС в замкнутом контуре, равна алгебраической сумме комплексных напряжений на сопротивлениях этого контура:

$$\sum \dot{E} = \sum \dot{I} \underline{Z}$$

Активная мощность в цепи синусоидального тока $P = UI \cos \varphi$.

Реактивная мощность $Q = UI \sin \varphi$.

Полная мощность $S = UI$.

В выражениях мощностей I и U — действующие значения тока и напряжения, φ — угол сдвига фаз между напряжением и током.

Основные законы, формулы и уравнения электротехники, соотношения между током и напряжением на элементах электрической цепи приведены в приложении 2.

Для расчета электрической цепи синусоидального тока со смешанным соединением приёмников так же как в цепях постоянного тока используют преобразование последовательно и параллельно соединенных сопротивлений в эквивалентное сопротивление.

Для расчета разветвленных цепей синусоидального тока с несколькими ЭДС используют метод уравнений Кирхгофа, метод контурных токов и в частном случае схемы только с двумя узлами – метод двух узлов. Все расчеты выполняют в комплексной форме.

2.3. Примеры

2.3.1. Расчет электрической цепи синусоидального тока со смешанным соединением приёмников (рис. 2.41).

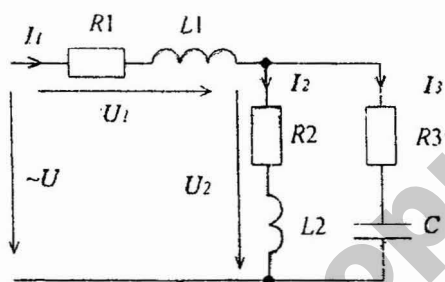


Рис. 2.41

В схеме электрической цепи

$U = 260 \text{ В}; \quad f = 50 \text{ Гц},$
 $R_1 = 6 \text{ Ом}, \quad R_2 = 10 \text{ Ом},$
 $R_3 = 10 \text{ Ом}, \quad L_1 = 57,33 \text{ мГн},$
 $L_2 = 95,55 \text{ мГн}, \quad C = 79,6 \text{ мкФ}.$

Определить токи и напряжения в ветвях цепи, рассчитать мощность на входе цепи по формуле $P = UI \cos \varphi$, проверить полученный результат по закону Джоуля-Ленца. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Решение

1. Указываем направления токов и напряжений в ветвях.
 2. Рассчитываем индуктивное и емкостное сопротивления.
- Угловая частота заданного синусоидального напряжения

$$\omega = 2\pi f = 314 \text{ рад/с}.$$

Тогда реактивные сопротивления:

$$X_{L1} = \omega L_1 = 314 \cdot 57,33 \cdot 10^{-3} = 18 \text{ Ом},$$

$$X'_{L2} = \omega L_2 = 314 \cdot 95,55 \cdot 10^{-3} = 30 \text{ Ом};$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 79,6 \cdot 10^{-6}} = 40 \text{ Ом}.$$

3. Записываем комплексные сопротивления ветвей:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = 6 + j18 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2 = 10 + j30 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 - j\frac{1}{\omega C} = 10 - j40 \text{ Ом}.$$

4. Рассчитываем эквивалентное сопротивление цепи по отношению к входным зажимам.

Сопротивления \underline{Z}_2 и \underline{Z}_3 соединены параллельно, поэтому их эквивалентное сопротивление

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{23} &= \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{(10 + j30)(10 - j40)}{20 - j10} = \frac{(1300 - j100)(20 + j10)}{20^2 + 10^2} = \\ &= 54 + j22 \text{ Ом}.\end{aligned}$$

Сопротивления \underline{Z}_1 и \underline{Z}_{23} соединены последовательно, значит их эквивалентное сопротивление

$$\underline{Z}_{\text{эк}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = 6 + j18 + 54 + j22 = 60 + j40 \text{ Ом}.$$

5. Рассчитываем токи и напряжения в ветвях цепи.

Ток на входе цепи определяем по закону Ома:

$$i = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_{\text{эк}}} = \frac{260}{60 + j40} = \frac{260 \cdot (60 - j40)}{60^2 + 40^2} = 3 - j2 \text{ А}.$$

Действующее значение тока $I_1 = \sqrt{3^2 + 2^2} = 3,6 \text{ А}.$

Напряжение U_2 на участке цепи с параллельным соединением ветвей можно найти двумя способами:

а) по второму закону Кирхгофа для левого контура электрической цепи

$$0 = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 - \dot{U}. \quad \text{Следовательно: } \dot{U}_2 = \dot{U} - \dot{U}_1, \text{ где}$$

$$\dot{U}_1 = i_1 \underline{Z}_1 = (3 - j2)(6 + j18) = 54 + j42 \text{ В};$$

$$\dot{U}_2 = 260 - (54 + j42) = 206 - j42 \text{ В}.$$

б) по закону Ома:

$$\dot{U}_2 = i_1 \underline{Z}_{23} = (3 - j2)(54 + j22) = 206 - j42 \text{ В}.$$

Действующие значения напряжений:

$$U_1 = \sqrt{54^2 + 42^2} = 68,4 \text{ В},$$

$$U_2 = \sqrt{206^2 + 42^2} = 210,2 \text{ В}.$$

Токи в параллельных ветвях находим по закону Ома:

$$i_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_2} = \frac{206 - j42}{10 + j30} = \frac{(206 - j42)(10 - j30)}{10^2 + 30^2} = 0,8 - j6,6 \text{ А};$$

$$i_3 = \frac{\dot{U}_2}{Z_3} = \frac{206 - j42}{10 - j40} = \frac{(206 - j42)(10 + j40)}{10^2 + 40^2} = 2,2 + j4,6 \text{ А}.$$

Действующие значения токов:

$$I_2 = \sqrt{0,8^2 + 6,6^2} = 6,65 \text{ А},$$

$$I_3 = \sqrt{2,2^2 + 4,6^2} = 5,1 \text{ А}.$$

Проверка по первому закону Кирхгофа:

$$i_1 = i_2 + i_3 = 0,8 - j6,6 + 2,2 + j4,6 = 3 - j2 \text{ А}.$$

5. Рассчитываем активную мощность цепи по формуле

$$P = UI_1 \cos \varphi.$$

Угол φ - сдвиг тока по фазе относительно напряжения на входе цепи.

Его можно определить пользуясь эквивалентным сопротивлением цепи

$$Z_{\text{эк}} = 60 + j40 \text{ Ом}.$$

В этом выражении $R_{\text{эк}} = 60 \text{ Ом}$; $X_{\text{эк}} = 40 \text{ Ом}$.

Из прямоугольного треугольника сопротивлений (рис. 2.42)

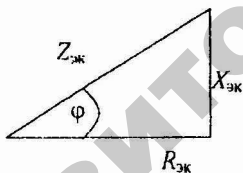


Рис. 2.42. Треугольник сопротивлений

$$\varphi = \arctg \frac{X_{\text{эк}}}{R_{\text{эк}}} = \arctg \frac{40}{60} = 33,7^\circ;$$

$$\cos \varphi = \frac{R_{\text{эк}}}{Z_{\text{эк}}} = \frac{60}{\sqrt{60^2 + 40^2}} = 0,832.$$

Следовательно: $P = 260 \cdot 3,6 \cdot 0,832 = 778,7 \text{ Вт}$.

Рассчитываем активную мощность по закону Джоуля-Ленца

$$P = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 = 3,6^2 \cdot 2 + 6,65^2 \cdot 10 + 5,1^2 \cdot 10 = 780 \approx 778,7 \text{ Вт}.$$

Мощность и токи цепи рассчитаны правильно.

7. Строим векторную диаграмму напряжений и токов (рис. 2.43).

Выбираем масштабы $m_u = 20$ В/см; $m_i = 1$ А/см.

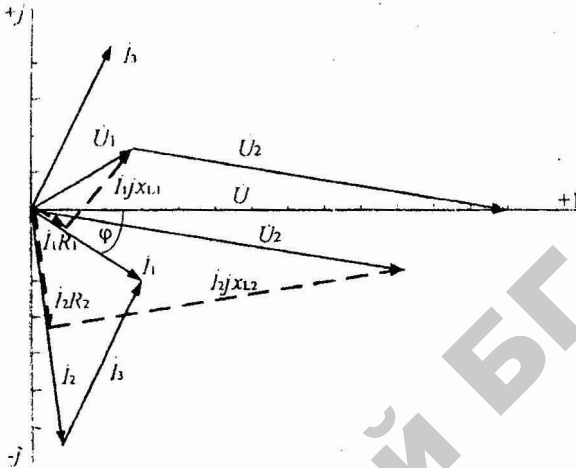


Рис. 2.43. Векторная диаграмма напряжений и токов

На векторной диаграмме (рис.2.43) показываем угол φ и складываем векторы токов и напряжений в соответствии с первым и вторым законами

Кирхгофа: $i_1 = i_2 + i_3$; $U = U_1 + U_2$.

Пунктиром показано разложение напряжений U_1 и U_2 на активную и реактивную составляющие.

2.3.2. Расчет разветвленной электрической цепи синусоидального тока с несколькими ЭДС.

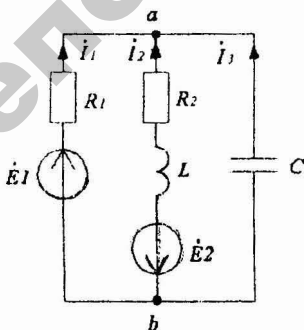


Рис. 2.44

В схеме электрической цепи (рис. 2.44) $e_1 = 169 \sin(\omega t + 60^\circ)$ В, $e_2 = 127 \sin \omega t$ В, $R_1 = 40$ Ом, $R_2 = 60$ Ом, $L = 255$ мГн, $C = 79,5$ мкФ, $f = 50$ Гц. Рассчитать токи в ветвях методом двух узлов. Составить баланс активных мощностей. Записать мгновенное значение тока любой ветви и построить график зависимости этого тока от времени.

Реше

1. Выбираем произвольно направл токов в ветвях. Для единообразия рекомендуется в схеме с двумя узлааправлять токи к одному узлу.

2. Записываем комплексные действующие значения ЭДС:

$$\dot{E}_1 = \frac{169}{\sqrt{2}} e^{j60^\circ} = 120 e^{j60^\circ} = 120(\cos 60^\circ + j \sin 60^\circ) = 120(0,5 + j0,866) = 60 + j104 \text{ В};$$

$$\dot{E}_2 = \frac{127}{\sqrt{2}} = 90 \text{ В}.$$

Записываем комплексные сопротивления ветвей

$$\underline{Z}_1 = R_1 = 40 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L = R_2 + j2\pi fL = 60 + j \cdot 255 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 60 + j80 = 100 e^{j53^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = -j \frac{1}{\omega C} = -j \frac{1}{2\pi fC} = -j \frac{1}{314 \cdot 10^{-6}} = -j40 = 40 e^{-j90^\circ} \text{ Ом}.$$

3. Для расчетов токов в ветвях испедем метод двух узлов. Напряжение между двумя узлами цепи определяют ормуне

$$\dot{U}_{ab} = \frac{\sum \dot{E}_k \underline{Y}_k}{\sum \underline{Y}_k},$$

где \underline{Y}_k – комплексная проводимость k ветви.

Рассчитаем комплексные проводимости ветвей

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{40} = 0,025 \text{ См};$$

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{60 + j80} = \frac{60 - j80}{60^2 + 80^2} = 6 - j0,008 = 0,01 e^{-j53^\circ} \text{ См};$$

$$\underline{Y}_3 = \frac{1}{\underline{Z}_3} = \frac{1}{-j40} = j0,025 = 0,025 \text{ См}.$$

Подставляем комплексные значения ЭДС и проводимостей в формулу для определения напряжения \dot{U}_{ab} . Погон ЭДС, направленная к узлу a , входит в формулу с плюсом, ЭДС направленная от узла a , входит в формулу с минусом. Тогда напряжение между двумя узлами

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{ab} &= \frac{\dot{E}_1 Y_1 - \dot{E}_2 Y_2}{Y_1 + Y_2 + Y_3} = \frac{(60 + j104) \cdot 0,025 - 90(0,006 - j0,008)}{0,025 + 0,006 - j0,008 + j0,025} = \\
 &= \frac{0,96 + j3,32}{0,031 + j0,017} = \frac{3,456 \cdot e^{j73,87^\circ}}{0,0353 \cdot e^{j28,73^\circ}} = 97,9 \cdot e^{j45,14^\circ} = 69 + j69,4 \text{ В.}
 \end{aligned}$$

Токи в ветвях находим по закону Ома для участка цепи с ЭДС. Ток в первой ветви

$$i_1 = \frac{\dot{E}_1 - U_{ab}}{Z_1} = \frac{60 + j104 - 69 - j69,4}{40} = -0,225 + j0,866 \text{ А.}$$

Действующее значение тока $I_1 = \sqrt{0,225^2 + 0,866^2} = 0,894 \text{ А.}$

Начальная фаза тока $\psi_{i1} = \arctg \frac{0,866}{-0,225} = -75,5^\circ + 180^\circ = 104,5^\circ.$

Комплексное значение тока в показательной форме

$$i_1 = 0,894 e^{j104,5^\circ} \text{ А.}$$

При определении начальной фазы тока необходимо учитывать положение

вектора на комплексной плоскости. Вектор тока I_1 расположен во второй четверти комплексной плоскости (рис. 2.45), следовательно, его начальная фаза должна быть больше 90° и меньше 180° . Поэтому при расчете фазы добавлен угол 180° .

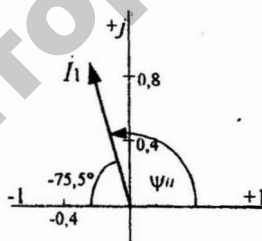


Рис. 2.45

Ток во второй ветви

$$\begin{aligned}
 i_2 &= \frac{-\dot{E}_2 - U_{ab}}{Z_2} = \frac{-90 - 69 - j69,4}{60 + j30} = \frac{173,5 \cdot e^{j203,6^\circ}}{100 \cdot e^{j53^\circ}} = 1,735 e^{j150,6^\circ} = \\
 &= -1,51 + j0,852 \text{ А.}
 \end{aligned}$$

Ток в третьей ветви

$$i_3 = \frac{-\dot{U}_{ab}}{Z_3} = \frac{-69 - j69,4}{-j40} = 1,735 - j1,72 = 3e^{-j45^\circ} \text{ А.}$$

Проверка по первому закону Кирхгофа:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \\ -0,226 + j0,866 - 1,51 + j0,852 + 1,735 - j1,72 = -0,000 - j0,002 \approx 0$$

4. Составляем баланс активных мощностей. Активная мощность источников ЭДС должна равняться активной мощности потребителей.

Активная мощность первого источника ЭДС

$$P_1 = E_1 I_1 \cos \left(\overset{\wedge}{\dot{E}_1} \overset{\wedge}{\dot{I}_1} \right).$$

Угол сдвига тока \hat{I}_1 по фазе относительно ЭДС \hat{E}_1 находим как разность начальных фаз ЭДС и тока

$$\left(\overset{\wedge}{\dot{E}_1} \overset{\wedge}{\dot{I}_1} \right) = \psi_{e2} - \psi_{i1} = 60^\circ - 104,5^\circ = -44,5^\circ$$

Тогда активная мощность

$$P_1 = 120 \cdot 0,894 \cdot \cos(-44,5^\circ) = 76,51 \text{ Вт.}$$

Активная мощность второго источника ЭДС

$$P_2 = -E_2 I_2 \cos \left(\overset{\wedge}{\dot{E}_2} \overset{\wedge}{\dot{I}_2} \right).$$

ЭДС \hat{E}_2 взята со знаком минус, так как она противоположна току.

$$\left(\overset{\wedge}{\dot{E}_2} \overset{\wedge}{\dot{I}_2} \right) = \psi_{e2} - \psi_{i2} = 0 - 150,6^\circ = -150,6^\circ$$

Активная мощность второго источника ЭДС

$$P_2 = -90 \cdot 1,735 \cos(-150,6^\circ) = 136 \text{ Вт.}$$

Мощность всех источников ЭДС:

$$P_{\text{ист}} = P_1 + P_2 = 76,51 + 136 = 212,51 \text{ Вт.}$$

Активную мощность потребителей рассчитываем по закону Джоуля-Ленца:

$$P_{\text{потр}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = 0,894^2 \cdot 40 + 1,735^2 \cdot 60 = 31,96 + 180,6 = 212,56 \text{ Вт.}$$

$$P_{\text{ист}} = P_{\text{потр}},$$

5. Запишем мгновенное значение тока i_1 в первой ветви и построим график этого тока в зависимости от времени.

Комплексное значение тока

$$i_1 = 0,894 e^{j104,5^\circ} \text{ А.}$$

Мгновенное значение

$$i_1 = I_m \sin(\omega t + \psi_{i1}) = \sqrt{2} \cdot 0,894 \sin(\omega t + 104,5^\circ) = 1,26 \sin(\omega t + 104,5^\circ) \text{ А.}$$

Для удобства построения графика $i_1 = f(t)$ рекомендуется аргумент синуса ωt нанести в градусах в масштабе $m = 30$ град/см. Если начальная фаза положительна, то начало синусоиды сдвинуто влево от начала координат, если начальная фаза отрицательна, то начало синусоиды сдвинуто вправо от начала координат. На графике показываем один полный период синусоиды, отмечаем начальную фазу ψ , амплитуду I_m и период T (рис. 2.46).

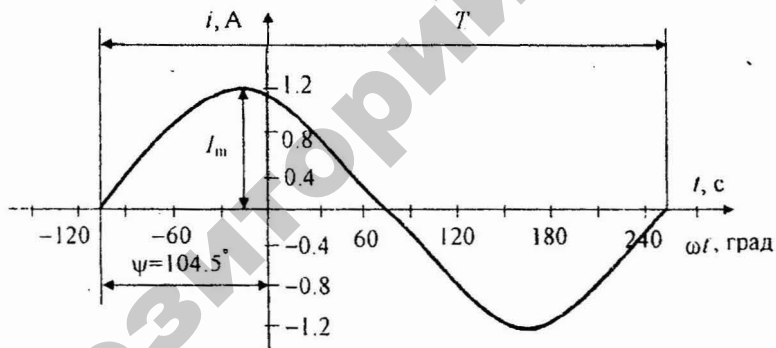


Рис. 2.46. График мгновенного значения тока

3. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

3.1. Контрольное задание 3

Задание состоит из двух задач: первая – по расчету трехфазной цепи с одним приемником, вторая – по расчету трехфазной цепи с несколькими приемниками.

Задача 3.1. Симметричный трехфазный приемник присоединен к сети, линейные напряжения которой симметричны. Линейное напряжение U_L сети и комплексное сопротивление одной фазы приемника Z приведены в табл. 3.1.

Требуется:

1. Начертить схемы трехфазных цепей, соединив фазы приемника в одной схеме звездой, в другой – треугольником. На схемах указать положительные направления напряжений и токов приемников.

2. Для каждой из схем: записать в комплексном виде системы линейных и фазных напряжений на приемнике; рассчитать линейные и фазные токи, активную, реактивную и полную мощности приемников; построить векторные диаграммы напряжений и токов.

3.1. Варианты и исходные данные задачи 3.1

Вариант	Линейное напряжение источника U_L , В	Сопротивление одной фазы потребителя Z , Ом	Вариант	Линейное напряжение источника U_L , В	Сопротивление одной фазы потребителя Z , Ом
01	220	$3 + j4$	21	660	$8 + j6$
02	380	$6 + j8$	22	220	$8 - j6$
03	660	$3 - j4$	23	380	$4 + j3$
04	220	$6 - j8$	24	660	$8 - j6$
05	380	10	25	220	$4 - j3$
06	660	$6 + j8$	26	380	$8 + j6$
07	220	$3 - j4$	27	660	$4 + j3$
08	380	$6 - j8$	28	220	$8 + j6$
09	660	$3 + j4$	29	380	$8 - j6$
10	220	$6 + j8$	30	660	$4 - j3$
11	380	20	31	220	$30 + j40$
12	660	$6 - j8$	32	380	$60 + j80$
13	220	10	33	660	$30 + j40$
14	380	$3 + j4$	34	220	$30 - j40$
15	660	20	35	380	$60 - j80$
16	220	20	36	660	$30 - j40$
17	380	$3 - j4$	37	220	$40 + j30$
18	660	30	38	380	$80 - j60$
19	220	$4 + j3$	39	660	$40 - j30$
20	380	$4 - j3$	40	220	$40 - j30$

Продолжение таблицы 3.1

Вариант	Линейное напряжение источника $U_{л}, В$	Сопrotивление одной фазы потребителя $Z, Ом$	Вариант	Линейное напряжение источника $U_{л}, В$	Сопrotивление одной фазы потребителя $Z, Ом$
41	380	80 -j60	71	380	20 +j10
42	660	40 +j30	72	660	10 +j20
43	220	60 -j80	73	220	10 -j20
44	380	30 -j40	74	380	20 -j10
45	660	60 +j80	75	660	10 -j20
46	220	60 +j80	76	220	20 +j10
47	380	30 +j40	77	380	10 +j20
48	660	60 -j80	78	660	20 -j10
49	220	80 +j60	79	220	20 -j10
50	380	40 -j30	80	380	10 -j20
51	660	80 +j60	81	660	20 +j10
52	220	80 -j60	82	220	30 +j20
53	380	40 +j30	83	380	20 -j30
54	660	80 -j60	84	660	30 +j20
55	220	50	85	220	30 -j20
56	380	100	86	380	20 +j30
57	660	200	87	660	3 -j20
58	220	10 +j10	88	220	20 +j30
59	380	10 +j10	89	380	30 -j20
60	660	10 +j10	90	660	20 +j30
61	220	10 -j10	91	220	20 -j30
62	380	10 -j10	92	380	30 +j20
63	660	10 -j10	93	660	20 -j30
64	220	5 +j5	94	220	40 +j20
65	380	5 +j5	95	380	20 -j40
66	660	5 +j5	96	660	40 -j20
67	220	5 -j5	97	220	40 -j20
68	380	5 -j5	98	380	20 +j40
69	660	5 -j5	99	660	20 -j40
70	220	10 +j20	100	220	20 +j40

Задача 3.2. Для трехфазной цепи напряжением 380/220 В, в начале которой включен электродвигатель, а в конце электрическая печь, соединенная треугольником, требуется:

1. Выбрать схему соединения электродвигателя и начертить схему цепи.
2. Определить фазные токи приемников и ток на входе цепи.
3. Определить активную мощность цепи по формуле $P = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \cos \varphi$ и по закону Джоуля-Ленца.
4. Определить токи в этой же цепи для случая, когда одно из сопротивлений фаз печи или одно из сопротивлений проводов линии передачи изменилось по величине. Остальные сопротивления остались без изменения.

Номинальное напряжение электродвигателя $U_{д}$, номинальная мощность электродвигателя $P_{д}$ (полезная мощность на), комплексное сопротивление провода линии электропередачи $Z_{л}$, совлечение фазы электрической печи $R_{п}$ и изменившееся сопротивление o провода линии или одной фазы печи приведены в табл. 3.2.

Для всех вариантов задания принять коэффициент мощности электродвигателя $\cos \varphi_{д} = 0,8$ и коэффициент полезного действия электродвигателя $\eta_{д} = 0,85$.

3.2. Варианты и исходные данные задач

Вариант	Симметричный режим					Несимметричный режим	
	Номинальная мощность двигателя $P_{д}$, кВт	Номинальное напряжение двигателя $U_{д}$, В	Сопротивление-проводности одного фазового провода линии электропередачи $Z_{л}$, Ом		Изменившееся сопротивление одного провода линии или одной фазы печи		
			$Z_{л}$, Ом	$r_{л}$, Ом	$Z_{п}$, Ом	$R_{п}$, Ом	
1	2	3	4	5	6	7	
01	1,1	380/220	6 + j12	30	$Z_{л1} = 2 + j6$	-	
02	1,5	380/220	1 + j8	24	-	$R_{аб} = 10$	
03	2,0	380/220	3 + j3	33	$Z_{лс} = 1 + j1$	-	
04	2,2	380/220	2 + j4	27	$Z_{лв} = 2$	-	
05	3,0	380/220	5 + j10	21	-	$R_{bc} = 5$	
06	4,0	380/220	4 + j25	45	$Z_{л1} = 4 + j10$	-	
07	5,5	380/220	8 + j8	36	-	$R_{ca} = 20$	
08	7,5	380/220	10 + j10	60	$Z_{лв} = 5 + j5$	-	
09	11,0	380/220	12 + j6	90	$Z_{лс} = 12 + j2$	-	
10	15,0	660/380	20 + j20	63	-	$R_{аб} = 8$	
11	18,5	660/380	6 + j15	12	$Z_{л1} = 6 + j10$	-	
12	22,0	660/380	25 + j10	30	-	$R_{bc} = 4$	
13	30,0	660/380	30 + j10	48	$Z_{лв} = 15 + j10$	-	
14	37,0	660/380	6 + j8	12	-	$R_{ca} = 10$	
15	45,0	660/380	10 + j15	18	$Z_{лс} = 10 + j10$	-	
16	1,1	660/380	12 + j6	21	-	$R_{аб} = 5$	
17	1,5	660/380	2 + j6	15	$Z_{л1} = 4 + j4$	-	
18	2,0	660/380	6 + j2	30	-	$R_{bc} = 6$	
19	2,2	660/380	4 + j4	18	$Z_{лв} = 6 + j8$	-	
20	3,0	660/380	7 + j7	21	-	$R_{ca} = 15$	
21	4,0	660/380	9 + j2	27	$Z_{лс} = 9 + j8$	-	
22	5,5	660/380	11 + j3	33	-	$R_{аб} = 20$	
23	7,5	660/380	12 + j5	36	-	$R_{ca} = 18$	
24	11,0	660/380	6 + j8	18	$Z_{лв} = 8 + j6$	-	
25	15,0	380/220	4 + j3	15	-	$R_{bc} = 30$	
26	18,5	380/220	8 + j6	12	$Z_{лв} = 10$	-	

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6	7
27	22,0	380/220	10 + j10	24	-	Rca = 18
28	30,0	380/220	17 + j12	36	Z _{Лс} = 20	-
29	37,0	380/220	12 + j14	45	-	Rab = 40
30	45,0	380/220	6 + j10	18	Z _{Лв} = 6 + j4	-
31	1,1	380/220	12 + j6	30	-	Rbc = 20
32	1,5	380/220	2 + j8	12	Z _{Лв} = 2 + j2	-
33	2,0	380/220	3 + j6	15	-	Rca = 10
34	2,2	380/220	4 + j3	21	Z _{Лс} = 3 + j2	-
35	3,0	380/220	5 + j5	18	-	Rab = 12
36	4,0	380/220	5 + j10	15	Z _{Лв} = 5 + j5	-
37	5,5	380/220	10 + j10	30	-	Rbc = 40
38	7,5	380/220	8 + j6	63	Z _{Лв} = 6 + j8	-
39	11,0	380/220	6 + j2	33	-	Rca = 21
40	15,0	660/380	20 + j10	21	Z _{Лв} = 10 + j20	-
41	18,5	660/380	20 + j30	45	-	Rab = 30
42	22,0	660/380	30 + j20	48	Z _{Лс} = 20 + j30	-
43	30,0	660/380	10 + j20	36	-	Rbc = 50
44	37,0	660/380	15 + j10	45	Z _{Лв} = 10 + j15	-
45	45,0	660/380	15 + j7	30	-	Rca = 20
46	1,1	660/380	7 + j15	39	Z _{Лв} = 15 + j7	-
47	1,5	660/380	30 + j10	60	-	Rab = 45
48	2,0	660/380	10 + j30	90	Z _{Лс} = 20 + j10	-
49	2,2	660/380	3 + j4	36	-	Rbc = 24
50	3,0	660/380	4 + j3	18	Z _{Лв} = 3 + j1	-
51	4,0	660/380	9 + j6	33	-	Rca = 40
52	5,5	660/380	6 + j9	42	Z _{Лв} = 9 + j6	-
53	7,5	660/380	8 + j4	36	-	Rab = 30
54	11,0	660/380	4 + j8	48	Z _{Лс} = 8 + j4	-
55	15,0	380/220	9 + j1	63	-	Rbc = 50
56	18,5	380/220	9 + j3	33	Z _{Лв} = 3 + j9	-
57	22,0	380/220	9 + j5	48	-	Rca = 60
58	30,0	380/220	22 + j3	24	Z _{Лв} = 3 + j12	-
59	37,0	380/220	22 + j8	9	-	Rab = 15
60	45,0	380/220	22 + j13	12	Z _{Лс} = 13 + j12	-
61	1,1	380/220	13 + j7	21	-	Rbc = 30
62	1,5	380/220	13 + j12	51	Z _{Лв} = 8 + j6	-
63	2,0	380/220	13 + j17	12	-	Rca = 20
64	2,2	380/220	7 + j13	69	Z _{Лв} = 13 + j7	-
65	3,0	380/220	8 + j22	66	-	Rab = 25
66	4,0	380/220	13 + j2	15	Z _{Лс} = 2 + j8	-
67	5,5	380/220	3 + j22	21	-	Rbc = 30
68	7,5	380/220	6 + j19	42	Z _{Лв} = 11 + j7	-
69	11,0	380/220	6 + j9	27	-	Rca = 20
70	15,0	660/380	12 + j12	9	Z _{Лв} = 10 + j5	-
71	18,5	660/380	13 + j13	51	-	Rab = 60

1	2	3	4	5	6	7
72	22,0	660/380	$4 + j11$	48	$Z_{\text{Лс}} = 4$	-
73	30,0	660/380	$16 + j4$	18	-	$R_{bc} = 15$
74	37,0	660/380	$16 + j9$	12	$Z_{\text{Лл}} = 9 + j16$	-
75	45,0	660/380	$16 + j8$	27	-	$R_{ca} = 15$
76	1,1	660/380	$14 + j6$	18	$Z_{\text{Лв}} = 6 + j8$	-
77	1,5	660/380	$10 + j14$	30	-	$R_{ab} = 45$
78	2,0	660/380	$10 + j7$	60	$Z_{\text{Лс}} = 7 + j10$	-
79	2,2	660/380	$7 + j18$	15	-	$R_{bc} = 30$
80	3,0	660/380	$18 + j7$	12	$Z_{\text{Лл}} = 7 + j18$	-
81	4,0	660/380	$22 + j3$	21	-	$R_{ca} = 18$
82	5,5	660/380	$20 + j10$	18	$Z_{\text{Лв}} = 10 + j20$	-
83	7,5	660/380	$22 + j8$	27	-	$R_{ab} = 16$
84	11,0	380/220	$18 + j7$	30	$Z_{\text{Лс}} = 7 + j18$	-
85	15,0	380/220	$23 + j12$	60	-	$R_{bc} = 80$
86	18,5	380/220	$26 + j14$	45	$Z_{\text{Лл}} = 14 + j20$	-
87	22,0	380/220	$11 + j19$	33	-	$R_{ca} = 24$
88	30,0	380/220	$30 + j10$	30	$Z_{\text{Лв}} = 10 + j30$	-
89	37,0	380/220	$20 + j20$	15	-	$R_{ab} = 20$
90	45,0	660/380	$15 + j15$	45	$Z_{\text{Лс}} = 10 + j10$	-
91	1,1	660/380	$12 + j12$	36	-	$R_{bc} = 80$
92	1,5	660/380	$16 + j16$	27	$Z_{\text{Лл}} = 20 + j20$	-
93	2,0	380/220	$6 + j6$	36	-	$R_{ca} = 18$
94	2,2	380/220	$9 + j3$	27	$Z_{\text{Лв}} = 3 + j9$	-
95	3,0	380/220	$12 + j8$	18	-	$R_{ab} = 24$
96	4,0	380/220	$15 + j10$	15	$Z_{\text{Лс}} = 10 + j5$	-
97	5,5	380/220	$10 + j3$	30	-	$R_{bc} = 40$
98	11,0	380/220	$12 + j6$	36	$Z_{\text{Лл}} = 6 + j6$	-
99	30,0	660/380	$24 + j12$	33	-	$R_{ca} = 24$
100	45,0	380/220	$12 + j24$	54	$Z_{\text{Лв}} = 20 + j6$	-

3.2. Методические указания

Для выполнения задания необходимо изучить принцип действия трехфазного генератора, понятие трехфазной системы ЭДС, трехфазной цепи, основные схемы соединения трехфазных цепей, определение линейных и фазных величин, соотношения между ними при соединении звездой и треугольником, расчет трехфазных цепей с одним и несколькими потребителями при симметричном и несимметричном режимах, мощности в трехфазных цепях. Указанные вопросы изложены в литературе [1] §§ 6.1...6.11, 6.13...6.14; [3] §§ 10.1...10.7.

Источник питания (генератор, трансформатор) имеет симметричную трехфазную систему напряжений (ЭДС). Если принять начальную фазу напряжения фазы A равной нулю, то трехфазную систему напряжений можно записать следующим образом:

а) мгновенные значения

$$u_A = U_m \sin \omega t; \quad u_B = U_m \sin (\omega t - 120^\circ);$$

$$u_C = U_m \sin (\omega t + 120^\circ);$$

б) комплексные значения

$$\dot{U}_A = U; \quad \dot{U}_B = U \cdot e^{-j120^\circ} = U(\cos 120^\circ - j\sin 120^\circ) = U(-0,5 - j0,866);$$

$$\dot{U}_C = U \cdot e^{j120^\circ} = U(\cos 120^\circ + j\sin 120^\circ) = U(-0,5 + j0,866),$$

где $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ – действующее значение напряжения, В; U_m – амплитудное

значение напряжения, В.

Векторная диаграмма напряжений представлена на рис. 3.1.

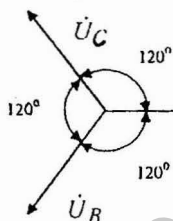


Рис. 3.1. Векторная диаграмма напряжений генератора

Основные схемы соединения обмоток трехфазного генератора и сопротивлений трехфазного приемника – трехлучевые звезда и треугольник (рис. 3.2...3.4).

При соединении приемника звездой возможны схемы с нейтральным проводом (рис. 3.2) и без нейтрального провода (рис. 3.3). В расчетах обычно сопротивлением нейтрального провода пренебрегают, т.е. принимают $Z_N = 0$. Если нейтральный провод отсутствует, считают, что $Z_N = \infty$.

Различают два режима работы трехфазной цепи:

а) симметричный, когда комплексные сопротивления фаз приемника одинаковы, т.е. при соединении звездой $Z_A = Z_B = Z_C$, а при соединении треугольником $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$;

б) несимметричный, когда комплексные сопротивления фаз приемника различны.

В задании расчета трехфазных цепей с одним приемником обычно заданы линейное напряжение источника U_d и комплексные сопротивления фаз приемника. Задачей расчета является определение фазных и линейных токов и мощностей в трехфазной цепи.

3.2.1. Расчет трехфазной цепи при соединении звездой с нейтральным проводом

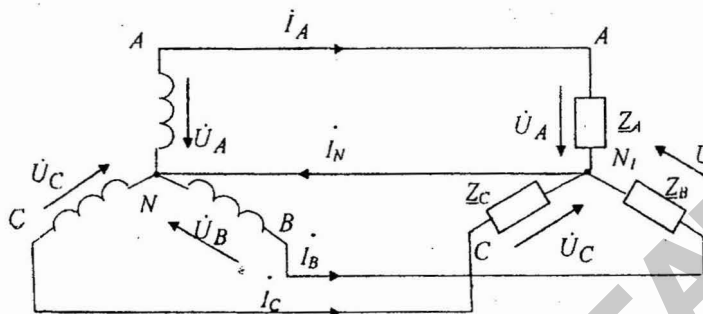


Рис. 3.2. Схема соединения фаз генератора и приемника звездой с нейтральным проводом

При симметричном режиме $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$. Сопротивление нейтрального провода $\underline{Z}_N = 0$. Напряжения на фазах потребителя равны фазным напряжениям генератора

$$\dot{U}_A = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} = U_A; \quad \dot{U}_B = U_A \cdot e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_C = U_A \cdot e^{j120^\circ}.$$

Как правило, при симметричной нагрузке ток определяют в одной из

фаз; например в фазе A, $i_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A}$.

Тогда в силу симметрии токи в других фазах

$$i_B = i_A \cdot e^{-j120^\circ}; \quad i_C = i_A \cdot e^{j120^\circ}$$

По первому закону Кирхгофа ток в нейтральном проводе

$$\begin{aligned} i_N &= i_A + i_B + i_C = i_A \cdot (1 + e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ}) = \\ &= i_A (1 - 0,5 - j0,866 - 0,5 + j0,866) = 0. \end{aligned}$$

Значит, при симметричной нагрузке нейтральный провод может отсутствовать.

Активную P , реактивную Q и полную S мощности симметричного трехфазного приемника определяют по формулам:

$$P = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cos \varphi; \quad (3.1)$$

$$Q = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin \varphi; \quad (3.2)$$

$$S = 3U_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (3.3)$$

где U_{ϕ} , I_{ϕ} – действующие значения фазного напряжения и фазного тока;
 $U_{Л}$, $I_{Л}$ – действующие значения линейного напряжения и линейного тока;

$\varphi = \arctg \frac{X}{R}$ – угол сдвига между фазным напряжением и фазным током;

X , R – реактивная и активная составляющие комплексного сопротивления фазы потребителя.

При несимметричном режиме ($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$). При наличии нейтрального провода ($Z_N = 0$) фазные напряжения приемника равны фазным напряжениям генератора.

Токи в фазах приемника находят по закону Ома:

$$i_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A}; \quad i_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \frac{\dot{U}_A \cdot e^{-j120^\circ}}{Z_B}; \quad i_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{\dot{U}_A \cdot e^{j120^\circ}}{Z_C}.$$

Ток в нейтральном проводе $i_N = i_A + i_B + i_C$.

Углы сдвига фаз определяются параметрами фаз приемника

$$\varphi_A = \arctg \frac{X_A}{R_A}; \quad \varphi_B = \arctg \frac{X_B}{R_B}; \quad \varphi_C = \arctg \frac{X_C}{R_C}.$$

Активную, реактивную и полную мощности несимметричного трехфазного приемника определяют по формулам:

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C; \quad (3.4)$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C; \quad (3.5)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (3.6)$$

3.2.2. Расчет трехфазной цепи при соединении звездой без нейтрального провода

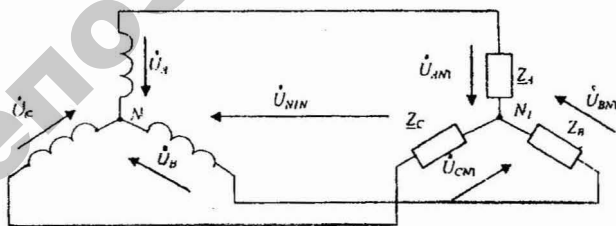


Рис. 3.3. Схема соединения фаз генератора и приемника звездой без нейтрального провода

При симметричном режиме $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$. Так как нейтральный провод отсутствует, то $\underline{Z}_N = \infty$. Методика расчета данной цепи такая же как и при наличии нейтрального провода.

При несимметричном режиме ($\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$) и отсутствии нейтрального провода ($\underline{Z}_N = \infty$) напряжение на фазах приемника будет отличаться от фазных напряжений генератора на величину напряжения между нейтральными точками.

Согласно методу двух узлов напряжение между нейтральными точками

$$\dot{U}_{N_1N} = \frac{\frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} + \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} + \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C}}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}}$$

Напряжения на фазах потребителя определяют по второму закону Кирхгофа

$$\dot{U}_{AN_1} = \dot{U}_A - \dot{U}_{N_1N}; \quad \dot{U}_{BN_1} = \dot{U}_B - \dot{U}_{N_1N}; \quad \dot{U}_{CN_1} = \dot{U}_C - \dot{U}_{N_1N}$$

Токи в фазах находят по закону Ома

$$i_A = \frac{\dot{U}_{AN_1}}{\underline{Z}_A}; \quad i_B = \frac{\dot{U}_{BN_1}}{\underline{Z}_B}; \quad i_C = \frac{\dot{U}_{CN_1}}{\underline{Z}_C}$$

Активную, реактивную и полную мощности несимметричной трехфазной цепи определяют по формулам (3.4...3.6)

3.2.3. Расчет трехфазной цепи при соединении треугольником

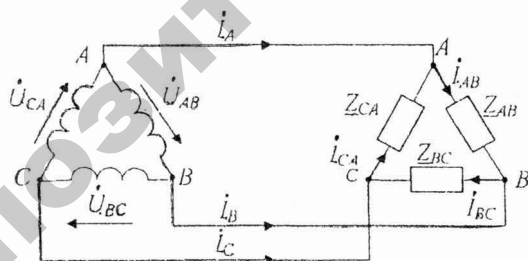


Рис. 3.4. Схема соединения фаз генератора и приемника треугольником

При соединении треугольником (рис. 3.4) линейное напряжение равно фазному, значит можно принять в комплексной форме $\dot{U}_{AB} = U_{\Delta}$.

При несимметричном режиме ($Z_{AB} \neq Z_{BC} \neq Z_{CA}$) токи в фазах приемника не равны друг другу по модулю

$$\dot{i}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}}; \dot{i}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{\dot{U}_{AB} \cdot e^{-j120^\circ}}{Z_{BC}}; \dot{i}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{\dot{U}_{AB} \cdot e^{j120^\circ}}{Z_{CA}}$$

и имеют различные углы сдвига относительно своих напряжений

$$\varphi_{AB} = \arctg \frac{X_{AB}}{R_{AB}}; \varphi_{BC} = \arctg \frac{X_{BC}}{R_{BC}}; \varphi_{CA} = \arctg \frac{X_{CA}}{R_{CA}}$$

Линейные комплексные токи определяют по первому закону Кирхгофа как разность соответствующих комплексных фазных токов

$$\dot{i}_A = \dot{i}_{AB} - \dot{i}_{CA}; \dot{i}_B = \dot{i}_{BC} - \dot{i}_{AB}; \dot{i}_C = \dot{i}_{CA} - \dot{i}_{BC}$$

Активную, реактивную и полную мощности несимметричного трехфазного приемника определяют по формулам

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA} = U_{AB} I_{AB} \cos \varphi_{AB} + U_{BC} I_{BC} \cos \varphi_{BC} + U_{CA} I_{CA} \cos \varphi_{CA}; \quad (3.7)$$

$$Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA} = U_{AB} I_{AB} \sin \varphi_{AB} + U_{BC} I_{BC} \sin \varphi_{BC} + U_{CA} I_{CA} \sin \varphi_{CA}; \quad (3.8)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (3.9)$$

При симметричном режиме ($Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$), как правило, определяют ток в одной из фаз, например в фазе AB,

$$\dot{i}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}}$$

Тогда в силу симметрии токи в других фазах

$$\dot{i}_{BC} = \dot{i}_{AB} \cdot e^{-j120^\circ}; \dot{i}_{CA} = \dot{i}_{AB} \cdot e^{j120^\circ}$$

Линейный ток в комплексной форме $\dot{I}_A = \sqrt{3} \dot{i}_{AB} \cdot e^{-j30^\circ}$, действующее значение $I_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}$.

Углы сдвига фаз

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \operatorname{arctg} \frac{X}{R},$$

где R , X – активная и реактивная составляющие комплексного сопротивления \underline{Z} фазы приемника.

Активную, реактивную и полную мощности симметричного трехфазного приемника определяют по формулам (3.1 ... 3.3).

3.2.4. Расчет трехфазной цепи с несколькими приемниками

При симметричном режиме в схеме трехфазной цепи проводят такие преобразования, чтобы можно было выделить для расчета одну фазу. Для этого генератор и приемник, соединенные треугольником, заменяют эквивалентным генератором и эквивалентным приемником, соединенными звездой. Сопротивление фазы эквивалентного приемника, соединенного звездой, в 3 раза меньше сопротивления фазы приемника, соединенного треугольником. Фазное напряжение эквивалентного генератора, соединенного звездой, в $\sqrt{3}$ раз меньше заданного линейного. Рисуют преобразованную схему, соединив нейтральные точки генератора и приемников. Выделяют в цепи фазу A с нейтральным проводом, фазу B и C удаляют. Рисуют полученную однофазную цепь. Рассчитывают однофазную цепь по методике расчета простых цепей со смешанным соединением приемников. Токи в фазе B и фазе C будут такие же по величине, но сдвинутые по фазе соответственно на угол -120° и на угол $+120^\circ$.

При несимметричном режиме преобразуют приемники так, чтобы получить последовательное или параллельное соединение сопротивлений в каждой фазе цепи и затем с помощью эквивалентных преобразований заменить все приемники одним эквивалентным приемником. Рассчитывают токи на входе цепи по правилам расчета несимметричной звезды или несимметричного треугольника. Используя второй закон Кирхгофа, определяют линейные напряжения на отдельных приемниках исходной цепи, после чего определяют все токи.

Пример. К трехфазной сети напряжением 380/220 В подключены в начале асинхронный электрический двигатель номинальной мощностью $P_d = 30$ кВт, с номинальным напряжением $U_d = 380/220$ В, коэффициентом мощности $\cos \varphi_d = 0,8$, коэффициентом полезного действия $\eta_d = 0,85$ и в конце линии, имеющей сопротивление одного провода $\underline{Z}_L = 4 + j6$ Ом, электрическая печь с сопротивлением фазы $R_p = 12$ Ом. Сопротивления печи соединены треугольником (рис. 3.5).

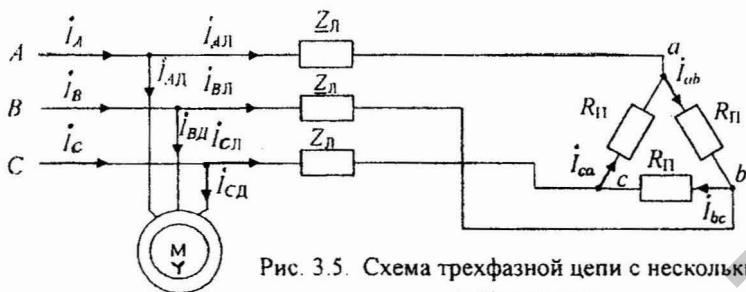


Рис. 3.5. Схема трехфазной цепи с несколькими приемниками

Требуется:

1. Выбрать схему соединения обмоток двигателя и нарисовать схему цепи.
2. Определить фазные токи приемников и ток генератора.
3. Определить активную мощность цепи и выполнить проверку по закону Джоуля-Ленца.
4. Определить токи и напряжения в этой же цепи, если сопротивление одной фазы печи изменилось $R_{ab} = 20$ Ом. Остальные сопротивления остались без изменений.

Симметричный режим

Так как фазное напряжение электродвигателя $U_{ФД} = 220$ В, то при напряжении сети 380/220 В его обмотки следует соединить звездой (рис. 3.5).

Преобразуем симметричный треугольник с сопротивлениями $R_{П}$ в симметричную эквивалентную звезду с сопротивлениями $R_{П1} = \frac{R_{П}}{3} = \frac{12}{3} = 4$ Ом.

Приведем схему преобразованной цепи (рис. 3.6), соединив нейтральные точки N , $N_{П1}$ и $N_{Д}$, так как их потенциалы одинаковы.

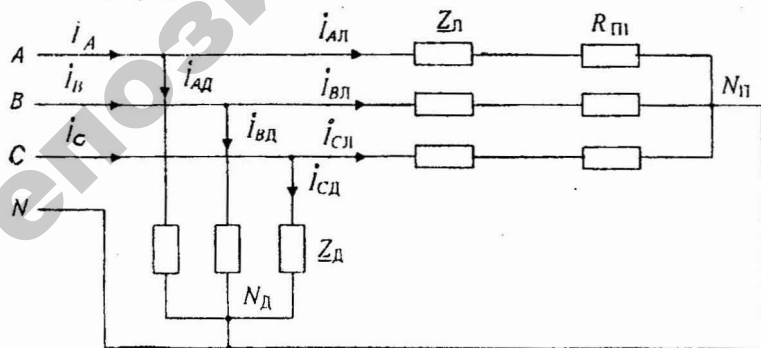


Рис. 3.6. Схема цепи после преобразований

Расчет симметричной трехфазной цепи можно вести по одной фазе, для чего выделим участок цепи с приемниками между фазой A и нейтральным проводом (рис. 3.7). Сопротивление двигателя Z_D определять нет необходимости, так как линейный ток двигателя I_{AD} можно определить из формулы мощности:

$$I_{AD} = \frac{P_D}{\sqrt{3} U_{Л} \eta_D \cos \varphi_D} = \frac{30 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85 \cdot 0,8} = 67 \text{ А.}$$

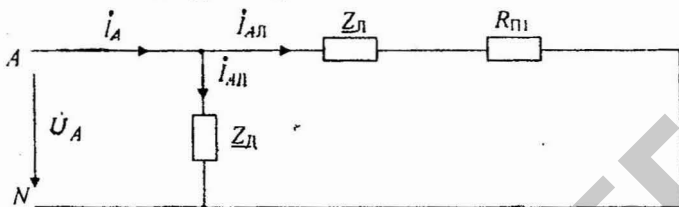


Рис. 3.7. Схема одной фазы цепи

Этот ток отстает по фазе от фазного напряжения на угол $\varphi = \arccos 0,8 = 37^\circ$.

В комплексной форме фазные токи двигателя

$$i_{AD} = 67 \cdot e^{-j37} = 67 \cdot (\cos 37^\circ - j \sin 37^\circ) = 67 \cdot (0,8 - j0,6) = 53,6 - j40,2 \text{ А;}$$

$$i_{BD} = i_{AD} \cdot e^{-j120^\circ} = 67 \cdot e^{-j37^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 67 \cdot e^{-j157^\circ} = \\ = 67 \cdot (\cos 157^\circ - j \sin 157^\circ) = 67 \cdot (-0,92 - j0,39) = -61,67 - j26,18 \text{ А;}$$

$$i_{CD} = i_{AD} \cdot e^{j120^\circ} = 67 \cdot e^{-j37^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 67 \cdot e^{j83^\circ} = 8,17 + j66,3 \text{ А.}$$

Линейный ток в сопротивлениях Z_L и R_{PI} (рис. 3.7).

$$i_{AL} = \frac{U_A}{Z} = \frac{U_A}{Z_L + R_{PI}} = \frac{220}{4 + j6 + 4} = \frac{220}{8 + j6} = \frac{220(8 - j6)}{8^2 + 6^2} = 17,6 - j13,2 = \\ = 22 \cdot e^{-j37^\circ} \text{ А.}$$

Тогда по первому закону Кирхгофа ток в начале линии (ток генератора)

$$i_A = i_{AD} + i_{AL} = 53,6 - j40,2 + 17,6 - j13,2 = 71,2 - j53,4 = 89 \cdot e^{-j37^\circ} \text{ А.}$$

Этот же ток в других фазах цепи (рис. 3.5)

$$I_B = I_A \cdot e^{-j120^\circ} = 89 \cdot e^{-j37^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 89 \cdot e^{-j157^\circ} \text{ А};$$

$$I_C = I_A \cdot e^{j120^\circ} = 89 \cdot e^{-j37^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 89 \cdot e^{j83^\circ} \text{ А.}$$

Действующие значения $I_A = I_B = I_C = 89 \text{ А}$.

Фазные токи в сопротивлениях печи, соединенных треугольником (рис. 3.5),

$$i_{ab} = \frac{i_{AЛ}}{\sqrt{3}} \cdot e^{j30^\circ} = \frac{22 \cdot e^{-j37^\circ} \cdot e^{j30^\circ}}{\sqrt{3}} = 12,7 \cdot e^{-j7^\circ} \text{ А};$$

$$i_{bc} = i_{ab} \cdot e^{-j120^\circ} = 12,7 \cdot e^{-j127^\circ} \text{ А};$$

$$i_{ca} = i_{ab} \cdot e^{j120^\circ} = 12,7 \cdot e^{j113^\circ} \text{ А.}$$

Действующие значения $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = 12,7 \text{ А}$.

Активная мощность цепи

$$P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi,$$

где $U_{л}, I_{л}$ – линейное напряжение и ток в начале линии; φ – угол сдвига между фазными напряжением и током, например, между U_A и I_A .

Если представить всю цепь одним эквивалентным приемником, соединенным звездой, то угол сдвига фаз

$$\varphi = \psi_{uA} - \psi_{iA},$$

где ψ_{uA} и ψ_{iA} – начальные фазы напряжения и тока в фазе A .

В данном примере $\psi_{uA} = 0$, а начальную фазу тока можно определить из комплексного выражения тока

$$\psi_{iA} = \operatorname{arctg} - \frac{53,4}{71,2} = -37^\circ.$$

Тогда угол сдвига фаз $\varphi = 0 - (-37^\circ) = 37^\circ$.

Активная мощность цепи

$$P = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 89 \cos 37^\circ = 46862 \text{ Вт.}$$

Проверка по закону Джоуля-Ленца

$$P_1 = \sum I_i^2 R_i = 3 I_{AЛ}^2 R_{Л} + 3 I_{ab}^2 R_{П} = 3 \cdot 22^2 \cdot 4 + 3 \cdot 12,7^2 \cdot 12 = \\ = 5808 + 5806 = 11614 \text{ Вт.}$$

С учетом мощности двигателя

$$P = P_1 + \frac{P_{Д}}{\eta_{Д}} = 11614 + \frac{30 \cdot 10^3}{0,85} = 46908 \text{ Вт.}$$

Так как результаты расчетов мощности практически совпали, значит они выполнены верно.

Несимметричный режим
 Расчетная схема цепи имеет вид (рис. 3.8)

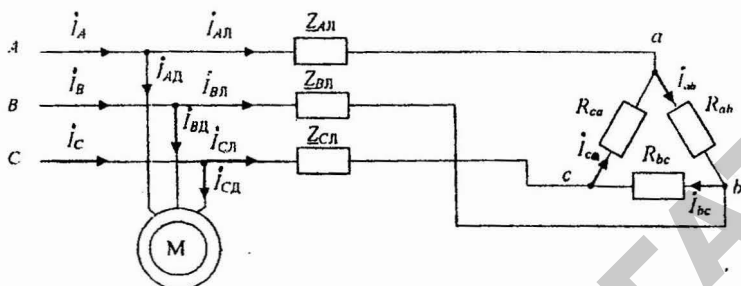


Рис. 3.8. Схема трехфазной цепи с несколькими приемниками

Дано: $U_{\text{Л}} = 380 \text{ В}$, $Z_{\text{Л}} = 4 + j6 \text{ Ом}$, $R_{ab} = 20 \text{ Ом}$, $R_{bc} = 12 \text{ Ом}$, $R_{ca} = 12 \text{ Ом}$,
 $U_{\text{Д}} = 380 / \sqrt{3} \text{ В}$, $P_{\text{д}} = 30 \text{ кВт}$, $\cos \varphi_{\text{д}} = 0,8$, $\eta_{\text{д}} = 0,85$.

Требуется определить токи в фазах приемников и в начале линии.

Решение начнем с записи напряжений в начале линии в комплексной форме

$$\dot{U}_A = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_A \cdot e^{-j120^\circ} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} = 220 \cdot (-0,5 - j0,866) = -110 - j190 \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_A \cdot e^{j120^\circ} = 220 \cdot e^{j120^\circ} = 220 \cdot (-0,5 + j0,866) = -110 + j190 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ} = 380 \cdot e^{j30^\circ} = 380 \cdot (0,866 + j0,5) = 329 + j190 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{AB} \cdot e^{-j120^\circ} = 380 \cdot e^{-j90^\circ} = -j380 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{AB} \cdot e^{j120^\circ} = 380 \cdot e^{j150^\circ} = -329 + j190 \text{ В}.$$

По сравнению с предыдущей задачей изменилось только одно сопротивление R_{ab} . Токи двигателя $i_{\text{АД}}$, $i_{\text{ВД}}$, $i_{\text{СД}}$ остались без изменения, так как не изменились напряжения и параметры электродвигателя. Чтобы определить токи в начале линии, необходимо рассчитать токи $i_{\text{АЛ}}$, $i_{\text{ВЛ}}$, $i_{\text{СЛ}}$.

Преобразуем цепь, заменив приемник, соединенный треугольником, эквивалентным приемником, соединенным звездой (рис. 3.9).

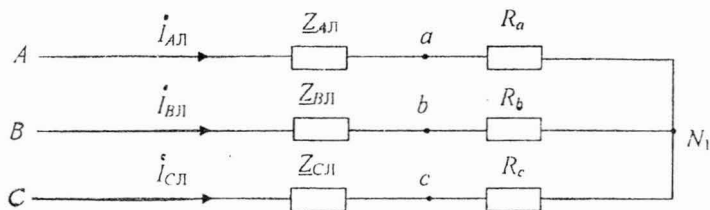


Рис. 3.9. Схема электрической цепи после преобразования

Сопротивления фаз эквивалентного приемника, соединенного звездой,

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = \frac{20 \cdot 12}{20 + 12 + 12} = 5,45 \text{ Ом};$$

$$R_b = \frac{R_{bc}R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = \frac{20 \cdot 12}{20 + 12 + 12} = 5,45 \text{ Ом};$$

$$R_c = \frac{R_{ca}R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = \frac{12 \cdot 12}{20 + 12 + 12} = 3,27 \text{ Ом}.$$

Так как сопротивления фаз преобразованного в звезду приемника и сопротивления линии соединены последовательно, то эквивалентные сопротивления фаз

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_{AЛ} + R_a = 4 + j6 + 5,45 = 9,45 + j6 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_B = \underline{Z}_{BЛ} + R_b = 4 + j6 + 5,45 = 9,45 + j6 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_C = \underline{Z}_{CЛ} + R_c = 4 + j6 + 3,27 = 7,27 + j6 \text{ Ом}.$$

Эквивалентная схема имеет вид (рис. 3.10).

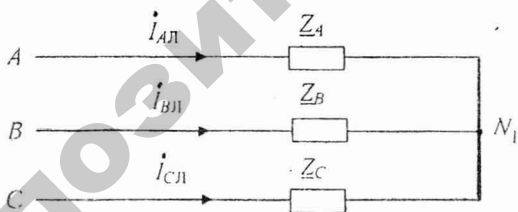


Рис. 3.10. Эквивалентная схема цепи

Таким образом, после преобразования получена схема несимметричного трехфазного приемника без нейтрального провода.

Напряжение между нейтральными точками генератора и приемника

$$\begin{aligned} \dot{U}_{N1N} &= \frac{\dot{U}_A}{Z_A} + \frac{\dot{U}_B}{Z_B} + \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{220}{9,45 + j6} + \frac{-110 - j190}{9,45 + j6} + \frac{-110 + j190}{7,27 + j6} = \\ &= \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{9,45 + j6} + \frac{1}{9,45 + j6} + \frac{1}{7,27 + j6} = \\ &= \frac{220(0,075 - j0,048) + (-110 - j190)(0,075 - j0,048) + (-110 + j190)(0,082 - j0,068)}{0,075 - j0,048 + 0,075 - j0,048 + 0,082 - j0,068} = \\ &= 1,48 + j16,35 \text{ В.} \end{aligned}$$

Напряжения на фазах несимметричного приемника

$$\dot{U}_{AN1} = \dot{U}_A - \dot{U}_{N1N} = 220 - 1,48 - j16,35 = 218,52 - j16,35 \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{BN1} = \dot{U}_B - \dot{U}_{N1N} = -110 - j190 - 1,48 - j16,35 = -111,48 - j206,35 \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{CN1} = \dot{U}_C - \dot{U}_{N1N} = -110 + j190 - 1,48 - j16,35 = -111,48 + j173,65 \text{ В.}$$

Линейные токи

$$i_{AЛ} = \frac{\dot{U}_{AN1}}{Z_A} = \frac{218,52 - j16,35}{9,45 + j6} = 15,7 - j11,6 = 19,58 \cdot e^{-j36^\circ} \text{ А;}$$

$$i_{BЛ} = \frac{\dot{U}_{BN1}}{Z_B} = \frac{-111,48 - j206,35}{9,45 + j6} = -18,3 - j10,2 = 20,94 \cdot e^{j209^\circ} \text{ А;}$$

$$i_{CЛ} = \frac{\dot{U}_{CN1}}{Z_C} = \frac{-111,48 + j173,65}{7,27 + j6} = 2,6 + j21,8 = 21,95 \cdot e^{j83^\circ} \text{ А.}$$

Проверка по первому закону Кирхгофа:

$$i_{AЛ} + i_{BЛ} + i_{CЛ} = 15,7 - j11,6 - 18,3 - j10,2 + 2,6 + j21,8 = 0.$$

Следовательно, значения токов определены правильно.

Токи в фазах приемника, соединенного треугольником (рис. 3.8), можно определить по закону Ома, если рассчитать напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} .

По второму закону Кирхгофа для контура $AabBA$

$$0 = -\dot{U}_{AB} + i_{AЛ} Z_{AЛ} + \dot{U}_{ab} - i_{BЛ} Z_{BЛ}.$$

Откуда

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_{AB} - i_{AЛ} Z_{AЛ} + i_{BЛ} Z_{BЛ} = 329 + j190 - (15,7 - j11,6)(4 + j6) + \\ &+ (18,3 - j10,2)(4 + j6) = 184,6 - j8,4 = 184,8 \cdot e^{-j2,6^\circ} \text{ В.} \end{aligned}$$

Аналогично

$$\begin{aligned} \dot{U}_{bc} &= \dot{U}_{BC} - i_{ВЛ} Z_{ВЛ} + i_{СЛ} Z_{СЛ} = -j380 - (18,3 - j10,2)(4 + j6) + \\ &+ (2,6 + j21,8)(4 + j6) = -108,4 - j126,6 = 166,7 \cdot e^{j229^\circ} \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ca} &= \dot{U}_{CA} - i_{СЛ} Z_{СЛ} + i_{АЛ} Z_{АЛ} = -329 + j190 - (2,6 + j21,8)(4 + j6) + \\ &+ (15,7 - j11,6)(4 + j6) = -76,2 + j135 = 155 \cdot e^{j119^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

Токи в фазах цепи

$$i_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{R_{ab}} = \frac{184,6 - j8,4}{20} = 9,23 - j0,42 = 9,24 \cdot e^{-j2,6^\circ} \text{ А};$$

$$i_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{R_{bc}} = \frac{-108,4 - j126,6}{12} = -9,03 - j10,55 = 13,89 \cdot e^{j229^\circ} \text{ А};$$

$$i_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{R_{ca}} = \frac{-76,2 + j135}{12} = -6,35 + j11,25 = 12,9 \cdot e^{j119^\circ} \text{ А}.$$

Токи в начале линии

$$i_A = i_{АЛ} + i_{АД} = 15,7 - j11,6 + 53,6 - j40,2 = 69,3 - j51,8 = 86,52 \cdot e^{-j37^\circ} \text{ А};$$

$$i_B = i_{ВЛ} + i_{ВД} = -18,3 - j10,2 - 61,67 - j26,18 = -79,97 - j36,38 = 87,86 \cdot e^{j204^\circ} \text{ А};$$

$$i_C = i_{СЛ} + i_{СД} = 2,6 + j21,8 + 8,17 + j66,5 = 10,77 + j88,2 = 88,85 \cdot e^{j83^\circ} \text{ А}.$$

4. ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

4.1. Контрольное задание 4

Задание состоит из двух задач: первая – по расчету линейной цепи несинусоидального переменного тока, вторая – по расчету нелинейной цепи переменного тока.

Задача 4.1. Для линейной электрической цепи, изображенной на рис 4.1...4.20 и соответствующей номеру варианта (табл. 4.1.), выполнить следующее:

1. Рассчитать все токи и написать выражения для их мгновенных значений.

2. Определить действующее значение тока в неразветвленной части цепи.
3. Определить показание вольтметра.
4. Рассчитать активную и полную мощности.

4.1. Варианты и исходные данные к задаче 4.1

Вариант	Рисунок	Напряжение источника $u, В$	Сопротивления для i -ой гармоника				
			R1	R2	R3	ωL	$1/\omega C$
			Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	2	3	4	5	6	7	8
1	4.1	$50 + 60 \sin(\omega t + 30^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	2	2	—	3,0	6,0
2	4.2	$60 + 50 \sin(\omega t - 90^\circ) + 35 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	5	5	—	2	6
3	4.3	$50 + 60 \sin(\omega t + 30^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	8	2	2	3	3
4	4.4	$60 + 50 \sin(\omega t + 90^\circ) + 35 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	2	4	—	3	9
5	4.5	$40 + 100 \sin(\omega t) + 70 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	2	4	6	4	6
6	4.6	$50 + 50 \sin(\omega t - 30^\circ) + 30 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	6	2	2	4	6
7	4.7	$60 + 50 \sin(\omega t + 90^\circ) + 35 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	6	6	—	3	9
8	4.8	$50 + 60 \sin(\omega t + 45^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	5	5	4	2	6
9	4.9	$40 + 100 \sin(\omega t - 90^\circ) + 70 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	4	4	—	4	12
10	4.10	$60 + 50 \sin(\omega t + 30^\circ) + 35 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	5	2	—	4	6
11	4.11	$40 + 100 \sin(\omega t) + 70 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	2	2	2	3	9
12	4.12	$100 + 120 \sin(\omega t + 30^\circ) + 60 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	2	3	—	4	12
13	4.13	$120 + 100 \sin(\omega t - 90^\circ) + 70 \sin(3\omega t + 15^\circ)$	5	5	—	5	15
14	4.14	$100 + 120 \sin(\omega t + 30^\circ) + 60 \cos(3\omega t - 30^\circ)$	3	2	5	3	9
15	4.15	$120 + 100 \sin(\omega t + 90^\circ) + 70 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	5	2	3	4	12
16	4.16	$80 + 120 \sin(\omega t - 30^\circ) + 60 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	3	6	—	2	6
17	4.17	$100 + 100 \sin(\omega t - 30^\circ) + 60 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	4	2	3	5	15
18	4.18	$60 + 120 \sin(\omega t + 45^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	2	3	4	3	6
19	4.19	$80 + 100 \sin(\omega t - 90^\circ) + 80 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	2	2	6	3	9
20	4.20	$100 + 80 \sin(\omega t) + 70 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	3	2	5	6	6
21	4.1	$60 + 50 \sin(\omega t - 90^\circ) + 30 \sin(3\omega t + 15^\circ)$	5	2	—	3	6
22	4.2	$80 + 100 \sin(\omega t + 45^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	4	4	—	4	12
23	4.3	$60 + 120 \sin(\omega t + 45^\circ) + 30 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	3	3	3	2	6
24	4.4	$100 + 100 \sin(\omega t - 90^\circ) + 60 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	4	2	—	5	15
25	4.5	$80 + 120 \sin(\omega t) + 60 \sin(3\omega t - 45^\circ)$	6	2	4	4	6
26	4.6	$120 + 100 \sin(\omega t + 90^\circ) + 70 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	2	2	2	3	9
27	4.7	$100 + 120 \sin(\omega t - 30^\circ) + 60 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	5	5	—	2	6
28	4.8	$40 + 100 \sin(\omega t) + 70 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	4	4	3	1	3
29	4.9	$60 + 50 \sin(\omega t + 30^\circ) + 35 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	3	3	—	2	6
30	4.10	$40 + 100 \sin(\omega t + 90^\circ) + 70 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	4	2	—	1	3
31	4.11	$50 + 60 \sin(\omega t + 30^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	3	3	4	1	3
32	4.12	$60 + 50 \sin(\omega t - 90^\circ) + 35 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	4	4	—	4	12
33	4.13	$50 + 60 \sin(\omega t + 30^\circ) + 70 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	6	3	—	3	3
34	4.14	$40 + 100 \sin(\omega t) + 60 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	3	2	4	1	3
35	4.15	$60 + 50 \sin(\omega t + 90^\circ) + 40 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	5	5	5	5	15
36	4.16	$50 + 60 \sin(\omega t + 30^\circ) + 30 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	2	4	—	2	6

1	2	3	4	5	6	7	8
37	4.17	$60 + 50 \sin(\omega t + 90^\circ) + 35 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	4	2	2	3	9
38	4.18	$50 + 60 \sin(\omega t + 30^\circ) + 60 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	3	3	3	3	3
39	4.19	$80 + 100 \sin(\omega t - 90^\circ) + 80 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	2	2	2	2	6
40	4.20	$100 + 80 \sin \omega t + 60 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	4	4	4	4	12
41	4.1	$60 + 80 \sin(\omega t + 30^\circ) + 40 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	3	3	—	3	6
42	4.2	$70 + 60 \sin(\omega t + 90^\circ) + 50 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	4	4	—	2	9
43	4.3	$60 + 80 \sin(\omega t - 60^\circ) + 40 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	4	4	4	3	9
44	4.4	$80 + 60 \sin(\omega t - 90^\circ) + 50 \sin(3\omega t - 45^\circ)$	3	2	—	2	6
45	4.5	$50 + 80 \sin \omega t + 50 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	2	4	3	5	15
46	4.6	$60 + 80 \sin(\omega t + 30^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	4	4	4	4	12
47	4.7	$40 + 50 \sin(\omega t - 90^\circ) + 40 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	5	5	—	1	3
48	4.8	$50 + 80 \sin(\omega t + 45^\circ) + 40 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	3	4	2	2	6
49	4.9	$20 + 100 \sin(\omega t - 90^\circ) + 80 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	4	2	—	3	9
50	4.10	$40 + 80 \sin(\omega t - 30^\circ) + 40 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	5	3	—	1	3
51	4.11	$60 + 120 \sin \omega t + 80 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	3	3	4	4	12
52	4.12	$80 + 100 \sin(\omega t - 30^\circ) + 60 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	6	6	—	3	3
53	4.13	$100 + 80 \sin(\omega t + 90^\circ) + 60 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	3	3	—	3	3
54	4.14	$50 + 60 \sin(\omega t + 30^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 45^\circ)$	4	3	2	2	6
55	4.15	$60 + 50 \sin(\omega t - 90^\circ) + 40 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	5	2	2	2	3
56	4.16	$40 + 60 \sin \omega t + 60 \sin(3\omega t - 45^\circ)$	5	5	—	5	15
57	4.17	$50 + 50 \sin(\omega t + 30^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	3	3	3	3	3
58	4.18	$60 + 100 \sin(\omega t - 45^\circ) + 30 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	4	2	3	1	3
59	4.19	$40 + 50 \sin(\omega t + 90^\circ) + 40 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	5	3	2	3	9
60	4.20	$80 + 120 \sin \omega t + 80 \sin(3\omega t - 45^\circ)$	6	4	3	4	12
61	4.1	$60 + 80 \sin(\omega t - 90^\circ) + 30 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	3	3	—	4	9
62	4.2	$40 + 50 \sin(\omega t - 45^\circ) + 30 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	5	6	—	3	12
63	4.3	$80 + 100 \sin(\omega t - 60^\circ) + 60 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	4	4	4	2	6
64	4.4	$50 + 50 \sin(\omega t + 30^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	2	4	—	1	3
65	4.5	$60 + 100 \sin \omega t + 60 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	4	3	3	2	6
66	4.6	$100 + 100 \sin(\omega t + 30^\circ) + 100 \sin 3\omega t$	3	2	2	5	15
67	4.7	$80 + 100 \sin(\omega t + 30^\circ) + 60 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	4	6	—	3	6
68	4.8	$50 + 80 \sin(\omega t - 60^\circ) + \sin(3\omega t + 45^\circ)$	3	3	4	4	3
69	4.9	$60 + 100 \sin(\omega t + 90^\circ) + 40 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	5	5	—	5	15
70	4.10	$40 + 80 \sin(\omega t - 30^\circ) + 60 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	6	2	—	3	3
71	4.11	$50 + 70 \sin(\omega t + 45^\circ) + 40 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	4	2	4	2	6
72	4.12	$40 + 40 \sin(\omega t - 90^\circ) + 20 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	3	3	—	3	9
73	4.13	$100 + 120 \sin(\omega t - 30^\circ) + 80 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	2	4	—	5	15
74	4.14	$40 + 100 \sin \omega t + 40 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	4	2	3	4	6
75	4.15	$60 + 80 \sin(\omega t - 90^\circ) + 40 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	8	4	6	4	6
76	4.16	$100 + 120 \sin(\omega t + 45^\circ) + 60 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	5	5	—	5	15
77	4.17	$60 + 100 \sin(\omega t - 90^\circ) + 60 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	1	2	3	4	6
78	4.18	$60 + 80 \sin(\omega t + 30^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	3	1	2	2	3
79	4.19	$40 + 100 \sin(\omega t + 90^\circ) + 60 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	6	4	2	4	12
80	4.20	$60 + 120 \sin(\omega t - 30^\circ) + 30 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	4	6	4	3	6
81	4.1	$30 + 60 \sin(\omega t + 30^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 45^\circ)$	4	4	—	2	6

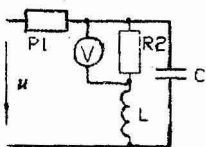


Рис. 4.1

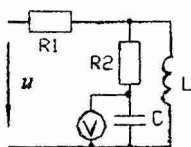


Рис. 4.2

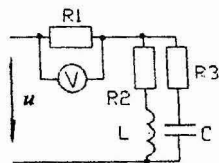


Рис. 4.3

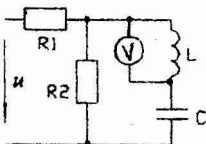


Рис. 4.4

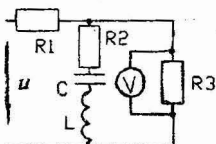


Рис. 4.5

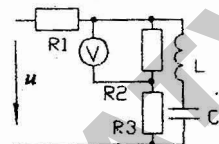


Рис. 4.6

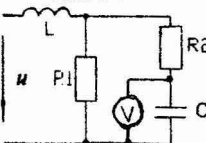


Рис. 4.7

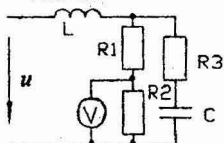


Рис. 4.8

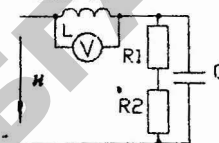


Рис. 4.9

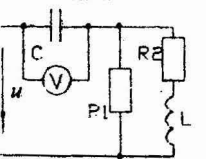


Рис. 4.10

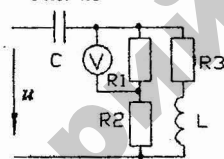


Рис. 4.11

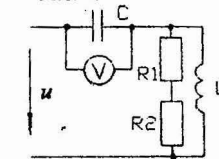


Рис. 4.12

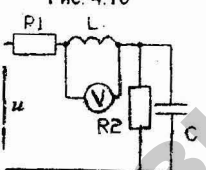


Рис. 4.13

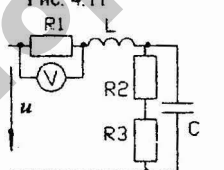


Рис. 4.14

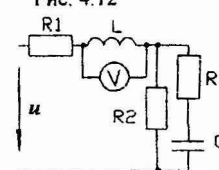


Рис. 4.15

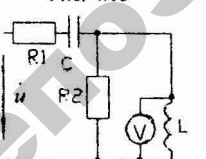


Рис. 4.16

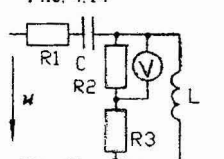


Рис. 4.17

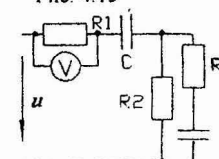


Рис. 4.18

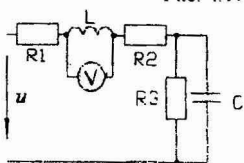


Рис. 4.19

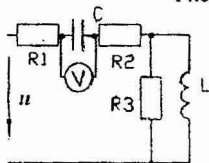


Рис. 4.20

1	2	3	4	5	6	7	8
82	4.2	$60 + 80 \sin(\omega t + 45^\circ) + 50 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	6	8	—	4	12
83	4.3	$30 + 100 \sin(\omega t - 60^\circ) + 60 \sin(3\omega t + 45^\circ)$	3	5	4	4	6
84	4.4	$30 + 80 \sin(\omega t - 30^\circ) + 60 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	8	4	—	4	9
85	4.5	$40 + 80 \cos \omega t + 60 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	4	4	4	4	12
86	4.6	$20 + 60 \sin(\omega t + 45^\circ) + 40 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	3	3	3	3	3
87	4.7	$40 + 100 \sin(\omega t - 90^\circ) + 30 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	4	6	—	6	24
88	4.8	$80 + 120 \sin(\omega t + 45^\circ) + 80 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	5	5	5	5	15
89	4.9	$60 + 100 \sin(\omega t - 90^\circ) + 60 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	2	3	—	2	3
90	4.10	$40 + 50 \sin(\omega t + 30^\circ) + 40 \sin(3\omega t - 45^\circ)$	6	6	—	3	6
91	4.11	$60 + 80 \sin \omega t + 60 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	4	4	4	4	12
92	4.12	$100 + 150 \sin(\omega t + 30^\circ) + 100 \sin(3\omega t - 30^\circ)$	3	4	—	5	15
93	4.13	$80 + 100 \sin(\omega t - 90^\circ) + 80 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	6	2	—	4	12
94	4.14	$100 + 150 \sin(\omega t + 30^\circ) + 100 \sin(3\omega t - 45^\circ)$	5	3	3	3	3
95	4.15	$50 + 100 \sin(\omega t - 90^\circ) + 60 \sin 3\omega t$	6	4	4	4	15
96	4.16	$40 + 80 \sin \omega t + 40 \sin(3\omega t + 60^\circ)$	2	4	—	5	9
97	4.17	$30 + 60 \sin(\omega t + 60^\circ) + 30 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	3	4	5	5	12
98	4.18	$50 + 120 \sin(\omega t - 45^\circ) + 50 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	2	2	2	2	6
99	4.19	$80 + 100 \sin(\omega t - 90^\circ) + 40 \sin(3\omega t + 30^\circ)$	6	2	2	3	9
100	4.20	$50 + 80 \sin \omega t + 30 \sin(3\omega t - 60^\circ)$	4	2	4	6	15

Задача 4.2. Нелинейную электрическую цепь переменного тока, изображенную на рис. 4.21... 4.40 и соответствующую номеру варианта (табл. 4.2), рассчитать методом эквивалентных синусоид, используя вольт-амперные характеристики (ВАХ) нелинейных элементов для действующих значений токов и напряжений (рис. 4.41).

Содержание расчета

1. Задаваясь различными значениями тока на нелинейном элементе, используя комплексный метод, найти все токи и напряжения цепи.
2. По полученным данным построить зависимость, указанную в табл. 4.2. Кривая должна иметь не менее 5 расчетных точек.
3. Для одного из расчетов построить векторную диаграмму напряжений и токов в цепи.

Примечания. 1. При двух нелинейных элементах следует задаваться током в нелинейном элементе, включенном в одну из параллельных ветвей. 2. При выборе значений токов нелинейного элемента необходимо использовать всю вольт-амперную характеристику.

4.2. Варианты и исходные данные к задаче 4.2

Вариант	Рисунок	Дано					Построить
		R_1 Ом	R_2 Ом	R_3 Ом	X_L Ом	X_C Ом	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	4.21	—	90	—	BAX 1	100	$U(I_1)$
2	4.22	—	100	—	BAX 1	90	$U(I_2)$
3	4.23	80	—	—	BAX 1	100	$U(I_2)$
4	4.24	60	100	—	BAX 1	120	$U(I_1)$
5	4.25	50	100	—	BAX 1	120	$U(I_1)$
6	4.26	—	60	—	50	BAX 3	$U(I_1)$
7	4.27	—	100	—	60	BAX 3	$U(I_2)$
8	4.28	100	—	—	100	BAX 3	$U(I_2)$
9	4.29	50	80	—	50	BAX 3	$U(I_2)$
10	4.30	50	75	—	100	BAX 3	$U(I_1)$
11	4.31	—	100	100	BAX 1	100	$U(I_2)$
12	4.32	—	100	100	BAX 1	100	$U(I_2)$
13	4.33	100	60	100	BAX 1	100	$U(I_2)$
14	4.34	—	60	100	100	BAX 3	$U(I_2)$
15	4.35	—	140	—	BAX 1	BAX 4	$U(I_1)$
16	4.36	50	140	—	BAX 1	BAX 4	$U(I_1)$
17	4.37	—	190	50	BAX 1	BAX 4	$U(I_2)$
18	4.38	100	190	50	BAX 1	BAX 4	$U(I_2)$
19	4.39	50	50	100	100	BAX 3	$U(I_1)$
20	4.40	—	70	70	100	BAX 3	$U(I_2)$
21	4.21	—	80	—	BAX 2	100	$U(I_2)$
22	4.22	—	90	—	BAX 2	90	$U(I_2)$
23	4.23	60	—	—	BAX 2	100	$U(I_2)$
24	4.24	60	90	—	BAX 2	120	$U(I_2)$
25	4.25	50	90	—	BAX 2	120	$U(I_2)$
26	4.26	—	50	—	50	BAX 4	$U(I_2)$
27	4.27	—	90	—	60	BAX 4	$U(I_2)$
28	4.28	90	—	—	100	BAX 4	$U(I_2)$
29	4.29	50	70	—	50	BAX 4	$U(I_2)$
30	4.30	50	70	—	100	BAX 4	$U(I_2)$
31	4.31	—	90	100	BAX 2	100	$U(I_2)$
32	4.32	—	90	100	BAX 2	100	$U(I_2)$
33	4.33	100	70	100	BAX 2	100	$U(I_2)$
34	4.34	—	70	100	100	BAX 4	$U(I_2)$
35	4.35	—	140	—	BAX 2	BAX 4	$U(I_2)$
36	4.36	50	140	—	BAX 2	BAX 4	$U(I_2)$
37	4.37	—	190	50	BAX 2	BAX 3	$U(I_2)$
38	4.38	100	190	50	BAX 2	BAX 4	$U(I_2)$
39	4.39	60	60	100	100	BAX 4	$U(I_2)$
40	4.40	—	60	60	100	BAX 4	$U(I_2)$
41	4.21	—	70	—	BAX 1	100	$U(I_1)$
42	4.22	—	80	—	BAX 1	90	$U(I_1)$
43	4.23	60	—	—	BAX 1	100	$U(I_1)$
44	4.24	60	80	—	BAX 1	120	$U(I_2)$
45	4.25	50	80	—	BAX 1	120	$U(I_2)$
46	4.26	—	40	—	50	BAX 3	$U(I_2)$
47	4.27	—	80	—	60	BAX 3	$U(I_1)$
48	4.28	80	—	—	100	BAX 3	$U(I_1)$
49	4.29	50	60	—	50	BAX 3	$U(I_1)$
50	4.30	50	60	—	100	BAX 3	$U(I_2)$

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8
51	4.31	—	90	100	BAX 1	100	$U(U_2)$
52	4.32	—	90	100	BAX 1	100	$U(U_3)$
53	4.33	100	80	100	BAX 1	100	$U(U_2)$
54	4.34	—	80	100	100	BAX 3	$U(U_2)$
55	4.35	—	135	—	BAX 1	BAX 4	$U(U_1)$
56	4.36	50	135	—	BAX 1	BAX 4	$U(U_2)$
57	4.37	—	180	50	BAX 1	BAX 4	$U(U_2)$
58	4.38	100	180	50	BAX 1	BAX 4	$U(U_1)$
59	4.39	70	70	100	100	BAX 3	$U(U_3)$
60	4.40	—	50	50	100	BAX 3	$U(U_2)$
61	4.21	—	100	—	BAX 2	100	$U(U_3)$
62	4.22	—	100	—	BAX 2	90	$U(U_1)$
63	4.23	80	—	—	BAX 2	100	$U(U_1)$
64	4.24	70	100	—	BAX 2	120	$U(U_3)$
65	4.25	60	100	—	BAX 2	120	$U(U_1)$
66	4.26	—	70	—	50	BAX 4	$U(U_1)$
67	4.27	—	110	—	60	BAX 4	$U(U_3)$
68	4.28	110	—	—	100	BAX 4	$U(U_3)$
69	4.29	60	80	—	50	BAX 4	$U(U_3)$
70	4.30	60	75	—	100	BAX 4	$U(U_2)$
71	4.31	—	80	100	BAX 2	100	$U(U_1)$
72	4.32	—	80	100	BAX 2	100	$U(U_1)$
73	4.33	100	90	100	BAX 2	100	$U(U_2)$
74	4.34	—	100	100	100	BAX 4	$U(U_1)$
75	4.35	—	135	—	BAX 2	BAX 4	$U(U_3)$
76	4.36	50	135	—	BAX 2	BAX 4	$U(U_2)$
77	4.37	—	180	50	BAX 2	BAX 4	$U(U_2)$
78	4.38	100	180	50	BAX 2	BAX 4	$U(U_2)$
79	4.39	80	80	100	100	BAX 4	$U(U_2)$
80	4.40	—	80	80	100	BAX 4	$U(U_2)$
81	4.21	—	110	—	BAX 1	100	$U(U_2)$
82	4.22	—	120	—	BAX 1	90	$U(U_1)$
83	4.23	90	—	—	BAX 1	100	$U(U_1)$
84	4.24	80	100	—	BAX 1	120	$U(U_{R1})$
85	4.25	60	100	—	BAX 1	120	$U(U_3)$
86	4.26	—	80	—	50	BAX 3	$U(U_3)$
87	4.27	—	110	—	60	BAX 3	$U(U_1)$
88	4.28	90	—	—	100	BAX 3	$U(U_1)$
89	4.29	60	80	—	50	BAX 3	$U(U_2)$
90	4.30	60	75	—	100	BAX 3	$U(U_3)$
91	4.31	—	70	100	BAX 1	100	$U(U_1)$
92	4.32	—	70	100	BAX 1	100	$U(U_1)$
93	4.33	100	70	100	BAX 1	100	$U(U_1)$
94	4.34	—	90	100	100	BAX 3	$U(U_2)$
95	4.35	—	150	—	BAX 1	BAX 4	$U(U_2)$
96	4.36	50	150	—	BAX 1	BAX 4	$U(U_3)$
97	4.37	—	200	50	BAX 1	BAX 4	$U(U_1)$
98	4.38	100	200	50	BAX 1	BAX 4	$U(U_1)$
99	4.39	100	100	100	100	BAX 3	$U(U_2)$
100	4.40	—	100	100	100	BAX 3	$U(U_1)$

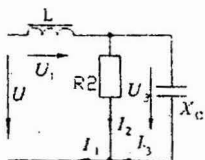


Рис. 4.21

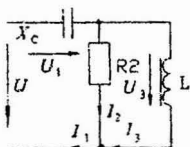


Рис. 4.22

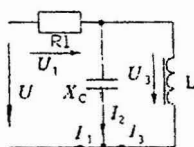


Рис. 4.23

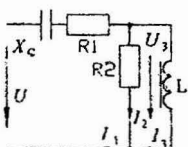


Рис. 4.24

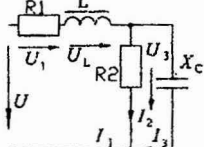


Рис. 4.25

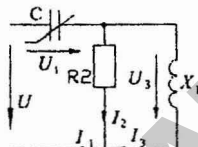


Рис. 4.26

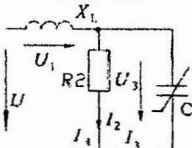


Рис. 4.27

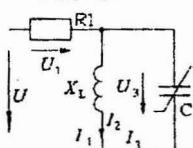


Рис. 4.28

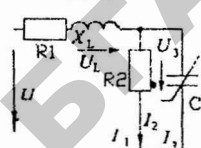


Рис. 4.29

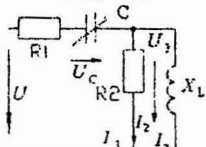


Рис. 4.30

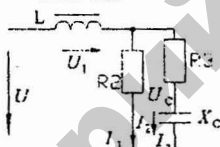


Рис. 4.31

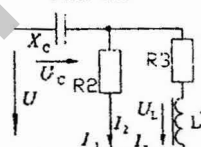


Рис. 4.32

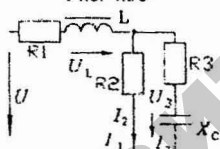


Рис. 4.33

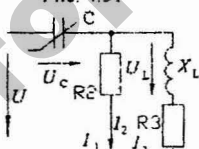


Рис. 4.34

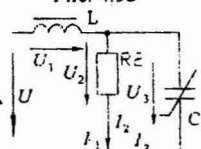


Рис. 4.35

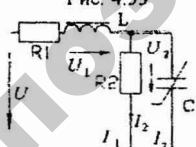


Рис. 4.36

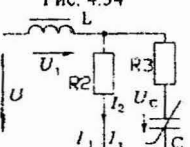


Рис. 4.37

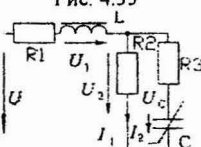


Рис. 4.38

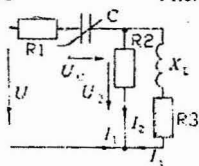


Рис. 4.39

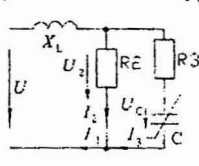


Рис. 4.40

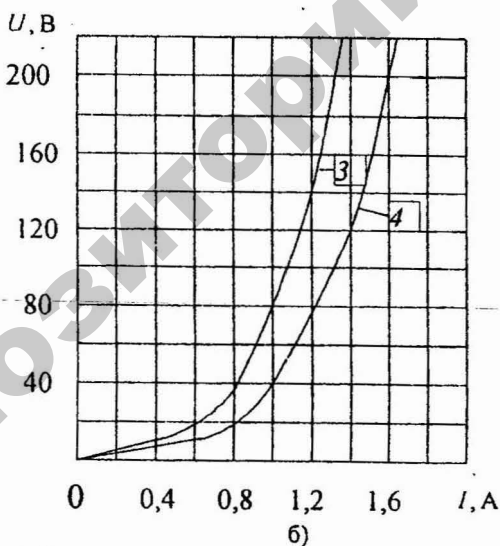
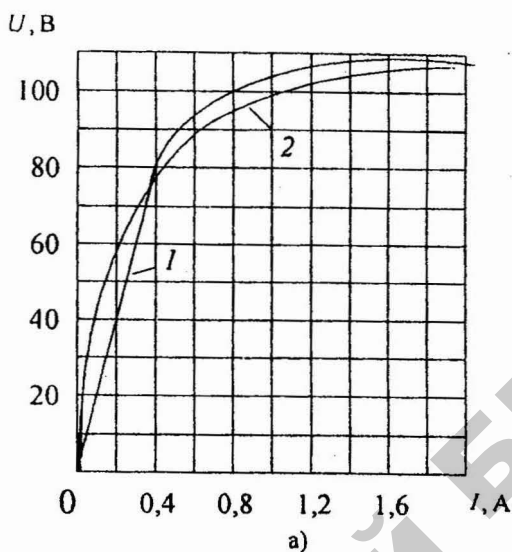


Рис. 4.41. Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов:
 а – индуктивности, б – емкости

4.2. Методические указания

4.2.1. Линейные электрические цепи несинусоидального переменного тока

Для выполнения этого задания необходимо иметь понятие о несинусоидальных периодических ЭДС, напряжениях и токах, методике расчета цепей несинусоидального тока. Указанные вопросы можно изучить по учебникам [1], глава седьмая, [3], глава двенадцатая. Необходимо также знать законы электрических цепей, методы расчета электрических цепей постоянного и переменного токов, комплексный метод.

Расчет токов в линейной цепи с несинусоидальной периодической ЭДС производится следующим образом.

1. Периодическая кривая ЭДС раскладывается в ряд Фурье

$$e(\omega t) = E_0 + E_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + E_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots = \\ = \sum_{k=0}^{k=\infty} E_{km} \sin(k\omega t + \psi_k),$$

$$\text{при } k=0 \quad E_{km} = E_0, \quad \psi_k = \psi_0 = \frac{\pi}{2}.$$

Первый член ряда E_0 называется постоянной составляющей (постоянной ЭДС) или нулевой гармоникой, второй член $E_{1m} \sin(\omega t + \psi)$ — основной синусоидой или первой гармоникой, а все остальные члены вида $E_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$ при $k > 1$ носят название высших гармоник, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ — основная частота; T — период несинусоидальной периодической ЭДС.

Разложение в ряд Фурье производится или аналитически или графически. Как правило, во встречающихся задачах ЭДС задается уже разложенной в ряд Фурье.

2. Используя принцип наложения, определяют токи в цепи от каждой составляющей ЭДС, входящей в ряд Фурье.

При решении каждой из этих задач необходимо учитывать, что для каждой гармоники индуктивные и емкостные сопротивления неодинаковые, вследствие неодинаковости частот ЭДС отдельных гармоник. Индуктивное сопротивление для k -й гармоники в k раз больше, а емкостное, наоборот, в k раз меньше, чем для первой:

$$X_{Lk} = k\omega L, \quad X_{Ck} = \frac{1}{k\omega C}.$$

Изменение активного сопротивления с ростом частоты можно не учитывать и считать, что при всех частотах активное сопротивление равно сопротивлению при постоянном токе.

При расчете токов от постоянной составляющей ЭДС (нулевой гармоники) необходимо иметь в виду, что индуктивный элемент для постоянного тока имеет сопротивление, равное нулю, а емкостный элемент – сопротивление, равное бесконечности (разрыв цепи). Это вытекает формально из выражений для сопротивлений X_L и X_C при $\omega = 0$. Действительно, при $\omega = 0$

$$X_L = \omega L = 0, \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \infty.$$

Пусть последовательная цепь (рис. 4.42) имеет ЭДС

$$e = E_0 + E_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + E_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots$$

и содержит резистивный R , индуктивный L и емкостный C элементы.

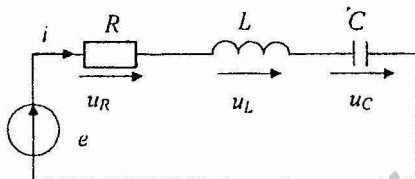


Рис. 4.42. Схема последовательной цепи

Постоянная составляющая тока в этой цепи равна нулю $i_0 = I_0 = 0$, так как конденсатор постоянного тока не пропускает. Падение напряжения на резисторе равно нулю $u_{OR} = U_{OR} = RI_0 = 0$, падение напряжения на индуктивной катушке от постоянного тока равно нулю, следовательно, исходя из второго закона Кирхгофа, падение напряжения на конденсаторе равно постоянной составляющей ЭДС $u_{CO} = U_{CO} = E_0$.

Ток k -й гармоники для рассматриваемой цепи имеет вид:

$$i_k = I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k),$$

$$\text{где } I_{km} = \frac{E_{km}}{\sqrt{R^2 + \left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C}\right)^2}}, \quad \varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{k\omega L - \frac{1}{k\omega C}}{R}.$$

Действующее значение тока каждой гармоники $I_k = \frac{I_{km}}{\sqrt{2}}$.

Если цепь разветвленная, то для расчета токов отдельных гармоник целесообразно применять комплексный метод.

3. Мгновенное значение тока согласно принципу наложения равно сумме мгновенных значений токов отдельных гармоник

$$i = i_0 + i_1 + i_2 + \dots$$

4. Действующее значение несинусоидального тока определяют по формуле

$$I = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{1m}^2}{2} + \frac{I_{2m}^2}{2} + \dots} \quad \text{или}$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots},$$

где I_1, I_2, I_3 и т.д. – действующие значения токов отдельных гармоник.

5. Активную мощность P и полную мощность S определяют по формулам:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots = \sum P_k,$$

$$S = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots} \cdot \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}.$$

4.2.2. Нелинейные электрические цепи переменного тока

Для выполнения этого задания необходимо иметь понятие о нелинейных цепях и о нелинейных элементах и их характеристиках при переменных токах и напряжениях: 1) характеристиках для мгновенных значений (вольт-амперные, вебер-амперные и кулон-вольтные), 2) вольт-амперных характеристиках по первым гармоникам, 3) вольт-амперных характеристиках по действующим значениям. Необходимо знать законы, на которых основан расчет нелинейных цепей, и иметь представление о методах расчета нелинейных цепей переменного тока. Указанные вопросы можно изучить по учебнику [1] §§ 15.1...15.8, §§ 15.44...15.49, [3].

Процессы в нелинейных электрических цепях переменного тока описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений, составленных по законам Кирхгофа. Для нелинейных уравнений каждого типа существуют свои методы подхода и решения, причем многие нелинейные уравнения не имеют аналитических решений и требуют построения специальных графических зависимостей. Как правило, решение получается приближенное, дающее качественную оценку процессам.

Одним из распространенных приближенных методов расчета нелинейных цепей переменного тока является метод эквивалентных синусоид, использующий вольт-амперные характеристики для действующих значений.

Если цепь содержит безинерционный нелинейный элемент, то ток и напряжение на участках цепи будут несинусоидальными, даже если приложено к зажимам цепи напряжение синусоидально. При расчете такой цепи по действующим значениям все несинусоидальные токи и напряжения в цепи заменяются эквивалентными синусоидальными. При замене несинусоидального напряжения и тока на данном элементе эквивалентным синусоидальным напряжением и током должно быть выполнено условие неизменности действующих значений тока, напряжения и мощности в этом элементе. Нелинейные элементы расчетной цепи характеризуются вольт-амперными характеристиками для действующих значений.

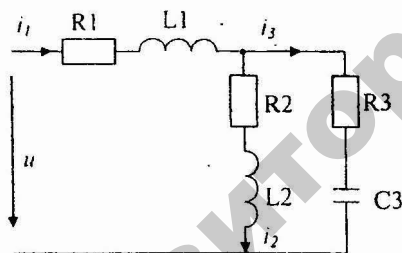
Так как все токи и напряжения цепи после замены стали синусоидальными, то для расчета цепи может быть использован комплексный метод.

Составляются уравнения по законам Кирхгофа в комплексной форме, которые затем решаются аналитически или графически относительно искомых величин. Решение уравнений может быть выполнено и с помощью векторных диаграмм.

Как правило, нелинейной катушке индуктивности и нелинейному конденсатору присущи потери энергии, поэтому нелинейная катушка индуктивности характеризуется нелинейным сопротивлением и нелинейной индуктивностью, а нелинейный конденсатор – нелинейным сопротивлением и нелинейной емкостью. Эти параметры зависят от действующего значения тока. Если потерями энергии в этих элементах можно пренебречь, то у них учитывается соответственно нелинейная индуктивность и нелинейная емкость. В этом случае ток через катушку индуктивности отстает по фазе от напряжения на катушке на 90° , а на конденсаторе ток опережает по фазе напряжение на 90° .

4.3. Примеры

4.3.1. Расчет линейной цепи несинусоидального тока (рис. 4.43)



Дано:

$$u = 100 + 150 \sin(\omega t + 30^\circ) + 50 \sin(3\omega t - 60^\circ) \text{ В,}$$

$$\omega = 314 \text{ с}^{-1},$$

$$R1 = 2 \text{ Ом}, \quad L1 = 10 \text{ мГн,}$$

$$R2 = 4 \text{ Ом}, \quad L2 = 20 \text{ мГн,}$$

$$R3 = 5 \text{ Ом}, \quad C3 = 1000 \text{ мкФ.}$$

Рис. 4.43

Определить токи в ветвях, активную и полную мощности, мгновенное и действующее значения напряжения на конденсаторе.

Произведем расчет токов для каждой гармоники.

1. Расчет токов постоянной составляющей:

$$I_{10} = I_{20} = \frac{U_0}{R_1 + R_2} = \frac{100}{2 + 4} = 16,7 \text{ А}, \quad I_{30} = 0,$$

$$\text{Активная мощность } P_D = U_{10} I_{10} = 100 \cdot 16,7 = 1670 \text{ Вт.}$$

Для определения значения напряжения на конденсаторе рассмотрим контур, образованный второй и третьей ветвями. Согласно второму закону Кирхгофа

$R_3 I_{30} + U_{CO} - R_2 I_{20} = 0$. Так как $I_{30} = 0$, то $U_{CO} = R_2 I_{20} = 4 \cdot 16,7 = 66,8$ В.

2. Расчет токов 1-й гармоники.

Запишем напряжение 1-й гармоники в комплексной форме

$$\dot{U}_1 = \frac{150}{\sqrt{2}} e^{j30^\circ} = 106,3 e^{j30^\circ} = 106,3 (\cos 30^\circ + j \sin 30^\circ) = 92 + j53 \text{ В.}$$

Общее сопротивление цепи для токов первой гармоники равно:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_{11} + \frac{\underline{Z}_{21} \underline{Z}_{31}}{\underline{Z}_{21} + \underline{Z}_{31}} = R_1 + j\omega L_1 + \frac{(R_2 + j\omega L_2) \left(R_3 - \frac{j}{\omega C_3} \right)}{R_2 + j\omega L_2 + R_3 - \frac{j}{\omega C_3}} = \\ &= 2 + j314 \cdot 10 \cdot 10^{-3} + \frac{(4 + j314 \cdot 20 \cdot 10^{-3}) \left(5 - \frac{j}{314 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}} \right)}{4 + j314 \cdot 20 \cdot 10^{-3} + 5 - \frac{j}{314 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}}} = \\ &= 6,6 + j3,63 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Определим токи в ветвях

$$i_{11} = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_1} = \frac{92 + j53}{6,6 + j3,63} = 14,1 + j0,3 = 14,12 e^{j1^\circ 10'} \text{ А.}$$

$$i_{11} = 14,12 \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t + \psi_i) = 19,9 \sin(\omega t + 1^\circ 10') \text{ А.}$$

$$\begin{aligned} i_{21} &= \frac{\dot{U}_1 - (R_1 + j\omega L_1) i_{11}}{R_2 + j\omega L_2} = \frac{92 + j53 - (2 + j314 \cdot 10 \cdot 10^{-3})(14,1 + j0,3)}{4 + j314 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = \\ &= 11 - j6,6 = 12,8 e^{-j31^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

$$i_{21} = 12,8 \sqrt{2} \sin(\omega t - 31^\circ) = 18 \sin(\omega t - 31^\circ) \text{ А.}$$

$$i_{31} = i_{11} - i_{21} = 14,1 + j0,3 - 11 + j6,6 = 3,1 + j6,9 = 7,56 e^{j65^\circ 50'} \text{ А.}$$

$$i_{31} = 7,56 \sqrt{2} \sin(\omega t + 65^\circ 50') = 10,6 \sin(\omega t + 65^\circ 50') \text{ А.}$$

Напряжение на конденсаторе

$$\begin{aligned} \dot{U}_{C1} &= -\frac{j}{\omega C} i_{31} = -\frac{j}{314 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}} (3,1 + j6,9) = 20 - j9,86 = \\ &= 22,3 e^{-j26^\circ 15'} \text{ В.} \end{aligned}$$

$$U_{C1} = 22,3 \text{ В.}$$

$$u_{C1} = 22,3\sqrt{2} \sin(\omega t - 26^\circ 15') = 31,4 \sin(\omega t - 26^\circ 15') \text{ В.}$$

3. Расчет токов третьей гармоники.

$$\dot{U}_3 = \frac{50}{\sqrt{2}} e^{-j60^\circ} = 35,5 e^{-j60^\circ} = 17,8 - j30,7 \text{ В.}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_3 &= \underline{Z}_{13} + \frac{\underline{Z}_{23}\underline{Z}_{33}}{\underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{33}} = R_1 + j3\omega L_1 + \frac{(R_2 + j3\omega L_2)\left(R_3 - \frac{j}{3\omega C_3}\right)}{R_2 + j3\omega L_2 + R_3 - \frac{j}{3\omega C_3}} = \\ &= 2 + 3j \cdot 314 \cdot 10 \cdot 10^{-3} + \frac{(4 + 3j \cdot 314 \cdot 20 \cdot 10^{-3})\left(5 - \frac{j}{3 \cdot 314 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}}\right)}{4 + 3j \cdot 314 \cdot 20 \cdot 10^{-3} + 5 - \frac{j}{3 \cdot 314 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}}} = \\ &= 6,93 + j9,28 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{13} = \frac{\dot{U}_3}{\underline{Z}_3} = \frac{17,8 - j30,7}{6,93 + j9,28} = -1,2 - j2,8 = 3,04 e^{j246^\circ 50'} \text{ А.}$$

$$i_{13} = 3,04\sqrt{2} \sin(3\omega t + 246^\circ 50') = 4,24 \cdot \sin(3\omega t + 246^\circ 50') \text{ А.}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{23} &= \frac{\dot{U}_3 - (R_1 + 3j\omega L_1)\dot{I}_{13}}{R_2 + 3j\omega L_2} = \\ &= \frac{17,8 - j30,7 - (2 + j3 \cdot 314 \cdot 10 \cdot 10^{-3})(-1,2 - j2,8)}{4 + j3 \cdot 314 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = \\ &= 2,34 + j1,92 = 3,02 e^{j39^\circ 20'} \text{ А.} \end{aligned}$$

$$i_{23} = 3,02\sqrt{2} \sin(3\omega t + 39^\circ 20') = 4,37 \sin(3\omega t + 39^\circ 20') \text{ А.}$$

$$\dot{I}_{33} = \dot{I}_{13} - \dot{I}_{23} = 1,2 - j2,8 - 2,34 - j1,92 = -3,54 - j4,72 = 5,96 e^{j233^\circ} \text{ А.}$$

$$i_{33} = 5,9\sqrt{2} \sin(3\omega t + 233^\circ) = 8,3 \sin(3\omega t + 233^\circ) \text{ А.}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{C3} &= -\frac{j}{3\omega C_3} \dot{I}_{33} = -\frac{j}{3 \cdot 314 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}} (-3,54 - j4,72) = -5 + j3,75 = \\ &= 6,25 e^{j143^\circ 20'} \text{ В.} \end{aligned}$$

$$U_{C3} = 6,25 \text{ В.}$$

$$u_{C3} = 6,25\sqrt{2} \sin(3\omega t + 143^\circ 20') = 8,81 \sin(3\omega t + 143^\circ 20') \text{ В.}$$

4. Определим мгновенные и действующие значения токов в ветвях и напряжения на емкостном элементе.

$$i_1 = i_{10} + i_{11} + i_{13} = 16,7 + 19,9 \sin(\omega t + 1^\circ 10') + 4,24 \sin(3\omega t + 246^\circ 50') \text{ А.}$$

$$I_1 = \sqrt{I_{10}^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2} = \sqrt{16,7^2 + 14,2^2 + 3,06^2} = 22,13 \text{ А.}$$

$$i_2 = i_{20} + i_{21} + i_{23} = 16,7 + 18 \sin(\omega t - 31^\circ) + 4,37 \sin(3\omega t + 39^\circ 20') \text{ А.}$$

$$I_2 = \sqrt{I_{20}^2 + I_{21}^2 + I_{23}^2} = \sqrt{16,7^2 + 12,8^2 + 3,02^2} = 21,26 \text{ А.}$$

$$i_3 = i_{30} + i_{31} + i_{33} = 0 + 10,6 \sin(\omega t + 65^\circ 50') + 8,3 \sin(3\omega t + 233^\circ) \text{ А.}$$

$$I_3 = \sqrt{I_{30}^2 + I_{31}^2 + I_{33}^2} = \sqrt{0 + 7,56^2 + 5,9^2} = 9,59 \text{ А.}$$

$$u_C = u_{C0} + u_{C1} + u_{C3} = 66,8 + 31,4 \sin(\omega t - 26^\circ 15') + 8,81 \sin(3\omega t + 143^\circ 20') \text{ В.}$$

$$U_C = \sqrt{U_{C0}^2 + U_{C1}^2 + U_{C3}^2} = \sqrt{66,8^2 + 22,3^2 + 6,25^2} = 70,7 \text{ В.}$$

5. Определим значения активной и полной мощностей

$$P = U_0 I_{10} + U_1 I_{11} \cos \varphi_1 + U_3 I_{13} \cos \varphi_3 = U_0 I_{10} + U_1 I_{11} \cos(\psi_{i11} - \psi_{u11}) + U_3 I_{13} \cos(\psi_{i13} - \psi_{u13}) = 100,0 \cdot 16,7 + 106,3 \cdot 14,2 \cos(30^\circ - 1^\circ 10') + 35,5 \cdot 3,06 \cos(-60^\circ - 246^\circ 50') = 3015,5 \text{ Вт.}$$

$$S = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_3^2} \cdot \sqrt{I_{10}^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2} = \sqrt{100,0^2 + 106,3^2 + 35,5^2} \cdot \sqrt{16,7^2 + 14,2^2 + 3,06^2} = 3324 \text{ ВА.}$$

4.3.2. Расчет нелинейной цепи переменного тока

Цепь (рис. 4.44) питается от источника синусоидального напряжения, $R_1 = 50 \text{ Ом}$, $R_2 = 60 \text{ Ом}$, $R_3 = 40 \text{ Ом}$, $X_2 = 60 \text{ Ом}$.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) нелинейной катушки индуктивности $U_2(I_1)$ и нелинейного конденсатора $U_3(I_3)$ для действующих значений представлены на рис. 4.45.

Задаваясь различными значениями тока через нелинейный конденсатор, рассчитать все токи и напряжения цепи и по полученным данным построить зависимость $U(I_2)$. По данным одного из расчетов построить векторную диаграмму цепи.

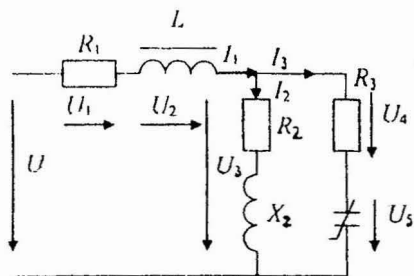


Рис. 4.44

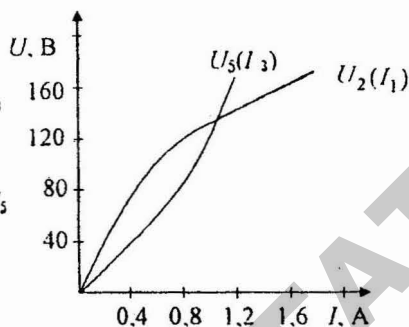


Рис. 4.45

Расчет

Пусть ток через нелинейный конденсатор равен $I_3 = 1,2$ А, тогда из ВАХ $U_3(I_3)$ следует, что напряжение $U_3 = 175$ В. Запишем ток I_3 и напряжение U_3 в комплексной форме. Принимаем, что ток I_3 совпадает с действительной осью комплексной плоскости, тогда

$$\dot{I}_3 = 1,2 \text{ А.}$$

Поскольку напряжение на емкости отстает по фазе от тока на 90° , то

$$\dot{U}_5 = -j175 \text{ В.}$$

Расчет остальных величин ведем комплексным методом.

Напряжение на резисторе R_3

$$\dot{U}_4 = R_3 \dot{I}_3 = 40 \cdot 1,2 = 48 \text{ В.}$$

Действующее значение $U_4 = 48$ В.

Напряжение на параллельных участках

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_4 + \dot{U}_5 = 48 - j175 \text{ В.}$$

Действующее значение $U_3 = \sqrt{48^2 + 175^2} = 181,5$ В.

Ток в другой параллельной ветви

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_3}{R_2 + jX_2} = \frac{48 - j175}{60 + j60} = -1,06 - j1,86 \text{ А, } I_2 = \sqrt{1,06^2 + 1,86^2} = 1,87 \text{ А.}$$

Ток I_1 найдем по первому закону Кирхгофа.

$$I_1 = I_2 + I_3 = -1,06 - j1,86 + 1,2 = 0,14 - j1,86 \text{ А.}$$

$$I_1 = \sqrt{0,14^2 + 1,86^2} = 1,87 \text{ А.}$$

По ВАХ нелинейной катушки индуктивности $U_2(I_1)$ находим $U_2 = 175 \text{ В}$. Как известно, напряжение на индуктивности опережает по фазе ток на 90° . Чтобы это учесть, запишем сначала ток в показательной форме

$$i_1 = I_1 e^{j\psi_{i1}},$$

$$\psi_{i1} = \arctg \frac{-1,86}{0,14} = -85^\circ 40',$$

$$i_1 = 1,87 e^{-j85^\circ 40'} \text{ А.}$$

Начальная фаза напряжения u_2

$$\psi_{u2} = \psi_{i1} + 90^\circ = -85^\circ 40' + 90^\circ = 4^\circ 20'$$

Тогда напряжение U_2 в комплексной форме

$$\dot{U}_2 = 175 e^{j4^\circ 20'}$$

$$\dot{U}_2 = 175 \cos 4^\circ 20' + j175 \sin 4^\circ 20' = 174,5 + j13,1 \text{ В.}$$

Напряжение на резисторе R_1 найдем по закону Ома:

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 = 50(0,14 - j1,86) = 7 - j93 \text{ В,}$$

$$U_1 = \sqrt{7^2 + 93^2} = 93,5 \text{ В.}$$

Напряжение на входе цепи найдем по второму закону Кирхгофа

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 = 7 - j93 + 174,5 + j13,1 + 48 - j175 = 229,5 - j254,9 \text{ В.}$$

$$U = \sqrt{229,5^2 + 254,9^2} = 343 \text{ В.}$$

Задаваясь другими значениями тока через нелинейный конденсатор, произведем аналогичные расчеты.

Данные расчетов сведены в табл. 4.3.

По значениям напряжения U и I_2 строим зависимость $U(I_2)$ (рис. 4.46).

Векторную диаграмму напряжений и токов строим по данным приведенного расчета (рис. 4.47).

4.3. Таблица расчетных данных

I_2, A	I_2, A	I_1, A	U_3, B	U_4, B	U_2, B	U_3, B	U_1, B	U_1, B
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0,17	0,236	12	8	14,4	60	11,8	62,8
0.4	0,4	0,48	30	16	34	90	24	102,6
0.6	0,707	0,741	55	24	60	120	37	151
0.8	1,02	1,02	80	32	86,2	140	51	194,2
1.0	1,49	1,37	120	40	126,5	160	74,5	239,2
1.2	2.14	1,87	175	48	181,5	175	93,3	344,4

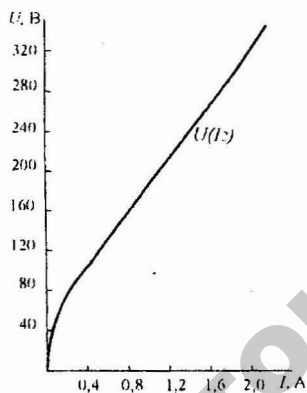


Рис. 4.46

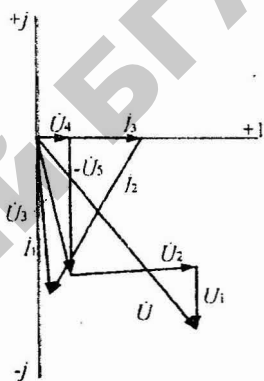


Рис. 4.47

5. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

5.1. Контрольное задание 5

Пятое задание содержит одну задачу по расчету переходного процесса в разветвленной электрической цепи.

Задача 5.1. В электрической цепи постоянного тока (рис. 5.1...5.20) происходит коммутация. Схема и параметры цепи, соответствующие номеру варианта, заданы в табл. 5.1.

Определить переходный ток или напряжение после коммутации, указанные в табл. 5.1.

Задачу решить двумя методами: классическим и операторным.

5.1. Варианты и исходные данные к задаче 5.1

Вариант	Рисунок	E В	L мГн	C мкФ	R_1 Ом	R_2 Ом	R_3 Ом	Опре- дить
1	5.1	230	1	100	12	12	—	i_1
2	5.2	50	1	1500	2	13	5	i_1
3	5.3	160	1	130	8	10	—	i_1
4	5.4	100	1	10	50	50	—	u_C
5	5.5	160	1	130	8	10	—	i_1
6	5.6	100	1	10	20	20	2	i_1
7	5.7	100	1	100	2	20	—	i_1
8	5.8	200	10	10	100	50	100	i_1
9	5.9	220	1	25	10	20	—	u_C
10	5.10	120	10	10	100	1000	1000	i_1
11	5.11	155	1	25	20	50	—	i_1
12	5.12	200	1	10	10	20	70	i_1
13	5.13	100	1	10	2	—	—	i_1
14	5.14	120	1	10	3	1	1	i_2
15	5.15	100	1	10	3	—	—	i_1
16	5.16	50	1	100	10	10	10	i_1
17	5.17	150	4	5	10	10	5	u_C
18	5.18	50	2	1670	1	2	6	i_1
19	5.19	100	1	10	4	—	—	i_1
20	5.20	100	1	10	20	20	2	i_1
21	5.1	160	1	130	8	10	—	i_2
22	5.2	100	1	1500	2	18	5	u_{R1}
23	5.3	75	1	200	10	10	—	i_2
24	5.4	100	1	10	50	50	—	i_3
25	5.5	220	0.5	250	10	8	—	i_2
26	5.6	75	1	10	25	25	3	i_3
27	5.7	155	10	2.5	20	5	—	i_2

Продолжение таблицы 5.1

Вариант	Рисунок	E В	L мГн	C мкФ	R_1 Ом	R_2 Ом	R_3 Ом	Определить
28	5.8	200	10	10	100	50	100	i_3
29	5.9	127	10	10	10	10	—	i_3
30	5.10	120	10	10	100	1000	1000	i_2
31	5.11	220	0.5	25	10	80	—	i_3
32	5.12	200	1	10	10	10	80	i_2
33	5.13	100	10	100	1	—	—	i_2
34	5.14	120	1	10	3	1	1	i_1
35	5.15	80	1	10	4	—	—	i_2
36	5.16	50	1	100	10	10	10	i_3
37	5.17	150	4	5	10	10	5	i_1
38	5.18	50	2	1670	1	2	6	i_2
39	5.19	100	1	10	4	—	—	i_3
40	5.20	100	1	10	20	20	2	u_L
41	5.1	220	0.5	150	8	10	—	i_3
42	5.2	200	1	1500	2	20	5	i_2
43	5.3	110	3	40	50	50	—	i_3
44	5.4	175	1	10	60	50	—	i_2
45	5.5	230	0.5	40	12	12	—	i_3
46	5.6	200	1	10	20	20	10	u_C
47	5.7	220	5	2.5	10	8	—	i_3
48	5.8	200	10	10	100	50	100	u_C
49	5.9	75	1	20	10	20	—	i_1
50	5.10	150	10	10	100	1000	1000	u_{R1}
51	5.11	127	10	10	10	10	—	i_2
52	5.12	200	1	10	10	25	65	i_3
53	5.13	80	5	40	2	—	—	i_3
54	5.14	120	1	10	3	1	1	u_C
55	5.15	100	10	100	3	—	—	i_3
56	5.16	50	1	100	10	10	10	u_L
57	5.17	150	4	5	10	10	5	i_2
58	5.18	50	2	1670	1	2	6	u_L
59	5.19	100	1	10	4	—	—	i_2
60	5.20	100	1	10	20	20	2	u_C
61	5.1	127	1	110	10	10	—	u_C
62	5.2	100	1	1500	2	20	5	u_C
63	5.3	155	1	25	20	50	—	u_C
64	5.4	200	1	10	10	40	—	i_1
65	5.5	75	1	200	10	10	—	u_C
66	5.6	100	1	10	20	20	2	u_L
67	5.7	110	3	40	50	50	—	u_C
68	5.8	20	10	10	95	40	50	u_{R3}
69	5.9	110	3	40	50	50	—	i_2
70	5.10	120	10	10	100	1000	1000	u_C
71	5.11	160	10	10	8	10	—	u_C

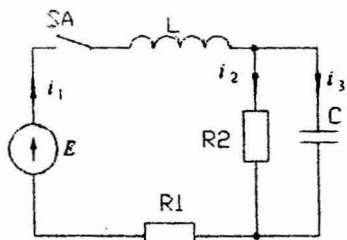


Рис. 5.1

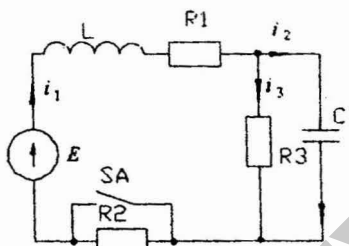


Рис. 5.2

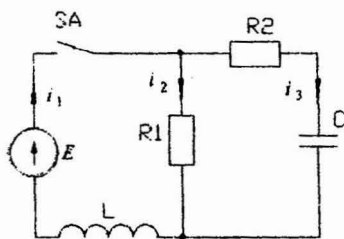


Рис. 5.3

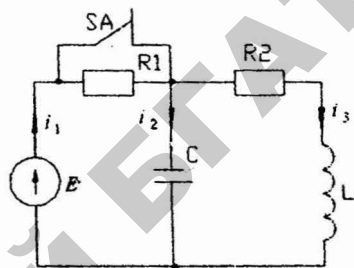


Рис. 5.4

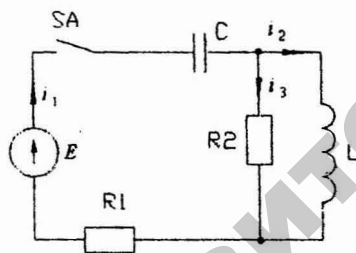


Рис. 5.5

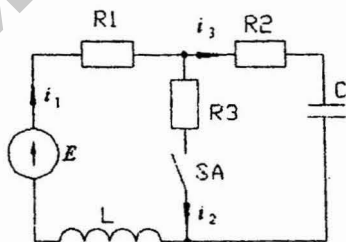


Рис. 5.6

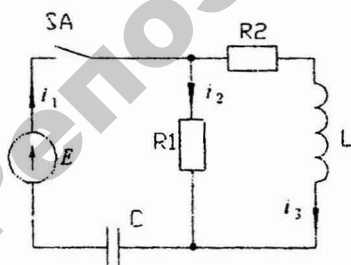


Рис. 5.7

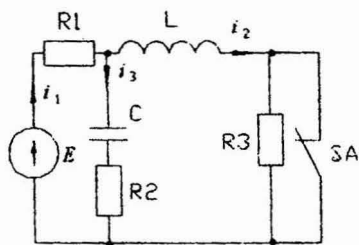


Рис. 5.8

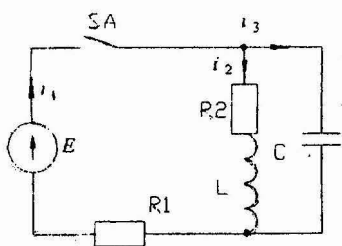


Рис. 5.9

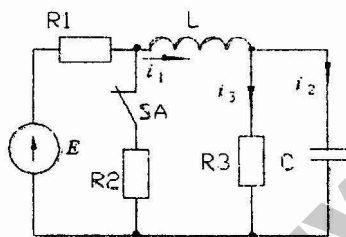


Рис. 5.10

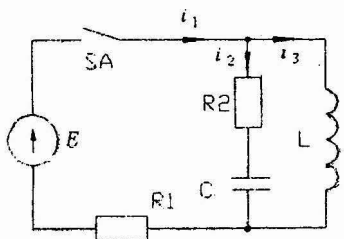


Рис. 5.11

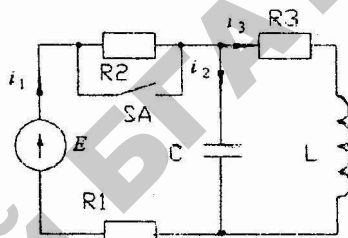


Рис. 5.12

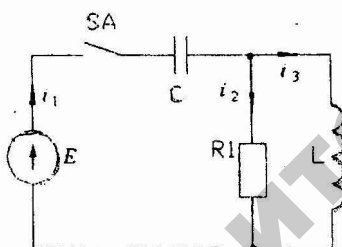


Рис. 5.13

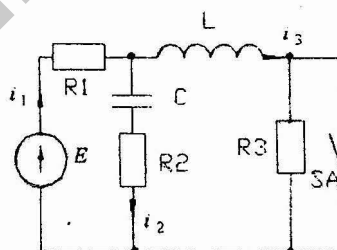


Рис. 5.14

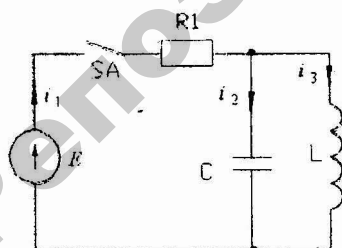


Рис. 5.15

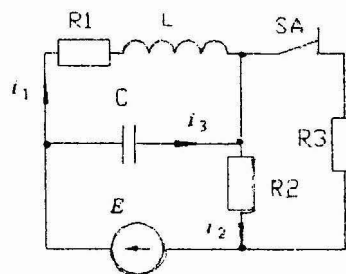


Рис. 5.16

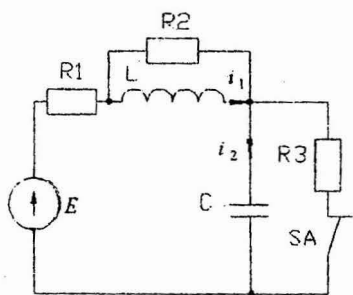


Рис. 5.17

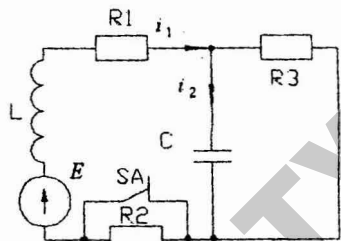


Рис. 5.18

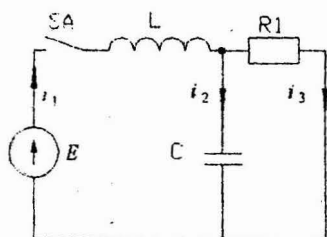


Рис. 5.19

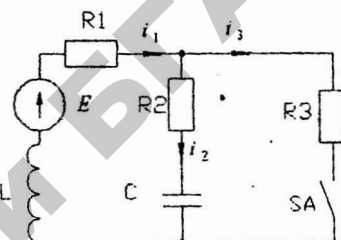


Рис. 5.20

Вариант	Рисунок	E В	L мГн	C мкФ	R_1 Ом	R_2 Ом	R_3 Ом	Определить
72	5.12	200	1	10	10	18	72	u_C
73	5.13	50	1	2	10	—	—	u_C
74	5.14	95	1	10	3	1	1	i_3
75	5.15	50	10	100	4	—	—	u_L
76	5.16	50	1	100	10	10	10	u_C
77	5.17	100	4	5	10	10	10	u_{R1}
78	5.18	50	2	1670	1	2	6	u_C
79	5.19	100	1	10	4	—	—	u_L
80	5.20	100	1	10	20	20	2	i_2
81	5.1	75	10	60	10	1	—	u_{R1}
82	5.2	25	1	1500	4	11	6	i_3
83	5.3	230	0.5	40	12	12	—	u_L
84	5.4	200	1	10	50	40	—	u_{R2}
85	5.5	230	5	400	12	12	—	u_L
86	5.6	100	1	10	20	20	2	u_{R1}
87	5.7	127	10	10	10	10	—	u_{R1}
88	5.8	75	10	10	100	50	50	i_2
89	5.9	150	1	20	10	20	—	u_{R2}
90	5.10	95	10	10	105	1000	1000	u_L
91	5.11	150	2	20	2	12	—	u_L
92	5.12	300	1	10	10	15	67	u_L
93	5.13	50	5	4	10	—	—	u_L
94	5.14	40	5	5	4	2	2	u_L
95	5.15	100	100	10	15	—	—	u_C
96	5.16	50	1	100	10	10	10	i_2
97	5.17	75	4	5	24	1	5	u_L
98	5.18	100	3	1670	2	20	5	u_{R2}
99	5.19	30	1	10	3	—	—	u_C
100	5.20	90	1	10	20	20	12	u_{R1}

5.2. Методические указания

5.2.1. Сущность классического и операторного методов расчета переходных процессов

Для выполнения задания «Расчет переходных процессов в разветвленных электрических цепях» необходимо знать, что понимают под переходным процессом, коммутацией, необходимо изучить сущность и порядок расчета переходного процесса классическим и операторным методами.

Указанные вопросы можно изучить по учебникам [1] §§ 8.1...8.13, 8.26, 8.27, 8.31...8.39, 8.41...8.49; [3] §§ 14.1, 14.2, 14.14, 15.1...15.3.

Задача расчета переходных процессов в электрических цепях состоит в

том, чтобы найти законы изменения физических величин (тока, падения напряжения на отдельных участках цепи) во времени с момента коммутации.

Расчет переходных процессов можно провести классическим или операторным методом.

Классический метод расчета состоит в решении уравнения или системы уравнений, составленных по законам Кирхгофа в дифференциальной форме для электрической цепи после коммутации.

Общее решение неоднородного дифференциального уравнения равно сумме частного решения неоднородного уравнения и общего решения однородного уравнения. Исходя из этого, переходной ток равен сумме двух составляющих токов: установившегося (i_y) или принужденного и свободного $i_{св}$:

$$i = i_y + i_{св}, \quad (5.1)$$

где $i_{св} = Ae^{pt}$, A – постоянная интегрирования; p – корень характеристического уравнения.

Операторный метод расчета позволяет упростить расчет переходных процессов в разветвленных цепях.

С помощью преобразования Лапласа $F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt$ переходят от функции вещественной переменной $f(t)$, называемой оригиналом, к операторному изображению $F(p)$. Система дифференциальных уравнений после подобного перехода преобразуется в систему алгебраических уравнений, поэтому при расчете переходных процессов операторным методом можно использовать любой из методов, применяемых при расчете токов в установившемся режиме. При этом определяют изображение искомой функции. Переход от изображения к оригиналу производят с помощью теоремы разложения.

5.2.2. Порядок расчета переходного процесса классическим методом

1. В цепи после коммутации указывают положительные направления токов в ветвях и направление обхода по контуру.

2. Составляют систему дифференциальных уравнений по первому и второму законам Кирхгофа.

3. Записывают решение искомой величины, например тока, в виде

$$i = i_y + i_{св} = i_y + \sum_{k=1}^n (A_k e^{pk t}). \quad (5.2)$$

4. Определяют установившееся значение тока i_y .

5. Определяют свободную составляющую переходного тока, для чего:

- составляют характеристическое уравнение и определяют его корни;
- находят постоянные интегрирования из начальных условий.

6. Подставляя в (5.2) найденные значения установившегося и свободного токов, записывают выражение переходного тока.

5.2.3. Пояснения к расчету переходных процессов классическим методом

1. Расчет установившихся токов, падений напряжений производится для цепи после коммутации методами, которые используются при расчете электрических цепей постоянного и переменного токов.

При наличии в цепях источника постоянного напряжения следует учитывать, что в установившемся режиме ток через конденсатор не идет, т. е. $i_{C\gamma} = 0$, и падение напряжения на индуктивности $u_{Ly} = 0$, т. к. нет изменения тока во времени. Рекомендуется для нового установившегося режима составить расчетную схему: вместо катушки индуктивности изобразить шунт, вместо конденсатора – разрыв цепи.

2. Для определения свободной составляющей переходного тока или напряжения необходимо предварительно составить характеристическое уравнение и решить его, определив тем самым его корни.

Характеристическое уравнение можно получить следующим образом:

а) записывают систему дифференциальных уравнений, по законам Кирхгофа для свободных переходных токов (систему однородных дифференциальных уравнений);

б) производят алгебраизацию системы дифференциальных уравнений, для чего операцию дифференцирования $\frac{d}{dt}$ заменяют на p , операцию интегрирования $\int dt$ заменяют на $\frac{1}{p}$, получают систему алгебраических уравнений;

в) составляют главный определитель Δ полученной системы уравнений и приравнивают его к нулю. Уравнение $\Delta = 0$ есть характеристическое уравнение.

Характеристическое уравнение можно получить и до составления дифференциальных уравнений. Для этого находят входное комплексное сопротивление цепи после коммутации $\underline{Z}_{вх}(j\omega)$. Во входном комплексном сопротивлении $j\omega$ заменяют оператором p , получают $\underline{Z}_{вх}(p)$. Приравняв $\underline{Z}_{вх}(p)$ к нулю, получают характеристическое уравнение.

В случае двух разных корней характеристического уравнения свободная составляющая тока записывается в виде

$$i_{св} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (5.3)$$

где A_1 и A_2 – постоянные интегрирования, которые определяют из начальных условий.

Переходный ток

$$i = i_y + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (5.4)$$

Для определения двух постоянных интегрирования записывают переходный ток i и его производную для начального момента времени $t = 0$

$$\begin{cases} i(0) = i_y(0) + A_1 + A_2; \\ \frac{di}{dt}(0) = \frac{di_y}{dt}(0) + p_1 A_1 + p_2 A_2. \end{cases} \quad (5.5)$$

Для решения уравнений (5.5) относительно постоянных интегрирования A_1 и A_2 необходимо найти начальные условия.

Порядок определения начальных условий.

1. Находят независимые начальные условия, т. е. ток через индуктивность i_L и напряжение на емкости до коммутации по тем же правилам, что и установившиеся значения. Согласно законам коммутации

$$i_L(0-) = i_L(0) = i_L(0+); \quad (5.6)$$

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

2. Начальные значения других токов и напряжений и их производных (зависимые начальные условия) находят из системы дифференциальных уравнений, записанной для времени $t = 0$, подставив в нее ранее найденные $i_L(0)$ и $u_C(0)$.

3. Если есть необходимость в определении каких-либо производных, которых в уравнении нет, то дифференцируют всю систему или отдельные ее уравнения и их записывают для времени $t = 0$.

Примечание. В случае, если корни характеристического уравнения комплексные сопряженные $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_0$, то решение дифференциальных уравнений для любого тока (аналогично и напряжения) будет иметь вид:

$$i = i_y + i_{св} = i_y + A e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \theta). \quad (5.7)$$

Значения A и θ определяют из начальных условий. Так как неизвестных две, то уравнение (5.7) дополняется вторым уравнением, полученным путем взятия производной от уравнения (5.7)

$$\frac{di}{dt} = \frac{di_y}{dt} - A\delta e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \theta) + A e^{-\delta t} \omega_0 \cos(\omega_0 t + \theta). \quad (5.8)$$

5.2.4. Порядок расчета переходных процессов операторным методом

1. Составляют эквивалентную операторную схему.
2. Находят изображение искомой переходной величины, применив из-

вестные методы расчета электрических цепей для установившихся режимов.

Изображение должно быть найдено в виде дроби $\frac{F_1(p)}{F_2(p)}$.

3. Используя теорему разложения

$$f(t) = \sum \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t}, \quad (5.9)$$

где p_k – корни уравнения $F_2(p) = 0$, находят оригинал искомой переходной величины.

5.2.5. Пояснения к расчету переходных процессов операторным методом

1. При составлении эквивалентной операторной схемы нужно учесть, что постоянная ЭДС E имеет изображение $\frac{E}{p}$. В ветви, содержащие индуктивность и емкость, вводят добавочные ЭДС. Величина добавочной ЭДС в ветви с индуктивностью определяется начальным током $i_L(0)$ и равна $Li_L(0)$, в ветви с емкостью – величиной начального напряжения $u_C(0)$ и равна $-\frac{u_C(0)}{p}$. Направления добавочных ЭДС должны совпадать с направлением токов в этих ветвях.

Сопротивление участка цепи с последовательным соединением R, L, C записывается как $Z(p) = R + Lp + \frac{1}{pC}$, т. е. так же как комплексное сопротивление при синусоидальном токе, только $j\omega$ заменяется на p .

2. При определении изображения искомой переходной величины используются методы для расчета токов в установившемся режиме – метод уравнений Кирхгофа, метод контурных токов и др., при этом запись уравнений в каждом методе аналогична записи их в комплексной форме.

3. При необходимости найти напряжение на участке цепи определяют изображение тока этого участка, затем находят изображение падения напряжения на участке, используя закон Ома в операторной форме:

а) на участке с сопротивлением R

$$U_R(p) = RI(p); \quad (5.10)$$

б) на участке с индуктивностью L

$$U_L(p) = pLI_L(p) - Li_L(0); \quad (5.11)$$

в) на участке с емкостью C

$$U_C(p) = \frac{1}{pC} I_C(p) + \frac{u_C(0)}{p}. \quad (5.12)$$

Затем, используя теорему разложения, находят оригинал искомого напряжения.

5.3. Пример

Определить переходный ток i_3 в цепи (рис. 5.21) после коммутации классическим и операторным методами, если $E = 500$ В, $R_1 = 400$ Ом, $R_2 = 100$ Ом, $L = 10^{-2}$ Гн, $C = 10^{-6}$ Ф.

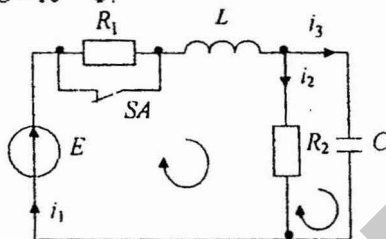


Рис. 5.21

Решение

Классический метод

1. Указываем на схеме направления токов и обход по контуру и составляем систему уравнений для послекоммутационного режима по законам Кирхгофа:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0; \\ i_1 R_1 + L \frac{di_1}{dt} + i_2 R_2 = E; \\ \frac{1}{C} \int i_3 dt - i_2 R_2 = 0. \end{cases} \quad (5.13)$$

2. Запишем выражение переходного тока i_3 в виде

$$i_3 = i_{3y} + i_{3св}.$$

3. Определяем i_{3y} .

Так как в установившемся режиме емкость является разрывом в цепи постоянного напряжения, то $i_{3y} = 0$.

4. Составляем характеристическое уравнение, для чего записываем систему дифференциальных уравнений для свободных токов на основании системы уравнений (5.13)

$$\begin{cases} i_{1CB} - i_{2CB} - i_{3CB} = 0; \\ i_{1CB}R_1 + L \frac{di_{1CB}}{dt} + i_{2CB}R_2 = 0; \\ \frac{1}{C} \int i_{3CB} dt - i_{2CB}R_2 = 0. \end{cases} \quad (5.14)$$

В системе (5.14) $\frac{d}{dt}$ заменяем на p , $\int dt$ заменяем на $\frac{1}{p}$

$$\begin{cases} i_{1CB} - i_{2CB} - i_{3CB} = 0; \\ i_{1CB}R_1 + Lpi_{1CB} + i_{2CB}R_2 = 0; \\ \frac{1}{Cp} i_{3CB} - i_{2CB}R_2 = 0. \end{cases} \quad (5.15)$$

Составляем главный определитель системы (5.15) и приравняем его к нулю:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ R_1 + Lp & R_2 & 0 \\ 0 & -R_2 & \frac{1}{Cp} \end{vmatrix} = \frac{R_2}{Cp} + \frac{R_1 + Lp}{Cp} + R_2(R_1 + Lp) =$$

$$= \frac{R_2 + R_1 + Lp + R_1R_2Cp + LCR_2p^2}{Cp} = 0;$$

$$R_2LCp^2 + p(L + R_1R_2C) + R_1 + R_2 = 0. \quad (5.16)$$

Уравнение $\Delta = 0$ является характеристическим.

Подставим в (5.16) значения R_1 , R_2 , C , L :

$$100 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + p(10^{-2} + 4 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}) + 500 = 0;$$

$$10^{-6} \cdot p^2 + 5 \cdot 10^{-2} \cdot p + 500 = 0;$$

$$p_{12} = \frac{-5 \cdot 10^{-2} \pm \sqrt{(5 \cdot 10^{-2})^2 - 4 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}}{2 \cdot 10^{-6}};$$

$$p_1 = -1,39 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1};$$

$$p_2 = -3,61 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

Имеем два разных корня, поэтому выражение свободного тока имеет

вид

$$i_{3CB} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

5. Определим постоянные интегрирования A_1 и A_2 , решая уравнения

$$\begin{cases} i_3(0) = i_{3y(0)} + A_1 + A_2; \\ \frac{di_3}{dt}(0) = p_1 A_1 + p_2 A_2. \end{cases} \quad (5.17)$$

Находим начальные условия $i_3(0)$ и $\frac{di_3}{dt}(0)$. Так как они являются зависимыми начальными условиями, то предварительно находим независимые начальные условия $i_{1(0)}$ и $u_C(0)$.

Для докоммутированного установившегося режима расчетная схема имеет вид (рис. 5.22), из которой следует, что

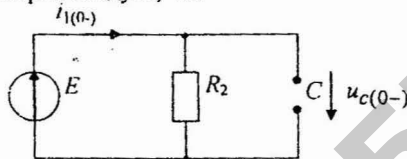


Рис. 5.22.

$$i_{1(0)} = i_{1(0-)} = \frac{E}{R_2} = \frac{500}{100} = 5 \text{ A.}$$

$$u_C(0) = u_C(0-) = E = 500 \text{ В.}$$

Подставим $i_{1(0)}$ и $u_C(0)$ в систему уравнений (5.13) и решим ее для $t = 0$:

$$\begin{cases} i_{1(0)} - i_2(0) - i_3(0) = 0; \end{cases} \quad (5.18)$$

$$\begin{cases} i_{1(0)}R_1 + L \frac{di_1}{dt}(0) + i_2(0)R_2 = E; \end{cases} \quad (5.19)$$

$$\begin{cases} u_C(0) - i_2(0)R_2 = 0. \end{cases} \quad (5.20)$$

$$\begin{cases} 5 - i_2(0) - i_3(0) = 0; \\ 5 \cdot 400 + 10^{-2} \frac{di_1}{dt}(0) + i_2(0) \cdot 100 = 500; \\ 500 - i_2(0) \cdot 100 = 0. \end{cases}$$

$$i_2(0) = \frac{500}{100} = 5 \text{ A}; \quad i_3(0) = 0.$$

Для определения $\frac{di_3}{dt}(0)$ из уравнения (5.19) находим

$$\frac{di_1}{dt}(0) = \frac{E - i_{1(0)}R_1 - i_2(0)R_2}{L} = \frac{500 - 5 \cdot 400 - 5 \cdot 100}{10^{-2}} = -2 \cdot 10^5 \frac{\text{A}}{\text{с}}$$

Продифференцируем третье уравнение системы (5.13) и подставим $t = 0$:

$$\frac{i_3(0)}{C} - \frac{di_2(0)}{dt} R_2 = 0, \text{ откуда } \frac{di_2(0)}{dt} = \frac{i_3(0)}{CR_2} = \frac{0}{10^{-6} \cdot 100} = 0.$$

Продифференцируем первое уравнение системы (5.13) и подставим $t = 0$:

$$\frac{di_1(0)}{dt} - \frac{di_2(0)}{dt} - \frac{di_3(0)}{dt} = 0, \text{ откуда } \frac{di_3(0)}{dt} = \frac{di_1(0)}{dt} - \frac{di_2(0)}{dt} = -2 \cdot 10^5 \frac{\text{A}}{\text{с}}$$

Найденные начальные условия подставим в (5.17) и найдем постоянные интегрирования:

$$\begin{cases} 0 = A_1 + A_2; \\ -2 \cdot 10^5 = -7,39 \cdot 10^4 A_1 - 9,61 \cdot 10^4 A_2; \end{cases}$$

$$A_1 = -9 \text{ A};$$

$$A_2 = 9 \text{ A}.$$

6. Записываем выражение переходного тока i_3

$$i_3 = -9e^{-13900t} + 9e^{-36100t} \text{ A}.$$

Операторный метод

1. Составляем эквивалентную операторную схему с учетом добавочных ЭДС (рис. 5.23).

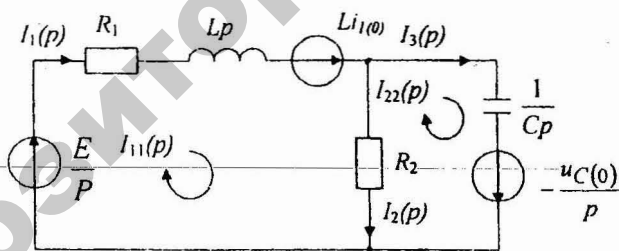


Рис. 5.23

2. Находим изображение тока $I_3(p)$, используя метод контурных токов;

$$\begin{cases} I_{11}(p)(R_1 + Lp + R_2) - I_{22}(p)R_2 = \frac{E}{p} + Li_1(0) \\ I_{22}(p)\left(\frac{1}{Cp} + R_2\right) - I_{11}(p)R_2 = -\frac{u_C(0)}{p} \end{cases} \quad (5.21)$$

$$\Delta(p) = \begin{vmatrix} (R_1 + Lp + R_2) & -R_2 \\ -R_2 & (\frac{1}{Cp} + R_2) \end{vmatrix} = \frac{(R_1 + Lp + R_2)(R_2 Cp + 1)}{Cp} - R_2^2 =$$

$$= \frac{R_2 CLp^2 + p(R_1 R_2 C + L) + R_1 + R_2}{Cp} = \frac{10^{-6} p^2 + 5 \cdot 10^{-2} p + 500}{Cp}$$

$$\Delta_2(p) = \begin{vmatrix} (R_1 + Lp + R_2) & (\frac{E}{p} + Li_{1(0)}) \\ -R_2 & -\frac{u_{C(0)}}{p} \end{vmatrix} = \frac{-u_{C(0)}(R_1 + Lp + R_2)}{p} +$$

$$+ R_2 \left(\frac{E}{p} + Li_{1(0)} \right) = \frac{-u_{C(0)}(R_1 + Lp + R_2) + ER_2 + R_2 Li_{1(0)} p}{p} =$$

$$= \frac{-500 \cdot 400 - 500 \cdot 10^{-2} \cdot p - 500 \cdot 100 + 100 \cdot 500 + 100 \cdot 10^{-2} \cdot 5p}{p} = \frac{-2 \cdot 10^5}{p}$$

$$I_{22}(p) = I_{33}(p) = \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} = \frac{-2 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}}{10^{-6} p^2 + 5 \cdot 10^{-2} p + 500} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}$$

Определяем корни уравнения $F_2(p) = 0$:

$$10^{-6} p^2 + 5 \cdot 10^{-2} p + 500 = 0,$$

$$p_1 = -1,39 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}; \quad p_2 = -3,61 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

Возьмем производную: $F_2'(p) = 2 \cdot 10^{-6} p + 5 \cdot 10^{-2}$.

Находим значения производной при каждом корне:

$$F_2'(p_1) = 2 \cdot 10^{-6} (-1,39 \cdot 10^4) + 5 \cdot 10^{-2} = 2,22 \cdot 10^{-2};$$

$$F_2'(p_2) = 2 \cdot 10^{-6} (-3,61 \cdot 10^4) + 5 \cdot 10^{-2} = -2,22 \cdot 10^{-2}.$$

Используя теорему разложения, найдем выражение переходного тока i_3 :

$$i_3 = \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{F_2'(p_2)} e^{p_2 t} = \frac{-0,2}{2,22 \cdot 10^{-2}} e^{-13900t} + \frac{-0,2}{-2,22 \cdot 10^{-2}} e^{-36100t} =$$

$$= -9e^{-13900t} + 9e^{-36100t} \text{ А.}$$

Результаты, полученные классическим и операторным методами, совпадают

ПРОГРАММА

дисциплины “Теоретические основы электротехники” для специальности
1 – 74 06 05 – “Энергетическое обеспечение сельскохозяйственного
производства”.

Предисловие

Цель дисциплины – изучение закономерностей электромагнитных процессов в электрических цепях и электромагнитных полях и овладение методиками расчета электрических цепей и электромагнитных полей.

Задачами изучения дисциплины являются:

- 1) знание сущности электромагнитных явлений и принципов их технического использования;
- 2) знание методик расчета электрических цепей и электромагнитных полей;
- 3) умение анализировать явления, происходящие в электротехнических устройствах;
- 4) умение рассчитывать электрические цепи и электромагнитные поля;
- 5) умение применять ЭВМ для расчета электрических цепей;
- 6) владение методикой экспериментальных исследований электрических цепей и электромагнитных полей.

Дисциплина базируется на знании курса физики и особенно таких разделов как электричество и магнетизм, а также таких разделов курса высшей математики и вычислительной техники как теория матриц, дифференциальное и интегральное исчисление, дифференциальные уравнения и методы их решения, включая численные, теорию функции комплексного переменного, преобразования Фурье – Лапласа, уравнения в частных производных, теорию поля.

Важнейшей составляющей частью процесса изучения курса является контролируемая самостоятельная работа студентов, которая включает не только изучение теоретических вопросов, но и обязательное выполнение контрольных заданий.

Дисциплина “Теоретические основы электротехники” является базовой для всех специальных электротехнических дисциплин.

Содержание дисциплины

Введение

Краткий исторический очерк развития науки об электрических и магнитных явлениях и их практическом применении. Содержание и построение курса теоретических основ электротехники и место его в общей системе электротехнического образования инженера. Современное состояние

электроэнергетики и перспективы ее развития.

1. Теория электрических цепей

1.1. Законы, элементы и параметры электрических цепей.

Электрическая цепь. Элементы электрических цепей, ЭДС, ток, напряжение, мощность, энергия. Законы электрических цепей. Параметры электрических цепей. Источники ЭДС и источники тока. Граф цепи. Матрицы соединений, контуров, сечений и связь между ними.

1.2 Теория линейных электрических цепей.

1.2.1. Основные понятия о цепях синусоидального тока.

Синусоидальные ЭДС, напряжения и токи. Генераторы синусоидальной ЭДС. Действующие и средние значения периодических ЭДС, напряжений и токов. Изображение синусоидальных функций времени комплексными числами. Векторные диаграммы.

Синусоидальный ток в цепи с последовательным соединением резистора, катушки индуктивности и конденсатора. Комплексные сопротивления и проводимости. Закон Ома и Кирхгофа в комплексной форме. Разность фаз напряжения и тока.

Мгновенная мощность и колебание энергии в цепи синусоидального тока. Активная, реактивная и полная мощности. Расчет мощности по комплексам напряжения и тока. Баланс мощностей. Двухполюсник. Схемы замещения двухполюсника. Топографические диаграммы. Условия передачи максимальной мощности от источника к приемнику.

1.1.2. Методы расчета электрических цепей при установившихся синусоидальных и постоянных токах.

Расчет цепи при последовательном, параллельном и смешанном соединении приемников. Метод уравнений Кирхгофа. Метод контурных токов. Метод узловых потенциалов. Метод двух узлов. Уравнения цепи в матричной форме. Применение ЭВМ. Принцип наложения и основанный на нем метод расчета цепи. Теорема компенсации. Метод эквивалентного генератора. Замена нескольких параллельных ветвей, содержащих ЭДС, одной эквивалентной. Преобразование соединения треугольником в эквивалентное соединение звездой и наоборот.

1.2.3. Резонанс в электрических цепях.

Резонанс при последовательном и параллельном соединении элементов цепи. Частотные характеристики последовательного и параллельного контуров. Компенсация сдвига фаз.

1.2.4. Цепь со взаимной индуктивностью.

Индуктивно-связанные элементы электрической цепи. Расчет индуктивно-связанных цепей. Трансформатор без ферромагнитного сердечника.

1.2.5. Четырехполюсники.

Четырехполюсники и их уравнения. Определение коэффициентов

четырёхполюсника. Эквивалентные схемы четырёхполюсника. Частотные электрические фильтры.

1.2.6. Трёхфазные цепи.

Трёхфазные генераторы. Трёхфазная система ЭДС. Расчет трёхфазных цепей в симметричных и несимметричных режимах. Мощность трёхфазных цепей. Измерение мощности в трёхфазных цепях. Вращающееся магнитное поле. Принцип действия асинхронного двигателя. Симметричные составляющие трёхфазной системы величин. Применение метода симметричных составляющих к расчету трёхфазных цепей.

1.2.7. Расчет электрических цепей при несинусоидальных периодических ЭДС, напряжениях и токах.

Разложение периодических функций в тригонометрический ряд. Расчет мгновенных значений напряжений и токов в электрических цепях при действии периодических несинусоидальных ЭДС. Действующее значение несинусоидальных токов и напряжений. Коэффициенты, характеризующие форму кривых токов и напряжений. Мощности при несинусоидальных токах и напряжениях. Влияние индуктивности и емкости на форму кривой тока при несинусоидальном напряжении. Замена несинусоидальных токов и напряжений эквивалентными синусоидами. Высшие гармоники в трёхфазных цепях.

1.2.8. Переходные процессы в электрических цепях.

Причины возникновения переходных процессов. Классический метод расчета. Переходные процессы в цепи R, L . Переходные процессы в цепи R, C . Переходные процессы в цепи R, L, C . Переходные процессы в разветвленных электрических цепях. Операторный метод расчета переходных процессов.

1.2.9. Цепи с распределенными параметрами.

Дифференциальные уравнения однородной линии. Однородная линия в установившемся режиме. Линия без потерь. Линия без искажений. Переходные процессы в цепях с распределенными параметрами.

1.3 Теория нелинейных электрических и магнитных цепей.

1.3.1. Нелинейные цепи постоянного тока.

Нелинейные цепи. Цепи с последовательным, параллельным и смешанным соединением нелинейных элементов. Расчет сложных нелинейных цепей. Метод 2-х узлов. Метод итераций. Статические и дифференциальные сопротивления. Эквивалентные схемы нелинейных элементов.

1.3.2. Магнитные цепи постоянного тока.

Основные понятия и законы магнитных цепей. Ферромагнитные материалы. Расчет неразветвленных и разветвленных магнитных цепей. Расчет магнитных цепей с постоянным магнитом.

1.3.3. Нелинейные цепи переменного тока.

Общие сведения о нелинейных цепях переменного тока. Методы расчета нелинейных цепей переменного тока. Потери энергии в ферромагнит-

ных сердечниках. Форма кривых тока и напряжения в цепи с катушкой с ферромагнитным сердечником. Эквивалентные параметры и схема замещения катушки с ферромагнитным сердечником. Феррорезонанс напряжений и токов. Стабилизаторы напряжения. Переходные процессы в нелинейных цепях.

2. Теория электромагнитного поля.

2.1. Электростатическое поле.

Закон Кулона. Напряженность и потенциал. Градиент потенциала. Электрическое смещение. Теорема Гаусса. Уравнения Пуассона и Лапласа. Емкость плоского конденсатора. Энергия электрического поля. Поле точечного заряда. Поле и емкость цилиндрического конденсатора. Поле и емкость двухпроводной линии.

2.2. Электрическое поле постоянных токов.

Плотность тока. Законы Ома, Джоуля-Ленца и Кирхгофа в дифференциальной форме. Аналогия между электрическим полем постоянного тока и электростатическим полем. Электрическое поле растекания токов.

2.3. Магнитное поле постоянных токов.

Основные величины, характеризующие магнитное поле и связь между ними. Закон полного тока. Принцип непрерывности магнитного потока. Магнитное поле и индуктивность тороида. Энергия магнитного поля. Магнитное поле и индуктивность двухпроводной линии. Взаимная индуктивность двух двухпроводных линий. Механические силы в магнитном поле.

2.4. Переменное электромагнитное поле.

Уравнения электромагнитного поля. Теорема Умова-Пойнтинга. Передача электромагнитной энергии вдоль проводов линии. Плоская электромагнитная волна в проводящей среде. Поверхностный эффект. Электромагнитное экранирование. Плоская электромагнитная волна в диэлектрике.

Примерное распределение учебного времени
(в процентах к общему времени)

№	Наименование раздела	Процент
1.	Введение, законы, элементы и параметры электрических цепей	7
2.	Основные понятия о цепях синусоидального тока. Методы расчета электрических цепей постоянного и синусоидального токов.	17
3.	Резонанс в электрических цепях. Цепи со взаимной индукцией. Четырехполюсники.	11
4.	Трехфазные цепи	12
5.	Расчет цепей при несинусоидальных токах	6
6.	Переходные процессы	13
7.	Цепи с распределенными параметрами	6
8.	Теория нелинейных электрических и магнитных цепей	14
9.	Теория электромагнитного поля	14
	Итого	100

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1984. – 559 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Высшая школа, 1986. – 263 с.
3. Основы теории цепей: Учебник для электротехнических и электро-энергетических специальностей вузов/ Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528с.
4. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники, т.1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536с.
5. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники, т.2. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 416с.
6. Теоретические основы электротехники, т.1. Под ред. П.А. Ионкина. – М.: Высшая школа, 1976. – 544с.
7. Теоретические основы электротехники, т.2. Под ред. П.А. Ионкина. – М.: Высшая школа, 1976. – 383с.
8. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч.1. – М.: Энергия, 1978. – 592с.
9. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. Под ред. Г.И. Атабекова. Ч. 2,3. – М.: Энергия, 1979. – 432 с.
10. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники Под ред. П.А. Ионкина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 503 с.
11. Сборник задач по теоретическим основам электротехники. Под редакцией Л.А. Бессонова. – М.: Высшая школа, 2000. – 528с.

Комплексные числа

Комплексное число, соответствующее точке, в которой лежит конец вектора \dot{A} (рис.1), может быть записано в следующих формах:

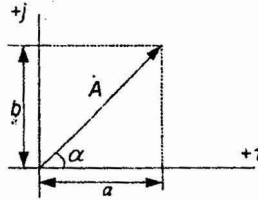


Рис. 1

$\dot{A} = a + jb$ — алгебраической;

$\dot{A} = A(\cos \alpha + j \sin \alpha)$ — тригонометрической;

$\dot{A} = A \cdot e^{j\alpha}$ — показательной;

$\dot{A} = A \angle \alpha$ — полярной.

Здесь $a = A \cos \alpha$ — действительная часть комплексного числа;

$jb = jA \sin \alpha$ — мнимая часть комплексного числа;

$j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица;

$A = |\dot{A}| = \sqrt{a^2 + b^2}$ — модуль комплексного числа;

$\alpha = \arctg \frac{b}{a}$ — угол (или аргумент) комплексного числа.

Комплексное число $\dot{A} = a - jb = A \cdot e^{-j\alpha}$ — называется сопряженным комплексному числу $\dot{A} = a + jb = A \cdot e^{j\alpha}$. Произведение комплексно-сопряженных чисел — число вещественное, равное квадрату их модуля:

$$\dot{A} \cdot A^* = A \cdot e^{j\alpha} \cdot A \cdot e^{-j\alpha} = A^2.$$

$e^{j\varphi}$ - оператор поворота на угол φ .

Умножение комплексного числа A на число $e^{j\varphi}$ сводится к повороту вектора A в комплексной плоскости на угол φ :

$$A \cdot e^{j\varphi} = A \cdot e^{j\alpha} \cdot e^{j\varphi} = A \cdot e^{j(\alpha + \varphi)}$$

$\varphi > 0$ - поворот против часовой стрелки.

$\varphi < 0$ - поворот по часовой стрелке.

Действия над комплексными числами

Вычисления над комплексными числами производятся так же, как и над обыкновенными двучленами, полагая $j = \sqrt{-1}$, $j^2 = -1$.

При делении одного комплексного числа на другое, записанных в алгебраической форме, уничтожают мнимость в знаменателе, для чего умножают числитель и знаменатель на число, сопряженное знаменателю:

$$\frac{a + jb}{c + jd} = \frac{(a + jb)(c - jd)}{(c + jd)(c - jd)} = \frac{ac - jad + jbc + bd}{c^2 + d^2} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + j \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}.$$

Возведение в степень $A^n = (A \cdot e^{j\alpha})^n = A^n \cdot e^{jn\alpha}$.

Извлечение корня:

$$\sqrt[n]{A} = \sqrt[n]{A \cdot e^{j\alpha}} = \sqrt[n]{A} \cdot e^{j \frac{\alpha + 2k\pi}{n}}$$

где k - целое число.

Основные законы электротехники	
Закон Ома	$i = \frac{u}{R}$
Первый закон Кирхгофа	$\sum i = 0$
Второй закон Кирхгофа	$\sum e = \sum u$
Закон Джоуля - Ленца	$p = i^2 R$
Закон электромагнитной индукции	$e = - \frac{d\Phi}{dt}$
Закон Ампера	$\vec{F} = i[d\vec{\ell} \vec{B}]$
Закон Кулона	$\vec{F} = \frac{q_1 q_2 \vec{R}_{01}}{4\pi\epsilon_0 R^2}$
Закон полного тока	$\oint \vec{H} d\vec{\ell} = \sum i$

Основные формулы и уравнения электротехники	
Мощность	$p = ui$
Энергия	$w = \int u i dt$
Энергия магнитного поля катушки	$w_{\text{мнг}} = \frac{Li^2}{2}$
Энергия электрического поля конденсатора	$w_{\text{эл}} = \frac{Cu^2}{2}$
Теорема Гаусса	$\oint \vec{D} d\vec{S} = \sum q_{\text{св}}$
Первое уравнение Максвелла	$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \epsilon_a \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$
Второе уравнение Максвелла	$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Теорема Умова - Пойнтинга	$-\oint \vec{H} d\vec{S} = \int_V \gamma E^2 dv + \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial t}$

**Соотношения между током и напряжением
на элементах электрической цепи**












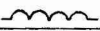

Элемент цепи	Вид тока			
	Переменный ток, мгновенное значение	Синусоидальный ток, комплексное значение	Синусоидальный ток, действующее значение	Постоянный ток
R	$u = iR$ $i = \frac{u}{R}$	$\dot{U} = \dot{I} R$ $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R}$	$U = IR$ $I = \frac{U}{R}$	$U = IR$ $I = \frac{U}{R}$
L	$u_L = L \frac{di}{dt}$ $i = \frac{1}{L} \int u_L dt$	$\dot{U} = j\omega L \dot{I}$ $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{j\omega L}$	$U = \omega L I$ $I = \frac{U}{\omega L}$	Индуктивность не оказывает сопротивления постоянному току
C	$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$ $i = C \frac{du_C}{dt}$	$\dot{U} = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I}$ $\dot{I} = j\omega C \dot{U}$	$U = \frac{1}{\omega C} I$ $I = \omega C U$	Емкость представляет собой разрыв цепи для постоянного тока


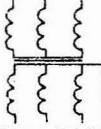



**Закон Ома
в комплексной форме для цепи синусоидального тока**

$$i = \frac{\dot{U}}{Z}, \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} = \frac{\dot{U}}{R + j(X_L - X_C)}$$

Приложение 3

Обозначения условные графические и буквенные в электрических схемах

Наименование	Графическое обозначение	Буквенное обозначение
1	2	3
Постоянный ток	—	
Полярность постоянного тока положительная	+	
Полярность постоянного тока отрицательная	—	
Переменный ток	~	
Переменный ток частотой 50 Гц	~50 Гц	
Трехфазный ток частотой 50 Гц, напряжением 220 В	3~50 Гц 220 В	
Трехфазный ток, четырехпроводная линия (три провода, нейтраль) частотой 50 Гц, напряжением 220/380 В	3N~50 Гц 220/380 В	
Резистор постоянный		<i>R</i>
Резистор постоянный с дополнительными отводами		<i>R</i>
Шунт измерительный		<i>R</i>
Резистор переменный		<i>R</i>
Терморезистор		<i>RK</i>
Варистор		<i>RU</i>
Потенциометр		<i>R</i>
Конденсатор постоянной емкости		<i>C</i>
Конденсатор постоянной емкости электролитический		<i>C</i>
Конденсатор переменной емкости		<i>C</i>
Вариконд		<i>C</i>
Катушка индуктивности		<i>L</i>
Дроссель с ферромагнитным магнитопроводом		<i>L</i>

1	2	3
Трансформатор однофазный двухобмоточный с ферромагнитным сердечником		<i>TV</i>
Автотрансформатор с ферромагнитным сердечником		<i>TV</i>
Измерительный трансформатор тока		<i>TA</i>
Трансформатор трехфазный с ферромагнитным магнитопроводом двухобмоточный с соединением обмоток звезда - звезда с выведенной нейтральной точкой		<i>TV</i>
Генератор постоянного тока со смешанным возбуждением		<i>G</i>
Синхронный генератор трехфазный с обмотками соединенными в звезду с невыведенной нейтральной точкой		<i>G</i>
Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением		<i>M</i>
Асинхронный двигатель трехфазный, соединенный в треугольник, с короткозамкнутым ротором		<i>M</i>
Амперметр		<i>PA</i>
Вольтметр		<i>PV</i>
Ваттметр		<i>PW</i>
Счетчик активной энергии		<i>PI</i>
Частотомер		<i>PF</i>
Фазометр		
Омметр		<i>PR</i>
Гальванометр		
Осциллограф		

1	2	3
Контакт замыкающий коммутационного устройства		<i>QS</i>
Контакт размыкающий коммутационного устройства		<i>QS</i>
Контакт переключающий с нейтральным центральным положением		<i>SA</i>
Разъединитель трехполюсный		<i>QS</i>
Контакт выключателя замыкающий трехполюсный с автоматическим срабатыванием максимального тока		<i>QF</i>
Переключатель однополюсный шестипозиционный		<i>SA</i>
Предохранитель плавкий		<i>FU</i>

Содержание

Общие методические указания и требования к оформлению контрольных заданий.....	3
1. Линейные электрические цепи постоянного тока. Контрольное задание 1.....	5
2. Линейные электрические цепи синусоидального тока. Контрольное задание 2.....	24
3. Трехфазные цепи синусоидального тока. Контрольное задание 3.....	41
4. Линейные электрические цепи несинусоидального переменного тока. Нелинейные электрические цепи переменного тока. Контрольное задание 4.....	58
5. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Контрольное задание 5.....	77
Литература.....	96
Приложение 1. Комплексные числа.....	97
Приложение 2. Основные законы, формулы, уравнения и соотношения в электротехнике.....	99
Приложение 3. Обозначения условные графические и буквенные в электрических схемах.....	101