

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ ЗАОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГОУ ВПО РГАЗУ)

Теоретические основы электротехники

Факультет энергетики и охраны водных ресурсов

Кафедра электрооборудования и автоматики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ И ЗАДАНИЯ
ДЛЯ КУРСОВОЙ И КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТ

Студентам 2*, 3 и 4 курсов направления 110800 «Агроинженерия»
подготовки бакалавров по профилю
«Электрооборудование и электротехнологии»

Москва 2011

Составители: доцент Л.В.Беляева, д.т.н., профессор С.И. Копылов,
к.т.н., доцент В.А.Оберюхтин, ст. преподаватель М.В. Попова

УДК 621.3 (075.5)

Теоретические основы электротехники: Методические указания по изучению дисциплины и задания для курсовой и контрольной работ / Росс. гос. аграр. заоч. ун-т; Сост. Л.В.Беляева, С.И. Копылов, В.А.Оберюхтин, М.В.Попова. М., 2011. с.

Предназначены для студентов 2*, 3 и 4 курсов

Утверждены методической комиссией факультета энергетики и охраны водных ресурсов протокол № __2__ от 18 октября 2011 г.

Рецензенты: д.т.н., проф. Л.П. Шичков, к.т.н., доц.О.А. Липа (РГАЗУ)

Раздел 1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина «Теоретические основы электротехники» относится к базовой (обязательной) части Б.3.П.В.02 цикла ООП. Методические указания по данной дисциплине составлены в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования, утвержденного Министерством образования и науки РФ 20 г. по направлению подготовки «Агроинженерия», примерной программой по дисциплине, утвержденной Департаментом образовательных программ и стандартов 20 г. и рабочими учебными планами, утвержденными ученым советом ФГОУ ВПО ЗГАЗУ 26.01.2011г.

1.1 Цели и задачи дисциплины

Цель - теоретическая и практическая подготовка будущих бакалавров в области электрификации сельскохозяйственного производства. Подготовка теоретической базы для изучения дисциплин в структуре ООП ВПО: Б.3.П.В. Б.1ГСЭ.

Задачи – изучение и усвоение методов расчета и синтеза электрических цепей, электрических и магнитных полей, принципов действия и областей применения основных электротехнических и электронных устройств и электроизмерительных приборов.

В результате освоения курса студент *должен*:

- *обладать компетенциями:*

ОК-1 - владением культурой мышления, способностью к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения;

ОК-2 – умением логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь;

ОК-6 – стремлению к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства, владением навыками самостоятельной работы;

ПК-1 – способностью к использованию основных законов естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применение методов математического анализа и моделирования;

ПК-3 – способностью решать инженерные задачи с использованием основных законов электротехники.

- *знать*: фундаментальные законы теории электромагнитного поля и теории цепей, современные методы расчета электрических цепей.

- *уметь*: применять теоретические знания к расчету, анализу и синтезу электрических и электронных цепей, исследовать электрические и магнитные цепи в статическом и динамическом режимах работы.

- *владеть*: методами составления и решения уравнений для анализа конкретных цепей, способами применения электронных устройств и электрических машин.

1.2. Библиографический список

Основной

1. Касаткин А.С. Курс электротехники: учеб. для вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов.- 10-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2009.
2. Касаткин А.С. Курс электротехники: учеб. для вузов /А.С. Касаткин, М.В. Немцов.- 9-е изд., стер.- М.: Высш. шк., 2007.
3. Иванов И.И. Электротехника: учебник для вузов / И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.С. Равдоник. – СПб.: Лань, 2009.
4. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника: учеб. пособие для вузов / М.А. Жаворонков, А.Ф. Кузин. – 2 - изд., стер. - М.: Академия, 2008.

Дополнительный

5. Козлова И.С. Электротехника: конспект лекций / И.С. Козлова.- М.: ЭКСМО, 2007.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. / Л.А. Бессонов. - 10-е изд.- М.: Гардарика, 1999.
7. Иванов И.И. Лукин А.Ф., Соловьев Г.И. Электротехника. Основные положения, примеры и задачи / И.И. Иванов, А.Ф. Лукин, Г.И. Соловьев. - СПб.: Лань, 1999

1.3. Распределение учебного времени по модулям (разделам) и темам дисциплины

Таблица 1.1

№ п.п	Наименование модулей и тем дисциплины	Всего, ч	В том числе, ч			Рекомендуемая литература
			Лекции	лабораторные, практические занятия	Самост. работа	
1	2	3	4	5	6	7
	Основные понятия и законы электромагнитного поля	33 (33)	1 -	- -	32 (33)	1, 2, 3
1	Место дисциплины в общей системе электротехнического образования	2 (3)	- -	- -	2 (3)	1, 2, 3
2	Теория электромагнитного поля	30 (30)	- -	- -	30 (30)	1, 2,

	Электрические цепи постоянного тока	34 (34)	2 (2)	2 (2)	30 (30)	1, 2, 4
1	Основные законы цепей постоянного тока	11 (11)	1 (1)	- -	10 (10)	1, 4, 5
2	Методы расчета цепей постоянного тока.	23 (23)	1 (1)	2 (2)	20 (20)	1, 5, 7
	Электрические цепи однофазного синусоидального тока	39 (39)	3 (1)	6 (4)	30 (34)	1,2, 6, 7
1	Синусоидальные напряжения и ЭДС	11 (11)	1 (1)	- -	10 (10)	1, 2, 6
2	Методы расчета цепей синусоидального тока	28 (28)	2 -	6 (4)	20 (24)	1,5, 7
	Электрические цепи трехфазного синусоидального тока	38 (38)	2 -	6 (4)	30 (34)	1, 2, 4,7
1	Понятия о трехфазных цепях	1 (11)	1 -	- -	10 (11)	1, 2
2	Расчеты трехфазных цепей	27 (27)	1 -	6 (4)	20 (23)	4, 7
	Нелинейные цепи постоянного и синусоидального токов	22 (22)	2 -	- -	20 (22)	3
1	Нелинейные цепи постоянного тока	11 (11)	1 -	- -	10 (11)	3
2	Нелинейные цепи синусоидального тока	11 (11)	1 -	- -	10 (11)	3
	Магнитные цепи и цепи с распределенными параметрами	54 (54)	2 -	2 -	50 (54)	1, 2, 3,4
1	Магнитные цепи при постоянных магнитных потоках	24 (24)	2 -	2 -	20 (24)	1, 2,
2	Электрические цепи с распределенными параметрами	30 (30)	- -	- -	30 (30)	1, 3, 4
	Электрические цепи несинусоидального периодического тока	30 (30)	2 -	6 (2)	22 (28)	1, 2, 4
1	Методы разложения несинусоидальных функций в ряд Фурье	15 (15)	1 -	4 -	10 (15)	1, 2, 4
2	Расчет цепей несинусоидального тока	15 (15)	1 -	2 (2)	12 (13)	1, 2, 4
	Работа электрических цепей в динамическом режиме	38 (38)	2 -	6 -	30 (38)	1, 2, 4

1	Понятия о переходных процессах в электрических цепях	16 (16)	1 -	- -	15 (16)	1, 2
2	Методы расчета переходных процессов	22 (22)	1 -	6 -	15 (22)	1,2, 7
	Всего	288 (288)	16 (8)	28 (12)	244 (268)	

Примечание1: Цифры в числителе – для 5-летнего обучения, цифры в знаменателе – для срока обучения 3 года.

*Примечание 2. 1,2,3,4 модули предназначены для студентов 3 курса;
5,6,7,8 модули предназначены для студентов 4 курса;
1,2,3,4,5,6,7,8 модули предназначены для студентов 2* курса.*

Раздел 2. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНЫХ МОДУЛЕЙ ДИСЦИПЛИНЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ИЗУЧЕНИЮ

2.1. Основные понятия и законы электромагнитного поля.

2.1.1. Место дисциплины в общей системе электротехнического образования: основные этапы развития электротехники, место дисциплины в общей системе электротехнического образования.

Теория электромагнитного поля, общая физическая основа задач электромагнитного поля и теории электрических и магнитных цепей.

2.1.2. Студенты самостоятельно прорабатывают лекции и рекомендуемую литературу и отвечают на вопросы для самоконтроля.

2.1.3. Вопросы для самоконтроля.

1. Явление электромагнитной индукции.
2. Явление самоиндукции и Э.Д.С. самоиндукции. Индуктивность Явление взаимной индукции. Э. Д.С. взаимной индукции. Взаимная.
3. индуктивность контуров.
4. Энергия магнитного поля уединенной катушки.
5. Плотность энергии магнитного поля.
6. Потери на гистерезис за один цикл перемагничивания. Магнитная энергия двух магнитосвязанных контуров.
7. Принцип взаимности взаимной индукции.
8. Коэффициент связи.
9. Магнитная энергия системы контуров с токами.
10. Механические усилия в магнитном поле.
11. Выражение механической силы в виде производной от энергии.
12. магнитного поля по координате.
13. Сила тяги электромагнита.
14. Закон электромагнитной инерции. Правило Ленца.

2.1.4.Задания для самостоятельной работы. Проработать материал и ответить на вопросы для самоконтроля.

2.2. Электрические цепи постоянного тока.

2.2.1. Основные законы цепей постоянного тока: законы Ома и Кирхгофа, принцип составления уравнений по законам Кирхгофа.

Методы расчета цепей постоянного тока: методы расчета электрических цепей, метод уравнений Кирхгофа, контурных токов, узловых потенциалов, двух узлов, наложения, баланс мощностей.

2.2.2. Программа дисциплины предусматривает изучение данного материала на лекции, семинарском занятии и при самостоятельной работе.

2.2.3. Вопросы для самоконтроля.

15. Определение линейных и нелинейных электрических цепей.
16. Источник э. д. с. и источник тока.
17. Разветвленные и неразветвленные электрические цепи.
18. Напряжение на участке цепи.
19. Закон Ома для участка цепи, не содержащего Э.Д.С.
20. Закон Ома для участка цепи, содержащего Э.Д.С.
21. Законы Кирхгофа.
22. Составление уравнений для расчета токов в схемах при помощи законов Кирхгофа.
23. О заземлении одной точки схемы.
24. Потенциальная диаграмма.
25. Энергетический баланс в электрических цепях.
26. Метод пропорциональных величин.
27. Метод контурных токов.
28. Принцип наложения и метод наложения.
29. Входные и взаимные проводимости ветвей. Входное сопротивление.
30. Теорема взаимности.
31. Теорема компенсации.
32. Линейные соотношения в электрических цепях.
33. Замена нескольких параллельных ветвей, содержащих источники э. д. с, одной эквивалентной.
34. Метод двух узлов.
35. Метод узловых потенциалов.
36. Преобразование звезды в треугольник и преобразование треугольника в звезду.
37. Активный и пассивный двухполюсники.
38. Замена активного двухполюсника эквивалентным генератором.
39. Метод холостого хода и короткого замыкания.
40. Передача энергии от активного двухполюсника нагрузке. Передача энергии по линии передачи.

2.2.4. Задания для самостоятельной работы. Проработать материал и ответить на вопросы для самоконтроля.

2.3. Электрические цепи однофазного синусоидального тока.

2.3.1. Синусоидальные напряжения и ЭДС: синусоидальные ЭДС, напряжения и токи, источники синусоидальной ЭДС, количественная оценка синусоидальных величин, комплексные числа, векторные диаграммы

Методы расчета цепей синусоидального тока: комплексное сопротивление и проводимость, законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме, законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме, расчет цепей с различным соединением элементов, активная, реактивная и полная мощности, резонансы.

2.3.2. Программа дисциплины предусматривает изучение данного материала на лекции, семинарском занятии, выполнение лабораторных работ и при самостоятельной работе.

2.3.3. Вопросы для самоконтроля

41. Синусоидальный ток и основные характеризующие его величины. Среднее и действующее значение синусоиды.
42. Коэффициент амплитуды и формы.
43. Изображение синусоидально изменяющихся величин векторами на комплексной плоскости. Комплексная амплитуда.
44. Действующее значение синусоидальной величины.
45. Сложение и вычитание синусоидальных функций времени при помощи комплексной плоскости.
46. Векторная диаграмма.
47. Мгновенная мощность.
48. Синусоидальный ток в активном сопротивлении.
49. Индуктивность в цепи синусоидального тока.
50. Конденсатор в цепи синусоидального тока.
51. Умножение вектора на j и на $-j$.
52. Основы символического метода расчета цепей синусоидального тока.
53. Комплексное сопротивление. Закон Ома для цепи синусоидального тока.
54. Комплексная проводимость.
55. Треугольник сопротивлений и треугольник проводимостей.
56. Применение логарифмической линейки для перехода от алгебраической формы записи комплекса к показательной и для обратного перехода.
57. Законы Кирхгофа в символической форме записи.
58. Изображение разности потенциалов на комплексной плоскости.
59. Топографическая диаграмма.
60. Активная, реактивная и полная мощности.
61. Выражение мощности в комплексной форме записи.
62. Измерение мощности ваттметром.
63. Двухполюсник в цепи синусоидального тока.
64. Резонансный режим работы двухполюсника.

65. Резонанс токов.
66. Компенсация сдвига фаз.
67. Резонанс напряжений.
68. Исследование работы схемы при изменении частоты.
69. и при изменении индуктивности.
70. Частотная характеристика двухполосника.
71. Передача энергии от активного двухполосника нагрузке.
72. Падение и потеря напряжения в линии передачи энергии. Расчет электрических цепей при наличии в них магнитосвязанных катушек.
73. Последовательное соединение двух магнитосвязанных катушек. Определение коэффициента магнитной связи M опытным путем.

2.3.4. Задания для самостоятельной работы. Проработать материал и ответить на вопросы для самоконтроля. Изучить действия с комплексными числами для дальнейшего выполнения курсовой работы. Материал по комплексным числам приведен в разделе «Приложение» настоящих методических указаний.

2.4. Электрические цепи трехфазного синусоидального тока.

2.4.1. Понятия о трехфазных цепях: преимущества трехфазного тока, понятия о трехфазных источниках ЭДС и тока, получение вращающегося магнитного поля, схемы соединения трехфазных цепей. Расчеты трехфазных цепей: методы расчета трехфазных цепей, симметричные и несимметричные цепи, применение симметричных составляющих для расчета несимметричных трехфазных цепей.

2.4.2. Программа дисциплины предусматривает изучение данного материала на лекции, семинарском занятии, выполнение лабораторных работ и выполнение курсовой работы.

2.4.3. Вопросы для самоконтроля.

74. Преимущества трехфазных цепей.
75. Принцип получения трехфазного напряжения.
76. Устройство и принцип работы трехфазного генератора.
77. Выражения трехфазных ЭДС в тригонометрической форме и с помощью векторов.
78. Какие схемы соединения трехфазных цепей Вы знаете?
79. Какие напряжения при соединении приёмников трёхфазной системы звездой считаются фазными, какие линейными?
80. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами в симметричной трёхфазной системе при соединении звездой?
81. При каких условиях исключается возможность использования трёхпроводной системы и возникает необходимость в применении нулевого провода?
82. В каком случае ток в нулевом проводе равен нулю?
83. Каково влияние нулевого провода на фазные напряжения при неравномерной нагрузке фаз в четырёхпроводной трёхфазной системе?

84. Как изменяются фазные напряжения при обрыве одной из фаз в трёхпроводной системе при соединении звездой?
85. Почему на нулевом проводе не ставятся предохранители?
86. Как определить величину тока в нулевом проводе, если известны величины токов в отдельных фазах?
87. В чём заключается отличие расположения нулевой точки в топографической диаграмме трёхфазной системы, соединённой звездой, при неравномерной нагрузке в случаях наличия и отсутствия нулевого провода?
88. Какие напряжения при соединении приёмников трёхфазной системы треугольником считаются фазными, какие линейными?
89. Какие соотношения между фазными и линейными токами в «треугольнике»?
90. Как изменится мощность трёхфазной цепи при переключении с «треугольника» на «звезду»?
91. Каким соотношением определяется активная мощность трёхфазной цепи?
92. Каким соотношением определяется реактивная мощность трёхфазной цепи?
93. Каким соотношением определяется полная мощность трёхфазной цепи?

2.4.4. . Проработать материал и ответить на вопросы для самоконтроля.

Изучить действия с комплексными числами для дальнейшего выполнения курсовой работы. Материал по комплексным числам приведен в разделе «Приложение» данных методических указаний. Выполнить курсовую работу.

2.5. Нелинейные цепи постоянного и синусоидального токов.

2.5.1. Нелинейные цепи постоянного тока, понятия о нелинейных цепях, замена нелинейного участка цепи линейным, статическое и дифференциальное сопротивление, расчет цепей при различном соединении элементов.

Нелинейные цепи синусоидального тока: особенности цепей переменного тока, методы расчета, нелинейное сопротивление как генератор высших гармоник.

2.5.2. Программа дисциплины предусматривает изучение данного материала на лекции, семинарском занятии и при самостоятельной работе.

2.5.3. Вопросы для самоконтроля.

94. Основные определения нелинейных цепей.
95. Вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений.
96. Общая характеристика методов расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока.
97. Электрические цепи с последовательным соединением нелинейных сопротивлений.
98. Вольт-амперная характеристика параллельного соединения нелинейных сопротивлений.
99. Последовательно-параллельное соединение нелинейных сопротивлений.
100. Применение метода двух узлов для расчета цепей с нелинейными сопротивлениями.

101. Замена нескольких параллельных ветвей, содержащих НС и э. д. с, одной эквивалентной ветвью.
102. Применение метода холостого хода и короткого замыкания к расчету цепей с нелинейными сопротивлениями.
103. Статическое и дифференциальное сопротивления.
104. Замена нелинейного сопротивления эквивалентным линейным сопротивлением и э. д. с.
105. Применение нелинейных сопротивлений для получения произведения двух функций.
106. Логарифмические преобразователи на нелинейных сопротивлениях.
107. Стабилизатор тока.
108. Стабилизатор напряжения.
109. Усилитель постоянного напряжения.
110. Особенности нелинейных цепей переменного тока.
111. Нелинейное сопротивление как генератор высших гармоник
112. Явление феррорезонанса. Феррорезонанс токов и напряжений.
113. Что такое триггерный эффект?
 - 2.5.4. Проработать материал и ответить на вопросы для самоконтроля.
- 2.6. Магнитные цепи и цепи с распределенными параметрами.
 - 2.6.1. Магнитные цепи при постоянных магнитных потоках: основные характеристики магнитного поля, основные законы магнитных цепей, нелинейная электрическая аналогия, расчет магнитных цепей.
Электрические цепи с распределенными параметрами: примеры цепей с распределенными параметрами, уравнение линии с распределенными параметрами.
 - 2.6.2. . Программа дисциплины предусматривает изучение данного материала на лекции, семинарском занятии и при самостоятельной работе.
 - 2.6.3. . Вопросы для самоконтроля.
114. Разделение всех веществ на две группы — ферромагнитные и неферромагнитные.
115. Основные величины, характеризующие магнитное поле.
116. Элементы теории ферромагнетизма.
117. Основные характеристики ферромагнитных материалов.
118. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы.
119. Материалы с прямоугольной петлей гистерезиса.
120. Магнитодиэлектрики и ферриты.
121. Закон полного тока.
122. Магнитодвижущая сила.
123. Магнитная цепь.
124. С какой целью в магнитную цепь электрических машин, электрических аппаратов и других устройств вводят ферромагнитные материалы?
125. Падение магнитного напряжения.
126. Веберамперные характеристики.

127. Построение веберамперных характеристик (в.а.х).
128. Законы Кирхгофа для магнитных цепей.
129. Распространение на магнитные цепи всех методов, применяемых для расчета электрических цепей с нелинейными сопротивлениями.
130. Определение МДС (магнитодвижущей силы) неразветвленной магнитной цепи по заданному потоку.
131. Закон Ома для магнитной цепи.
132. Определение потока в неразветвленной магнитной цепи по МДС. Расчет разветвленной магнитной цепи методом двух узлов.
133. Как получить постоянный магнит?
134. Расчет магнитной цепи постоянного магнита.
135. Магнитное сопротивление и магнитная проводимость участка магнитной цепи. Законы Кирхгофа для магнитной цепи.
136. Нелинейная электрическая аналогия.
137. Метод последовательных приближений для расчета магнитных цепей.
138. Два типа задач для магнитных цепей.

2.6.4. Проработать материал и ответить на вопросы для самоконтроля.

2.7. Электрические цепи несинусоидального периодического тока.

2.7.1. Методы разложения несинусоидальных функций в ряд Фурье: аналитический и графический методы разложения в ряд Фурье несинусоидальных величин, виды симметрии, количественная оценка несинусоидальных токов и напряжений.

Методы расчета цепей несинусоидального тока: методы расчета, высшие гармоники в трехфазных цепях.

2.7.2. Программа дисциплины предусматривает изучение данного материала на лекции, семинарском занятии, выполнение лабораторной работы.

2.7.3. . Вопросы для самоконтроля.

139. Причины возникновения несинусоидальных напряжений и токов.
140. Условие разложения несинусоидальных величин в ряд Фурье.
141. Формулы разложения в ряд Фурье.
142. Разложение в ряд Фурье аналитически и графическим методом.
143. Четные и нечетные синусные и косинусные гармоники.
144. Действующее и среднее значение несинусоидального тока.
145. Коэффициенты, характеризующие несинусоидальные кривые.
146. Мощность несинусоидального тока.
147. Методы расчета несинусоидальных цепей.
148. Влияние параметров цепи на форму кривой тока.
149. Резонанс высших гармоник.
150. Резонансные фильтры.
151. Высшие гармоники в трехфазных цепях.
152. Расчет трехфазных цепей при несинусоидальном напряжении.
153. Расчет цепи при соединении по схеме «звезда».
154. Расчет цепи при соединении по схеме «треугольник».

2.7.4. Повторить в разделе дисциплины «Высшая математика» тему «Разложение несинусоидальных функций в ряд Фурье ». Ответить на вопросы для самоконтроля.

2.8. Работа электрических цепей в динамическом режиме.

2.8.1. Понятие о переходных процессах в электрических цепях: причины возникновения и сущность переходных процессов.

Методы расчета переходных процессов:

Классический метод расчета переходных процессов, порядок расчета, расчет переходного процесса в цепи с одним накопителем и несколькими накопителями электрической энергии, операторный метод расчета, преобразование Лапласа

2.8.2. Программа дисциплины предусматривает изучение данного материала на лекции, семинарском занятии, выполнение лабораторной работы.

2.8.3. Вопросы для самоконтроля.

155. Причины возникновения переходного процесса в электрических цепях.

156. Каким явлением в электрических цепях сопровождается переходный процесс?

157. Первый закон коммутации.

158. Второй закон коммутации.

159. Методы расчета переходных процессов. Классический метод. Операторный метод.

160. Общее и частное решение линейного дифференциального уравнения.

161. Расчет цепи при коротком замыкании катушки индуктивности.

162. Включение индуктивной катушки к постоянному напряжению.

163. Включение индуктивной катушки к синусоидальному напряжению.

164. Расчет переходных токов и напряжений при коротком замыкании цепи с резистором и конденсатором, включенных последовательно.

165. Включение резистора и конденсатора к постоянному напряжению.

166. Включение резистора и конденсатора к синусоидальному напряжению.

167. Расчет переходных токов и напряжений при коротком замыкании в цепи, содержащей резистор, индуктивность и емкость, включенных последовательно.

168. Расчет переходных токов и напряжений при подключении к постоянному напряжению резистора, индуктивности и емкости, соединенных последовательно.

169. Что такое характеристическое уравнение?

170. Как определяются корни характеристического уравнения?

171. Аперриодический переходный процесс и колебательный. Чем определяется характер переходного процесса?

172. Что такое действительные и комплексно-сопряженные корни характеристического уравнения?

173. Операторный метод расчета переходных процессов. Его преимущество и недостаток.

174. Законы электрических цепей в операторной форме. Закон Ома. Законы Кирхгофа.

2.8.4. Повторить в разделе дисциплины «Высшая математика» тему «Методы решений линейных дифференциальных уравнений первого и второго порядков». Ответить на вопросы для самоконтроля.

Раздел 3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЮ

Тема курсовой работы: «Расчет трехфазной цепи синусоидального тока»

3.1. Методические указания по выполнению курсовой работы

3.1.1. Требования к оформлению курсовой работы

Курсовая работа должна содержать расчетно-пояснительную записку и графический материал.

Текстовая часть расчетно-пояснительной записки пишется на листах формата А4 (210х297мм) в рамке, которая – согласно ГОСТу – должна иметь отступ в 20 мм с левой стороны листа и по 5 мм с трех других сторон. Все записи в расчетно-пояснительной записке ведутся аккуратным разборчивым почерком на одной стороне листа на расстоянии от верхней и нижней линии рамки не менее 10 мм, а начало и конец строк должно отстоять от боковых линий рамки не менее, чем на 3 мм. Абзацы в тексте начинают отступом в 10-15 мм. Текст пишется размером шрифта не менее 2,5 мм. Исправление ошибок допускается выполнять белой краской.

Графический материал (векторные диаграммы) выполнять на отдельных листах такого же формата А4. Электрические схемы следует давать по тексту. Схемы и векторные диаграммы должны вычерчиваться с помощью чертежных принадлежностей в соответствии с действующими требованиями Единой Системы Конструкторской Документации (ЕСКД). В начале расчетно-пояснительной записки следует написать содержание курсовой работы и привести таблицу исходных данных в соответствии с шифром зачетной книжки.

Изложение решения задачи должно сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями. Расчетные формулы первоначально записывают в общем виде символами, принятыми в ГОСТах. Каждой формуле присваивается номер, который записывается арабскими цифрами в круглых

скобках на уровне формулы в крайнем правом положении. Нумерация формул разрешается как сквозной, так и по разделам (но не по подразделам или пунктам). Пояснения символов формулы с указанием их размерностей даются под формулой в той последовательности, в которой они приведены в формуле. Первая строка пояснения начинается с начала строки со слова «где» без двоеточия после него. Затем в формулы подставляют вместо символов соответствующие числовые значения и приводят конечный результат. Все листы расчетно-пояснительной записки должны быть пронумерованы и сброшюрованы.

В конце курсовой работы нужно привести список использованной литературы. Список литературы записывается в той последовательности, в которой дается ссылка на литературу в тексте. Ссылки в тексте на литературу задаются в косых скобках, например, /2/ или /2,с35/, если при этом указывается страница. В конце курсовой работы нужно также поставить свою подпись.

3.1.2. Требования к выбору варианта задания

Исходные данные для индивидуального задания студент выбирает из таблицы 3.1 по двум последним цифрам шифра зачетной книжки, и из таблицы 3.2 – по последней цифре шифра;

- Перед выполнением работы необходимо освоить операции с комплексными числами по Приложению 2 или соответствующей литературе;
- Вычисление всех числовых значений следует выполнять с точностью до сотых (или до трех значащих цифр, если число меньше единицы);
- Вычисление значений углов (в градусах) выполнять с точностью до десятых.

Таблица 3.1

Напряжение сети и параметры двигателя

Последние две цифры шифра	Напряжение сети $U, В$	Параметры двигателя			
		напряжение $U_{дв}, В$	мощность $P_{н}, кВт$	коэффициент мощности $\cos\varphi$	КПД, %
от 01 до 20	380	380/220	1,5	0,85	81,0
« 21 « 40	380	380/220	4,0	0,88	87,0
« 41 « 60	380	380/220	5,5	0,89	88,0
« 61 « 80	220	380/220	7,5	0,88	87,5
« 81 « 00	220	220/127	11,0	0,90	88,0

Таблица 3.2

Сопротивления линии и печи

Последняя цифра шифра студента	Сопротивление линии в комплексной форме $\underline{Z}_л, Ом$	Сопротивление фазы печи $R, Ом$
1	$1+j6$	21
2	$3+j4$	15

3	$2+j4$	24
4	$2+j8$	18
5	$3+j8$	12
6	$1+j4$	27
7	$2+j8$	30
8	$1+j8$	15
9	$3+j6$	21
0	$2+j6$	18

3.2. Задание для курсовой работы

В начале трехфазной сети с линейным напряжением U подключен электродвигатель, а в конце – электрическая печь, фазы которой соединены треугольником.

Требуется:

1. Выбрать схему соединения обмоток электродвигателя и начертить схему заданной цепи.
2. Вычислить:
 - 2.1. Линейные токи электродвигателя;
 - 2.2. Линейные токи печи;
 - 2.3. Входные токи цепи;
 - 2.4. Фазные токи печи;
 - 2.5. Падения напряжения в линии;
 - 2.6. Фазные (линейные) напряжения на зажимах печи;
 - 2.7. Потери активной мощности в линии.
3. Построить:
 - 3.1. Векторную диаграмму фазных и линейных напряжений цепи;
 - 3.2. Векторную диаграмму линейных токов двигателя;
 - 3.3. Векторную диаграмму фазных и линейных токов печи.
4. В аварийном режиме при обрыве фазы ca печи:
 - 4.1. Определить линейные токи несимметричной нагрузки и построить векторную диаграмму фазных напряжений и токов;
 - 4.2. Определить входные токи цепи;
 - 4.3. Разложить аналитически и графически токи несимметричной нагрузки на симметричные составляющие.

Указания: 1) Правильность вычисления линейных токов проверять по первому закону Кирхгофа; 2) Правильность аналитического разложения токов несимметричной нагрузки на симметричные составляющие проверить суммированием симметричных составляющих для каждой фазы.

3.3. Пример выполнения задания

Пусть по шифру зачетной книжки выбраны исходные данные:

Напряжение сети U , В	Двигатель				Сопротивления	
	$U_{дв}$, В	P_H , кВт	$\cos\varphi$	КПД, %	Z_L , Ом	R , Ом
220	220/127	2,2	0,75	73,3	$2+j7$	24

Решение

1. Выбираем схему соединения обмоток электродвигателя, исходя из соотношения между напряжением сети и линейным напряжением двигателя: так как линейное напряжение двигателя совпадает с напряжением сети, обмотки электродвигателя соединяем в звезду.

Схема заданной цепи представлена на рис.2.1.

Расчет симметричной трехфазной цепи обычно выполняют только для какой-то одной фазы. Тогда токи других фаз будут по величине равны вычисленным токам, а по фазе сдвинуты относительно них соответственно на $\pm 120^\circ$.

Для перехода от заданной трехфазной цепи (рис.2.1) к расчетной однофазной цепи предварительно преобразуем схему симметричного треугольника в эквивалентную звезду (рис.2.2), вычислив сопротивление луча эквивалентной звезды по формуле $R' = R/3$:

$$R' = 24/3 = 8 \text{ Ом}.$$

Затем мысленно соединяем нулевым проводом (пунктирные линии) нулевые точки эквивалентной звезды и звезды обмоток двигателя с нулевой точкой сети и выделяем фазу A из симметричной трехфазной цепи с нулевым проводом, получая расчетную однофазную цепь (рис.2.3).

2 Вычисляем:

2.1 Линейные токи электродвигателя:

По схеме рис.2.2 линейный ток фазы A электродвигателя

$$I'_A = \frac{P_H}{\sqrt{3}U \cos\varphi \cdot \eta}, \quad (1)$$

где P_H – мощность, потребляемая двигателем из сети, кВт;

U – линейное напряжение сети, В;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности двигателя;

η – КПД двигателя.

$$I'_A = \frac{2,2 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 220 \cdot 0,75 \cdot 0,733} = 10,51 \text{ А}.$$

Этот ток отстает от фазного напряжения \dot{U}_A на угол сдвига фаз

$$\varphi = \arccos 0,75 = 41,4^\circ.$$

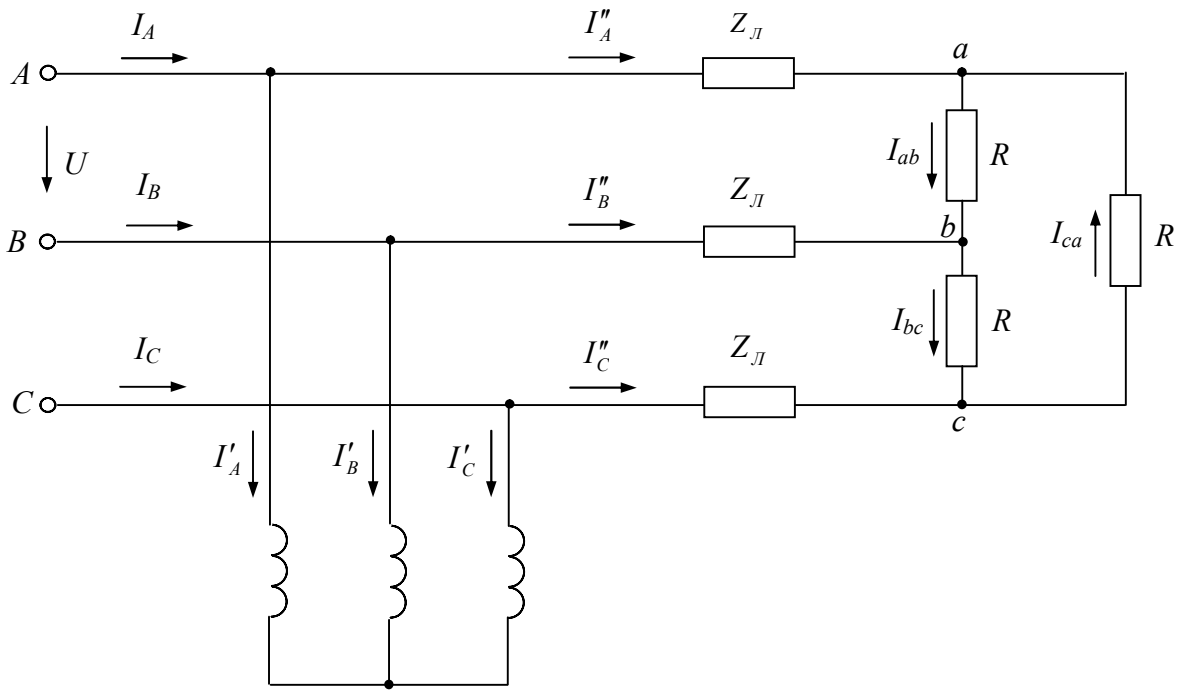


Рис. 2.1. Схема заданной трехфазной цепи.

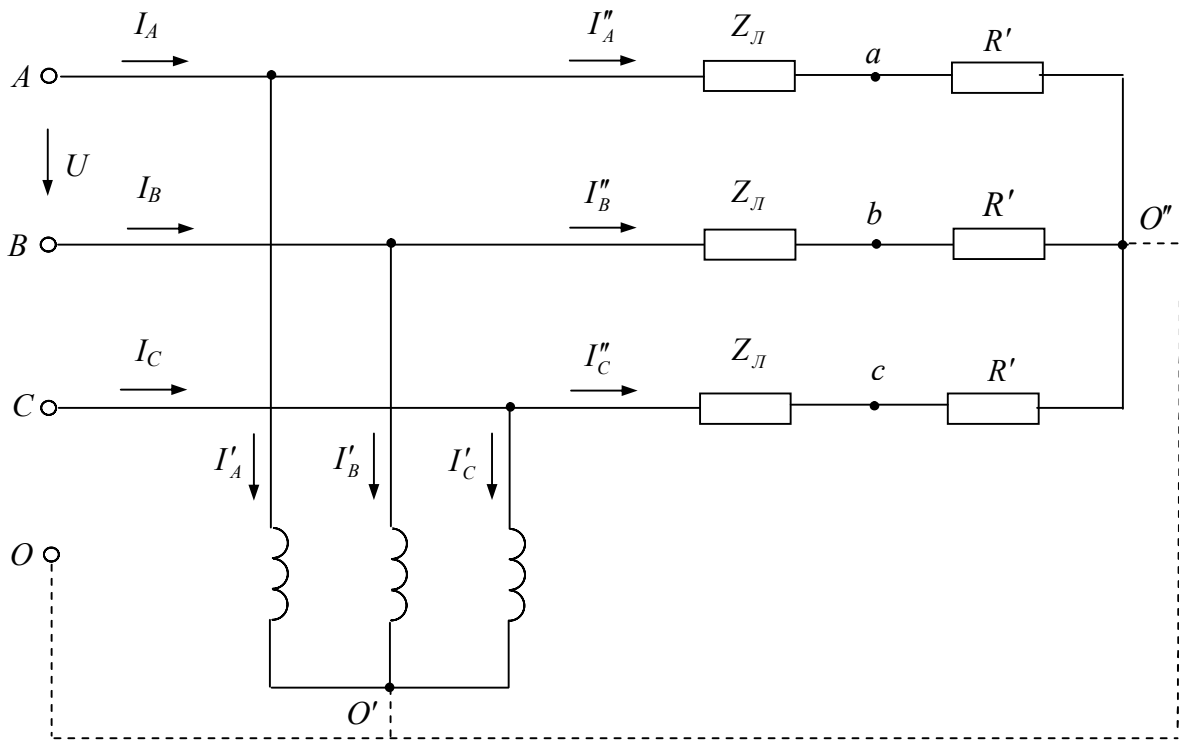


Рис.2.2. Схема эквивалентной трехфазной цепи.

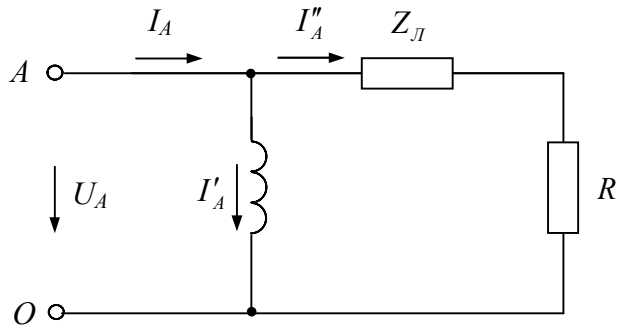


Рис.2.3. Схема расчетной однофазной цепи

Запишем в комплексной форме этот ток и токи других фаз (здесь и в дальнейшем все комплексные числа записываем в показательной и алгебраической формах):

$$\dot{I}'_A = I'_A e^{-j\varphi} = 10,51 e^{-j41,4^\circ} = 7,88 - j6,95 \text{ A};$$

ток фазы B отстает по фазе от тока фазы A на 120° , поэтому

$$\dot{I}'_B = \dot{I}'_A e^{-j120^\circ} = 10,51 e^{-j41,4^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 10,51 e^{-j161,4^\circ} = -9,96 - j3,35 \text{ A};$$

ток фазы C опережает по фазе ток фазы A на 120° , поэтому

$$\dot{I}'_C = \dot{I}'_A e^{j120^\circ} = 10,51 e^{-j41,4^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 10,51 e^{j78,6^\circ} = 2,08 + j10,3 \text{ A}.$$

Проверяем по I закону Кирхгофа правильность вычислений:

$$\dot{I}'_A + \dot{I}'_B + \dot{I}'_C = 7,88 - j6,95 - 9,96 - j3,35 + 2,08 + j10,3 = 0 + j0 = 0 \text{ — верно.}$$

2.2. Линейные токи печи:

Предварительно найдем полное сопротивление луча эквивалентной звезды (рис.2.2):

$$\underline{Z} = \underline{Z}_Л + R' = 2 + j7 + 8 = 10 + j7 = 12,21 e^{j35^\circ} \text{ Ом.}$$

Тогда по закону Ома

$$\dot{I}''_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}} = \frac{127}{12,21 e^{j35^\circ}} = 10,4 e^{-j35^\circ} = 8,52 - j6 \text{ A},$$

а токи других фаз сдвинуты по фазе относительно этого тока на $\pm 120^\circ$:

$$\dot{I}''_B = \dot{I}''_A \cdot e^{-j120^\circ} = 10,4 e^{-j35^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 10,4 e^{-j155^\circ} = -9,43 - j4,4 \text{ A};$$

$$\dot{I}''_C = \dot{I}''_A \cdot e^{j120^\circ} = 10,4 e^{-j35^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 10,4 e^{j85^\circ} = 0,91 + j10,36 \text{ A}.$$

Проверяем по I закону Кирхгофа:

$$\dot{I}''_A + \dot{I}''_B + \dot{I}''_C = 8,52 - j6 - 9,43 - j4,4 + 0,91 + j10,36 = 0 - j0,04 \approx 0 \text{ — верно.}$$

2.3. Входные токи цепи определяем через линейные токи двигателя и печи по первому закону Кирхгофа соответственно для узлов a , b , c (рис.2.2):

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}'_A + \dot{I}''_A = 7,88 - j6,95 + 8,52 - j6 = 16,4 - j12,95 = 20,9e^{-j38,3^\circ} \text{ A}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}'_B + \dot{I}''_B = -9,96 - j3,35 - 9,43 - j4,4 = -19,39 - j7,75 = 20,9e^{-j158,3^\circ} \text{ A}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}'_C + \dot{I}''_C = 2,08 + j10,3 + 0,91 + j10,36 = 2,99 + j20,66 = 20,9e^{-j81,7^\circ} \text{ A}. \end{aligned}$$

2.4. Фазные токи печи вычисляем через линейные токи печи, помня, что для симметричного режима ток фазы *ab* опережает линейный ток фазы *A* на 30° и по величине в $\sqrt{3}$ меньше линейного тока:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{I}''_A}{\sqrt{3}} \cdot e^{j30^\circ} = \frac{10,4e^{-j35^\circ}}{1,73} \cdot e^{j30^\circ} = 6,01e^{-j5^\circ} = 5,99 - j0,52 \text{ A}.$$

Фазные токи для фаз *bc* и *ca* печи

$$\begin{aligned} \dot{I}_{bc} &= \dot{I}_{ab} \cdot e^{-j120^\circ} = 6,01e^{-j5^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 6,01e^{-j125^\circ} = -3,45 - j4,92 \text{ A}; \\ \dot{I}_{ca} &= \dot{I}_{ab} \cdot e^{j120^\circ} = 6,01e^{-j5^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 6,01e^{j115^\circ} = -2,54 + j5,45 \text{ A}. \end{aligned}$$

2.5. Падения напряжения в фазе *A* линии вычисляем по закону Ома как произведение линейного тока на сопротивление линии, предварительно записав это сопротивление в показательной форме:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_L &= 2 + j7 = 7,28e^{j74,1^\circ} \text{ Ом}; \\ \Delta \dot{U}_A &= \dot{I}''_A \cdot \underline{Z}_L = 10,4e^{-j35^\circ} \cdot 7,28e^{j74,1^\circ} = 75,71e^{j39,1^\circ} = 58,75 + j47,75 \text{ В}. \end{aligned}$$

Падения напряжения в других фазах линии:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_B &= \Delta \dot{U}_A \cdot e^{-j120^\circ} = 75,71e^{-j80,9^\circ} = 11,97 - j74,76 \text{ В}; \\ \Delta \dot{U}_C &= \Delta \dot{U}_A \cdot e^{j120^\circ} = 75,71e^{j159,1^\circ} = -70,73 + j27,01 \text{ В}. \end{aligned}$$

2.6. Фазные напряжения печи, соединенной в треугольник, равны линейным напряжениям печи, совпадающим с линейными напряжениями на зажимах эквивалентной звезды. Для определения линейных напряжений эквивалентной звезды предварительно найдем фазное напряжение \dot{U}_a эквивалентной звезды либо по закону Ома:

$$\dot{U}_a = \dot{I}''_A \cdot R', \quad (2)$$

либо как разность фазного напряжения \dot{U}_A на входе линии и падения напряжения в фазе *A* линии:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \Delta \dot{U}_A. \quad (3)$$

Воспользуемся формулой (2):

$$\dot{U}_a = 10,4e^{-j35^\circ} \cdot 8 = 83,2e^{-j35^\circ} = 68,05 - j47,72 \text{ В}.$$

Фазные напряжения других фаз эквивалентной звезды:

$$\dot{U}_b = \dot{U}_a \cdot e^{-j120^\circ} = 83,2e^{-j35^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 83,2e^{-j155^\circ} = -75,4 - j35,16 \text{ В};$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_a \cdot e^{j120^\circ} = 83,2e^{-j35^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 83,2e^{j85^\circ} = 7,25 + j82,88 \text{ В}.$$

Так как эквивалентная звезда симметрична, линейное напряжение на ее зажимах a и b опережает фазное напряжение \dot{U}_a на 30° и по величине больше этого напряжения в $\sqrt{3}$:

$$\dot{U}_{ab} = \sqrt{3}\dot{U}_a e^{j30^\circ}. \quad (4)$$

Вычисляем по формуле (4) фазное (линейное) напряжение фазы ab печи:

$$\dot{U}_{ab} = 1,73 \cdot 83,2e^{-j35^\circ} \cdot e^{j30^\circ} = 143,94e^{-j5^\circ} = 143,39 - j12,55 \text{ В}.$$

Находим фазные (линейные) напряжения других фаз печи:

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{ab} \cdot e^{-j120^\circ} = 143,94e^{-j5^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 143,94e^{-j125^\circ} = -82,56 - j117,91 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{ab} \cdot e^{j120^\circ} = 143,94e^{-j5^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 143,94e^{j115^\circ} = -60,85 + j130,45 \text{ В}.$$

2.7. Потери активной мощности в линии:

$$\Delta P = 3 \cdot (I_A'')^2 \cdot R_l, \quad (5)$$

где R_l - действительная часть комплекса сопротивления линии, Ом.

Вычисляем:

$$\Delta P = 3 \cdot 10,4^2 \cdot 2 = 648,96 \text{ Вт} \approx 0,65 \text{ кВт}.$$

3. По результатам вычислений строим векторные диаграммы.

3.1 Векторную диаграмму фазных и линейных напряжений цепи строим в следующем порядке:

а) выбираем масштаб напряжения: для $U = 380 \text{ В}$ $m_U = 40 \text{ В/см}$,

для $U = 220 \text{ В}$ $m_U = 25 \text{ В/см}$;

б) на оси действительных чисел комплексной плоскости откладываем вектор \dot{U}_A входного фазного напряжения линии ($m_U = 25 \text{ В/см}$), и конец этого вектора обозначаем точкой A (рис.2.4);

в) вектор \dot{U}_a фазного напряжения эквивалентной звезды строим из начала координат и конец этого вектора обозначаем точкой a ;

г) строим из точки a в точку A вектор $\Delta \dot{U}_A$ падения напряжения в фазе A линии, а сумма векторов \dot{U}_a и $\Delta \dot{U}_A$ дает фазное напряжение сети \dot{U}_A ;

д) поворачивая векторы \dot{U}_A и \dot{U}_a на $\pm 120^\circ$, получим соответствующие векторы для фаз B и C , и построим векторы $\Delta \dot{U}_B$ и $\Delta \dot{U}_C$ падений напряжения в фазах B и C линии;

е) соединив точки a, b и c , получим треугольник линейных напряжений $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$ на зажимах печи (следует помнить, что вектор линейного напряжения направлен в ту точку, которая в индексе этого напряжения стоит на первом месте);

ж) соединив точки A, B и C , получим треугольник линейных напряжений $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ на входных зажимах цепи.

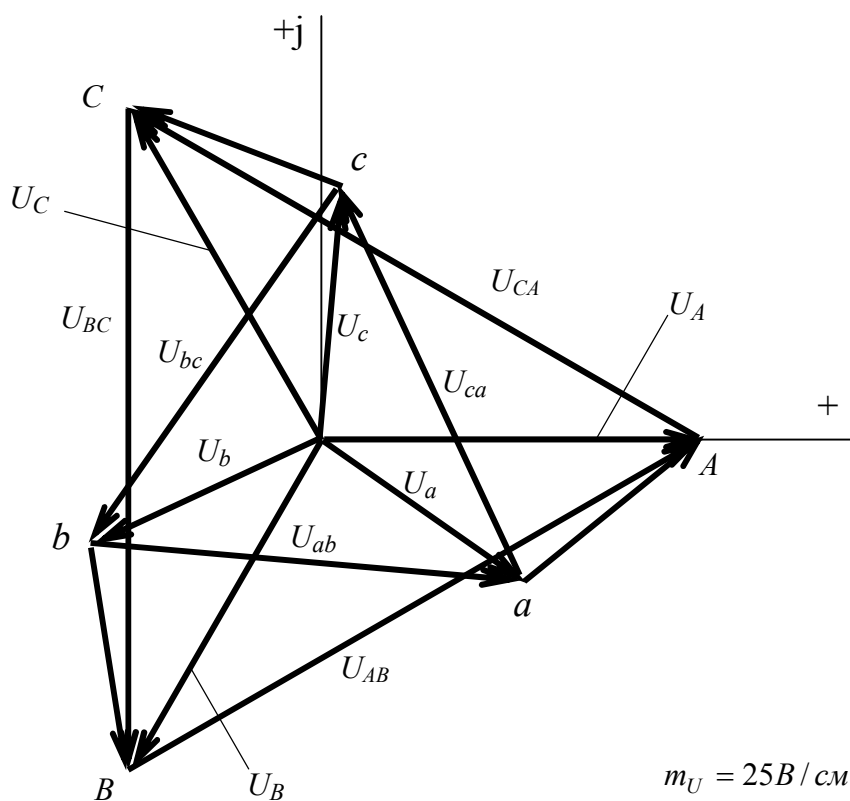


Рис.2.4. Векторная диаграмм фазных и линейных напряжений сети

Построенная векторная диаграмма напряжений является **топографической**, т.е. каждой точке цепи соответствует только одна точка на схеме, и наоборот. Таким образом, по построенной топографической диаграмме можно найти величину и фазу напряжения между любыми двумя точками заданной цепи, например, напряжение \dot{U}_{Ab} между точками A и b .

3.2. Для построения векторной диаграммы линейных токов двигателя (рис.2.5):

а) строим в масштабе $m_U = 25B / \text{см}$ вектор \dot{U}_A и, поворачивая этот вектор на $\pm 120^\circ$, получаем звезду фазных напряжений сети;

б) масштаб тока выбираем так, чтобы длина вектора линейного тока составляла 40÷50% длины вектора \dot{U}_A ; в данном случае принимаем $m_I = 4A/cm$;

в) строим вектор \dot{I}'_A , отстающий от вектора \dot{U}_A угол $\varphi \approx 41^\circ$, и, поворачивая вектор \dot{I}'_A на $\pm 120^\circ$, получим звезду линейных токов двигателя.

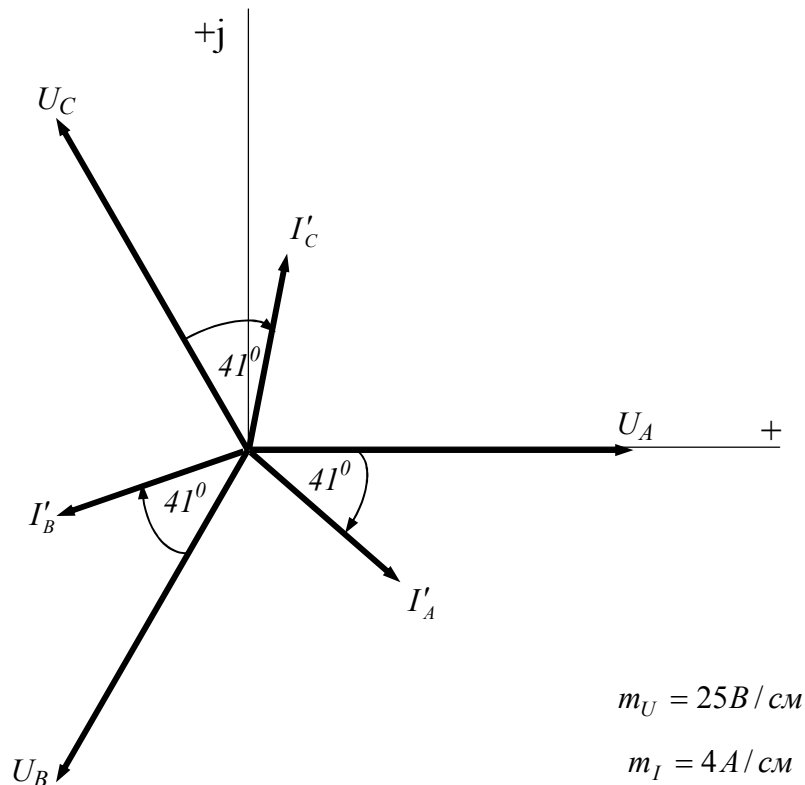


Рис.2.5. Векторная диаграмма линейных токов двигателя

3.3 Для удобства построения векторной диаграммы фазных и линейных токов печи (рис.2.6) векторы линейных напряжений $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$ строим из начала координат комплексной плоскости (в масштабе $m_U = 25B/cm$). Затем:

а) из начала координат по направлениям этих линейных напряжений (для нагрузки, соединенной треугольником, они являются фазными) откладываем фазные токи печи $\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$ в масштабе $m_I = 2A/cm$;

б) векторы линейных токов печи строим на основании первого закона Кирхгофа для узлов a, b, c схемы, изображенной на рис.2.1:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} ; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} ; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} ,$$

т.е. вектор \dot{I}_A проводим из конца вектора \dot{I}_{ca} в конец вектора \dot{I}_{ab} ; вектор \dot{I}_B – из конца вектора \dot{I}_{ab} в конец вектора \dot{I}_{bc} , и вектор \dot{I}_C – из конца вектора \dot{I}_{bc} в конец вектора \dot{I}_{ca} .

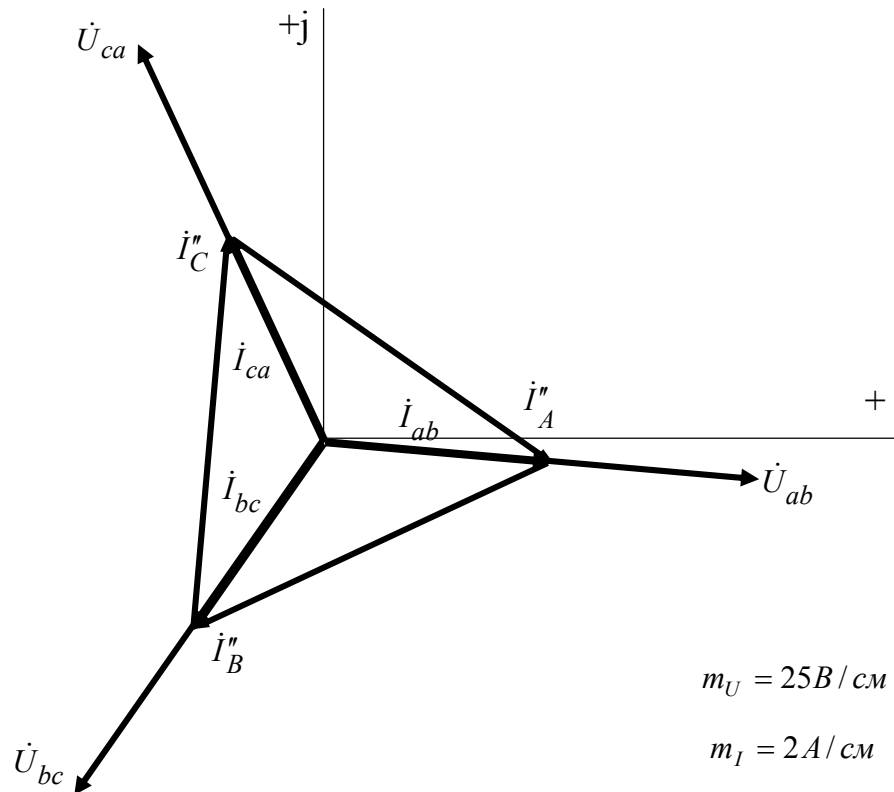


Рис.2.6. Векторная диаграмма фазных и линейных токов печи

3.4. Векторная диаграмма входных линейных токов цепи строится аналогично векторной диаграмме линейных токов двигателя и имеет такой же вид; отличие лишь в длине векторов и величине угла сдвига по фазе относительно соответствующего вектора напряжения. Поэтому векторную диаграмму входных токов цепи можно не строить, а ограничиться пояснением, подобным вышеприведенному в этом пункте.

4. В аварийном режиме при обрыве фазы ca печи:

- заданная цепь принимает вид, представленный на рис.2.7;
- линейные токи двигателя остались без изменения, так как не изменились напряжение и параметры двигателя.

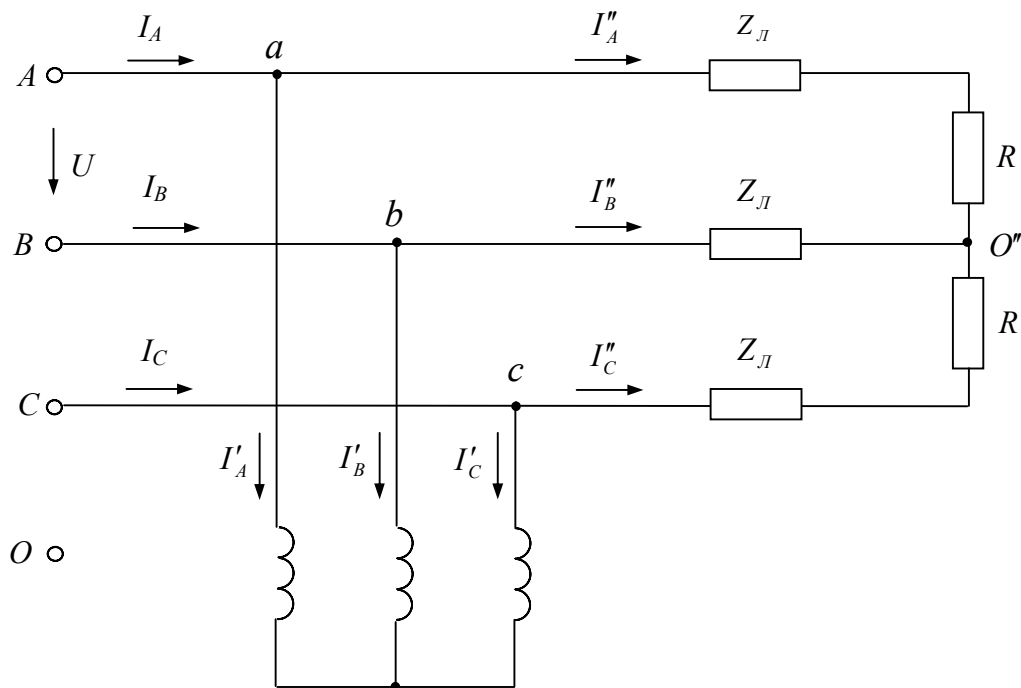


Рис.2.7. Схема трехфазной цепи в аварийном состоянии

4.1 Определение токов несимметричной нагрузки.

4.1.1 Предварительно найдем фазные напряжения несимметричной цепи одним из двух способов (по выбору студента):

Способ 1.

По фазным напряжениям сети и напряжению смещения нейтрали

Напряжение смещения нейтрали

$$\dot{U}_{O'O} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}, \quad (6)$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – фазные напряжения сети, В;

$\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ – проводимости фаз, См.

Полагая, что система фазных напряжений сети сохранилась симметричной, при $\dot{U}_A = 127В$ для других фаз имеем:

$$\dot{U}_B = \dot{U}_A \cdot e^{-j120^\circ} = 127e^{-j120^\circ} = -63,5 - j110, В;$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_A \cdot e^{j120^\circ} = 127e^{j120^\circ} = -63,5 + j110, В.$$

Вычислим проводимости $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$, предварительно найдя сопротивления фаз несимметричной нагрузки:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_C = \underline{Z}_n + R = 2 + j7 + 24 = 26 + j7 = 26,93e^{j15,1^0} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_B = \underline{Z}_n = 2 + j7 = 7,28e^{j74,1^0} \text{ Ом}.$$

Тогда:

$$\underline{Y}_A = \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_A} = \frac{1}{26,93e^{j15,1^0}} = 0,0371e^{-j15,1^0} = 0,0358 - j0,0097 \text{ См};$$

$$\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B} = \frac{1}{7,28e^{j74,1^0}} = 0,1374e^{-j74,1^0} = 0,0376 - j0,1321 \text{ См}.$$

Теперь по формуле (6) вычисляем напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_{o'o} = \frac{127 \cdot 0,0371e^{-j15,1^0} + 127e^{-j120^0} \cdot 0,1374e^{-j74,1^0} + 127e^{j120^0} \cdot 0,0371e^{-j15,1^0}}{0,0358 - j0,0097 + 0,0376 - j0,1321 + 0,0358 - j0,0097} =$$

$$= \frac{-13,5865 + j7,569}{0,1092 - j0,1515} = \frac{15,55e^{j150,8}}{0,1867e^{-j54,2}} = 83,3e^{j205^0} = -75,5 - j35,2, \text{ В}.$$

Фазные напряжения несимметричной цепи определяем по формулам:

$$\dot{U}_A'' = \dot{U}_A - \dot{U}_{o'o}; \quad (7)$$

$$\dot{U}_B'' = \dot{U}_B - \dot{U}_{o'o}; \quad (8)$$

$$\dot{U}_C'' = \dot{U}_C - \dot{U}_{o'o}; \quad (9)$$

и вычисляем их:

$$\dot{U}_A'' = 127 - (-75,5 - j35,2) = 202,5 + j35,2 = 205,54e^{j9,9^0}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_B'' = -63,5 - j110 - (-75,5 - j35,2) = 12 - j74,8 = 75,76e^{-j80,9^0}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_C'' = -63,5 + j110 - (-75,5 - j35,2) = 12 + j145,2 = 145,7e^{j85,3^0}, \text{ В}.$$

Способ 2. По линейным напряжениям сети

Предварительно выразим в комплексной форме линейные напряжения сети.

Если фазное напряжение $\dot{U}_A = 127 \text{ В}$, то линейное напряжение \dot{U}_{AB} , которое в $\sqrt{3}$ больше фазного и опережает его на 30^0 , запишется так:

$$\dot{U}_{AB} = \sqrt{3}\dot{U}_A \cdot e^{j30^0} = 1,73 \cdot 127 \cdot e^{j30^0} = 220e^{j30^0} = 190,53 + j110 \text{ В},$$

а два других линейных напряжения будут равны:

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{AB} \cdot e^{-j120^0} = 220e^{j30^0} \cdot e^{-j120^0} = 220e^{-j90^0} = -j220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{AB} \cdot e^{j120^0} = 220e^{j30^0} \cdot e^{j120^0} = 220e^{j150^0} = -190,53 + j110 \text{ В}.$$

Фазное напряжение фазы A несимметричной нагрузки найдем по формуле:

$$\dot{U}''_A = \frac{\dot{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_B - \dot{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}, \quad (10)$$

где значения проводимостей $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ определены в *Способе 1*.

Фазные напряжения других фаз несимметричной цепи найдем по формулам:

$$\dot{U}''_B = \dot{U}''_A - \dot{U}_{AB}; \quad (11)$$

$$\dot{U}''_C = \dot{U}''_A + \dot{U}_{CA}. \quad (12)$$

Вычисляем по формулам (10), (11) и (12):

$$\begin{aligned} \dot{U}''_A &= \frac{220e^{j30^\circ} \cdot 0,1374e^{-j74,1^\circ} - 220e^{j150^\circ} \cdot 0,0371e^{-j15,1^\circ}}{0,0358 - j0,0097 + 0,0376 - j0,1321 + 0,0358 - j0,0097} = \\ &= 205,62e^{j9,9^\circ} = 202,56 + j35,35, \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\dot{U}''_B = 202,56 + j35,35 - 190,53 - j110 = 12,03 - j74,65 = 75,61e^{-j80,8^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}''_C = 202,56 + j35,35 - 190,53 + j110 = 12,03 + j145,35 = 145,85e^{j85,3^\circ}, \text{ В}.$$

4.1.2 По закону Ома определим токи несимметричной нагрузки (например, по значениям фазных напряжений, вычисленным по последним трем формулам):

$$\dot{I}''_A = \frac{\dot{U}''_A}{\underline{Z}_A} = \frac{205,62e^{j9,9^\circ}}{26,93e^{j15,1^\circ}} = 7,64e^{-j5,2^\circ} = 7,61 - j0,69 \text{ А};$$

$$\dot{I}''_B = \frac{\dot{U}''_B}{\underline{Z}_B} = \frac{75,61e^{-j80,8^\circ}}{7,28e^{j74,1^\circ}} = 10,39e^{-j154,9^\circ} = -9,4 - j4,41 \text{ А};$$

$$\dot{I}''_C = \frac{\dot{U}''_C}{\underline{Z}_C} = \frac{145,85e^{j85,3^\circ}}{26,93e^{j15,1^\circ}} = 5,42e^{j70,2^\circ} = 1,84 + j5,1 \text{ А},$$

и проверим правильность вычислений по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}''_A + \dot{I}''_B + \dot{I}''_C = 7,61 - j0,69 - 9,4 - j4,41 + 1,84 + j5,1 = 0,05 + j0 \approx 0 - \text{верно.}$$

4.1.3 Строим векторную диаграмму токов несимметричной нагрузки:

а) поместив нулевую точку O'' несимметричной нагрузки в начало координат комплексной плоскости, строим векторы $\dot{U}''_A, \dot{U}''_B, \dot{U}''_C$ в ранее выбранном масштабе $m_U = 25 \text{ В/см}$ (рис.2.8);

б) в масштабе $m_I = 2 \text{ А/см}$ строим векторы $\dot{I}''_A, \dot{I}''_B, \dot{I}''_C$ токов нагрузки.

4.1.4 Выполняем графическую проверку по I закону Кирхгофа:

- из конца вектора \dot{I}''_A строим вектор \dot{I}''_B (пунктир), а из конца пунктирного вектора \dot{I}''_B – вектор \dot{I}''_C (тоже пунктир);
- построенный векторный треугольник токов замкнут, т.е. равнодействующая суммы векторов линейных токов равна нулю, что означает выполнение первого закона Кирхгофа для узла O'' в схеме аварийного режима (рис. 2.7).

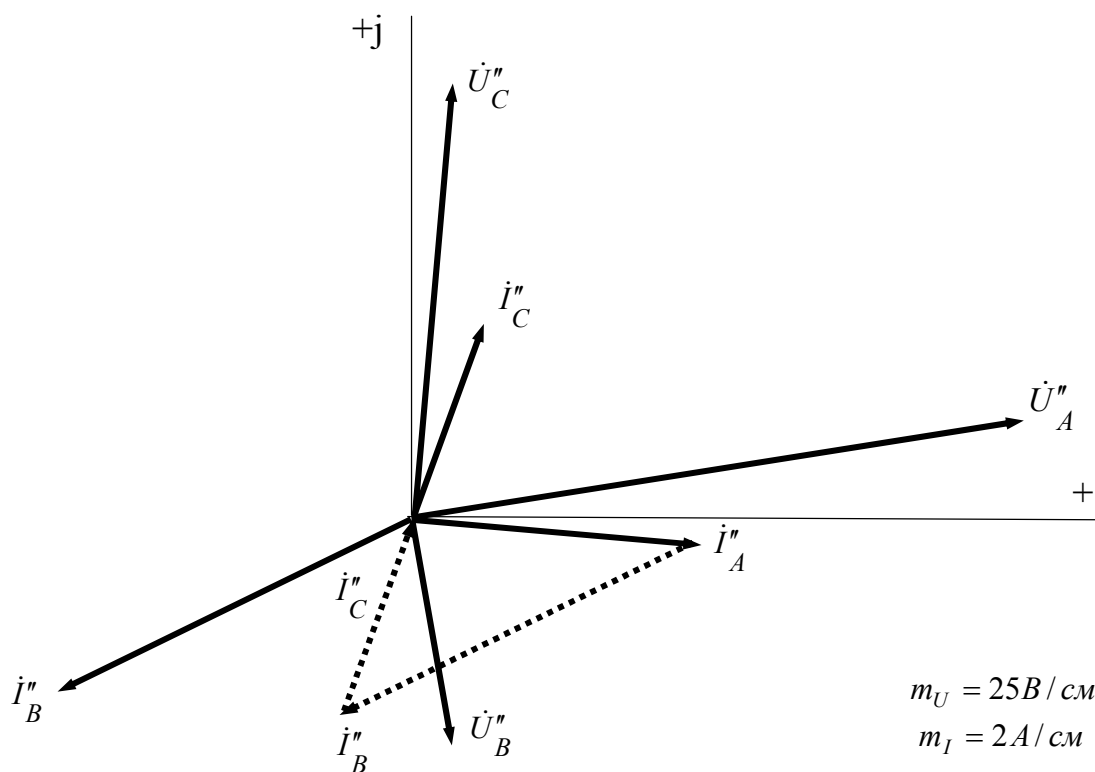


Рис.2.8. Векторная диаграмма несимметричной нагрузки

Примечание. Любопытного студента, выполнившего расчет фазных напряжений по *Способу 2*, может заинтересовать вопрос: а велико ли напряжение между нулевой точкой O сети и нулевой точкой O'' несимметричной нагрузки? – Это напряжение $\dot{U}''_{O''O}$ легко найти из топографической диаграммы линейных и фазных напряжений (рис.2.9):

- строим векторы $\dot{U}''_A, \dot{U}''_B, \dot{U}''_C$ так, как строили их на рис.2.8, и обозначаем концы этих векторов буквами A, B, C ;
- соединив точки A, B и C , получим равносторонний треугольник векторов линейных напряжений сети;
- находим нулевую точку O сети как точку пересечения медиан (пунктир) треугольника линейных напряжений сети;

г) проводим из точки O в точку O'' вектор $\dot{U}_{O''O}$ напряжения смещения нейтрали;

д) умножив длину вектора $\dot{U}_{O''O}$ на масштаб напряжения, получим величину напряжения смещения нейтрали;

е) измерив угол между вектором $\dot{U}_{O''O}$ и вещественной осью, найдем фазу напряжения смещения нейтрали.

В данном случае длина вектора напряжения смещения нейтрали

$$|\dot{U}_{O''O}| = m_U \cdot \overline{O''O} = 25 \cdot 3,4 = 85 \text{ В},$$

и этот вектор сдвинут относительно вещественной оси на угол

$$\psi_{O''O} = -155^\circ.$$

Таким образом, $\dot{U}_{O''O} = 85e^{-j155^\circ} \text{ В}$, что практически совпадает с результатом вычислений по формуле (6).

Графическое определение вектора $\dot{U}_{O''O}$, т.е. построение векторной диаграммы, изображенной на рис.2.9, выполняется по желанию студента.

4.2 Входные токи цепи определяем через линейные токи двигателя и печи по первому закону Кирхгофа соответственно для узлов **a**, **b**, **c** схемы трехфазной цепи в аварийном режиме (рис.2.7):

$$\dot{I}_A = \dot{I}'_A + \dot{I}''_A = 7,88 - j6,95 + 7,61 - j0,69 = 15,49 - j7,64 = 17,27e^{-j26,3^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}'_B + \dot{I}''_B = -9,96 - j3,35 - 9,4 - j4,41 = -19,36 - j7,76 = 20,86e^{-j158,2^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}'_C + \dot{I}''_C = 2,08 + j10,3 + 1,84 + j5,1 = 3,92 + j15,4 = 15,89e^{j75,7^\circ} \text{ А}.$$

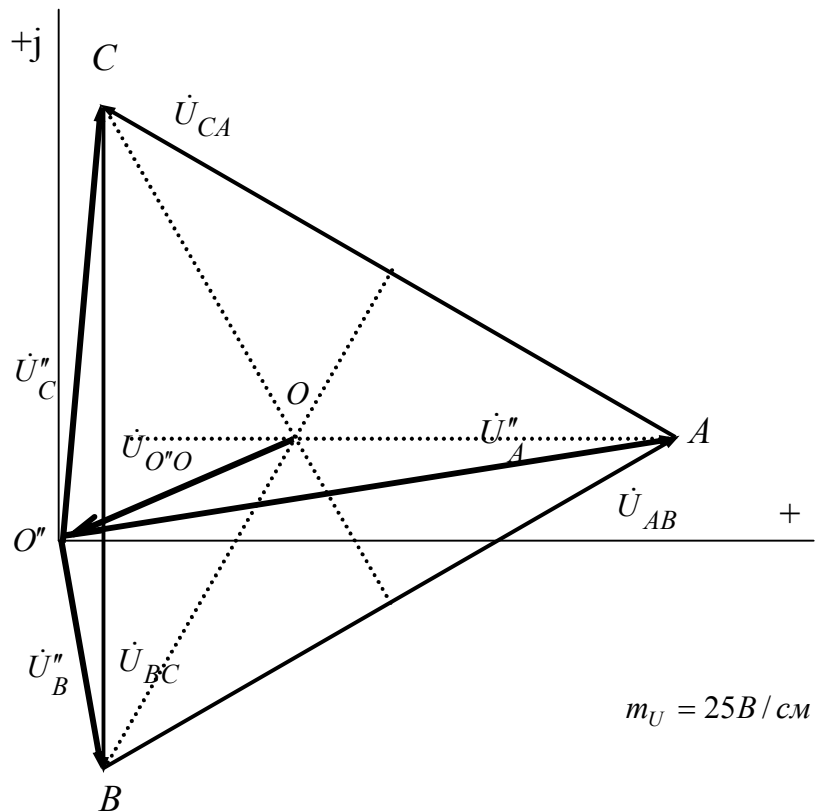


Рис.2.9. Определение напряжения смещения нейтрали при обрыве фазы *ca*

4.3 Разлагаем токи $\dot{I}''_A, \dot{I}''_B, \dot{I}''_C$ на симметричные составляющие:

4.3.1 Аналитически:

1) Токи симметричных составляющих нулевой последовательности:

$$\dot{I}''_{AO} = \dot{I}''_{BO} = \dot{I}''_{CO} = \frac{\dot{I}''_A + \dot{I}''_B + \dot{I}''_C}{3}, \quad (13)$$

но для любой трехпроводной цепи

$$\dot{I}''_A + \dot{I}''_B + \dot{I}''_C = 0 \Rightarrow \dot{I}''_{AO} = \dot{I}''_{BO} = \dot{I}''_{CO} = 0,$$

т.е. в любой трехпроводной цепи токи нулевой последовательности отсутствуют (для них нет пути замыкания через нулевой провод).

2) Токи симметричных составляющих прямой последовательности:

ток фазы *A*:

$$\dot{I}''_{A1} = \frac{\dot{I}''_A + a\dot{I}''_B + a^2\dot{I}''_C}{3}, \quad (14)$$

где $a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ}$;

$$\dot{I}''_{A1} = \frac{7,64e^{-j5,2^\circ} + e^{j120^\circ} \cdot 10,39e^{-j154,9^\circ} + e^{-j120^\circ} \cdot 5,42e^{j70,2^\circ}}{3} =$$

$$= \frac{7,61 - j0,69 + 10,39e^{-j34,9^0} + 5,42e^{-j49,8^0}}{3} = \frac{7,61 - j0,69 + 8,72 - j5,94 + 3,50 - j4,14}{3} =$$

$$= \frac{19,63 - j10,77}{3} = 6,54 - j3,59 = 7,46e^{-j28,8^0} \text{ A};$$

токи других фаз:

$$\dot{I}_{B1}'' = \dot{I}_{A1}'' \cdot e^{-j120^0} = 7,46e^{-j28,8^0} \cdot e^{-j120^0} = 7,46e^{-j148,8^0} = -6,38 - j3,86 \text{ A};$$

$$\dot{I}_{C1}'' = \dot{I}_{A1}'' \cdot e^{j120^0} = 7,46e^{-j28,8^0} \cdot e^{j120^0} = 7,46e^{j91,2^0} = -0,156 + j7,458 \text{ A}.$$

3) Токи симметричных составляющих обратной последовательности:

ток фазы A :

$$\dot{I}_{A2}'' = \frac{\dot{I}_A'' + a^2 \dot{I}_B'' + a \dot{I}_C''}{3}; \quad (15)$$

$$\dot{I}_{A2}'' = \frac{7,64e^{-j5,2^0} + e^{-j120^0} \cdot 10,39e^{-j154,9^0} + e^{j120^0} \cdot 5,42e^{j70,2^0}}{3} =$$

$$= \frac{7,61 - j0,69 + 10,39e^{-j274,9^0} + 5,42e^{j190,2^0}}{3} = \frac{7,61 - j0,69 + 0,89 + j10,35 - 5,33 - j0,96}{3} =$$

$$= \frac{3,17 + j8,7}{3} = 1,06 + j2,9 = 3,09e^{j69,9^0} \text{ A}.$$

токи других фаз:

$$\dot{I}_{B2}'' = \dot{I}_{A2}'' \cdot e^{j120^0} = 3,09e^{j69,9^0} \cdot e^{j120^0} = 3,09e^{j189,9^0} = -3,04 - j0,53 \text{ A};$$

$$\dot{I}_{C2}'' = \dot{I}_{A2}'' \cdot e^{-j120^0} = 3,09e^{j69,9^0} \cdot e^{-j120^0} = 3,09e^{-j50,1^0} = 1,98 - j2,37 \text{ A}.$$

Проверка:

$$\dot{I}_{A0}'' + \dot{I}_{A1}'' + \dot{I}_{A2}'' = 6,5 - j3,59 + 1,06 + j2,9 = 7,6 - j0,69 \approx 7,61 - j0,69 = \dot{I}_A''$$

$$\dot{I}_{B0}'' + \dot{I}_{B1}'' + \dot{I}_{B2}'' = -6,38 - j3,86 - 3,04 - j0,53 = -9,42 - j4,39 \approx -9,4 - j4,41 = \dot{I}_B''$$

$$\dot{I}_{C0}'' = \dot{I}_{C1}'' = \dot{I}_{C2}'' = -0,156 + j7,458 + 1,98 - j2,37 = 1,82 + j5,09 \approx 1,84 + j5,1 = \dot{I}_C''$$

– Верно.

4.3.2. Графически:

1) Построение вектора тока нулевой последовательности фактически является графической проверкой по первому закону Кирхгофа, уже выполненной в п.4.1.2 (см. векторную диаграмму на рис.2.8).

2) Для построения вектора \dot{I}_{A1}'' тока прямой последовательности фазы A (рис.2.10):

- из конца вектора \dot{I}_A'' строим вектор $a\dot{I}_B''$, т.е. вектор \dot{I}_B'' , повернутый на 120^0 против хода часовой стрелки;
- из конца вектора $a\dot{I}_B''$ строим вектор $a^2\dot{I}_C''$, т.е. вектор \dot{I}_C'' , повернутый на 240^0 против хода часовой стрелки;
- соединив начало вектора \dot{I}_A'' с концом вектора $a^2\dot{I}_C''$, получим вектор, третья часть которого дает вектор \dot{I}_{A1}'' ;

- поворачивая вектор \dot{I}''_{A1} на $\pm 120^\circ$, получим два других вектора симметричной системы токов прямой последовательности: $\dot{I}''_{B1} = a^2 \dot{I}''_{A1}$ и $\dot{I}''_{C1} = a \dot{I}''_{A1}$.

3) Ток обратной последовательности \dot{I}''_{A2} фазы A (рис.2.11) строим аналогично, однако при сложении векторов вектор \dot{I}''_B поворачиваем на 240° , а вектор \dot{I}''_C – на 120° ; затем, поворачивая вектор \dot{I}''_{A2} на $\pm 120^\circ$, получим два других вектора $\dot{I}''_{B2} = a \dot{I}''_{A2}$ и $\dot{I}''_{C2} = a^2 \dot{I}''_{A2}$ симметричной системы токов обратной последовательности.

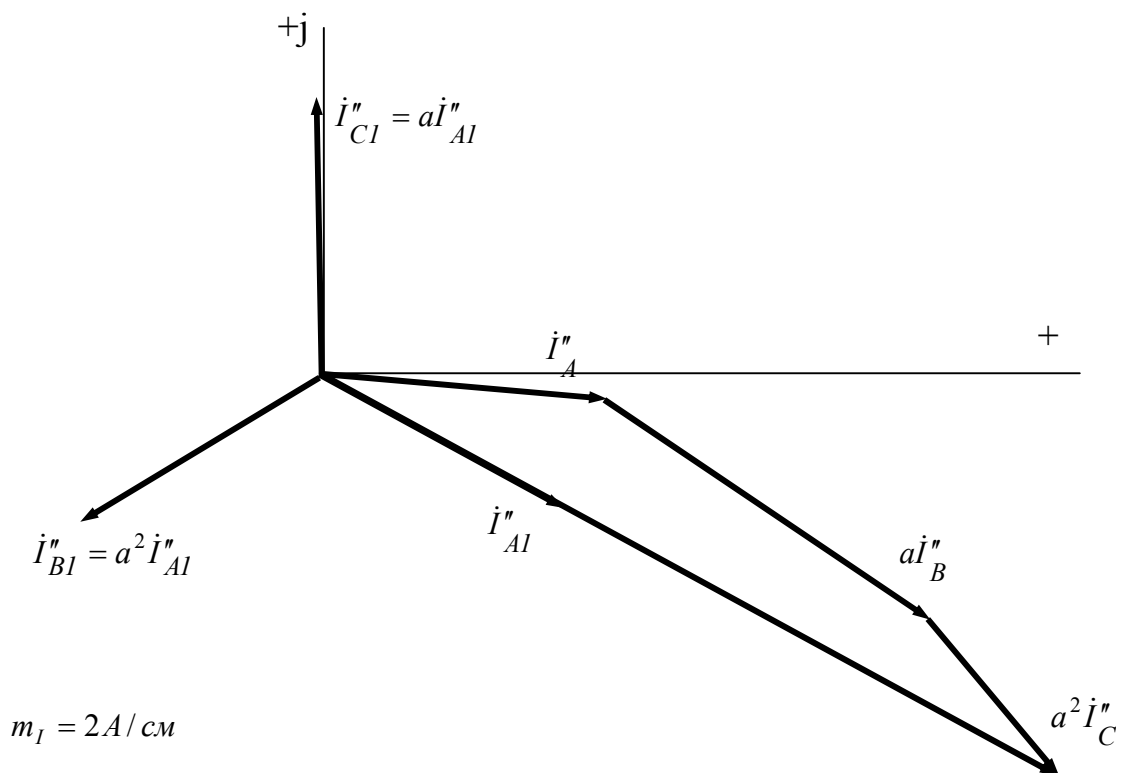


Рис.2.10. Симметричные составляющие прямой последовательности

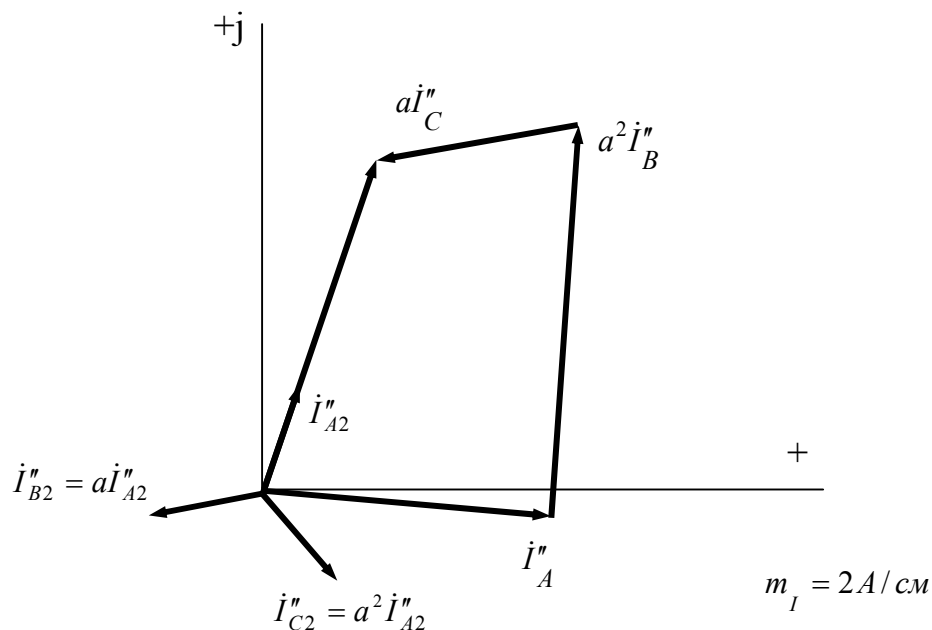


Рис.2.11. Симметричные составляющие обратной последовательности

Раздел 4. ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЮ

4.1. Методические указания по выполнению контрольной работы

При выполнении контрольной работы использовать общепринятые обозначения, расшифровывая их при первом применении и указывая единицы измерения в Международной системе единиц СИ. Текст и формулы должны быть написаны чернилами или пастой аккуратным разборчивым почерком в тетради или на листах формата А4 с полями справа в 3 см для замечаний рецензента. Расчетные формулы первоначально приводятся в общем виде с разъяснением входящих в них физических величин и указанием их размерностей. Затем в формулы подставляют соответствующие числовые значения и приводят конечный результат. Схемы и графические построения выполняют с применением чертежных инструментов в соответствии с требованиями ЕСКД. В конце контрольной работы нужно дать список использованной литературы, поставить свою подпись и указать дату окончания задания.

Прежде чем приступить к выполнению работы, необходимо внимательно ознакомиться с Приложением.

4.2. Задания для контрольной работы

Задача 1. Расчет разветвленной цепи несинусоидального тока

Вычертить схему индивидуального задания и найти:

1. Действующие и мгновенные значения гармоник токов ветвей;
2. Действующие и мгновенные значения токов ветвей;
3. Действующее значение э.д.с.;
4. Мощности и коэффициент мощности несинусоидальной цепи, а также коэффициент мощности для первой гармоники.

УКАЗАНИЯ ПО ВЫБОРУ ВАРИАНТА ЗАДАНИЯ И РАСЧЕТУ:

– Номер варианта схемы индивидуального задания определяют по двум последним цифрам шифра. Если число, образованное двумя последними цифрами, больше 20, то для получения номера варианта из этого числа вычитают 20, 40, 60 или 80. Например, для шифра 5257 номер варианта $57-40=17$.

– Схему индивидуального задания строят, исходя из общего вида разветвленной цепи (рис.4.1), а элементы схемы индивидуального задания выбирают из таблицы 4.1, где заданные элементы отмечены знаком \times в строке, соответствующей номеру варианта. При этом для всех вариантов:

$$e_1 = e_2 = e_3 = e = E_o + E_m^{(1)} \sin(\omega t + \psi_1) + E_m^{(3)} \sin(3\omega t + \psi_3) = \\ = 20 + 100\sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ) + 50\sqrt{2} \sin(3\omega t - 60^\circ), B;$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R; \quad L_1 = L_2 = L_3 = L; \quad C_1 = C_2 = C_3 = C; \quad \text{частота } f = 50 \text{Гц}.$$

(Из таблицы 4.1 видно, что каждая индивидуальная схема будет содержать только один источник э.д.с., и лишь только одна ветвь заданной схемы будет содержать последовательное соединение резистора и реактивного элемента (L или C); другие же ветви будут содержать только по одному элементу – R , L или C).

– Численные значения R , L или C выбирают из таблицы 4.2 по последней цифре учебного шифра.

– Индуктивные и емкостные сопротивления для первой гармоники, а также аргументы комплексных чисел, вычислять с точностью до десятых, а комплексы сопротивлений и токов – до сотых.

– Все комплексные величины записывать и в алгебраической, и в показательной формах.

– При обозначении токов и сопротивлений номер ветви указывать нижним индексом, а номер гармоники – верхним индексом в скобках, например: $I_2^{(3)}$; $Z_1^{(1)}$ и тому подобное.

– Правильность расчета токов ветвей для каждой гармоники проверять по первому закону Кирхгофа.

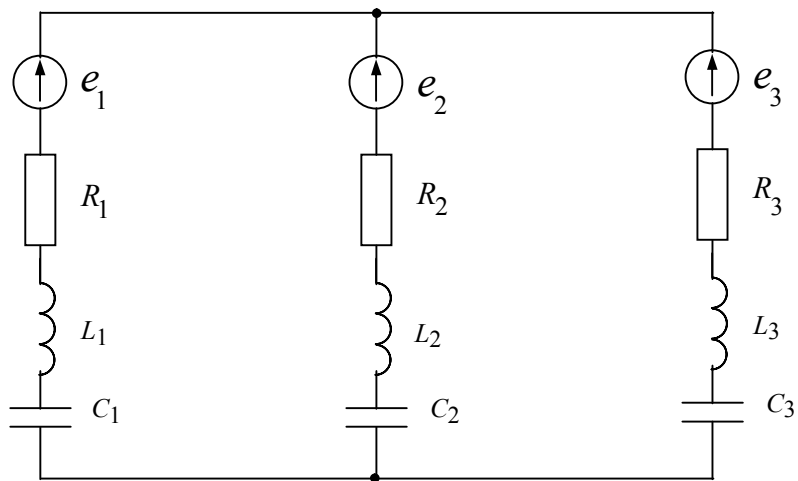


Рис.4.1 Общий вид цепи несинусоидального тока

Таблица 4.1

Выбор схемы индивидуального задания

Вариант	Параметры											
	e_1	e_2	e_3	R_1	L_1	C_1	R_2	L_2	C_2	R_3	L_3	C_3
01	×			×				×		×		×
02		×		×	×				×	×		
03			×			×	×		×		×	
04	×			×			×	×				×
05		×			×		×	×				×
06			×			×	×	×				×
07	×				×		×		×	×		
08		×			×		×			×		×
09			×		×		×		×			×
10	×				×		×	×				×
11		×				×		×		×	×	
12			×		×		×	×				×
13	×			×	×			×				×
14		×			×				×	×	×	

Окончание таблицы 4.1

Вариант	Параметры
---------	-----------

ант	e_1	e_2	e_3	R_1	L_1	C_1	R_2	L_2	C_2	R_3	L_3	C_3
15			×	×			×	×				×
16	×					×	×		×		×	
17		×		×	×			×				×
18			×	×		×		×		×		
19	×					×	×	×				×
20		×				×			×	×	×	

Таблица 4.2

Исходные данные для расчета

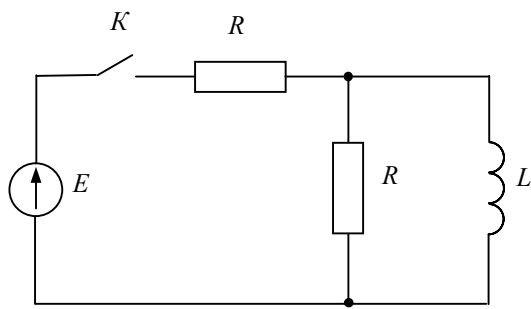
Параметр	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R, \text{ Ом}$	7	3	5	6	8	3	6	7	8	9
$L, \text{ мГн}$	16	19	13	10	19	13	16	10	26	22
$C, \text{ мкФ}$	265	212	177	152	133	152	177	212	265	133

Задача 2 Расчет переходных процессов в разветвленных цепях постоянного тока с одним накопителем

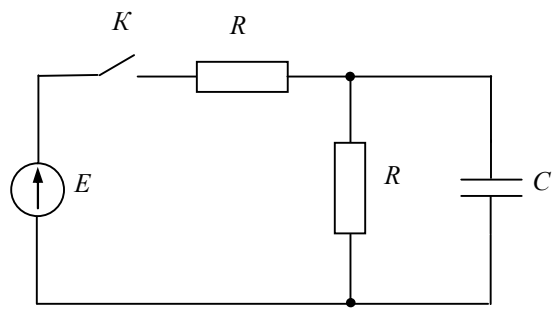
УКАЗАНИЯ ПО ВЫБОРУ ВАРИАНТА ЗАДАНИЯ И РАСЧЕТУ:

1. Номер схемы индивидуального задания равен числу, образованному двумя последними цифрами учебного шифра, если это число ≤ 20 . Если это число > 20 , нужно вычесть 20, 40, 60 или 80.
2. Схема задания по ее номеру выбирается из табл. 4.3.
3. Для всех вариантов принять $E=18\text{В}$;
4. В зависимости от наличия в схеме индуктивности или емкости, требуется найти закон изменения во времени:
 - А. Тока и напряжения на индуктивности;
 - Б. Напряжения и тока на емкости.
5. Все решение ведется в общем виде, а числовые значения подставляют лишь в окончательное выражение.
6. Исходные данные для вычислений берутся следующим образом:
 - индуктивность, измеряемая в миллигенри ($1\text{мГн}=10^{-3}\text{Гн}$), равна последней цифре шифра, умноженной на 100;
 - емкость в микрофарадах ($1\text{мкФ}=10^{-6}\text{Ф}$) равна последней цифре учебного шифра, умноженной на 1000;
 - сопротивление резистора (Ом) равно предпоследней цифре шифра;
 - если цифра, по которой определяется индуктивность L , емкость C или сопротивление R , равна нулю, то берется число 10.

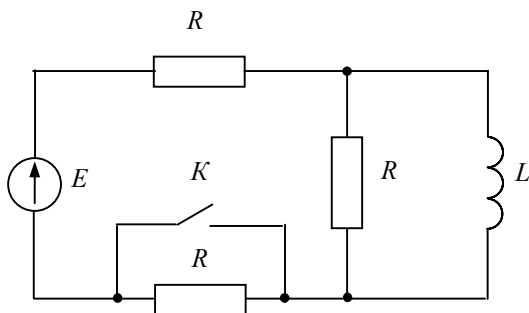
Схемы индивидуальных заданий



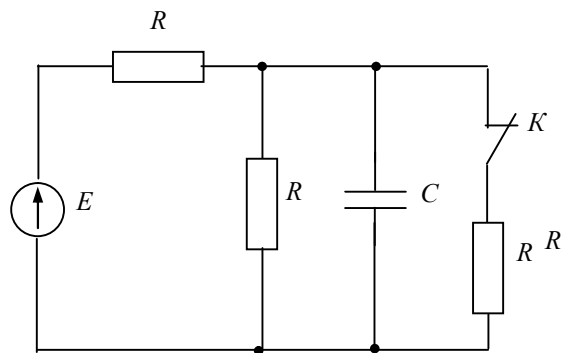
Сх.1. Ключ K замыкается



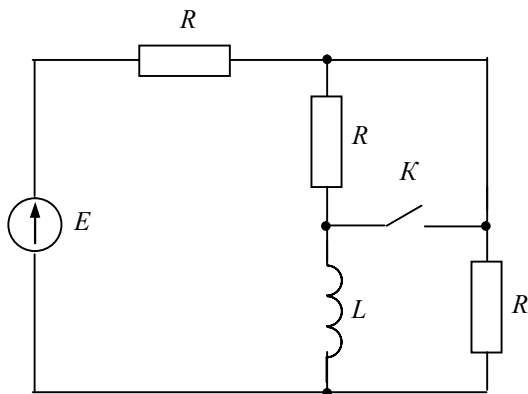
Сх.2. Ключ K замыкается



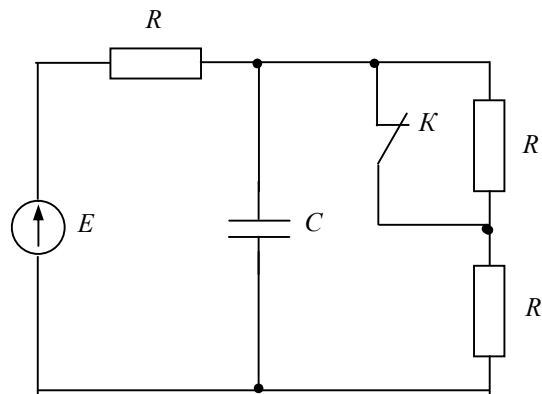
Сх.3. Ключ K замыкается



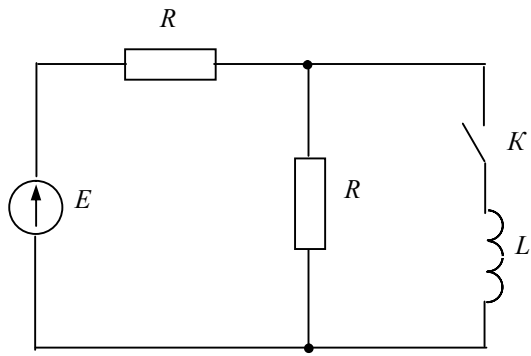
Сх.4. Ключ K размыкается



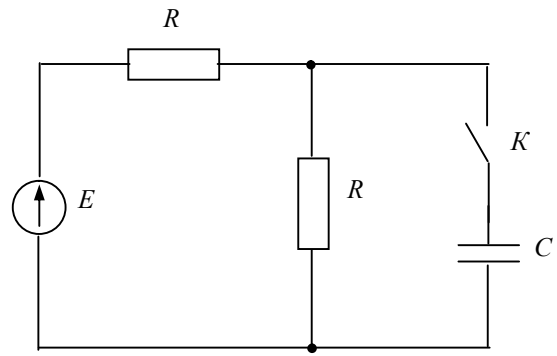
Сх.5. Ключ K замыкается



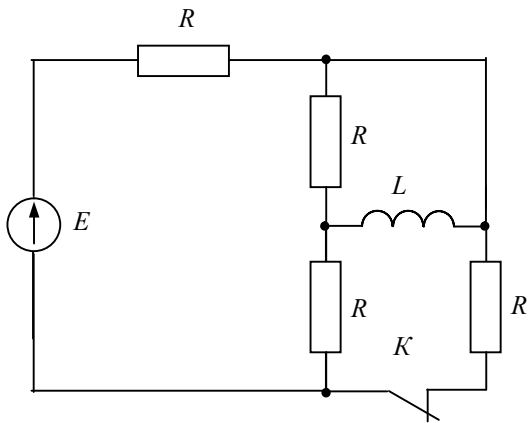
Сх.6. Ключ K размыкается



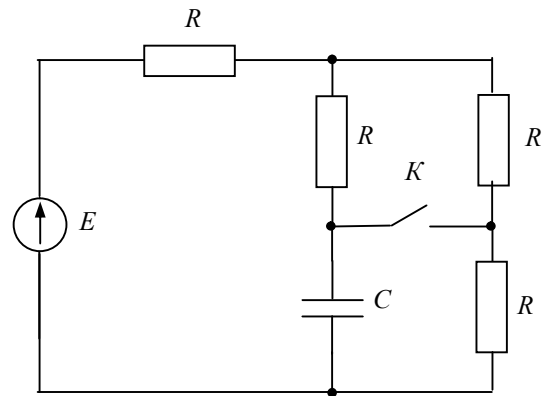
Сх.7. Ключ K замыкается



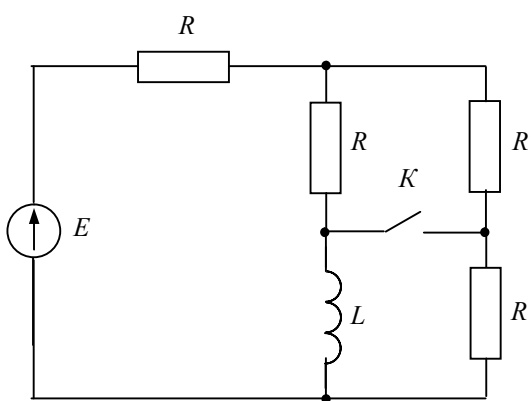
Сх.8. Ключ K замыкается



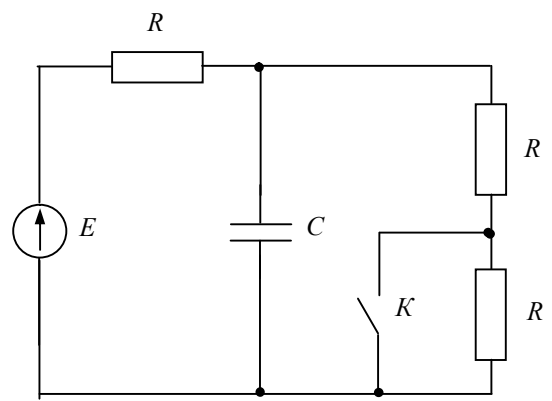
Сх.9. Ключ K размыкается



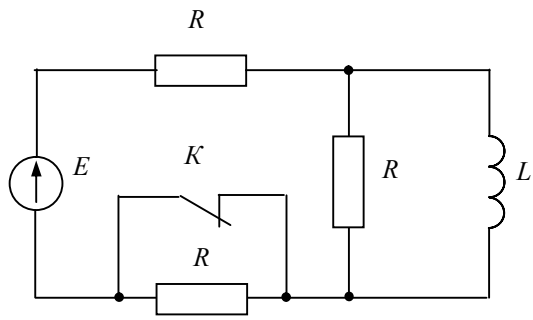
Сх.10. Ключ K замыкается



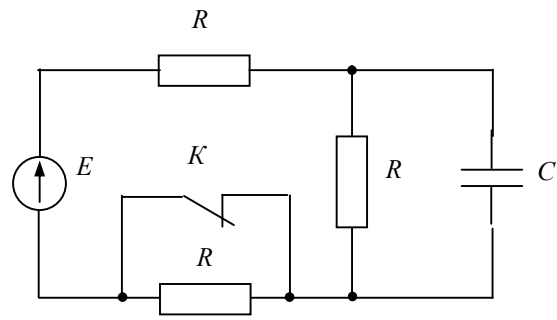
Сх.11. Ключ K замыкается



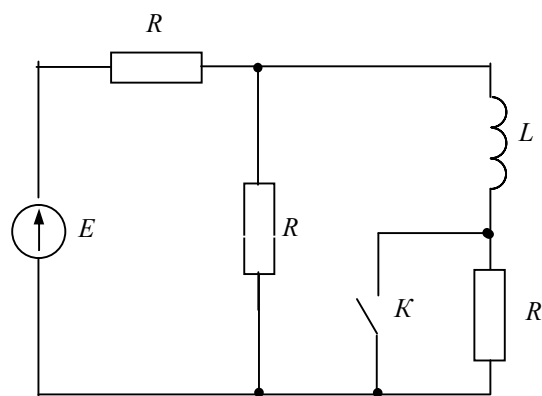
Сх.12. Ключ K замыкается



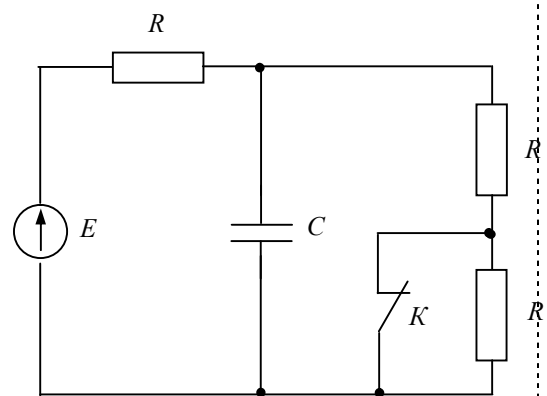
Сх.13. Ключ K размыкается



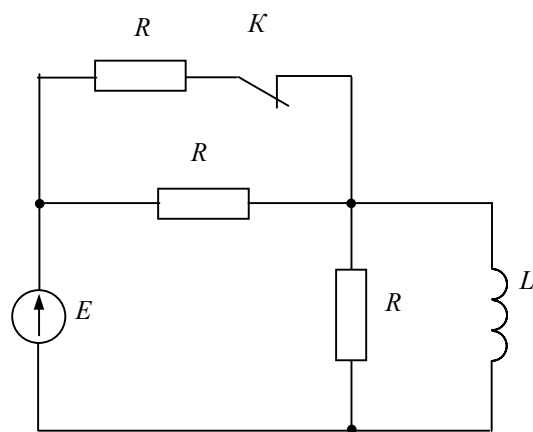
Сх.14. Ключ K размыкается



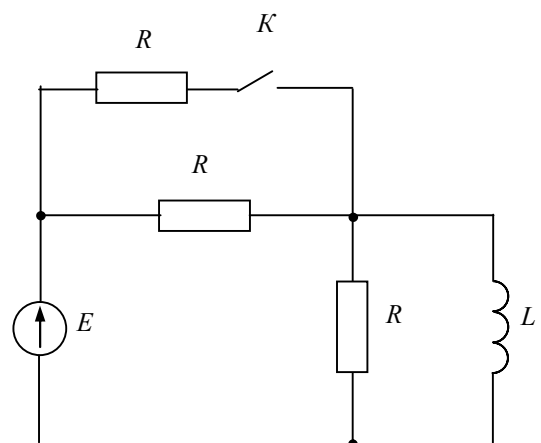
Сх.15. Ключ K замыкается



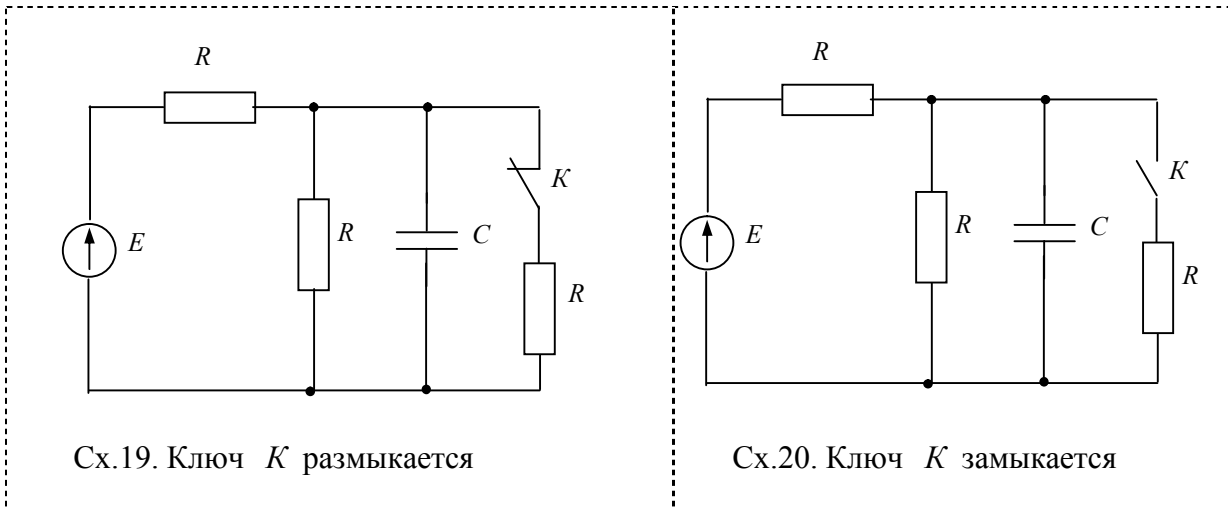
Сх.16. Ключ K размыкается



Сх.17. Ключ K размыкается



Сх.18. Ключ K замыкается



4.3. Примеры выполнения задания

Пример решения задачи 1

Пусть по двум последним цифрам шифра выбран вариант 01, по которому, – согласно первой строке таблицы 4.1, – в первой ветви индивидуальной схемы должны быть включены э.д.с. $e_1 = e$ и резистор $R_1 = R$, во второй ветви – индуктивность $L_2 = L$, а в третьей ветви – резистор $R_3 = R$ и емкость $C_3 = C$. Числовые значения параметров R , L и C , разумеется, заданы в примере произвольно (а не выбраны по последней цифре 1 шифра из таблицы 4.2):

$$R=40\text{М}, L=20\text{мГн}, C=220\text{мкФ}.$$

Итак, записываем условие задачи и чертим схему индивидуального задания (рис.4.2):

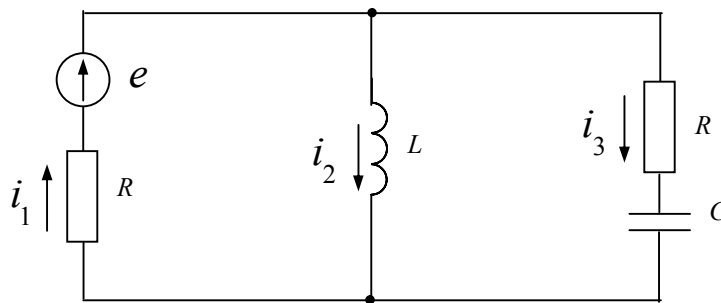


Рис.4.2 Схема разветвленной цепи несинусоидального тока

Дано:

$$e = E_o + E_m^{(1)} \sin(\omega t + \psi_1) + E_m^{(3)} \sin(3\omega t + \psi_3) =$$

$$= 20 + 100\sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ) + 50\sqrt{2} \sin(3\omega t - 60^\circ), B;$$

$$R=40\text{М}, L=20\text{мГн}, C=220\text{мкФ}; \text{ частота } f = 50\text{Гц}.$$

Найти:

1. Действующие и мгновенные значения гармоник токов ветвей;
2. Действующие и мгновенные значения токов ветвей;
3. Действующее значение э.д.с.;
4. Мощности и коэффициент мощности несинусоидальной цепи, а также коэффициент мощности для первой гармоники.

Решение

1 Действующие и мгновенные значения гармоник токов ветвей находим по методу наложения от каждой гармоники э.д.с. в отдельности:

а) при включении цепи на нулевую гармонику э.д.с., т.е. на постоянное напряжение $E^{(0)} = 20B$:

– входное сопротивление цепи $R_{\text{вх}}^{(0)} = R_1$, т.к. на постоянном токе индуктивность второй ветви ведет себя как короткое замыкание, а емкость третьей ветви – как разрыв цепи;

– токи нулевой гармоники

$$I_1^{(0)} = I_2^{(0)} = \frac{E^{(0)}}{R_{\text{вх}}^{(0)}} = \frac{20}{4} = 5A; \quad I_3^{(0)} = 0;$$

б) при включении цепи на первую гармонику

$$e^{(1)} = E_m^{(1)} \sin(\omega t + \psi_1) = 100\sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ), B;$$

– угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад} / \text{с}$;

– индуктивное и емкостное сопротивления для первой гармоники:

$$X_L^{(1)} = \omega L = 314 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 6,3 \text{ Ом}; \quad X_C^{(1)} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 220 \cdot 10^{-6}} = 14,5 \text{ Ом};$$

– комплекс действующего значения э.д.с. первой гармоники:

$$\dot{E}^{(1)} = \frac{E_m^{(1)}}{\sqrt{2}} e^{j\psi_1} = 100e^{j30^\circ} B;$$

– комплексы сопротивлений:

$$\text{первой ветви} \quad \underline{Z}_1^{(1)} = R = 4 \text{ Ом},$$

$$\text{второй ветви} \quad \underline{Z}_2^{(1)} = jX_L^{(1)} = j6,3 = 6,3e^{j90^\circ} \text{ Ом},$$

$$\text{третьей ветви} \quad \underline{Z}_3^{(1)} = R - jX_C^{(1)} = 4 - j14,5 = 15,04e^{-j74,6^\circ} \text{ Ом};$$

– комплекс входного сопротивления цепи:

$$\underline{Z}_{\text{вх}}^{(1)} = \underline{Z}_1^{(1)} + \frac{\underline{Z}_2^{(1)} \cdot \underline{Z}_3^{(1)}}{\underline{Z}_2^{(1)} + \underline{Z}_3^{(1)}} = 4 + \frac{6,3e^{j90^\circ} \cdot 15,04e^{-j74,6^\circ}}{j6,3 + 4 - j14,5} = 5,91 + j10,21 = 11,8e^{j60^\circ} \text{ Ом},$$

откуда следует, что активное и реактивное входные сопротивления цепи для первой гармоники соответственно равны:

$$R_{\text{вх}}^{(1)} = 5,91 \text{ Ом}, \quad X_{\text{вх}}^{(1)} = 10,21 \text{ Ом}$$

(по этим значениям удобно будет вычислить активную и реактивную мощности первой гармоники);

– комплексы первых гармоник токов ветвей:

$$\dot{I}_1^{(1)} = \frac{\dot{E}^{(1)}}{\underline{Z}_{\text{ex}}^{(1)}} = \frac{100e^{j30^\circ}}{11,8e^{j60^\circ}} = 8,47e^{-j30^\circ} = 7,34 - j4,24 A,$$

$$\dot{I}_2^{(1)} = \dot{I}_1^{(1)} \cdot \frac{\underline{Z}_3^{(1)}}{\underline{Z}_2^{(1)} + \underline{Z}_3^{(1)}} = 8,47e^{-j30^\circ} \cdot \frac{15,04e^{-j74,6^\circ}}{j6,3 + 4 - j14,5} = 13,97e^{-j40,6^\circ} = 10,61 - j9,09 A,$$

$$\dot{I}_3^{(1)} = \dot{I}_1^{(1)} \cdot \frac{\underline{Z}_2^{(1)}}{\underline{Z}_2^{(1)} + \underline{Z}_3^{(1)}} = 8,47e^{-j30^\circ} \cdot \frac{6,3e^{j90^\circ}}{j6,3 + 4 - j14,5} = 5,85e^{j124^\circ} = -3,27 + j4,85 A;$$

– проверка по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_2^{(1)} + \dot{I}_3^{(1)} = 10,61 - j9,09 - 3,27 + j4,85 = 7,34 - j4,24 = \dot{I}_1^{(1)} \quad \text{– верно};$$

– действующие и мгновенные значения первых гармоник токов ветвей:

$$\begin{aligned} I_1^{(1)} &= 8,47 A, & i_1^{(1)} &= 8,47\sqrt{2} \sin(\omega t - 30^\circ) A; \\ I_2^{(1)} &= 13,97 A, & i_2^{(1)} &= 13,97\sqrt{2} \sin(\omega t - 40,6^\circ) A; \\ I_3^{(1)} &= 5,85 A, & i_3^{(1)} &= 5,85\sqrt{2} \sin(\omega t + 124^\circ) A; \end{aligned}$$

в) при включении цепи на третью гармонику

$$e^{(3)} = E_m^{(3)} \sin(3\omega t + \psi_3) = 50\sqrt{2} \sin(3\omega t - 60^\circ), B;$$

– индуктивное и емкостное сопротивления для третьей гармоники:

$$X_L^{(3)} = 3\omega L = 3X_L^{(1)} = 3 \cdot 6,3 = 18,9 \text{ Ом}, \quad X_C^{(3)} = \frac{1}{3\omega C} = \frac{X_C^{(1)}}{3} = \frac{14,5}{3} = 4,8 \text{ Ом};$$

– комплекс действующего значения э.д.с. третьей гармоники:

$$\dot{E}^{(3)} = \frac{E_m^{(3)}}{\sqrt{2}} e^{j\psi_3} = 50e^{-j60^\circ} B;$$

– комплексы сопротивлений:

$$\text{первой ветви} \quad \underline{Z}_1^{(3)} = R = 4 \text{ Ом};$$

$$\text{второй ветви} \quad \underline{Z}_2^{(3)} = jX_L^{(3)} = j18,9 = 18,9e^{j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$\text{третьей ветви} \quad \underline{Z}_3^{(3)} = R - jX_C^{(3)} = 4 - j4,8 = 6,25e^{-j50,2^\circ} \text{ Ом};$$

– комплекс входного сопротивления цепи:

$$\underline{Z}_{\text{ex}}^{(3)} = \underline{Z}_1^{(3)} + \frac{\underline{Z}_2^{(3)} \cdot \underline{Z}_3^{(3)}}{\underline{Z}_2^{(3)} + \underline{Z}_3^{(3)}} = 4 + \frac{18,9e^{j90^\circ} \cdot 6,25e^{-j50,2^\circ}}{j18,9 + 4 - j4,8} = 10,67 - j4,53 = 11,59e^{-j23^\circ} \text{ Ом},$$

откуда следует, что активное и реактивное входные сопротивления цепи для третьей гармоники соответственно равны:

$$R_{\text{ex}}^{(3)} = 10,67 \text{ Ом}, \quad X_{\text{ex}}^{(3)} = -j4,53 \text{ Ом};$$

– комплексы третьих гармоник токов ветвей:

$$\dot{I}_1^{(3)} = \frac{\dot{E}^{(3)}}{\underline{Z}_{\text{ex}}^{(3)}} = \frac{50e^{-j60^\circ}}{11,59e^{-j23^\circ}} = 4,31e^{-j37^\circ} = 3,44 - j2,59 A;$$

$$\dot{I}_2^{(3)} = \dot{I}_1^{(3)} \cdot \frac{\underline{Z}_3^{(3)}}{\underline{Z}_2^{(3)} + \underline{Z}_3^{(3)}} = 4,31e^{-j37^\circ} \cdot \frac{6,25e^{-j50,2^\circ}}{j18,9 + 4 - j4,8} = 1,84e^{-j161,4^\circ} = -1,74 - j0,59 A;$$

$$\dot{I}_3^{(3)} = \dot{I}_1^{(3)} \cdot \frac{\underline{Z}_2^{(3)}}{\underline{Z}_2^{(3)} + \underline{Z}_3^{(3)}} = 4,31e^{-j37^\circ} \cdot \frac{18,9e^{j90^\circ}}{j18,9 + 4 - j4,8} = 5,56e^{-j21,2^\circ} = 5,18 - j2,01 A;$$

– проверка по первому закону Кирхгофа:

$$\boxed{\begin{matrix} (2) \\ \times \end{matrix}} \quad \begin{matrix} (3) \\ 3 \end{matrix} \quad \varphi \quad 5,18 \quad 2,01 \quad 3,44 \quad 2,60 \quad 3,44 \quad 2,59 \quad \begin{matrix} (3) \\ 1 \end{matrix} \quad - \text{ верно};$$

– действующие и мгновенные значения третьих гармоник токов ветвей:

$$I_1^{(3)} = 4,31 A, \quad i_1^{(3)} = 4,31\sqrt{2} \sin(3\omega t - 37^\circ), A;$$

$$I_2^{(3)} = 1,84 A, \quad i_2^{(3)} = 1,84\sqrt{2} \sin(3\omega t - 161,4^\circ), A;$$

$$I_3^{(3)} = 5,56 A, \quad i_3^{(3)} = 5,56\sqrt{2} \sin(3\omega t - 21,2^\circ), A;$$

2 Действующие и мгновенные значения токов ветвей:

$$I_1 = \sqrt{(I_1^{(0)})^2 + (I_1^{(1)})^2 + (I_1^{(3)})^2} = \sqrt{5^2 + 8,47^2 + 4,31^2} = 10,74 A,$$

$$i_1 = I_1^{(0)} + i_1^{(1)} + i_1^{(3)} = 5 + 8,47\sqrt{2} \sin(\omega t - 30^\circ) + 4,31\sqrt{2} \sin(3\omega t - 37^\circ), A;$$

$$I_2 = \sqrt{(I_2^{(0)})^2 + (I_2^{(1)})^2 + (I_2^{(3)})^2} = \sqrt{5^2 + 13,97^2 + 1,84^2} = 14,95 A,$$

$$i_2 = I_2^{(0)} + i_2^{(1)} + i_2^{(3)} = 5 + 13,97\sqrt{2} \sin(\omega t - 40,6^\circ) + 1,84\sqrt{2} \sin(3\omega t - 161,4^\circ), A;$$

$$I_3 = \sqrt{(I_3^{(1)})^2 + (I_3^{(3)})^2} = \sqrt{5,85^2 + 5,56^2} = 8,07 A,$$

$$i_3 = i_3^{(1)} + i_3^{(3)} = 5,85\sqrt{2} \sin(\omega t + 124^\circ) + 5,56\sqrt{2} \sin(3\omega t - 21,2^\circ), A;$$

3 Действующее значение э.д.с.:

$$E = \sqrt{E_0^2 + \left(\frac{E_m^{(1)}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{E_m^{(3)}}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{20^2 + 100^2 + 50^2} = 113,58 B;$$

4. Мощности и коэффициент мощности несинусоидальной цепи, коэффициент мощности для первой гармоники:

– активная мощность несинусоидальной цепи равна сумме активных мощностей всех гармоник:

$$P = P_0 + P^{(1)} + P^{(3)} = I_0^2 R + (I_1^{(1)})^2 R_{\text{эк}}^{(1)} + (I_1^{(3)})^2 R_{\text{эк}}^{(3)},$$

$$P = 5^2 \cdot 4 + 8,47^2 \cdot 5,91 + 4,31 \cdot 10,67 = 722,2 \approx 722 Bm;$$

– реактивная мощность несинусоидальной цепи равна алгебраической сумме реактивных мощностей всех гармоник (кроме, разумеется, нулевой), при этом знак реактивной мощности для каждой гармоники определяется знаком ее реактивного сопротивления:

$$Q = Q^{(1)} + Q^{(3)} = (I_1^{(1)})^2 X_{\text{эк}}^{(1)} + (I_1^{(3)})^2 X_{\text{эк}}^{(3)},$$

$$Q = 8,47^2 \cdot 10,21 + 4,31^2 \cdot (-4,53) = 648,3 \approx 648 BAp;$$

– полная мощность источника несинусоидальной э.д.с. равна произведению действующих значений э.д.с. и входного тока:

$$S = EI_1 = 113,58 \cdot 10,74 = 1219,85 \approx 1220 BA,$$

при этом $S \neq \sqrt{P^2 + Q^2}$ из-за мощности искажения, которая равна нулю только при чисто активной нагрузке;

– мощность искажения

$$T = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} = \sqrt{1219,85^2 - (722,2^2 + 648,3^2)} = 739 BA;$$

– коэффициент мощности цепи несинусоидального тока – это коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{экв}}$ такой синусоидальной цепи, у которой действующие значения напряжения (э.д.с.) и тока такие же, как в

рассматриваемой несинусоидальной цепи, и в которой выделяется такая же мощность; однако, угол $\varphi_{экс}$ – фиктивная величина, поэтому обычно коэффициент мощности несинусоидальной цепи обозначают, например, греческой буквой χ (или какой-либо другой буквой), и вычисляют по формуле:

$$\chi = \frac{P}{S},$$

$$\chi = \frac{722}{1220} = 0,59;$$

– коэффициент мощности для первой гармоники определяем из треугольника сопротивлений на входе цепи:

$$\cos\varphi^{(1)} = \frac{R_{\text{ex}}^{(1)}}{Z_{\text{ex}}^{(1)}} = \frac{5,91}{11,80} = 0,50.$$

Таким образом, за счет компенсации реактивной мощности на высших гармониках коэффициент мощности цепи несинусоидального тока оказался выше коэффициента мощности для первой гармоники.

Пример решения задачи 2

Дано:

$$E=18\text{В}; R=1\text{Ом}; L=101\text{мГн}.$$

Найти закон изменения во времени тока и напряжения на индуктивности после замыкания ключа K .

Определить продолжительность переходного процесса.

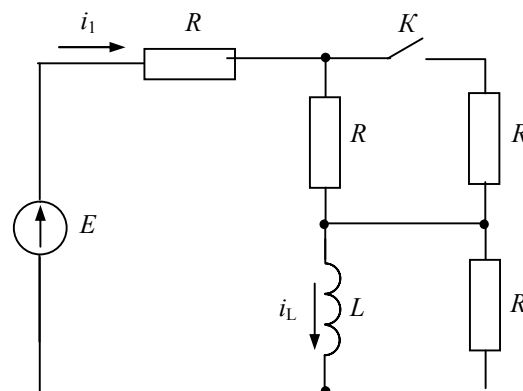


Рис.4.3. Схема до коммутации

Решение

1. Найдем ток в индуктивности до коммутации по закону Ома в заданной схеме (рис.4.3):

$$i_L(0-) = i_1(0-) = \frac{E}{2R}. \quad (4.1)$$

2. По I закону коммутации записываем основное начальное условие:

$$i_L(0) = i_L(0-) = \frac{E}{2R}. \quad (4.2)$$

3. Для тока в индуктивности решение ищем в виде:

$$i_L = i_{L,np} + i_{L,св}, \quad (4.3)$$

где $i_{L,np}$ – принужденная составляющая переходного тока;

$i_{L,св}$ – свободная составляющая переходного тока.

Так как после окончания переходного процесса новый установившийся режим будет режимом цепи постоянного тока, для которого индуктивное сопротивление равно нулю, то сопротивление R в послекоммутационной схеме (рис.4.4) будет закорочено, и по закону Ома

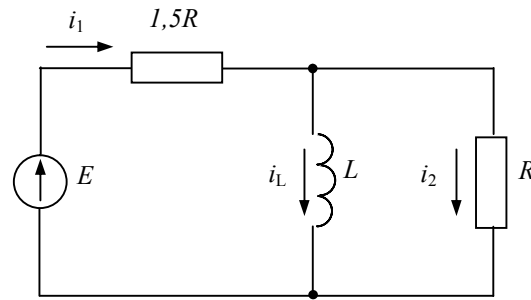


Рис.4.4. Схема после коммутации

$$i_{L,np} = \frac{E}{1,5R} = \frac{2E}{3R}. \quad (4.4)$$

Свободная составляющая переходного тока от источника не зависит, а зависит только от схемы соединения и параметров электрической цепи:

$$i_{L,св} = Ae^{p_1 t}, \quad (4.5)$$

где A – постоянная интегрирования;

p_1 – корень характеристического уравнения.

Для получения характеристического уравнения записываем входное сопротивление послекоммутационной схемы (рис.4.4) в комплексной форме, а затем заменяем $j\omega$ на p :

$$\underline{Z}_{вх}(j\omega) = \frac{3R}{2} + \frac{j\omega L \cdot R}{j\omega L + R}, \Rightarrow \underline{Z}_{вх}(p) = \frac{3R}{2} + \frac{pL \cdot R}{pL + R}.$$

Приведя правую часть последнего уравнения к общему знаменателю и приравняв числитель нулю, получим характеристическое уравнение:

$$5pL + 3R = 0, \quad (4.6)$$

корень которого
$$p_1 = -\frac{3R}{5L}. \quad (4.7)$$

Подставив значения из (4.4), (4.5), (4.7) в уравнение (4.3), получим:

$$i_L = \frac{2E}{3R} + Ae^{-\frac{3R}{5L}t}. \quad (4.8)$$

Для определения постоянной интегрирования A запишем последнее уравнение при $t=0$ с подстановкой основного начального условия из формулы (4.2):

$$i_L(0) = i_L(0-) = \frac{E}{2R},$$

т.е. при $t=0$ уравнение (4.8) принимает вид (4.8*):

$$\frac{E}{2R} = \frac{2E}{3R} + A, \quad (4.8^*)$$

откуда $A = -\frac{E}{6R}$. Подставляя это значение A в (4.8), получим:

$$i_L = \frac{2E}{3R} - \frac{E}{6R} e^{-\frac{3R}{5L}t},$$

или:

$$i_L = \frac{E}{3R} \left(2 - \frac{1}{2} e^{-\frac{3R}{5L}t} \right). \quad (4.9)$$

Правильность решения проверяем, записав уравнение (4.9) при $t=0$ и $t \rightarrow \infty$:

$$i_L(0) = \frac{E}{3R} \left(2 - \frac{1}{2} \right) = \frac{E}{2R}, \text{ что совпадает с ОНУ;}$$

$$i_L(\infty) = \frac{2E}{3R}, \text{ что совпадает с принужденным значением тока.}$$

Следовательно, решение найдено верно.

4. Находим закон изменения напряжения на индуктивности

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = \frac{E}{10} e^{-\frac{3R}{5L}t}. \quad (4.10)$$

5. Записываем формулы (4.7), (4.9) и (4.10) в числовом выражении:

$$p_1 = -\frac{3 \cdot 1}{5 \cdot 101 \cdot 10^{-3}} = -5,94 c^{-1} \approx -6 c^{-1};$$

$$i_L = \frac{18}{6 \cdot 1} (4 - e^{-6t}) = 3(4 - e^{-6t}) A;$$

$$u_L = \frac{18}{10} e^{-6t} = 1,8 e^{-6t} B.$$

6. Продолжительность t_{III} переходного процесса для цепи с одним накопителем энергии (индуктивностью или емкостью) приближенно определяется по формуле:

$$t_{\text{III}} \approx (3 \div 4) \tau, \quad (4.11)$$

где $\tau = \frac{1}{|p_1|}$ – постоянная времени, с.

Приняв $t_{\text{III}} = 3 \tau$, вычислим:

$$t_{\text{III}} = \frac{3}{|-6|} = 0,5 c.$$

Таким образом, через время, равное 0,5с, переходный процесс практически закончится

КОМПЛЕКСНЫЕ ЧИСЛА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
ДЛЯ РАСЧЕТА ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

П2.1. Определение и формы представления комплексных чисел

Число j , удовлетворяющее условию:

$$j^2 = -1, \quad (\text{П1})$$

называется *мнимой единицей* (этому условию, разумеется, не удовлетворяют *действительные* числа, поскольку их квадрат не может быть отрицательным числом).

Число вида
$$\mathbf{A} = a_1 + ja_2, \quad (\text{П2})$$

где a_1 и a_2 – вещественные числа, называется *комплексным числом*; при этом a_1 и a_2 называются соответственно *вещественной* и *мнимой частями* комплексного числа \mathbf{A} .

Геометрическим местом комплексных чисел является комплексная плоскость, в которой ось абсцисс называется *вещественной осью*, а ось ординат – *мнимой осью*. В комплексной плоскости комплексное число может быть представлено в виде *точки* \mathbf{A} (рис.П1) с координатами a_1 и a_2 и записано в форме (П2), которая называется *алгебраической* формой записи комплексного числа. Комплексное число также может быть представлено в комплексной плоскости в виде *радиуса-вектора* точки \mathbf{A} (рис.П2) и записано в *показательной* форме:

$$\mathbf{A} = Ae^{j\alpha}, \quad (\text{П3})$$

где A – *модуль комплексного числа* \mathbf{A} , равный длине радиуса-вектора;
 α – *аргумент комплексного числа* \mathbf{A} , равный углу, который образует вектор \mathbf{A} с положительным направлением вещественной оси.

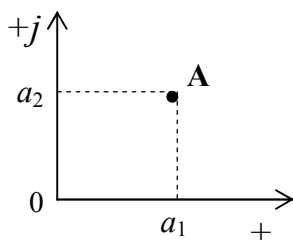


Рис. П1

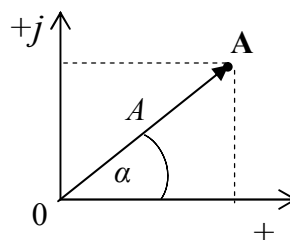


Рис. П2

Из сопоставления рисунков П1 и П2 видно, что можно выразить координаты комплексного числа через его модуль и аргумент, получив третью форму записи комплексного числа – *тригонометрическую*:

$$\mathbf{A} = A \cos \alpha + jA \sin \alpha = A(\cos \alpha + j \sin \alpha), \quad \text{П5)}$$

где $A \cos \alpha = a_1$ и $A \sin \alpha = a_2$.

П2.2. Арифметические операции над комплексными числами

Сложение и вычитание удобнее выполнять над комплексными числами, представленными в алгебраической форме:

$$(a_1 + ja_2) \pm (b_1 + jb_2) = (a_1 \pm b_1) + j(a_2 \pm b_2), \quad \text{П6)}$$

т.е. при сложении (вычитании) комплексных чисел складываются (вычитаются) их вещественные и мнимые части.

Умножение и деление удобнее выполнять над комплексными числами, представленными в показательной или тригонометрической форме. В этом случае справедливо правило: при умножении (делении) комплексных чисел их модули перемножаются (делятся), а аргументы складываются (вычитаются).

Если

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= A e^{j\alpha} = A(\cos \alpha + j \sin \alpha), \\ \mathbf{B} &= B e^{j\beta} = B(\cos \beta + j \sin \beta), \end{aligned}$$

то

$$\mathbf{AB} = AB e^{j(\alpha+\beta)} = AB[\cos(\alpha + \beta) + j \sin(\alpha + \beta)], \quad \text{П7)}$$

$$\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}} = \frac{A}{B} e^{j(\alpha-\beta)} = \frac{A}{B} [\cos(\alpha - \beta) + j \sin(\alpha - \beta)]. \quad \text{П8)}$$

П2.3. Преобразование формы записи комплексных чисел

При вычислениях возникает необходимость перевода комплексного числа из одной формы записи в другую.

Преобразование комплексного числа из *показательной формы в алгебраическую* выполняется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= A \cos \alpha \\ a_2 &= A \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad \text{П9)}$$

где A и α – соответственно модуль и аргумент в показательной форме записи комплексного числа;

a_1 и a_2 – координаты комплексного числа в алгебраической форме.

При переводе комплексного числа из *алгебраической формы в показательную* модуль A комплекса, расположенного в любом квадранте комплексной плоскости, вычисляется по формуле:

$$A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}, \quad \text{П10)}$$

а при определении аргумента α возможны случаи:

1) если $a_1 > 0$, т.е. комплексное число расположено в правой полуплоскости (I и IV квадранты), то

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{a_2}{a_1}, \quad (\text{П11})$$

и знак аргумента определяется знаком мнимой части a_2 , т.е. в первом квадранте – положительный, а в четвертом квадранте – отрицательный.

2) если $a_1 < 0$, но $a_2 > 0$ (II квадрант), то

$$\alpha = \pi - \operatorname{arctg} \frac{a_2}{|a_1|}. \quad (\text{П12})$$

3) если $a_1 < 0$ и $a_2 < 0$ (III квадрант), то

$$\alpha = \pi + \operatorname{arctg} \left| \frac{a_2}{a_1} \right|. \quad (\text{П13})$$

Если задано мгновенное значение тока в виде $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$, то комплексное действующее значение записывают сначала в показательной форме, а затем (при необходимости) по формуле Эйлера переходят к алгебраической форме:

$$\dot{i} = I e^{j\psi} = I \cos\psi + jI \sin\psi = \operatorname{Re} \dot{i} + j \operatorname{Im} \dot{i},$$

где $I = I_m / \sqrt{2}$ – действующее значение синусоидального тока;

\dot{i} – комплекс действующего значения тока;

$\operatorname{Re} \dot{i}$ – вещественная часть комплекса тока;

$\operatorname{Im} \dot{i}$ – мнимая часть комплекса тока.

Если же известен комплекс действующего значения тока $\dot{i} = I e^{j\psi}$, то мгновенное значение тока $i = I \sqrt{2} \sin(\omega t + \psi)$.

Оглавление

Раздел 1. Общие методические указания по изучению дисциплины.....	3
Раздел 2. Содержание учебных модулей дисциплины и методические указания по их изучению.....	6
Раздел 3. Задания для курсовой работы и методические указания по ее выполнению.....	13
Раздел 4. Задания для контрольной работы и методические указания по ее выполнению.....	33
Приложение.....	47