

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САХАЛИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Практикум

Часть II ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Под общей редакцией
В. П. Максимова

Южно-Сахалинск
Издательство СахГУ
2014

УДК 621.3.014(075)
ББК 31.2я73
Т338

Печатается по решению учебно-методического совета
Сахалинского государственного университета, 2014 г.

Рецензент:

- Т338 **Теоретические основы электротехники** : практикум : в 2 ч. / В. П. Максимов, И. Г. Минервин, Е. Д. Уткин, О. А. Федоров ; под общ. ред. В. П. Максимова. – Южно-Сахалинск : изд-во СахГУ, 2014. – 48 с.
ISBN 978-5-88811-491-9
Ч 2 : Линейные электрические цепи постоянного тока.
ISBN 978-5-88811-493-3

Практикум содержит краткие теоретические сведения, упражнения, типовое решение расчетно-графической работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники» по разделу «Расчет линейных цепей синусоидального тока», а также контрольные задания для самостоятельного решения студентами.

Практикум рекомендован студентам очной и заочной форм обучения по дисциплине «Теоретические основы электротехники» направлений подготовки 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» и 140200.62 «Электроэнергетика», по дисциплине «Электротехника» направления подготовки 131000.62 «Нефтегазовое дело» и по дисциплине «Электротехника и электроника» направления подготовки 190600.62 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

УДК 621.3.014(075)
ББК 31.2я73

ISBN 978-5-88811-493-3 (ч. 2)
ISBN 978-5-88811-491-9

© Максимов В. П., Введение, 1,
Литература, 2014
© Минервин И. Г., 3, 5, 7, 9, 2014
© Уткин Е. Д., 2, 10, 2014
© Федоров О. А., 4, 6, 8, 2014
© Сахалинский государственный
университет, 2014

Содержание

Введение.....	4
1. Требования к выполнению и оформлению практикума.....	5
2. Переменные токи	11
3. Среднее и действующее значения синусоидально изменяющейся величины	12
4. Символический метод расчета цепей переменного синусоидального тока	13
5. Основные законы электротехники в символической форме. Закон Ома.....	14
6. Применение комплексных чисел к расчету цепей синусоидального тока	21
7. Активная, реактивная и полная мощность. Баланс мощностей	26
8. Цепи с взаимной индукцией.....	28
9. Задание. Расчет линейных электрических цепей синусоидального тока.....	30
10. Типовой расчет задания.....	40
Список литературы	47

Введение

В соответствии с содержанием профессиональных компетенций государственных образовательных стандартов высшего образования студенты различных специальностей, где предусмотрено изучение электротехнических дисциплин, должны выполнить расчетно-графическую работу по теме «Расчет линейных цепей синусоидального тока».

Самостоятельная работа студентов над заданием включает предварительную проработку необходимого теоретического материала. С целью облегчения усвоения необходимого теоретического материала методическое пособие содержит краткие теоретические сведения, несложные примеры, позволяющие закрепить теоретические знания, и типовое решение расчетно-графической работы.

1. Требования к выполнению и оформлению практикума

1. Результатом учебной деятельности студентов является выполнение и оформление различных студенческих работ, в том числе научных рефератов, докладов, практических работ, курсовых проектов, выпускной квалификационной работы, выполняемой в виде дипломной работы или проекта. Данные виды студенческих работ способны продемонстрировать профессиональные компетенции работы с источниками различной информации, справочной и учебной литературой, а также профессиональные способности использования своих теоретических знаний в практической деятельности.

2. К оформлению практикума предъявляются специальные требования, которые соответствуют действующим нормативным документам, принятым в ФГБОУ ВПО «Сахалинский государственный университет». Студенческие работы являются текстовыми материалами, к которым предъявляются требования ГОСТ 7.32-2001 «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления». Вопросы оформления научных студенческих работ, которые не нашли своего отражения в данном стандарте, определяются выпускающей кафедрой.

3. Прежде чем приступить к выполнению расчетно-графической работы, необходимо внимательно ознакомиться с соответствующими разделами теории. Выполнение практикума должно показать не только умение решать предложенные задачи, но и умение оформить их согласно требованиям. Несоблюдение правил оформления практикума может стать причиной того, что представленная работа не будет зачтена.

4. Научные студенческие работы оформляются в виде сброшюрованного документа и прилагаемых к нему дополнительных материалов.

5. Практикум оформляется на листах стандартной белой бумаги формата по ГОСТ 9327-60 А4 (297 Ч 297 мм) с использованием компьютера.

6. Основные требования к компьютерному набору. Набор текста осуществляется в редакторе MS WORD¹. Текст должен быть напечатан на одной стороне листа через 1,5 межстрочного интервала шрифтом Times New Roman размера 14 пт., цвет текста черный. Следует использовать размеры полей в параметрах страницы: левое – 3,0 см, правое – 1,5 см, верхнее и нижнее – 2,0 см. При наборе текстового материала следует использовать двухстороннее выравнивание и автоматическую расстановку переносов слов (кроме заголовков, названий таблиц и рисунков). Абзацы в тексте начинаются отступом 12,5–1,27 см, выполняемым с помощью клавиши табулятора (автонастройки по умолчанию). Опечатки, описки, необработанные сканированные изображения не допускаются.

7. Страницы нумеруются в нарастающем порядке арабскими цифрами. Номера страниц указываются арабскими цифрами в нижней части страницы по центру без каких-либо символов. Страницы работы нумеруются все, включая титульный лист, оглавление и приложения, но на титульном листе нумерация не указывается. Бланк задания, аннотация брошюруются вместе с текстом работы, но в нумерацию не включаются.

8. Сокращения русских слов и словосочетаний производится по ГОСТ 7.12-93. Так, стандартом допускается пользоваться общепринятыми сокращениями, например: и так далее – и т. д., год (годы) – г. (гг.), пункт (пункты) – п. (пп.). Применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, пунктуации, а также соответствующими государственными стандартами, не допускается. Сокращения типа «т. д.», «с. г.» записываются через пробел. Сокращения типа «и др.» ставятся только в конце предложения, в середине предложения их нужно записывать полностью или в скобках.

9. Единицы физических величин приводятся по ГОСТ 8.417-2002. Запрещается применять сокращенные или условные обозначения единиц измерения (в том числе денежных), если они употребляются без цифр, за исключением использования сокращений в таблицах и расшифров-

¹ Выпускающая кафедра настоятельно требует использовать только лицензионные компьютерные программы.

ках формул. В конце общеупотребительных сокращений (кг, т, Ом, м, Вт, МВт, кА, мкТл) точка не ставится.

10. Фамилии, названия учреждений, организаций, предприятий, название изделий и другие имена собственные в документе приводятся на языке оригинала. Не допускается транскрипция имен собственных или их перевод на русский язык. Рекомендуется названия учреждений, организаций, предприятий оформлять только прописными буквами.

11. К частому нарушению правил компьютерного набора относится отбивка знаков препинания от предыдущего текста, что может вызвать их перенос на следующую строку (отбивать от текста знаки следует «неразрывным» пробелом (Ctrl+Shift+<пробел>), исключая растяжку и разрыв при переносе). Также следует отбивать от цифр знаки процента, градусы, минуты, секунды, килограммы и т. п. Одним «неразрывным» пробелом цифры отбиваются от № и §. Дефис пробелами не отбивается. Тире отбивается пробелами с двух сторон, за исключением сочетаний, имеющих смысл «от» и «до» (1941–1945 гг.).

12. Письменному деловому общению свойствен неличный характер изложения текста, то есть употребление глаголов от первого и второго лица не рекомендуется, а глаголы от третьего лица употребляются в неопределенно-личном значении: «Нами установлено...», но не «Мы установили...». Язык изложения используется сухой, без эмоциональности и превосходных степеней. Каждый используемый термин, не связанный однозначно с определенным понятием в современной научной литературе, должен быть обязательно раскрыт и пояснен.

13. Иллюстрации.

13.1. Иллюстрации (чертежи, графики, схемы, блок-схемы, диаграммы, рисунки, распечатки экранных форм, фотографии) объединяются единым названием «рисунок». Характер иллюстрации может быть указан в ее названии (например, «СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА», «БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА»; «ФОТОГРАФИЯ ПРИБОРА», «ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА»). Рисунки следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые, или на следующей странице, располагая симметрично по ширине страницы.

13.2. Иллюстрация обозначается словом «Рис. с номером», которое помещают непосредственно под иллюстрацией. Иллюстрации должны иметь название, которое размещают так: «Рис. Номер. Тире», без точки в конце. При необходимости под названием иллюстрации помещают поясняющие данные (подрисуночный текст). Шрифт подрисуночного текста Time New Roman 12 пт.

Например.

Рис. 1.5 – ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА УСИЛИТЕЛЯ УЭ-232

На рис. 1.5: А – главный каскад усилителя;

Б – каскад интегратора.

13.3. Иллюстрации следует нумеровать арабскими цифрами порядковой нумерацией в пределах одной главы. Так, номер рисунка будет составным: номер раздела и через точку порядковый номер рисунка в нем (например, «Рис. 2.1»). Точка после номера рисунка не ставится. Перенос слов недопустим, используйте для разрыва строк (Shift+Enter).

Например.

Рис. 2.17 – ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ

13.4. Если в документе только одна иллюстрация, ее нумеровать не следует, но слово «Рис.» и название рисунка должны быть указаны.

13.5. По мере возможности иллюстрацию следует размещать на одной странице без переноса. Если иллюстрация не умещается на одной странице, можно переносить ее на другие страницы, при этом название иллюстрации помещают на первой странице, поясняющие данные приводят на каждой странице и под ними указывают «Рис. __, лист __, листов __».

13.6. На все иллюстрации в тексте должны быть даны ссылки. Первую ссылку на иллюстрацию дают по типу «приведена на рис. 1.2», (рис. 1.2). Ссылки на ранее упомянутые иллюстрации дают с сокращенным словом «смотри», например, «см. рис. 1.2». Если повторная ссылка удале-

на от рисунка, например, дается в другой главе, целесообразно также указывать номер страницы, где приведен рисунок (см. рис. 1.7, с. 56).

13.7. Место расположения и шрифт названий рисунков должны быть едиными по всему текстовому документу. Названия выравниваются по центру без отступа.

13.8. Шрифт слова «Рис.», его номер и название должны быть такими же, как и шрифт основного текста, то есть 14 пт., межстрочный интервал рекомендуется одинарным. В оформлении текста полей рисунка рекомендуется использовать номера шрифтов 10–14 пт.

13.9. Иллюстрации вместе с их названиями и подрисовочными надписями должны быть отделены снизу и сверху от основного текста междустрочным интервалом 12 пт. Рекомендуется оформить слово «Рис.», его номер и название специальным стилем редактора Word.

14. Таблицы.

14.1. Цифровой материал, а также многомерный текстовый материал с перечислениями должен оформляться в виде таблиц. Допускается для наглядности при формировании таблиц использовать заливку ячеек строк граф (функция «Формат», «Границы и заливка», «Заливка»). Word предусматривает автоматическое формирование ряда таблиц стандартной структуры. Заголовки граф таблиц должны начинаться с прописной буквы, а подзаголовки граф, составляющие одно целое с подзаголовками, – со строчных.

14.2. Допускается более мелкий шрифт текста в таблице, чем основной текст, и меньший межстрочный интервал.

14.3. Таблицу следует располагать в документе непосредственно после текста, в котором она упоминается впервые, или на следующей странице.

14.4. Таблица, как правило, должна иметь заголовок, выполняемый строчными буквами (кроме первой – заглавной), выравниваемый по центру, без точки в конце. Заголовок должен быть кратким и полностью отражать содержание таблицы. Шрифт заголовков всех таблиц в документе должен быть единым (при этом желательно, чтобы он совпадал с шрифтом названий рисунков). Номер шрифта заголовка и межстрочный интервал должны быть такими же, как и шрифт основного текста, то есть 14 пт., но выполнены прописными буквами, межстрочный интервал рекомендуется одинарным.

14.5. Таблицы следует нумеровать арабскими цифрами порядковой нумерацией в пределах главы. Номер таблицы будет составным: номер главы и через точку порядковый номер таблицы в нем (например, «Таблица 2.1»). После номера таблицы ставится короткое тире, а затем название таблицы. Слово «Таблица», ее номер и название располагаются над таблицей форматом слева без отступа.

Например.

Таблица 1.4 – РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЗАДАНИЯ 1

14.6. Если в документе только одна таблица, ее нумеровать не следует, но слово «Таблица» и ее название должны быть.

14.7. По мере возможности таблицу следует располагать на одной странице. Если же строки или графы таблицы выходят за формат листа, таблицу делят на части, которые в зависимости от особенностей таблицы переносят на другие листы, помещают на одном листе рядом или одну под другой. Если части таблицы размещаются рядом, в каждой части таблицы повторяют головку, при размещении частей одна под другой – повторяется боковик. Нумерационный и тематический заголовки таблицы указывают один раз над первой частью таблицы, а над последующими частями пишут «Продолжение табл. ___» и «Окончание табл. ___».

14.8. В боковике таблицы допускается графа «№ п.п.», в общем же случае для облегчения ссылок номер строки (показателя) может быть проставлен перед наименованием показателя (через точку). Также рекомендуется в редакторе Word установить автоматическую печать заголовка таблицы. В этом случае на каждой новой странице при ее переносе на другую страницу заголовок будет повторяться. Обычно в боковике таблицы размещаются показатели ее подлежащего, то есть наименования объектов или явлений, описываемых с помощью таблицы. В головке раз-

мещаются показатели сказуемого, то есть характеристики объектов и явлений, относящихся к подлежащему.

14.9. Если цифровые данные в графах или строках таблицы выражены в разных единицах измерения, то их указывают, соответственно, в заголовках граф (в головке) или при наименованиях параметров в строках боковика (для чего может предусматриваться специальная графа «Единица измерения» или «Ед. изм.»). Если все параметры, размещенные в таблице, выражены в одной и той же единице измерения, ее сокращенное обозначение помещают над таблицей, например, в конце заголовка таблицы.

14.10. Точки в конце заголовков и подзаголовков граф, наименований, параметров в конце текста в ячейках текстовых таблиц не ставятся. Промежуточные знаки препинания в текстовых таблицах проставляются, в том числе и точки между предложениями.

14.11. Если параметры одной графы имеют одинаковые значения в двух и более строках, то допускается объединение соответствующих ячеек данной графы в одну ячейку и проставление параметра один раз. То же относится и к одинаковым значениям параметра в одной строке.

14.12. Повторяющийся в строках графы текст можно заменять словами «То же». Ставить кавычки при повторении цифровых данных, марок, математических и иных символов не допускается.

14.13. Если цифровые и иные данные в ячейке не приводятся, то в ней ставится прочерк.

14.14. Если в ячейке проставляется диапазон значений, то между числами, ограничивающими диапазон, ставится тире.

14.15. Форматирование цифровых данных в графах должно обеспечивать расположение классов чисел строго один под другим (например, рубли под рублями, копейки под копейками).

14.16. Таблицы вместе с их реквизитами должны быть отделены снизу и сверху от основного текста пробелами (с одинарным междустрочным интервалом).

14.17. На все таблицы в тексте должны быть даны ссылки. Первую ссылку на иллюстрацию дают по типу «приведены в табл. 1.2», «(табл. 1.2)». Ссылки на ранее упомянутые таблицы дают с сокращенным словом «смотри», например, «см. табл. 1.2». Если повторная ссылка удалена от таблицы, например, дается в другом разделе, целесообразно также указывать номер страницы, где приведена таблица.

15. Иллюстрации и таблицы, расположенные на отдельных листах, включаются в общую нумерацию страниц. В этом случае рисунки и таблицы могут иметь как вертикальное, так и горизонтальное размещение. При горизонтальном размещении листа поле для подшивки оставляется сверху.

16. Перечисления.

16.1. Перечисления при необходимости могут быть приведены внутри пунктов или подпунктов. Перечисления (списки) могут быть маркированными или нумерованными (числами или буквами).

16.2. Маркированные списки с крупными текстовыми фрагментами, состоящими из нескольких предложений, целесообразно начинать с прописных букв и в конце фрагментов ставить точку.

16.3. При мелких, например, однострочных фрагментах перечислений, их следует начинать со строчной буквы и заканчивать точкой с запятой. Если фрагменты перечисления не имеют внутренних знаков пунктуации, например содержащие по одному слову или слову с определением, их можно разделять запятой. Вид маркера может быть произвольным из числа предусмотренных редактором Word, но рекомендуется использовать короткое тире.

16.4. Аналогично в нумерованных списках при крупных текстовых фрагментах используются арабские цифры с точкой (1., 2.), после которой текст начинается с прописной буквы и завершается точкой. При мелких фрагментах перечисления нумеруются порядковой нумерацией арабскими цифрами со скобкой (например, 1), 2), 3) и т. д.), начинаются со строчной буквы и разделяются точкой с запятой.

16.5. Использование римских цифр не допускается.

16.6. В буквенных списках в первом случае роль идентификатора в списке играют прописные

буквы с точкой после них (А, Б, В и т. д.), а во втором – строчные буквы со скобкой (например, а), б), в) и т. д.). Поскольку формирование списков на компьютере ведется автоматически в выбранном режиме, то не допускается в буквенных списках использовать латинский алфавит.

16.7. Следует избегать в пределах одного пункта или подпункта использование более одной группы перечислений. Но если этого избежать нельзя, то следует использовать различные формы идентификации списков либо, используя только форму маркировки, применять для разных списков различные виды маркера.

17. Примечания и сноски.

17.1. Примечания и сноски следует помещать в документе при необходимости пояснения содержания текста таблицы или иллюстрации. Примечания и сноски, как правило, размещают под чертой в нижней части страницы непосредственно после пункта, таблицы, иллюстрации, к которым они относятся, и печатают с прописной буквы с абзационного отступа. Само слово «Примечание» не печатается.

17.2. Одно примечание не нумеруют. Несколько примечаний следует нумеровать порядковой нумерацией арабскими цифрами с точкой.

17.3. Целесообразно примечание печатать более мелким шрифтом (например, 10–12 пт.).

17.4. Если примечание относится к началу крупного текстового фрагмента (раздела, подраздела), занимающего несколько страниц, его следует давать в виде сноски к странице (функция «Вставка», «Сноска», «Обычная»).

17.5. В студенческих работах библиографические ссылки в виде постраничных сносок не оформляются.

18. Формулы, уравнения, математические и цифровые выражения в тексте.

18.1. Уравнения и формулы следует выделять из текста в отдельную строку с отделением от текста пробелами в один межстрочный интервал снизу и сверху. Если уравнение не умещается в одну строку, оно может быть перенесено на следующую строку после знаков равенства (=), сложения (+), вычитания (–), умножения (\cdot или \times), деления (/ или \div) или других математических знаков. Недопустимо использовать в качестве знака умножения звездочку (*).

18.2. Пояснение значений символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в которой они даны в формуле. Значение каждого символа и числового коэффициента следует давать с новой строки. Первую строку пояснения начинают со слова «где» без двоеточия.

18.3. Для указания формул используйте редактор формул Microsoft Equation (Вставка; Объект) или встроенный редактор формул Word версии 2007 года и новее.

18.4. Все формулы (уравнения), если их в документе более одной, нумеруют арабскими цифрами в пределах текущего пункта. В последнем случае номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой. Номер указывают с правой стороны листа на уровне формулы в круглых скобках. Допускается нумеровать только те формулы, на которые в тексте есть ссылки.

18.5. Ссылки в тексте на номер формулы дают в скобках, например, «в формуле (3.1)».

18.6. Запрещается употреблять по тексту (вне формул и уравнений) математические знаки без цифр, например, $>$ (больше), \geq (больше или равно, не меньше), $<$ (меньше), \leq (меньше или равно, не больше), $=$ (равно), \neq (неравно), \sim (приблизительно равно), (тождественно), Σ (сумма), \sphericalangle (угол) и т. д., а также знаки № (номер), % (процент), $^{\circ}$ (градус).

18.7. Запрещается использовать в тексте математический знак минус (–) перед отрицательными значениями величин. Вместо математического знака следует писать слово «минус».

18.8. В тексте документа числа с размерностью следует писать цифрами, а без размерности словами, например, «в сумме не более 1,5 млн. руб.», «прибыль повысилась в два раза». Если в тексте приводится ряд величин с одной и той же единицей измерения, то ее указывают только после последнего числового значения, например: 1,5; 1,75; 2 кА. Если в предложении используются простые числа не более двух раз, то числа пишутся словами «Напряжение повысится в

два-три раза». Если числа многозначные или их более двух, то числа пишутся цифрами «в 1,75 раза», «в 2, 3, а то и 10 раз».

18.9. В тексте документа перед обозначением параметра дают его пояснение, например: «Напряжение сети УС составило...».

19. Ссылки.

19.1. Библиографические ссылки на источники следует указывать порядковым номером перечня использованных источников, который представлен после заключения, в квадратных скобках, например, [31]. Не допускается приводить ссылки на источники в подстрочной сноске. Оформление ссылок в этом случае осуществляется по ГОСТ Р 7.0.5-2008, который впервые введен в действие с 1 января 2009 года.

19.2. Если по тексту приводится цитата, то в ссылке кроме номера источника по списку указывается номер страницы, откуда взята цитата, например, [31, с. 51]. При указании источника в подстрочном примечании (сноске) номер страницы дается после библиографического описания источника.

19.3. Ссылки на главы, разделы, пункты, подпункты, рисунки, таблицы, формулы и уравнения, перечисления (с цифровой или буквенной идентификацией), приложения следует делать с указанием их номеров, например: «в гл. 4», «в соответствии с п. 3.3», «по формуле (3)», «в уравнении (2)», «на рис. 1.8», «в табл. 3.1», «в приложении б». При этом для обозначения глав, пунктов, рисунков, таблиц следует использовать только сокращения «разд.», «п.», «рис.», «табл.».

19.4. Если в документе один рисунок, одна таблица, одна формула, одно уравнение, одно приложение, то при ссылках следует писать «на рисунке», «в таблице», «по формуле», «в уравнении», «в приложении». При этом слова «рисунок» и «таблица» пишутся полностью.

20. Электрические схемы должны быть оформлены с соблюдением ГОСТ 2.702-2011 «ЕСКД: Правила выполнения электрических схем». Можно пользоваться теми изображениями элементов схем, которые применяются в помещенных ниже задачах. При выполнении работы следует руководствоваться материалами стандартов, которые устанавливают стандарт на буквенные обозначения основных электрических и магнитных величин. В скобках указываются допускаемые обозначения.

21. При построении электрических схем рекомендуется использовать графические редакторы, например, Microsoft Visio.

22. Графики должны быть вычерчены аккуратно, с помощью чертежных инструментов, желательнее на миллиметровой бумаге. Оси абсцисс и ординат вычерчивают сплошными толстыми линиями. Стрелки на концах осей вычерчивать не следует. Масштабы шкал по осям следует выбирать равномерными, начиная с нуля, с использованием всей площади графика. Цифры шкал наносят слева от оси ординат и под осью абсцисс. Если на графике небольшое число кривых, то их вычерчивают разными линиями (сплошной, штриховой, штрихпунктирной и т. п.). При большом числе кривые нумеруют. Для показа на графике расчетных точек рекомендуется применять по выбору следующие знаки: Δ , \square , \diamond , \circ . Буквенное обозначение наименования шкалы и единицу измерения величины пишут над числами шкалы оси ординат и под осью абсцисс, справа, вместо последнего числа шкалы. Надписи не должны выходить за пределы графика. Количество знаков цифр в числах должно быть минимальным, для чего целесообразно ввести у наименования шкалы постоянный множитель 10^n . Если шкалы на осях начинаются с нуля, то ноль на их пересечении ставится один раз. Во всех других случаях ставят оба значения.

23. Векторные диаграммы должны строиться в масштабе.

24. В конце контрольной работы надо поставить дату выполнения работы и подписаться.

25. Если контрольная работа не зачтена или зачтена при условии внесения исправлений, то все необходимые поправки необходимо делать в разделе «Работа над ошибками». Нельзя вносить какие-либо исправления в текст, расчеты и графики, уже просмотренные преподавателем.

26. Студентам рекомендуется поэтапное выполнение контрольных заданий, то есть выполнение решения первой задачи и сдача ее на проверку преподавателю, затем решение второй задачи и сдача на проверку всей расчетно-графической работы.

2. Переменные токи

Переменным током называется ток, изменяющийся во времени по величине и направлению. Значение тока в любой данный момент времени называется мгновенным значением тока. Направление тока, для которого его **мгновенные значения** i положительны, называется **положительным направлением тока**. Ток определен, если известна зависимость его мгновенного значения от времени $i = f(t)$ и указано его положительное направление.

Токи, значения которых повторяются через равные промежутки времени в той же самой последовательности, называются периодическими. Наименьший промежуток времени, через который эти повторения наблюдаются, называется периодом T . Для периодического тока $i = f(t) = f(t + nT)$, где n – целое число. В системе СИ единицы измерения $[T]$ – секунды (с).

Рассмотрим график некоторого периодического тока $i(t)$ (рис. 1 а).

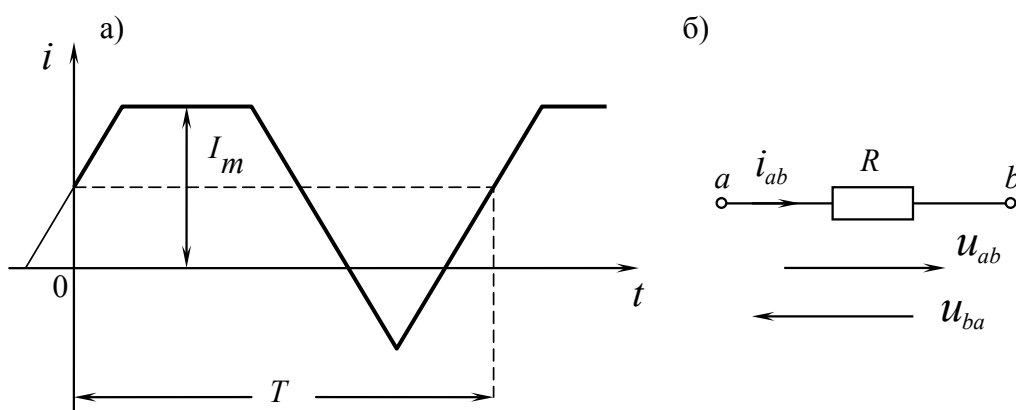


Рис. 1 – График зависимости $i = f(t)$

Отрезок кривой $i = f(t)$ за период T охватывает один полный цикл изменения тока. Величина, обратная периоду T , называется частотой f , то есть $f = \frac{1}{T}$, $[f] = \frac{1}{с}$ Гц (Герц).

Максимальное значение функции $i(t)$ называется амплитудой I_m . Постоянный ток можно рассматривать как частный случай периодического тока, период изменения которого бесконечно велик, то есть

$$T = \infty, f = 0.$$

На рисунке 1 б показана отдельная ветвь сложной схемы, то есть двухполюсник ab . Стрелка на схеме указывает положительное направление тока i_{ab} . Положительное направление напряжения совпадает с положительным направлением тока, так как в электротехнике условно принято, что ток течет от большего потенциала φ_a к меньшему потенциалу φ_b .

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b - \text{положительное (по току),}$$

$$u_{ba} = \varphi_b - \varphi_a - \text{отрицательное (навстречу току),}$$

$$u_{ab} = -u_{ba}.$$

Все определения, данные здесь и ниже для тока, применимы для напряжений, ЭДС, магнитных потоков и любых других величин, изменяющихся во времени. В электроэнергетике и электротехнике наибольшее применение получили простые гармонические колебания или синусоидальные токи.

$$i = I_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_i\right) = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) .$$

Синусоида представляет вертикальную проекцию вращающегося со скоростью ω вектора i_m , развернутую во времени (рис. 2). Аргумент синуса ($\omega t + \varphi_i$) называется фазой колебания. Фаза характеризует состояние колебания, то есть значение функции в данный момент времени t . Значение фазы при $t=0$, то есть φ_i , есть начальная фаза синусоидального тока. Любая синусоидально изменяющаяся функция вполне определяется тремя параметрами: амплитудой I_m , угловой частотой ω , начальной фазой φ_i .

$i_m = I_m e^{j\varphi_i}$ – комплексная амплитуда синусоидального тока,

I_m – амплитуда синусоидального тока,

T – период синусоидальных колебаний,

$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ – угловая частота,

$[\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}} = \text{с}^{-1}$.

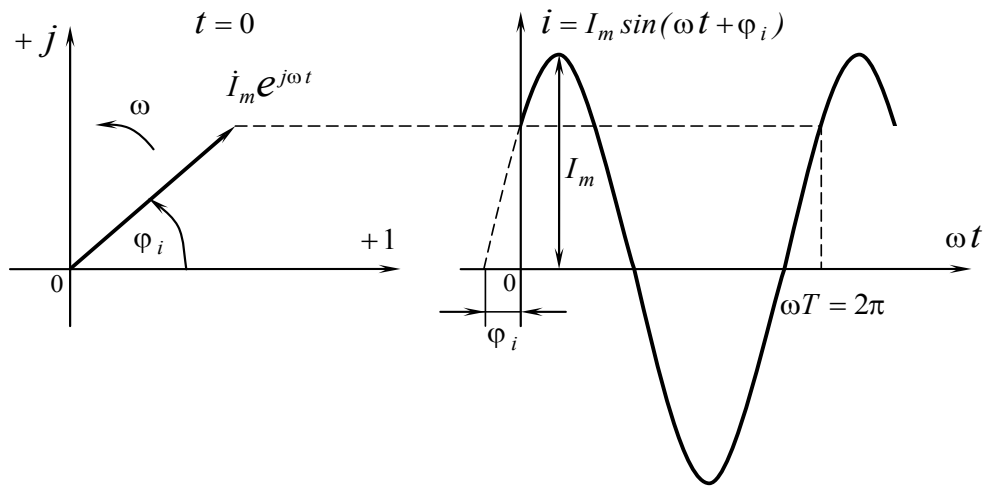


Рис. 2 – Графическое представление синусоидального тока

Для напряжения и ЭДС аналогично:

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

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_e) .$$

3. Среднее и действующее значения синусоидально изменяющейся величины

Под средним значением синусоидально изменяющейся величины понимают среднее ее значение за полпериода.

Среднее значение синусоидального тока:

$$I = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i dt = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m ;$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} I_m = 0,638 I_m.$$

Аналогично получим среднее значение напряжения и ЭДС:

$$U_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} U_m = 0,638 U_m, \quad E_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} E_m = 0,638 E_m.$$

Среднее значение тока служит для сравнения постоянного и переменного тока по их электролитическому действию.

Тепловое действие тока пропорционально квадрату тока. Поэтому для суждения о величине периодического тока вводят понятие о среднем квадратичном значении тока за период, которое называют действующим значением переменного тока. Действующее значение синусоидального тока:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}},$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m.$$

Аналогично получим действующие значения напряжения и ЭДС:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m, \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707 E_m.$$

Действующее значение переменного тока численно равно такому постоянному току, который за один период выделяет в сопротивлении такое же количество тепла, как и ток переменный. Отсюда и одинаковое их обозначение. Действующие значения измеряют приборами электромагнитной, электродинамической и тепловой систем.

4. Символический метод расчета цепей переменного синусоидального тока

На рисунке 2 показано, что синусоидальная функция i представляет собой проекцию на ось мнимых величин j вектора длиной I_m при вращении его против часовой стрелки с угловой скоростью ω , то есть $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$.

С целью упрощения расчетов синусоидального тока удобно на момент расчета заменить синусоиду изображающим вектором \dot{I}_m , называемым комплексной амплитудой.

$\dot{I}_m = I_m e^{j\varphi_i}$ – комплексная амплитуда, определяет величину и положение вектора в момент $t = 0$.

Для любого момента времени t :

$$\dot{I}_m e^{j\omega t} = I_m e^{j(\omega t + \varphi_i)} = I_m \cos(\omega t + \varphi_i) + j \sin(\omega t + \varphi_i);$$

$$I_m \cos(\omega t + \varphi_i) = \text{Re}[\dot{I}_m e^{j\omega t}] \text{ – действительная часть вращающегося вектора;}$$

$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) = \text{Im}[\dot{I}_m e^{j\omega t}]$ – мнимая часть вращающегося вектора, представляет собой мгновенное значение синусоидального тока.

Можно вести расчет не только с использованием комплексной амплитуды \dot{I}_m , но и комплекса действующего значения тока \dot{I} .

Необходимо четко усвоить связь между следующими величинами:

$$\dot{i} = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) - \text{мгновенное значение синусоидального тока};$$

I_m – амплитуда;

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} - \text{действующее значение синусоидального тока};$$

$$\dot{i}_m = I_m e^{j\varphi_i} - \text{комплексная амплитуда синусоидального тока};$$

$$i = \frac{\dot{i}_m}{\sqrt{2}} = I e^{j\varphi_i} - \text{комплекс действующего значения синусоидального тока}.$$

Метод расчета с использованием изображающих векторов или соответствующих им комплексных чисел называется символическим методом, так как действительные синусоидальные функции заменяют символами.

Напряжение и ЭДС можно представить аналогичными изображающими комплексами или векторами:

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\varphi_u}; \quad \dot{E}_m = E_m e^{j\varphi_e}.$$

Совокупность векторов, построенная с соблюдением их взаимной ориентации по фазе, называется **векторной диаграммой**. Векторную диаграмму всегда изображают для момента $t = 0$, при этом начальную фазу соответствующего вектора откладывают от оси действительных чисел (рис. 3). Углы, отложенные против часовой стрелки, – положительные, по часовой – отрицательные. На рисунке 3 φ_u – положительный, φ_i – отрицательный угол.

Сдвиг по фазе тока относительно напряжения $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ нужно показывать стрелкой от тока \dot{I} к напряжению \dot{U} . На рисунке 3 угол φ – положительный.

Основные законы электротехники для цепей синусоидального тока записывают для комплексных величин или изображающих векторов, то есть они представляют геометрическую сумму в отличие от цепей постоянного тока, где суммирование алгебраическое.

Символический метод позволяет упростить расчеты, так как вместо интегрально-дифференциальных уравнений для синусоид получаем уравнения алгебраические для изображающих векторов.

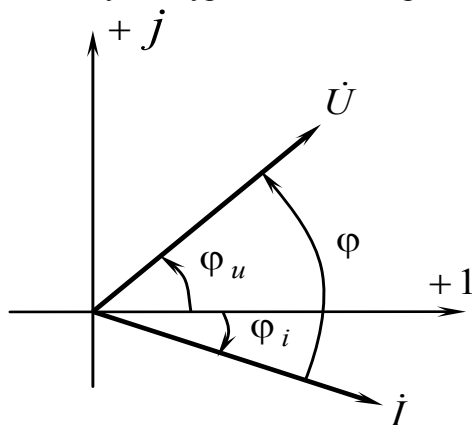


Рис. 3 – Сдвиг по фазе φ тока относительно напряжения

5. Основные законы электротехники в символической форме

Закон Ома

5.1. Активное сопротивление

На рисунке 4 а изображена схема активного сопротивления R с использованием обозначений мгновенных значений тока i и напряжения u_R .

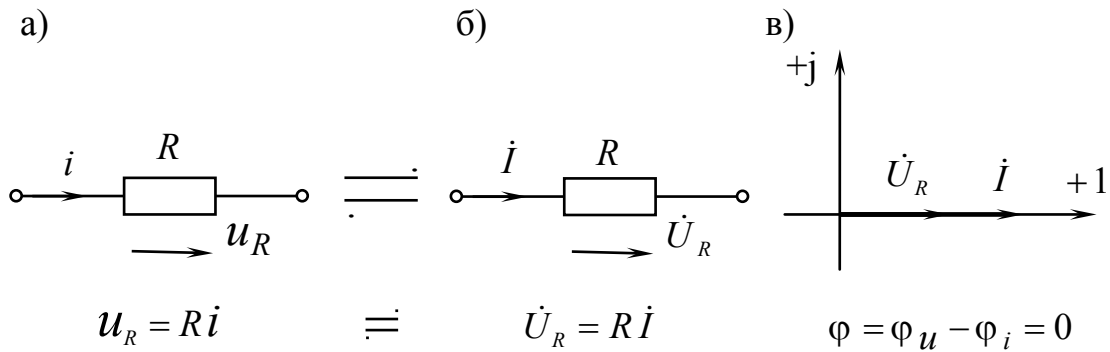


Рис. 4 – Схема активного сопротивления R с обозначением мгновенных значений тока i и напряжения u_R

На рисунке 4 б использована символическая форма записи, где показаны комплексы тока \dot{I} и напряжения \dot{U}_R .

Знак \equiv обозначает «соответствует». На активном сопротивлении ток и напряжение совпадают по фазе, или синфазны, при этом $\varphi = 0$ (рис. 4 в).

R учитывает тепловые потери в реальной цепи.

5.2. Идеальная индуктивность

На рисунке 5 а изображена схема идеальной индуктивности L с использованием обозначений мгновенных значений тока i и напряжения u , на рисунке 5 б показана соответствующая схема с символической записью.

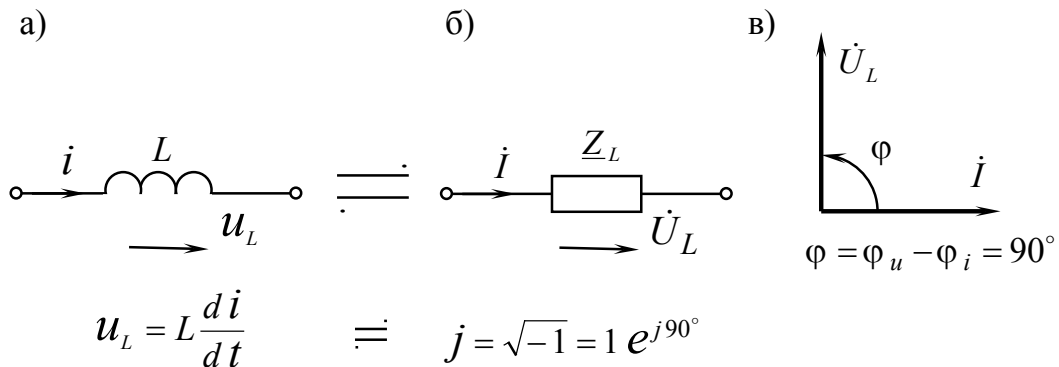


Рис. 5 – Схема идеальной индуктивности L с обозначением мгновенных значений тока i и напряжения u

$\underline{Z}_L = j\omega L = jX_L$ – комплексное индуктивное сопротивление.

$$j = \sqrt{-1} = 1 e^{j90^\circ}; \quad \frac{1}{j} = -j = 1 e^{-j90^\circ}.$$

$X_L = \omega L$ – величина реактивного индуктивного сопротивления, $[X_L] = \text{Ом}$.

Индуктивное сопротивление X_L – положительное. Действие дифференцирования для мгновенных значений заменяется действием умножения на $j \cdot \omega$ для изображающих векторов или комплексных чисел. На индуктивности сдвиг по фазе тока относительно напряжения $\varphi = +90^\circ$ (рис. 5 в).

При постоянном токе $X_L = \omega L = 0 \cdot L = 0$ – коротка, L учитывает явление самоиндукции в реальной цепи.

5.3. Идеальная емкость

На рисунке 6 а изображена схема идеальной емкости для мгновенных значений u, i и соответствующая схема (рис. 6 б) с символической записью.

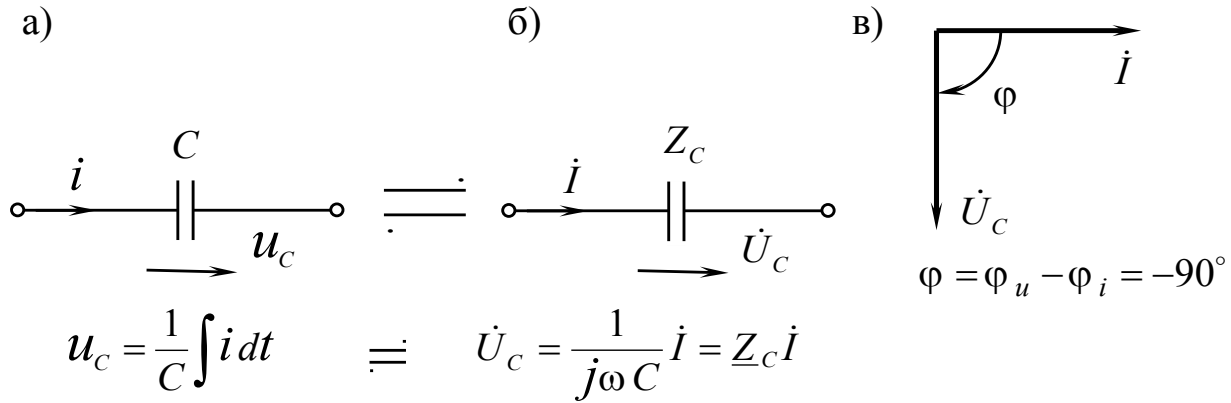


Рис. 6 – Схема идеальной емкости с обозначением мгновенных значений u, i

$$\underline{Z}_c = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C} = -jX_c \text{ – комплексное емкостное сопротивление.}$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \text{ – величина реактивного емкостного сопротивления, } [X_c] = \text{Ом.}$$

Реактивное емкостное сопротивление X_c – отрицательное. В данном случае действие интегрирования для мгновенных значений заменяется действием деления на $j\omega$ для изображающих векторов или комплексных чисел. На емкости сдвиг по фазе тока относительно напряжения $\phi = -90^\circ$ (рис. 6 в).

При постоянном токе $X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{0 \cdot C} = \infty$ – разрыв, C учитывает накопление энергии в электрическом поле конденсатора.

В символическом методе синусоидальная функция заменяется соответствующим комплексом, действие дифференцирования – умножением на $j\omega$, действие интегрирования – делением на $j\omega$.

$$\left. \begin{aligned} i &\equiv \dot{i} \\ \frac{di}{dt} &\equiv j\omega \dot{i} \\ \int i dt &\equiv \frac{\dot{i}}{j\omega} \end{aligned} \right\} \text{сущность символического метода}$$

$$\boxed{\dot{U} = \underline{Z} \dot{i}} \text{ – закон Ома в символической форме.}$$

5.4. Первый закон Кирхгофа

Геометрическая сумма изображающих векторов токов в узле равна нулю.

$$\boxed{\sum I_k = 0}$$
 – первый закон Кирхгофа.

На рисунке 7 а показан узел некоторой схемы и использованы обозначения мгновенных значений токов, на рисунке 7 б – соответствующая схема с символической записью.

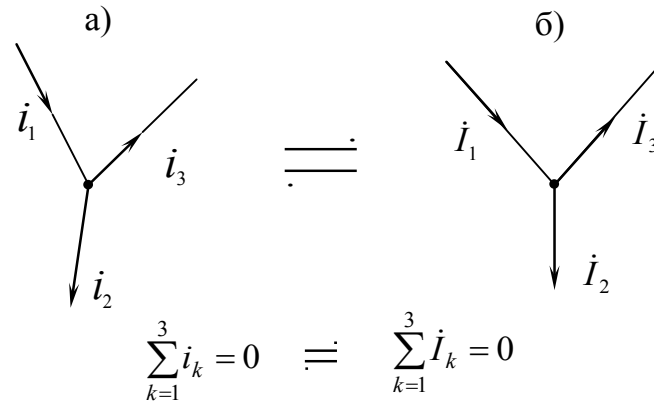


Рис. 7 – Схемы узлов

Пример 1. Определить в схеме (рис. 8 а) показание амперметра тепловой системы, если:

$$X_{L1} = X_{L2} = 40 \text{ Ом}, R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}, X_C = 20 \text{ Ом}, U = 200 \text{ В}.$$

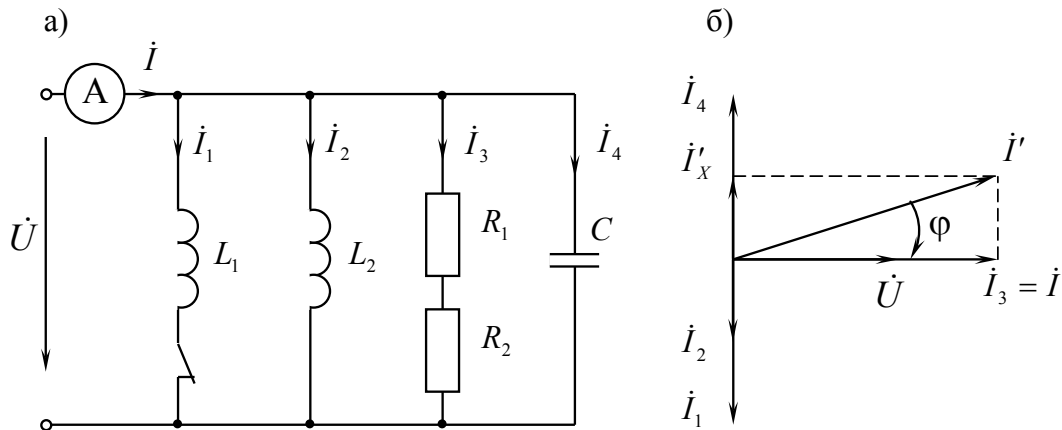


Рис. 8 – Схема к примеру 1

Решение:

$R_A = 0$ – сопротивление амперметра эквивалентно коротке.

Сначала рассмотрим задачу в общем виде. По первому закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4 = \frac{U}{jX_{L1}} + \frac{U}{jX_{L2}} + \frac{U}{R_1 + R_2} + \frac{U}{-jX_C} = \\ &= \dot{U} \left[\frac{1}{R_1 + R_2} - j \left(\frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} - \frac{1}{X_C} \right) \right] = U(g - jb) = \dot{U}Y \end{aligned}$$

$Y = g - jb$ – комплексная проводимость;

$g = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1 + R_2}$ – активная проводимость;

$b_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}}$ – индуктивная проводимость;

$b_C = \frac{1}{X_C}$ – емкостная проводимость;

$b = b_L - b_C$ – реактивная проводимость.

Рассмотрим два режима: 1) ключ закрыт,

2) ключ открыт.

1. Так как все ветви цепи соединены параллельно, то построение векторной диаграммы (рис. 8 б) начнем с общей величины – напряжения \dot{U} . Затем в некотором масштабе откладываем вектора токов ветвей, причем \dot{I}_1 и \dot{I}_2 – друг за другом, чтобы сразу их суммировать, так как они совпадают по фазе.

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{jX_{L1}} = -j \frac{200}{40} = -j5 \text{ A};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{jX_{L2}} = -j \frac{200}{40} = -j5 \text{ A};$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}}{R_1 + R_2} = \frac{200}{10 + 10} = 10 \text{ A};$$

$$\dot{I}_4 = \frac{\dot{U}}{jX_C} = j \frac{200}{20} = j10 \text{ A}.$$

Сначала суммируем токи реактивных ветвей:

$$\dot{I}_X = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_4 = -j5 - j5 + j10 = 0.$$

В данном примере реактивная составляющая тока $\dot{I}_X = 0$, так как

$$b = b_L - b_C = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} - \frac{1}{X_C} = \frac{1}{40} + \frac{1}{40} - \frac{1}{20} = 0.$$

Это частный режим, когда $b = b_L - b_C = 0$, называемый резонансом токов. Общий ток $\dot{I} = \dot{I}_3 + \dot{I}_X = \dot{I}_3 = 10 \text{ A}$, этот ток в фазе с напряжением $\dot{U} (\varphi = 0)$, так как $\varphi = \arctg \frac{b}{g}$. Амперметр покажет 10 A .

2. При открытом ключе $b_L = \frac{1}{X_{L2}}$, $\dot{I}_1 = 0$, а токи ветвей \dot{I}_2 , \dot{I}_3 , \dot{I}_4 – не изменятся. Определим реактивную составляющую тока:

$$\dot{I}'_X = \dot{I}_2 + \dot{I}_4 = -j5 + j10 = j5.$$

Общий ток $\dot{I}' = \dot{I}_3 + \dot{I}'_X = 10 + j5 = \sqrt{10^2 + 5^2} e^{j \arctg \frac{5}{10}} = 11,18 e^{j26^\circ 30'}$.

Амперметр покажет $11,18 \text{ A}$.

Реактивная проводимость:

$$b = b_L - b_C = \frac{1}{X_{L2}} - \frac{1}{X_C} = \frac{1}{40} - \frac{1}{20} = -\frac{1}{40} = -0,025$$

Фазовый сдвиг тока относительно напряжения:

$$\phi = \arctg \frac{-0,025}{0,05} = -26^\circ 30'.$$

Цепь носит активно-емкостный характер.

5.5. Второй закон Кирхгофа

Геометрическая сумма векторов, изображающих напряжения замкнутого контура, уравнове-

шивается геометрической суммой векторов ЭДС этого контура.

$$\boxed{\sum \underline{Z}_K \dot{I} = \sum \dot{E}_K} \text{ – второй закон Кирхгофа.}$$

Сначала запишем уравнения по второму закону Кирхгофа в дифференциальной форме для замкнутого контура $abcd$ (рис. 9 а):

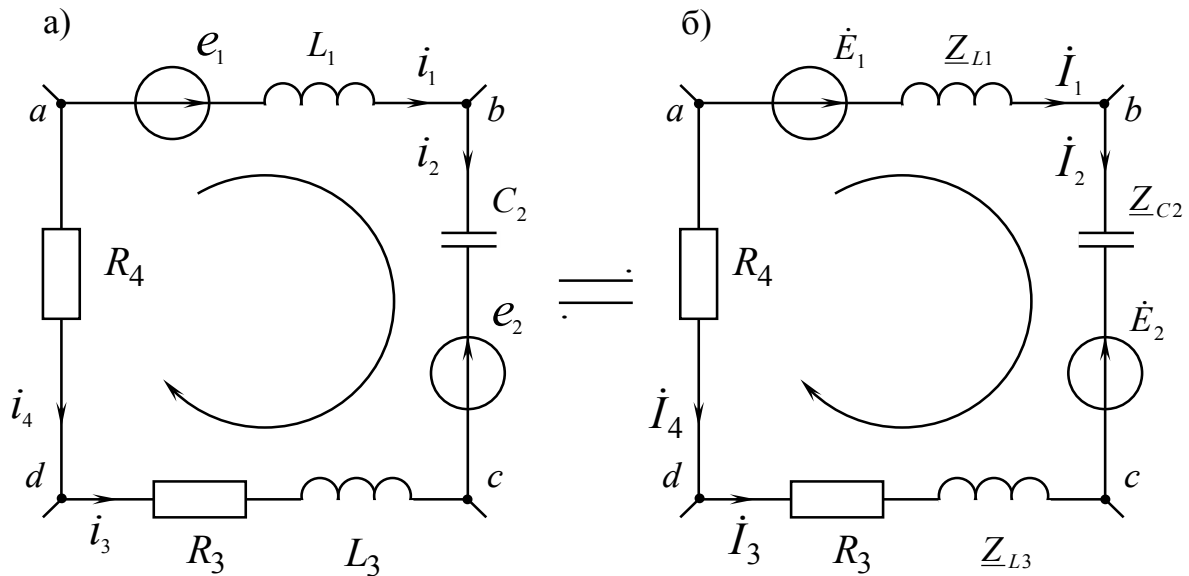


Рис. 9 – Схема замкнутого контура $abcd$

$$L_1 \frac{d i_1}{d t} + \frac{1}{C} \int i_2 d t - L_3 \frac{d i_3}{d t} - R_3 i_3 - R_4 i_4 = e_1 - e_2$$

Затем запишем уравнения по второму закону Кирхгофа в символической форме (рис. 9 б):

$$j \omega L_1 \dot{I}_1 - j \frac{1}{\omega C_2} \dot{I}_2 - j \omega L_3 \dot{I}_3 - R_3 \dot{I}_3 - R_4 \dot{I}_4 = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 ;$$

$$\underline{Z}_{L1} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{C2} \dot{I}_2 - \underline{Z}_{L3} \dot{I}_3 - R_3 \dot{I}_3 - R_4 \dot{I}_4 = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 .$$

Выводы:

Все методы расчета электрических цепей базируются на применении основных законов электротехники. Поэтому рассмотренные ранее методы на постоянном токе применимы для расчета цепей синусоидального тока, но при этом алгебраическое суммирование в цепях постоянного тока заменяется геометрическим суммированием в цепях переменного синусоидального тока.

Напомним эти методы: метод законов Кирхгофа, контурных токов, узловых потенциалов, эквивалентного генератора, преобразований, наложения, взаимности.

Пример 2. Определить показания вольтметра электромагнитной системы в схеме (рис. 10 а), активную, реактивную и полную мощность, если $R = X_L = 2 \text{ Ом}$, $I = 10 \text{ А}$.

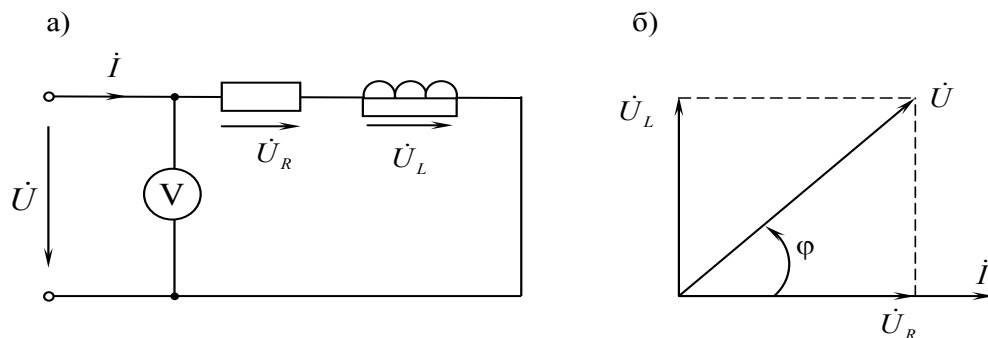


Рис. 10 – Схема к примеру 2

Решение:

Задачу решим с использованием векторной диаграммы. Построение диаграммы начнем с общей величины для последовательного соединения – тока \dot{I} (рис. 10 б). Затем подсчитаем и отложим на векторной диаграмме в некотором масштабе напряжения на элементах последовательной цепи:

$$\dot{U}_R = R\dot{I} = 2 \cdot 10 = 20 \text{ В} \text{ – в фазе с током;}$$

$\dot{U}_L = jX_L\dot{I} = j2 \cdot 10 = j20 \text{ В}$ – вектор \dot{I} вращаем на j , то есть на $+90^\circ$ (против часовой стрелки), получаем направление \dot{U}_L .

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L = 20 + j20 \text{ – по правилу параллелограмма;}$$

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = 20\sqrt{2} = 28 \text{ В} \text{ – показание вольтметра, действующее значение;}$$

$$P = RI^2 = 2 \cdot 10^2 = 200 \text{ Вт} \text{ – активная мощность;}$$

$$Q = X_L I^2 = 2 \cdot 10^2 = 200 \text{ вар} \text{ – реактивная мощность;}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 200\sqrt{2} = 282 \text{ ВА} \text{ – полная мощность.}$$

Пример 3. Определить по векторной диаграмме входное напряжение цепи (рис. 11 а) для трех случаев:

- 1) $X_L > X_C$; 2) $X_L < X_C$; 3) $X_L = X_C$.

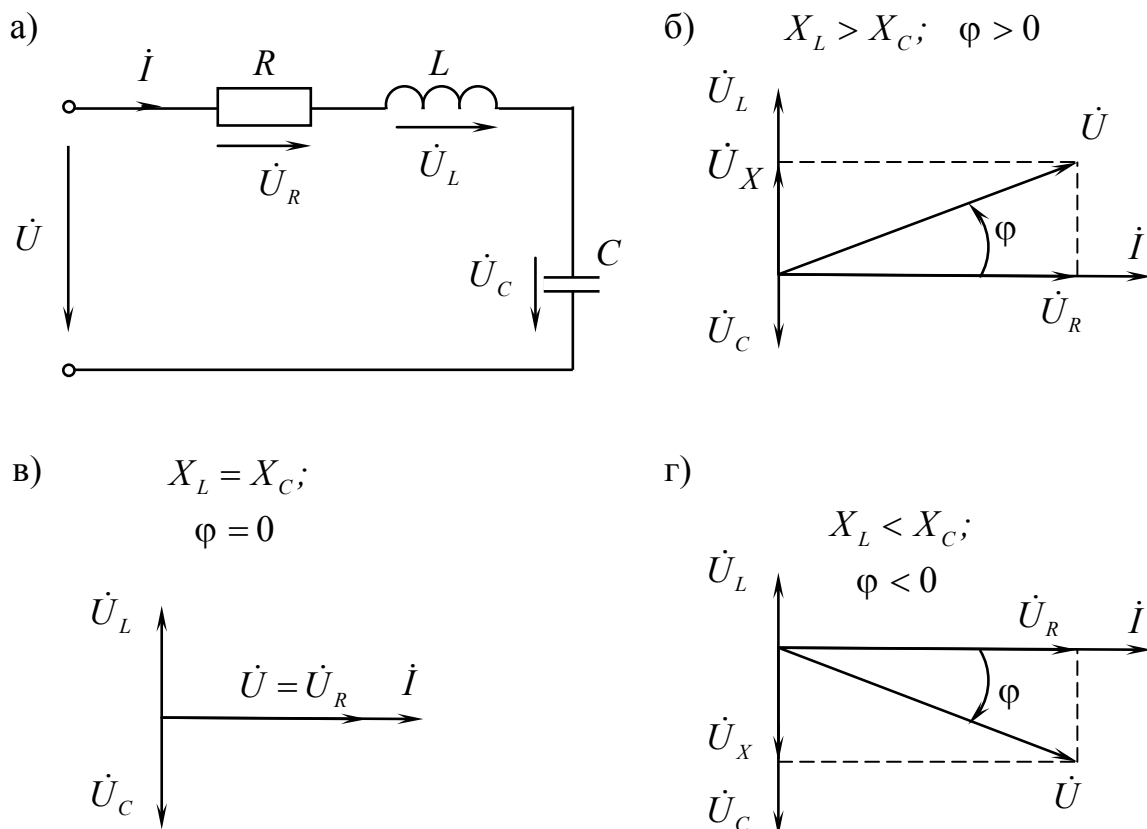


Рис. 11 – Схема к примеру 3

Решение:

В общем случае для цепи (рис. 11 а) имеем с учетом второго закона Кирхгофа:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = R\dot{I} + jX_L\dot{I} - jX_C\dot{I} = [R + j(X_L - X_C)]\dot{I} = \underline{Z}\dot{I},$$

где $\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$ – комплексное сопротивление цепи;

R – активное сопротивление;

$X = (X_L - X_C)$ – реактивное сопротивление.

Ток I – общий для последовательной цепи. Поэтому при построении векторной диаграммы для каждого случая сначала откладывается вектор тока \dot{I} . Рассмотрим каждый случай.

1) $X_L > X_C$ (рис. 11 б)

$\dot{U}_R = R\dot{I}$ – в фазе с током;

$\dot{U}_L = jX_L\dot{I}$ – вектор \dot{I} вращаем на $+j$ или на $+90^\circ$;

$\dot{U}_C = -jX_C\dot{I}$ – вектор \dot{I} вращаем на $-j$ или на -90° ;

$\dot{U}_X = \dot{U}_L + \dot{U}_C$ – направлен в сторону \dot{U}_L , т. к. $U_L > U_C$;

$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_X$ – по правилу параллелограмма.

Сдвиг по фазе тока относительно напряжения $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ откладываем от тока к напряже-

нию. $\varphi = \arctg \frac{X}{R} > 0$, т. к. $X = (X_L - X_C) > 0$.

2) $X_L < X_C$ (рис. 11 г)

Расчеты и построения векторной диаграммы аналогичны первому случаю, но $U_L < U_C$, поэтому \dot{U}_X направлен в сторону \dot{U}_C и фазовый сдвиг $\varphi < 0$, так как $X = (X_L - X_C) < 0$.

3) $X_L = X_C$ (рис. 11 в)

В этом случае $U_L = U_C$, но они в противофазе, поэтому

$$\dot{U}_X = \dot{U}_L + \dot{U}_C = 0; \quad \dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_X = \dot{U}_R; \quad \varphi = \arctg \frac{X}{R} = 0, \text{ т. к.}$$

$$X = X_L - X_C = 0.$$

Это частный режим, когда $X = (X_L - X_C) = 0$, фазовый сдвиг $\varphi = 0$, называемый резонансом напряжений.

6. Применение комплексных чисел к расчету цепей синусоидального тока

Комплексное число может быть изображено на комплексной плоскости вектором, проведенным из начала координат (рис. 12), который характеризуется величиной и положением относительно оси $+1$.

Комплексное число можно выразить в трех формах:

• алгебраической – $\dot{A} = c + jb$,

• тригонометрической – $\dot{A} = A(\cos \varphi + j \sin \varphi)$,

показательной – $\dot{A} = Ae^{j\varphi}$,

где – $A = \sqrt{c^2 + b^2}$ – модуль комплексного числа; $\varphi = \arctg \frac{b}{c}$ – аргумент комплексного числа.

Сложение и вычитание комплексных величин удобно производить в алгебраической форме, а умножение и деление – в показательной форме. В связи с этим надо часто переходить от одной формы комплексного числа к другой.

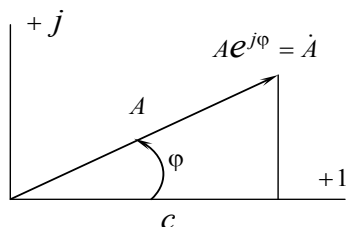


Рис. 12 – Комплексная плоскость

6.1. Переход от показательной формы комплексного числа к алгебраической

$$\dot{A} = Ae^{j\varphi} = c + jb = A\cos\varphi + jA\sin\varphi \quad (\text{рис. 12})$$

$$c = A\cos\varphi \quad b = A\sin\varphi$$

Пример 4. Мгновенные значения ЭДС, напряжения и тока известны:

$$e = 300\cos(\omega t + 120^\circ), \quad u = 200\sin(\omega t - 30^\circ), \quad i = 5\sqrt{2}\sin\omega t.$$

Записать комплексы действующих значений ЭДС, напряжения и тока в показательной и алгебраической формах. Построить векторные диаграммы ЭДС, напряжения и тока.

Решение:

а) $e = 300\cos(\omega t + 120^\circ) = 300\sin(\omega t + 120^\circ + 90^\circ)$;

$\dot{E}_m = 300e^{j210^\circ}$ – комплексная амплитуда ЭДС;

$\dot{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}e^{j210^\circ}$ – комплекс действующего значения ЭДС в показательной форме;

$$\dot{E} = \frac{300}{\sqrt{2}}e^{j210^\circ} = \frac{300}{\sqrt{2}}\cos 210^\circ + j\frac{300}{\sqrt{2}}\sin 210^\circ = -\frac{300\sqrt{3}}{\sqrt{2} \cdot 2} - j\frac{300 \cdot 1}{\sqrt{2} \cdot 2} =$$

$$= -183 - j107 \text{ – комплекс действующего значения ЭДС в алгебраической форме (рис. 13 а);}$$

б) $\dot{U}_m = 200e^{-j30^\circ}$ – комплексная амплитуда напряжения;

$\dot{U} = \frac{\dot{U}_m}{\sqrt{2}}$ – комплекс действующего значения напряжения в показательной форме;

$$\dot{U} = \frac{200}{\sqrt{2}}e^{-j30^\circ} = \frac{200}{\sqrt{2}}\cos(-30^\circ) + j\frac{200}{\sqrt{2}}\sin(-30^\circ) = 120 - j71 \text{ – комплекс действующего значения напряже-}$$

ния в алгебраической форме (рис. 13 б).

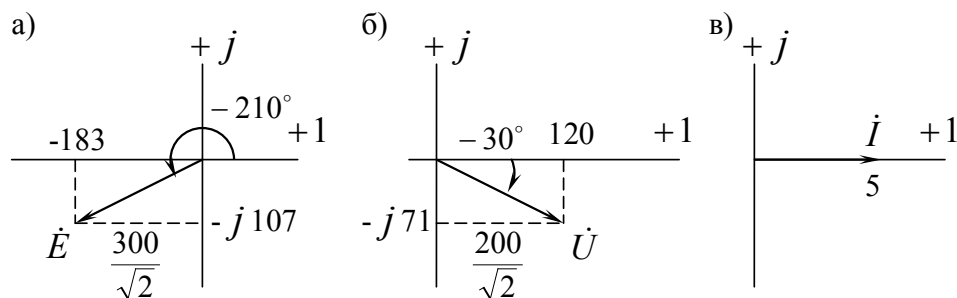


Рис. 13 – Схема к примеру 4

в) $\dot{I}_m = 5\sqrt{2}$ – комплексная амплитуда тока;

$\dot{i} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}}$ – комплекс действующего значения тока;

$\dot{I} = 5$ – алгебраическая форма записи комплекса действующего значения тока (рис. 13 в).

Векторные диаграммы \dot{E} , \dot{U} , \dot{I} представлены на рисунке 13 а, б, в. Векторы располагают относительно действительной оси $+1$.

6.2. Переход от алгебраической формы комплексного числа к показательной

$$c + jb = Ae^{j\varphi} = \dot{A} \text{ (см. рис. 12);}$$

$$A = \sqrt{c^2 + b^2}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{c}.$$

Пример 5. Комплексные ЭДС, напряжение и ток известны: $\dot{E} = -40 + j40$; $\dot{U} = 1 - j30$; $\dot{I} = -1 - j2$. Записать \dot{E} , \dot{U} , \dot{I} в показательной форме, построить их векторные диаграммы и определить мгновенные значения e , u , i .

Решение:

а) $\dot{E} = -40 + j40 = \sqrt{40^2 + 40^2} e^{j \operatorname{arctg} \frac{40}{-40}} = 56e^{j135^\circ} = 56e^{-j225^\circ}$ – показательная форма комплекса ЭДС (рис. 14 а);

б) $\dot{U} = 1 - j30 = \sqrt{1^2 + 30^2} e^{j \operatorname{arctg} \frac{-30}{1}} = 30e^{-j88^\circ} \approx 30e^{-j90^\circ}$ – показательная форма комплекса напряжения (рис. 14 б);

в) $\dot{I} = -1 - j2 = \sqrt{1^2 + 2^2} e^{j \operatorname{arctg} \frac{-2}{-1}} = 2,24e^{-j117^\circ}$ – показательная форма комплекса тока (рис. 14 в).

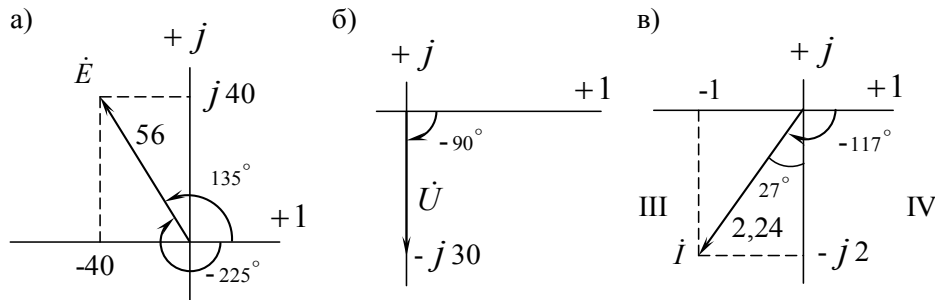


Рис. 14 – Схема к примеру 5

Векторные диаграммы \dot{E} , \dot{U} , \dot{I} представлены на рисунке 14 а, б, в. Вектор нужно располагать относительно оси действительных чисел $+1$.

Чтобы найти мгновенные значения e , u , i , определим сначала их комплексные амплитуды в показательной форме:

$$\dot{E}_m = \sqrt{2}\dot{E} = \sqrt{2} \cdot 56e^{j135^\circ} = \sqrt{2}56e^{-j225^\circ};$$

$$\dot{U}_m = \sqrt{2}\dot{U} = \sqrt{2} \cdot 30e^{-j90^\circ};$$

$$\dot{I}_m = \sqrt{2}\dot{I} = \sqrt{2} \cdot 2,24e^{-j117^\circ}.$$

Мгновенные значения e , u , i :

$$e = 56\sqrt{2} \sin(\omega t + 135^\circ) = 56\sqrt{2} \sin(\omega t - 225^\circ);$$

$$u = 30\sqrt{2} \sin(\omega t - 90^\circ); \quad i = 2,24\sqrt{2} \sin(\omega t - 117^\circ).$$

Пример 6. Заданы комплексы напряжения и тока:

$$\dot{U} = 80 + j60; \quad \dot{I} = 24 + j7.$$

Определить активное R и реактивное X сопротивление последовательной схемы замещения, нарисовать эту схему, построить векторную диаграмму тока и напряжений, подсчитать активную, реактивную и полную мощность цепи.

Решение:

Определим комплексное сопротивление цепи:

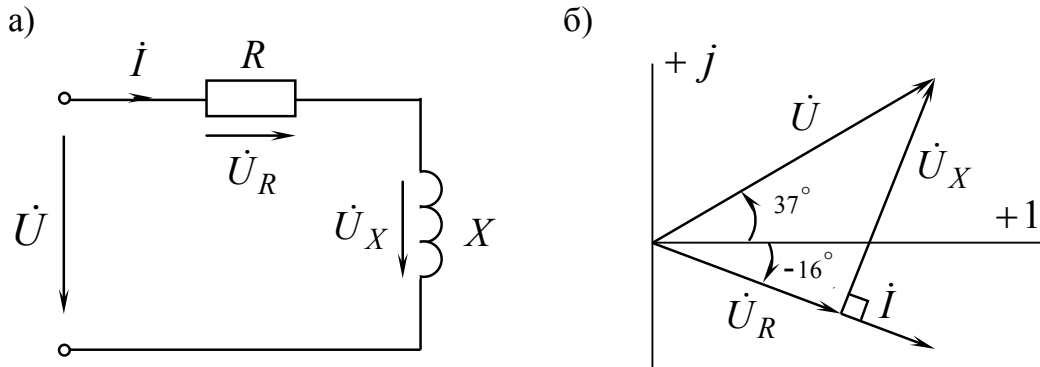


Рис. 15 – Схема к примеру 6

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{80 + j60}{24 - j7} = \frac{100e^{j37^\circ}}{25e^{-j16^\circ}} = 4e^{j53^\circ} = 2,4 + j3,2 = R + jX.$$

Так как jX – положительное, на схеме замещения X – индуктивное сопротивление (рис. 15 а).

На рисунке 15 б показана векторная диаграмма цепи. Сначала откладываем общую величину для последовательной цепи – вектор тока \dot{I} . Затем определим \dot{U}_R и \dot{U}_X .

$$\dot{U}_R = RI = 2,4 \cdot 25e^{-j16^\circ} = 60e^{-j16^\circ} \text{ – совпадает по направлению с током } \dot{I};$$

$$\dot{U}_X = jXI = j3,2 \cdot 25e^{-j16^\circ} = 80e^{j74^\circ} \text{ – вектор тока } \dot{I} \text{ вращаем на } +j \text{ или на } +90^\circ \text{ и по-}$$

лучаем направление \dot{U}_X .

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_X = 80 + j60 = 100e^{j37^\circ} \text{ – входное напряжение верно};$$

$$P = RI^2 = 2,4 \cdot 25^2 = 1500 \text{ Вт – активная мощность};$$

$$Q = XI^2 = 3,2 \cdot 25^2 = 2000 \text{ вар – реактивная мощность};$$

$$S = ZI^2 = 4 \cdot 25^2 = 2500 \text{ ВА – полная мощность.}$$

Пример 7. Построить векторную диаграмму цепи (рис. 16 а) для общего случая и определить величину емкости C , при которой в цепи может возникнуть режим резонанса токов, если:

$$R = 6 \text{ Ом}; \quad L = 12,7 \text{ Гн}; \quad f = 100 \text{ Гц}.$$

Решение:

Построение диаграммы (рис. 16 б) в общем случае удобнее начинать с ветви, содержащей последовательные элементы R и L , задаваясь током \dot{I}_3 .

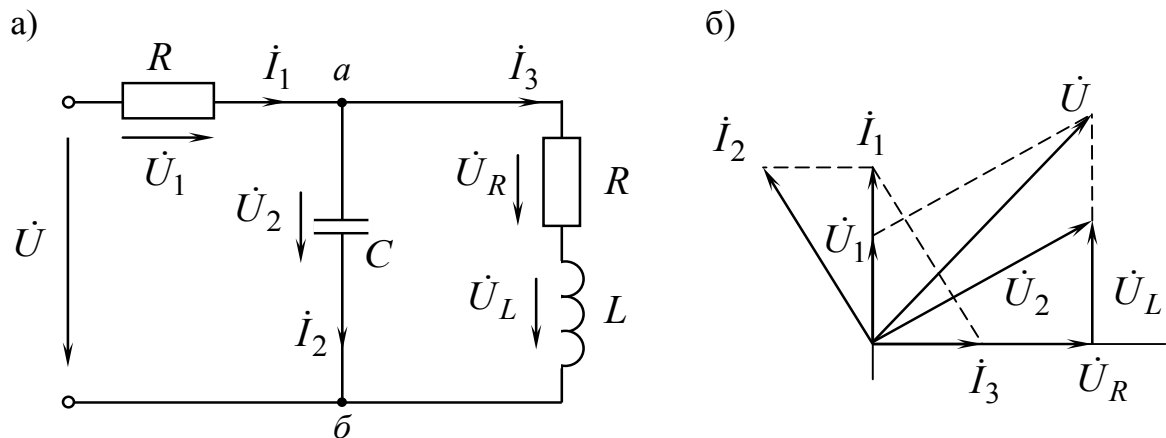


Рис. 16 – Схема к примеру 7

Тогда вектора напряжений этой ветви:

$$\dot{U}_R = R \dot{I}_3 - \text{в фазе с током } \dot{I}_3;$$

$$\dot{U}_L = j X_L \dot{I}_3 - \text{вращаем вектор } \dot{I}_3 \text{ на } j \text{ или } 90^\circ.$$

По второму закону Кирхгофа определяем $\dot{U}_2 = \dot{U}_R + \dot{U}_L$.

По закону Ома находим \dot{I}_2 .

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{-j X_C} = j \frac{\dot{U}_2}{X_C} - \text{вращаем вектор } \dot{U}_2 \text{ на } j \text{ или } 90^\circ.$$

По первому закону Кирхгофа находим вектор общего тока \dot{I}_1 .

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 - \text{складываем по правилу параллелограмма.}$$

По закону Ома определим \dot{U}_1 : $\dot{U}_1 = R \dot{I}_1$ – в фазе с током \dot{I}_1 .

По второму закону Кирхгофа определим входное напряжение:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 - \text{складываем по правилу параллелограмма.}$$

Теперь рассмотрим частный режим – **резонанс токов**.

Определим эквивалентную проводимость \underline{Y}_{ab} параллельного участка цепи, где возможен резонанс токов:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{ab} &= \frac{1}{-j X_C} + \frac{1}{R + j X_L} = j \frac{1}{X_C} + \frac{R - j X_L}{(R + j X_L)(R - j X_L)} = \\ &= \frac{R}{R^2 + X_L^2} - j \left(\frac{X_L}{R^2 + X_L^2} - \frac{1}{X_C} \right) = g - j b. \end{aligned}$$

При резонансе токов реактивная составляющая проводимости:

$$b = b_L - b_C = 0;$$

$$b = \frac{X_L}{R^2 + X_L^2} - \frac{1}{X_C} = 0;$$

$$X_L = 2\pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 12,7 \cdot 10^{-3} = 8 \text{ Ом}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{R^2 + X_L^2}{X_L} = \frac{6^2 + 8^2}{8} = 16,7 \text{ Ом}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{6,28 \cdot 100 \cdot 16,7} = 0,98 \cdot 10^{-3} \text{ ф} = 980 \text{ мкф}$$

Пример 8. В цепи синусоидального тока (рис. 17 а) $R = X_C$, амперметр показывает 12 А. Написать выражение мгновенного значения тока i_R , приняв начальную фазу тока \dot{i} равной -15° .

Решение:

Сначала рассмотрим задачу в общем виде. Построение векторной диаграммы (рис. 17 б) начнем с общей величины – напряжения \dot{U} .

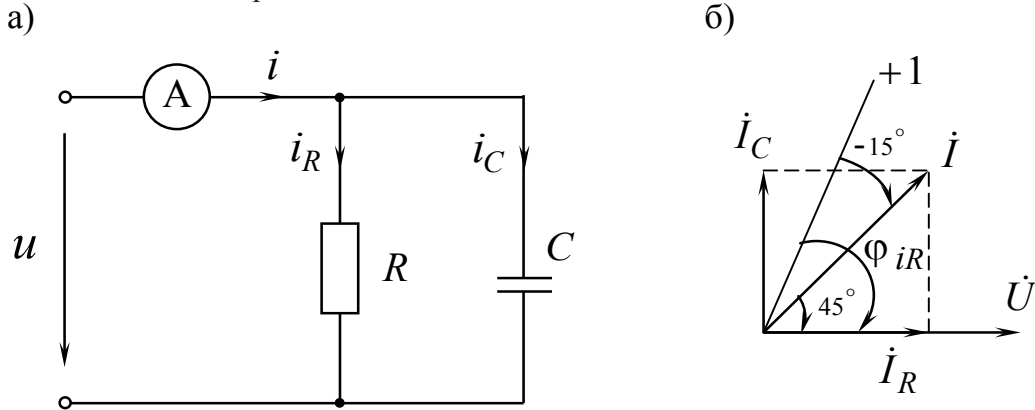


Рис. 17 – Схема к примеру 8

$i_R = \frac{\dot{U}}{R}$ – совпадает по фазе с напряжением \dot{U} .

$i_C = \frac{\dot{U}}{-jX_C} = j \frac{\dot{U}}{X_C}$ – вектор \dot{U} повернем на $+j$ или на 90° и получим направление \dot{I}_C .
 При $R = X_C$ величины токов I_R и I_C равны.

$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_C$ определяем по правилу параллелограмма.

Проведем ось вещественных значений $+1$ так, чтобы начальная фаза тока \dot{I} была равной -15° . Так как при равных I_R и I_C угол между вектором \dot{I}_R и вектором \dot{I} составляет 45° , начальная фаза тока \dot{I}_R :

$$\phi_{iR} = -(15^\circ + 45^\circ) = -60^\circ.$$

Действующее значение тока I_R определяем из прямоугольного треугольника:

$$I_R^2 + I_C^2 = 2I_R^2 = I^2; \quad I_R = \frac{I}{\sqrt{2}}.$$

Амплитуда тока: $I_{Rm} = \sqrt{2} I_R = I = 12 \text{ А}$.

Мгновенное значение: $i_R = I_{Rm} \sin(\omega t + \phi_{iR}) = 12 \sin(\omega t - 60^\circ)$.

7. Активная, реактивная и полная мощность. Баланс мощностей

В цепи переменного тока следует различать мгновенную мощность p и активную мощность P . Мгновенная мощность $p = \mathbf{u} \mathbf{i}$ меняется во времени, а эквивалентная ей, но неизменная во времени активная мощность P может быть получена из равенства этих мощностей за период потребляемой энергии:

$$PT = \int_0^T p \, dt.$$

Активная мощность P является средним значением мгновенной мощности за период и характеризует необратимое преобразование электрической энергии в другие виды энергии, например, тепло.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = R I^2 = U I \cos \phi$$

$$[P] = \text{Вт (Ватт)}$$

Там, где в цепи имеются реактивные идеализированные элементы индуктивности L и емкости C , идет непрерывный обмен энергией между источником и приемником электрической энергии. Для удобства количественных оценок интенсивности обмена энергией введено понятие **реактивной мощности Q** .

$$Q = \pm X I^2 = U I \sin \phi.$$

$[Q]$ – вар (вольт-амперы реактивные)

Для характеристики оборудования в электротехнике используют понятие **полной мощности S** .

$$S = Z I^2 = U I; [S] = \text{ВА (вольт-ампер)}$$

Рассмотрим цепь с последовательным соединением элементов R, L, C (рис. 11 а), где комплексное сопротивление нагрузки:

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R \pm jX = Z e^{\pm j\phi}.$$

Из векторной диаграммы (рис. 18) нетрудно заметить, что треугольник мощностей подобен треугольнику сопротивлений и, следовательно, треугольнику напряжений.

$$S = U I = Z I^2 = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2};$$

$$P = R I^2 = U I \cos \phi = U_R I;$$

$$Q = Q_L - Q_C = X_L I^2 - X_C I^2 = I^2 (X_L - X_C) = U I \sin \phi = U_X I.$$

Из-за сдвига фаз ϕ расчетная (полная) мощность установки используется не полностью, отсюда ясна важность высокого $\cos \phi$, называемого **коэффициентом мощности**.

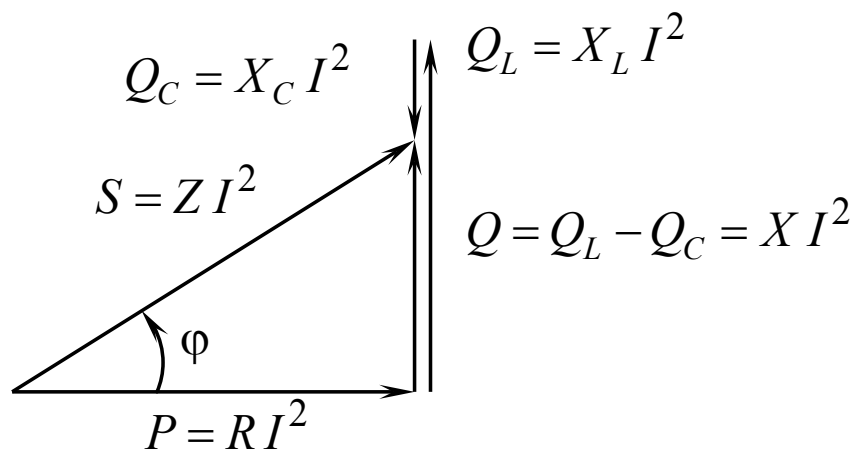


Рис. 18 – Треугольник мощностей

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \leq 1$$

Чем меньше реактивная мощность Q , тем выше $\cos \varphi$.

Рассмотрим простой прием, позволяющий найти активную и реактивную мощности по комплексному напряжению \dot{U} и сопряженному комплексу тока I .

$\dot{U} = U e^{j\varphi_u}$ – комплексное напряжение;

$\dot{I} = I e^{j\varphi_i}$ – комплексный ток;

$I = I e^{-j\varphi_i}$ – сопряженный комплекс тока;

$\tilde{S} = \dot{U} I$ – комплекс полной мощности.

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \dot{U} I^* = U e^{j\varphi_u} I e^{-j\varphi_i} = U I e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = U I e^{j\varphi} = \\ &= U I \cos \varphi + U I \sin \varphi = P + jQ. \end{aligned}$$

В линейной электрической цепи сумма активных мощностей источников ЭДС равна сумме активных мощностей приемников, а сумма реактивных мощностей источников ЭДС равна сумме реактивных мощностей приемников энергии.

$$\boxed{\sum \tilde{S}_{\text{потр.}} = \sum \tilde{S}_{\text{ист.}}}$$

Баланс комплексов полной мощности источников и потребителей.

$$\sum (P_{\text{потр.}} + jQ_{\text{потр.}}) = \sum (P_{\text{ист.}} + jQ_{\text{ист.}})$$

$$\sum P_{\text{потр.}} = \sum P_{\text{ист.}}$$

$$\sum Q_{\text{потр.}} = \sum Q_{\text{ист.}}$$

$$\sum Q = \sum Q_L - \sum Q_C$$

8. Цепи с взаимной индукцией

В состав электрических цепей могут входить катушки, магнитосвязанные с другими катушками индуктивности. Поток одной из них пронизывает витки других и наводит в них ЭДС взаимной индукции, которые должны быть учтены в расчете. При составлении уравнений для магнитосвязанных цепей необходимо знать, согласно или встречно направлены потоки самоиндукции и взаимной индукции. Правильное заключение об этом можно сделать, если известно направление намотки катушек на сердечнике и выбрано положительное направление токов в них.

Вспомним, что если потоки самоиндукции и взаимной индукции направлены согласно, то это – согласное включение катушек, а если они направлены встречно, то это – встречное включение катушек. На электрических схемах условно принято одноименные зажимы катушек помечать звездочками или жирными точками. При этом, если на схеме токи двух магнитосвязанных катушек одинаковым образом ориентированы относительно одноименных зажимов катушек, то имеет место согласное включение (рис. 19 а), в противном случае – встречное включение (рис. 19 б).

Запишем напряжение на каждой катушке с учетом магнитной связи. При согласном включении (рис. 19 а) в дифференциальной форме:

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt};$$

$$u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

В символической форме:

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2;$$

$$\dot{U}_2 = j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega M \dot{I}_1.$$

При встречном включении (рис. 19 б) в дифференциальной форме:

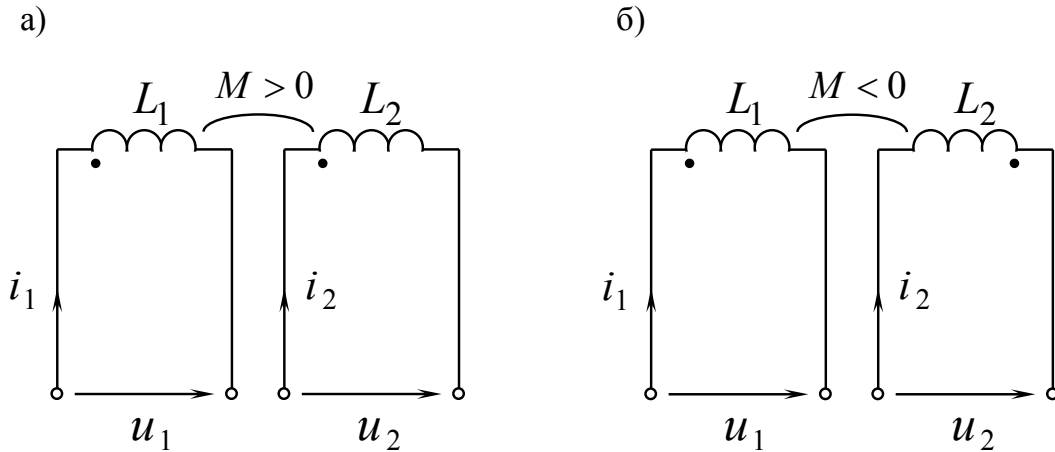


Рис. 19 – Согласное и встречное включение двух магнитосвязанных катушек

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt};$$

$$u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt}.$$

В символической форме:

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2;$$

$$\dot{U}_2 = j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1.$$

Интенсивность магнитной связи определяется коэффициентом связи:

$$K_{св} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \leq 1.$$

Пример 9. Как изменятся показания приборов в схеме (рис. 20) при увеличении расстояния между двумя индуктивно связанными катушками?

Решение:

Здесь имеет место встречное включение катушек. Величина эквивалентного сопротивления цепи:

$$Z_{встр} = \sqrt{R^2 + \omega^2 (L_1 + L_2 - 2M)^2}.$$

С увеличением расстояния между катушками $K_{ос}$ уменьшается, что приводит к уменьшению $M = K_{ос} \sqrt{L_1 L_2}$.

$Z_{встр}$ увеличивается, U – неизменно.
Показание амперметра:

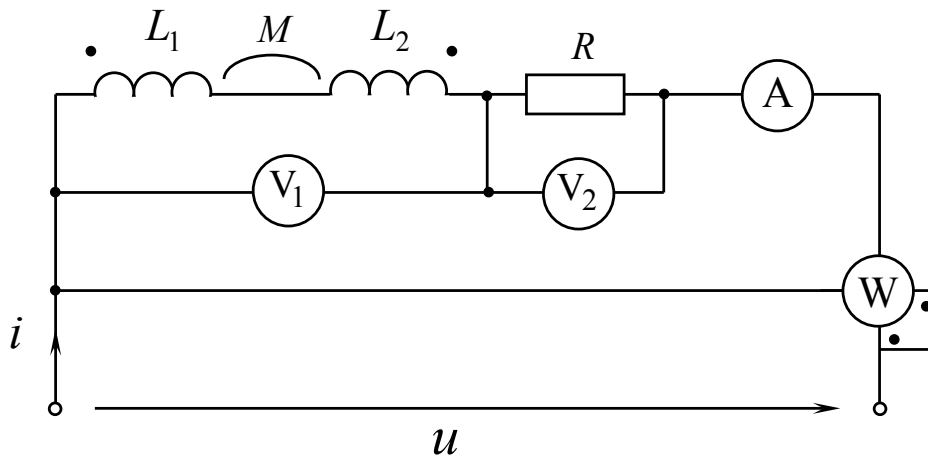


Рис. 20 – Схема к примеру 9

$$I = \frac{U}{Z_{\text{встр}}} - \text{уменьшается.}$$

Показания вольтметров (рис. 21):

$$U_2 = RI - \text{уменьшается;}$$

$$U_1 = \sqrt{U^2 - U_2^2} - \text{увеличивается.}$$

Показание ваттметра:

$$P = RI^2 - \text{уменьшается.}$$

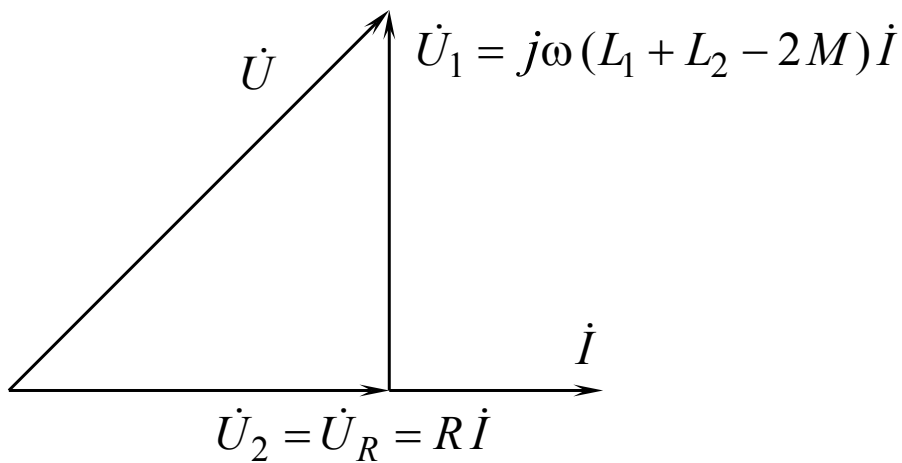


Рис. 21 – Векторная диаграмма напряжений к примеру 9

9. Задание. Расчет линейных электрических цепей синусоидального тока

Задача 1

Электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 22, рассчитать при частоте $f = 50 \text{ Гц}$ по данным (см. табл. 1). Построить топографическую векторную диаграмму.

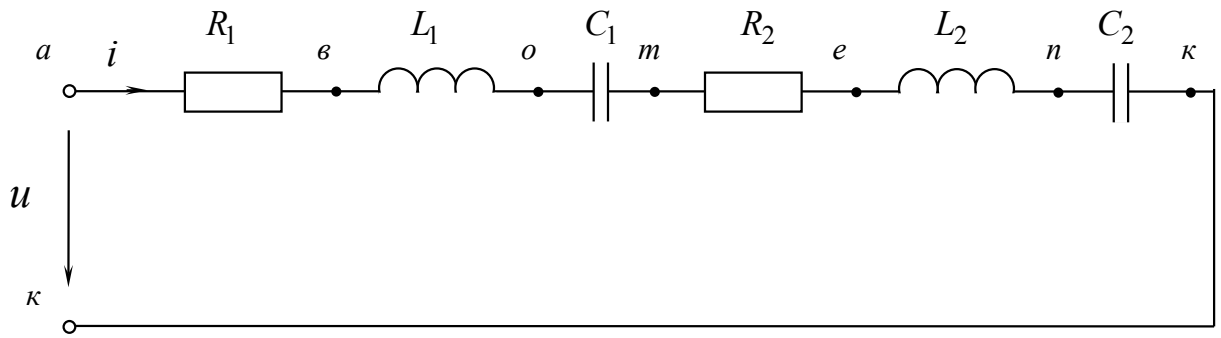


Рис. 22 – Электрическая цепь к задаче 1

Таблица 1

Вариант	Данные для расчета									Определить				
	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$L_1,$ мГн	$L_2,$ мГн	$C_1,$ мкФ	$C_2,$ мкФ		$\varphi_u,$ град	$\varphi_i,$ град					
1	10	12	–	105	–	64	$U_{ок} = 200 \text{ В}$	–	0	i	u	U_{ae}	$P_{ав}$	S
2	20	20	32	64	–	–	$I = 4 \text{ А}$	–	15	i	u	P	Q	S
3	4	–	19	–	1076	–	$U_{ae} = 60 \text{ В}$	25	–	i	P	Q	S	u_{L1}
4	20	–	–	25,5	100	398	$P = 686 \text{ Вт}$	20	–	i	u_{C1}	U	Q	S
5	–	8	19,1	12,7	–	–	$U_{ан} = 50 \text{ В}$	–	20	i	u	P	Q	S
6	2	–	13	–	1060	–	$Q = 100 \text{ вар}$	30	–	i	u	U_{ao}	P	S
7	4	–	41	–	1592	455	$U = 70 \text{ В}$	130	–	i	P	Q	S	u_{R1}
8	–	5	9,55	12,8	177	–	$U_{ен} = 120 \text{ В}$	–	25	i	u	P	Q	S
9	–	3	3,18	19,1	636	–	$U = 10 \text{ В}$	0	–	i	P	Q	S	u
10	12	8	–	–	635	118	$U_{ек} = 200 \text{ В}$	–	-10	i	P	Q	S	u
11	5	6	–	57	–	–	$U_{ок} = 127 \text{ В}$	–	-17	i	$u_{ав}$	P_{ae}	Q	S
12	10	20	–	127	–	318	$I = 1 \text{ А}$	–	30	i	$u_{ак}$	P	Q	S
13	2	2	–	19,1	1060	–	$Q = 120 \text{ вар}$	15	–	i	u	$U_{тн}$	P	S
14	10	6	32	–	–	196	$U_{ек} = 160 \text{ В}$	–	0	i	$P_{ан}$	u_{R1}	Q	S
15	1	2	–	12,8	796	–	$U_{ae} = 50 \text{ В}$	–	30	i	u	$\cos j$	Q	S
16	0,5	2,5	–	13	–	–	$P = 1730 \text{ Вт}$	10	–	i	$u_{тн}$	P	Q	S
17	3	7	15,9	–	–	290	$U_{ан} = 30 \text{ В}$	–	-15	i	$u_{ек}$	P	Q	S
18	43	3	61	–	–	–	$U = 50 \text{ В}$	20	–	i	u	P	Q	S
19	3	–	12,8	35,1	–	318	$U_{ен} = 190 \text{ В}$	–	37	i	u	P	Q	S
20	6	5	15,9	–	227	106	$U = 30 \text{ В}$	15	–	i	u	$U_{тк}$	P	S
21	10	50	22	22	–	210	$U_{ак} = 80 \text{ В}$	–	75	i	u	U_{ae}	P	S
22	5	–	–	38,2	118	–	$U_{ан} = 50 \text{ В}$	–	20	i	u	P	Q	S
23	–	10	105	–	–	318	$Q = 360 \text{ вар}$	10	–	i	u_{L1}	S	P	Q_{ee}
24	–	15	64	32	–	212	$I = 10 \text{ А}$	–	20	i	u	Q	S	P

Вариант	Данные для расчета							Определить						
	R_1 , Ом	R_2 , Ом	L_1 , мГН	L_2 , мГН	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ		φ_u , град	φ_i , град					
25	–	10	–	16	290	530	$U_{\text{вк}} = 185 \text{ В}$	9	–	i	u_{L2}	P	$\cos j$	S
26	3	9	–	–	–	265	$U_{\text{ае}} = 120 \text{ В}$	–	-15	i	u_{C2}	\cos	S	P
27	0,5	0,5	9,6	–	–	–	$P = 64 \text{ Вт}$	-30	–	i	$u_{\text{ам}}$	P	Q	S
28	6	24	–	57,4	–	530	$U_{\text{вн}} = 120 \text{ В}$	–	-41	i	u	$U_{\text{ок}}$	P	S
29	4	5	–	19,1	177	–	$U_{\text{вк}} = 150 \text{ В}$	–	15	i	u	$U_{\text{мн}}$	Q	P
30	3	10	–	44,6	289	–	$U = 60 \text{ В}$	-30	–	i	$u_{\text{ае}}$	P	Q	S
31	10	12	51	64	–	–	$U_{\text{ок}} = 220 \text{ В}$	–	4	i	u	$U_{\text{ве}}$	S	P
32	12	–	28,7	–	1060	530	$U_{\text{ан}} = 40 \text{ В}$	–	15	i	u	Q	P	S
33	1	2	–	–	–	796	$Q = 500 \text{ вар}$	12	–	i	u	P	$\cos j$	S
34	3	7	22	25	–	–	$I = 17 \text{ А}$	–	60	i	u	$U_{\text{мн}}$	P	Q
35	4	9	25,5	–	–	177	$U_{\text{вк}} = 200 \text{ В}$	–	14	i	u_{R1}	$Q_{\text{вн}}$	P	S
36	6	–	25,5	86	–	74	$U_{\text{ае}} = 30 \text{ В}$	0	–	i	u	P	Q	S
37	8	–	–	38,3	–	398	$P = 128 \text{ Вт}$	20	–	i	u_{L2}	$U_{\text{ан}}$	S	P
38	6	–	25,5	–	–	177	$U_{\text{вн}} = 40 \text{ В}$	–	-28	i	u_{C2}	P	Q	S
39	4	3	–	–	–	199	$U = 190 \text{ В}$	0	–	i	u_{R2}	$U_{\text{вк}}$	P	S
40	1	4	6,37	25,5	–	–	$U_{\text{вн}} = 100 \text{ В}$	–	14	i	$u_{\text{ак}}$	$U_{\text{ое}}$	Q	S
41	3	8	–	51	–	187	$U = 90 \text{ В}$	-50	–	i	u_{R1}	$U_{\text{ам}}$	P	S
42	60	80	–	242	172	–	$U_{\text{вк}} = 600 \text{ В}$	–	-25	i	u	P	Q	S
43	5	–	15,92	–	398	–	$U_{\text{ок}} = 30 \text{ В}$	–	10	i	u_{C1}	P	Q	S
44	10	–	–	–	1060	796	$Q = 252 \text{ вар}$	55	–	i	u	$\cos j$	P	S
45	3	–	64	–	–	796	$I = 6 \text{ А}$	–	-15	i	u_{L1}	$U_{\text{мн}}$	P	S
46	12	2	–	–	398	796	$U_{\text{вк}} = 150 \text{ В}$	20	–	i	u_{R2}	$U_{\text{ан}}$	Q	S
47	18	–	76,5	–	–	133	$U_{\text{ае}} = 220 \text{ В}$	–	-90	i	u	Q	S	P
48	15	40	–	–	106	636	$U_{\text{вн}} = 200 \text{ В}$	–	-58	i	u_{C1}	P	Q	S
49	3	3	–	–	–	338	$U = 100 \text{ В}$	-45	–	i	u	\cos	P	S
50	–	6	–	41,4	796	212	$U_{\text{вн}} = 120 \text{ В}$	–	-15	i	u	P	Q	S
51	15	8	–	73,2	–	244	$U = 160 \text{ В}$	-60	–	i	u_{L2}	$U_{\text{ок}}$	S	P
52	–	30	64	127	318	–	$U_{\text{ок}} = 220 \text{ В}$	–	-12	i	u	$U_{\text{ае}}$	S	P
53	20	–	–	22,3	59	–	$U_{\text{ан}} = 70 \text{ В}$	45	–	i	u_{C1}	P	Q	S
54	–	–	–	13	265	1592	$Q = 640 \text{ вар}$	0	–	i	u_{L2}	$U_{\text{ен}}$	S	P
55	10	10	–	48	–	–	$I = 20 \text{ А}$	–	-35	i	u	$U_{\text{ак}}$	Q	P
56	–	12	32	–	635	177	$U_{\text{вк}} = 200 \text{ В}$	–	0	i	u	$\cos j$	P	Q
57	30	–	–	207	–	127	$U_{\text{ае}} = 120 \text{ В}$	10	–	i	u_{R1}	$U_{\text{ок}}$	P	S
58	13	16	–	–	–	127	$U_{\text{ок}} = 110 \text{ В}$	–	10	i	u	$U_{\text{ек}}$	Q	S
59	3	–	3,2	9,55	–	–	$Q = 60 \text{ вар}$	20	–	i	u_{L1}	$U_{\text{ое}}$	S	P

Вариант	Данные для расчета									Определить				
	R_1 , Ом	R_2 , Ом	L_1 , мГН	L_2 , мГН	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ		φ_u , град	φ_i , град					
60	60	–	207	–	106	–	$I = 80 A$	–	75	i	u	U_{ae}	P_{an}	S
61	6	4	51	16	–	–	$U_{ек} = 175 B$	12	–	i	u_{L2}	$\cos j$	Q	S
62	8	–	–	318	199	–	$U_{ae} = 179 B$	23	–	i	u_{C1}	P	Q	S
63	10	5	–	31,9	319	–	$P = 360 Bm$	-30	–	i	u_{L2}	$U_{ок}$	S	Q
64	–	6	38,2	–	–	796	$U_{en} = 40 B$	–	32	i	u	$\cos j$	$P_{ак}$	S
65	4	–	13	–	455	–	$U = 25 B$	0	–	i	u_{L1}	U_{eo}	Q	S
66	–	20	–	63,6	636	212	$U_{en} = 220 B$	–	-65	i	u_{C2}	$U_{ек}$	S	P
67	10	–	38,2	6,37	636	–	$U_{an} = 27 B$	–	-30	i	u_{R1}	$U_{ек}$	Q	S
68	5	5	38	–	–	338	$U = 110 B$	–	10	i	u	$U_{ок}$	S	P
69	2	8	–	–	–	133	$P = 300 Bm$	30	–	i	u_{R2}	S	Q	P_{ae}
70	8	7	25,4	–	–	530	$U = 40 B$	80	–	i	u	Q	S	P
71	–	20	80	100	–	–	$U_{ок} = 220 B$	–	30	i	u_{R2}	S	P	Q
72	14	–	–	15,92	290	–	$U_{an} = 36 B$	–	40	i	u_{ae}	$U_{ек}$	Q	S
73	–	4	32	–	636	1592	$Q = 324 \text{ вар}$	15	–	i	u	$U_{нк}$	S	P
74	–	–	–	127	318	318	$I = 4,5 A$	-30	–	i	u	P	Q	S
75	9	–	32	–	635	318	$U_{ек} = 160 B$	–	7	i	u	P_{an}	Q	S
76	2	7	–	51	–	–	$U_{ae} = 36 B$	–	-40	i	u_{R2}	$\cos j$	Q	S
77	6	–	64	–	133	–	$P = 400 Bm$	50	–	i	u	Q	S	$\cos j$
78	–	8	51	–	318	796	$U_{en} = 60 B$	–	60	i	u_{L1}	P	Q	S
79	10	–	48	96	106	–	$U = 80 B$	0	–	i	$\cos j$	u_{C1}	P	S
80	–	10	38,2	3,2	–	106	$U_{en} = 200 B$	–	12	i	u	P	Q	S
81	8	2	6,36	–	–	289	$U = 70 B$	35	–	i	u_{R2}	$U_{ок}$	S	Q
82	15	10	255	–	–	64	$U_{ок} = 380 B$	–	-10	i	u	U_{en}	P	S
83	13	–	–	32	796	–	$U_{an} = 15 B$	–	-75	i	u	P	Q	S
84	3	–	–	16	–	354	$Q = 100 \text{ вар}$	0	–	i	u	U_{ae}	P	S
85	–	7	–	57	398	–	$I = 4 A$	–	60	i	u_{R2}	U_{mn}	S	P
86	17	2	16	35,1	–	–	$U_{ек} = 170 B$	18	–	i	u_{L2}	S	P	Q
87	7	8	63,7	–	–	159	$U_{ae} = 125 B$	–	60	i	u	P	Q	S
88	2	4	25,5	–	–	398	$P = 600 Bm$	-60	–	i	u_{en}	$U_{ак}$	Q	S
89	14	36	–	86	–	–	$U_{en} = 180 B$	–	44	i	u	S	P	Q
90	–	4	–	19	–	158	$U = 220 B$	–	-60	i	u_{L2}	$\cos j$	P	S
91	8	25	15,9	–	117	–	$U = 300 B$	–	-41	i	u	$U_{ек}$	Q	S
92	4	–	12,7	3,18	199	–	$U_{ак} = 100 B$	-50	–	i	u	U_{am}	P	S
93	12	30	–	–	160	160	$U_{ок} = 110 B$	–	40	i	u	U_{an}	P	S
94	–	32	32	25,5	106	–	$U_{an} = 20 B$	–	20	i	u	P	S	Q
95	–	6	–	–	354	290	$Q = 80 \text{ вар}$	0	–	i	u	U_{me}	P	S

Вариант	Данные для расчета									Определить				
	R_1 , Ом	R_2 , Ом	L_1 , мГн	L_2 , мГн	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ		φ_u , град	φ_i , град					
96	–	6	64	–	295	–	$I = 10 A$	–	23	i	u_{R2}	U_{me}	P	S
97	5	8	63,7	6,4	–	–	$U_{ак} = 100 B$	–	-12	i	u	P	S	Q
98	–	4,6	16	77,3	212	–	$U_{ae} = 110 B$	–	0	i	u	S	P	Q
99	–	6	6,36	6,36	–	–	$P = 600 Bm$	60	–	i	u	$U_{мк}$	S	Q
100	8	12	25,5	–	398	–	$U_{en} = 60 B$	–	-26	i	u_{R2}	U_{L1}	P	S

Задача 2

Рассчитать электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 23, по данным (см. табл. 2). Построить векторную диаграмму. Подсчитать баланс мощностей.

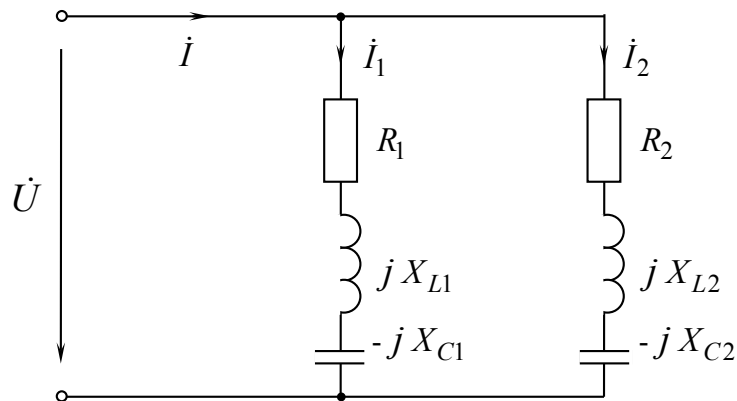


Рис. 23 – Схема к задаче 2

Таблица 2

Вариант	Данные для расчета							Определить		
	R_1 , Ом	R_2 , Ом	X_{L1} , Ом	X_{L2} , Ом	X_{C1} , Ом	X_{C2} , Ом				
1	–	6	4	–	12	8	$U = 120 B$	I_1	I_2	I
2	5	18	12	24	12	–	$U = 45 B$	I_1	I_2	I
3	8	9	10	–	4	12	$I_2 = 6 A$	U	I_1	I
4	2	–	2	6	4	4	$I = 4 A$	U	I_1	I_2
5	3	10	3	–	9	–	$U = 27 B$	I_1	I_2	I
6	15	–	25	–	5	30	$I = 3 A$	U	I_1	I_2
7	12	–	19	15	10	–	$I_1 = 5 A$	U	I_2	I
8	2	4	3	5	–	5	$I_2 = 8 A$	U	I_1	I
9	10	2	4	–	–	8	$U = 70 B$	I_1	I_2	I
10	2	–	1,5	4,9	–	9	$I_1 = 10 A$	U	I_2	I
11	21	20	28	–	–	16	$I_2 = 1 A$	U	I_1	I
12	4	–	4	–	–	4	$U = 141 B$	I_1	I_2	I
13	7	6	4	–	–	–	$I = 7 A$	U	I_1	I_2
14	4,5	–	6	5	–	–	$I_1 = 8 A$	U	I_2	I

Вариант	Данные для расчета						Определить			
	R_1 ,	R_2 ,	X_{L1} ,	X_{L2}	X_{C1}	X_{C2}				
	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом				
15	5	6	–	9	7	–	$U = 83 B$	I_1	I_2	I
16	8	–	–	16	8	8	$I_2 = 5 A$	U	I_1	I
17	13	10	–	–	11	–	$I_1 = 2 A$	U	I_2	I
18	16	–	–	24	9	–	$I = 10 A$	U	I_1	I_2
19	20	–	–	–	18	18	$U = 220 B$	I_1	I_2	I
20	3	4	–	–	4	3	$I = 9 A$	U	I_1	I_2
21	60	60	60	–	–	80	$U = 120 B$	I_1	I_2	I
22	30	–	40	–	–	30	$U = 127 B$	I_2	I_1	I
23	10	6	–	8	–	–	$U = 127 B$	I	I_1	I_2
24	20	–	15	–	–	50	$U = 127 B$	I_1	I_2	I
25	20	18	–	–	16	–	$U = 127 B$	I_2	I_1	I
26	44	32	–	44,5	–	–	$I_1 = 5 A$	U	I_2	I
27	32	44	–	–	44,5	–	$I = 8 A$	U	I_1	I_2
28	40	–	40	–	50	50	$U = 220 B$	I_1	I_2	I
29	10	10	–	–	12	12	$I = 10 A$	U	I_1	I_2
30	–	–	30	40	60	–	$U = 380 B$	I	I_2	I_1
31	–	32	64	–	20	44,5	$I_2 = 4 A$	U	I_1	I
32	–	6	–	–	10	8	$U = 100 B$	I_1	I_2	I
33	60	60	–	–	60	80	$I_1 = 6 A$	U	I_2	I
34	–	7	–	24	44	–	$I_1 = 5 A$	U	I	I_2
35	–	–	–	12,7	15	22,7	$I_2 = 10 A$	U	I_1	I
36	–	–	44	44	22	–	$U = 220 B$	I_1	I_2	I
37	40	54	20	–	–	–	$U = 380 B$	I_2	I	I_1
38	–	–	15	20	–	10	$I_1 = 8 A$	U	I	I_2
39	–	20	25	–	15	–	$I_2 = 6 A$	U	I	I_1
40	25	–	30	–	–	50	$I_1 = 4 A$	I	I_2	U
41	4	6	–	8	–	–	$U = 40 B$	I	I_1	I_2
42	6	–	2	10	4	–	$U = 40 B$	I_1	I_2	I
43	10	3	–	4	–	–	$I_1 = 4 A$	U	I	I_2
44	8	4	18	–	2	–	$I = 10 A$	I_1	I_2	U
45	6	–	–	–	8	12	$I_2 = 5 A$	I	I_1	U
46	3	–	–	–	4	10	$U = 30 B$	I_1	I_2	I
47	8	–	6	–	8	4	$U = 40 B$	I_2	I	I_1
48	5	3	–	–	4	4	$I_2 = 8 A$	I	I_1	U
49	80	–	100	–	25	15	$I = 1 A$	U	I_1	I_2
50	12	–	16	–	10	6	$U = 160 B$	I_1	I_2	I
51	10	4	–	–	–	3	$I_1 = 5 A$	U	I_2	I
52	12	20	30	–	6	–	$U = 72 B$	I	I_1	I_2
53	6	–	10	2	4	–	$I = 5 A$	U	I_1	I_2
54	25	30	–	40	–	–	$U = 150 B$	I_1	I_2	I
55	4	–	9	–	3	3	$U = 20 B$	I_2	I_1	I
56	24	–	32	–	–	20	$U = 24 B$	I	I_1	I_2
57	6	–	10	2	4	–	$I = 5 A$	U	I_1	I_2

Вариант	Данные для расчета						Определить			
	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$X_{L1},$ Ом	X_{L2} Ом	X_{C1} Ом	X_{C2} Ом				
58	8	–	2	1	10	–	$U = 20 B$	I	I_1	I_2
59	20	–	32	–	–	24	$U = 64 B$	I_1	I_2	I
60	40	–	8	6	16	–	$U = 12 B$	I_2	I_1	I
61	33	40	64	–	21	–	$U = 127 B$	I	I_1	I_2
62	30	–	10	22	45	–	$U = 220 B$	I_1	I_2	I
63	63	–	93	–	28	76	$U = 380 B$	I_2	I_1	I
64	68	42	72	–	–	–	$I_1 = 0,8 A$	U	I	I_2
65	18	–	16	–	–	35	$I_2 = 3,5 A$	I_1	I	U
66	11	35	–	–	8	–	$I_1 = 6 A$	I	I_2	U
67	17	–	–	55	30	–	$I_2 = 4 A$	I_1	I	U
68	30	60	40	–	–	80	$I = 5 A$	U	I_1	I_2
69	28	18	–	36	42	–	$I = 0,3 A$	I_1	I_2	U
70	16	18	–	14	–	17	$I = 7 A$	U	I_1	I_2
71	–	11	48	68	–	24	$I_2 = 4,5 A$	U	I	I_1
72	–	26	–	38	52	56	$I_2 = 8 A$	I_1	I	U
73	15	5	–	17	–	–	$I = 2,5 A$	U	I_1	I_2
74	23	3	–	–	–	15	$I = 7,8 A$	U	I_1	I_2
75	4,6	11	10	–	3	–	$I_1 = 3 A$	U	I	I_2
76	16	–	33	18	48	–	$I_1 = 4,5 A$	I_2	I	U
77	18	–	28	–	6	7	$I_1 = 0,5 A$	U	I_2	I
78	3	2	10	–	–	14	$U = 36 B$	I_1	I_2	I
79	9	5	–	18	16	–	$U = 50 B$	I_2	I_1	I
80	5	–	5	6	–	5	$I_1 = 2 A$	U	I_2	I
81	6	–	8	–	–	35	$I_2 = 4 A$	U	I_1	I
82	–	5	10	5	5	–	$I_1 = 5 A$	U	I	I_2
83	4	3	2	–	5	–	$U = 12 B$	I	I_1	I_2
84	3	3	–	4	4	–	$U = 20 B$	I_1	I_2	I
85	4	–	4	3	6	14	$U = 30 B$	I_2	I_1	I
86	–	4	4	5	–	5	$I_2 = 4 A$	U	I	I_1
87	–	6	5	–	6	5	$I_1 = 1 A$	I	I_2	U
88	3	3	4	–	–	4	$I_2 = 2 A$	U	I_1	I_2
89	6	6	6	–	–	6	$U = 12 B$	I	I_1	I_2
90	7	–	7	–	17	5	$U = 15 B$	I_1	I_2	I
91	8	8	5	–	–	5	$U = 21 B$	I_2	I	I_1
92	6	6	5	–	–	5	$I_1 = 4 A$	U	I	I_2
93	4	4	5	–	–	8	$U = 30 B$	I_1	I_2	I
94	6	–	6	7	16	–	$U = 21 B$	I_2	I	I_1
95	8	8	–	5	5	–	$I_2 = 3 A$	U	I_1	I
96	8	–	9	3	–	10	$U = 70 B$	I	I_1	I_2
97	9	8	–	7	–	6	$U = 18 B$	I_1	I_2	I
98	–	7	7	5	5	–	$I_1 = 1 A$	U	I	I_2
99	5	–	15	–	5	5	$I_1 = 2 A$	U	I	I_2
100	6	9	–	3	2	–	$U = 22 B$	I	I_1	I_2

Задача 3

Определить эквивалентное сопротивление цепи (рис. 24) Z в алгебраической и показательной форме по данным (см. табл. 3).

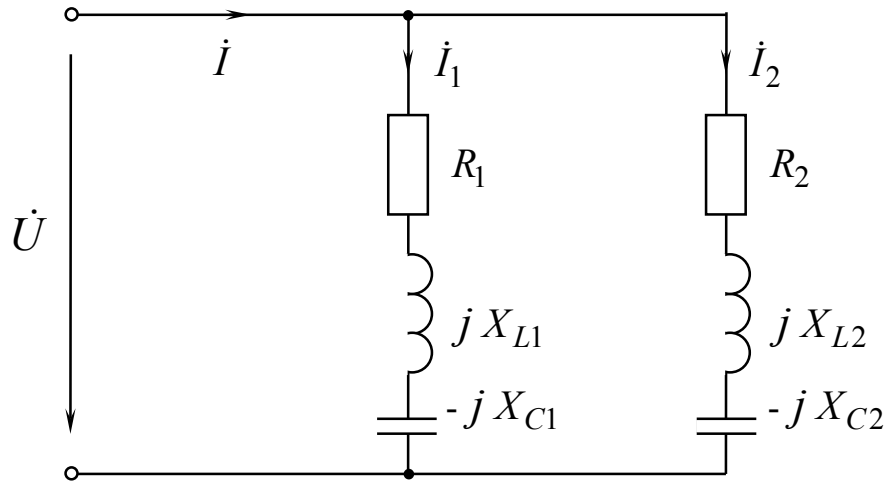


Рис. 24 – Схема к задаче 3

Таблица 3

Вариант	Данные для расчета								
	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$X_{L1},$ Ом	$X_{L2},$ Ом	$X_{L3},$ Ом	$X_{C1},$ Ом	$X_{C2},$ Ом	$X_{C3},$ Ом
1	8	10	12	6	–	–	–	12	–
2	–	14	–	24	30	–	10	–	25
3	15	–	5	–	10	–	18	–	8
4	40	–	20	–	30	15	26	–	–
5	–	28	–	35	20	–	–	–	42
6	–	–	15	–	–	20	24	36	–
7	30	16	36	–	–	–	–	–	26
8	–	32	45	–	24	–	14	–	–
9	–	48	–	20	–	80	–	26	–
10	22	–	14	–	17	–	30	35	–
11	18	–	28	–	–	–	–	32	21
12	–	12	25	36	26	–	–	–	–
13	–	34	18	11	–	24	26	–	–
14	20	33	–	–	–	40	–	44	–
15	12	24	–	18	–	34	–	–	20
16	–	1	1	–	–	3	8	3	–
17	1	2	4	–	4	–	–	–	2
18	10	20	20	–	10	–	–	–	10
19	–	3	–	7	–	6	–	4	8
20	6	10	–	6	–	–	–	–	10
21	–	1	1	3	7	–	–	–	3
22	2	5	–	–	11	–	2	–	14
23	3	–	8	–	8	–	–	4	–
24	10	–	–	15	–	20	–	10	–

Вариант	Данные для расчета								
	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$X_{L1},$ Ом	$X_{L2},$ Ом	$X_{L3},$ Ом	$X_{C1},$ Ом	$X_{C2},$ Ом	$X_{C3},$ Ом
25	–	–	7	–	–	10	5	5	–
26	–	–	5	2,5	–	–	–	5	–
27	6	–	–	–	3	–	–	–	6
28	–	5	–	–	–	5	4	–	–
29	3	–	–	4	6	–	–	–	10
30	–	2	–	8	–	–	–	–	6
31	6	–	4,5	–	4	–	8	–	–
32	–	6,4	6,4	10	–	–	5	–	–
33	7	–	4,4	–	–	–	–	3	–
34	–	–	–	–	–	–	3,5	3	4
35	–	–	–	6	6	8	–	–	–
36	3	–	–	–	5	–	4	–	10
37	4	4	–	3	–	–	–	5	5
38	–	5	–	8	–	–	6	–	5
39	4	–	–	4,5	3	–	–	–	7
40	2	–	–	–	6,5	–	–	–	3,5
41	–	–	6	3	–	–	–	5	–
42	7	–	–	–	2	–	–	–	6
43	–	6	–	–	–	7	3	–	–
44	3	–	10	2	5	5	–	–	–
45	–	2	–	8	–	–	–	–	8
46	7	–	–	5	–	5	–	8	–
47	–	–	6	7	11	–	–	8	–
48	8	–	–	5	5	–	–	8	8
49	4	–	–	–	5	–	4	–	6
50	–	5	–	9	–	–	5	–	5
51	3	6	–	12	–	4	–	8	–
52	–	12	10	18	–	14	–	30	–
53	8	–	8	22	–	8	–	4	–
54	–	16	–	20	14	8	–	–	18
55	6	12	6	–	–	6	4	–	–
56	–	10	–	17	16	16	–	–	14

Вариант	Данные для расчета								
	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$X_{L1},$ Ом	$X_{L2},$ Ом	$X_{L3},$ Ом	$X_{C1},$ Ом	$X_{C2},$ Ом	$X_{C3},$ Ом
57	4	9	–	16	18	–	–	–	37
58	–	–	7	–	19	–	28	4	16
59	3	–	26	12	14	–	–	–	13
60	–	24	–	22	17	–	8	–	30
61	10	80	40	5	–	–	–	10	–
62	20	30	–	40	–	–	–	30	40
63	30	–	40	–	–	50	–	20	–
64	20	–	–	50	–	–	–	40	30
65	–	5	–	3	–	4	–	5	–
66	–	–	15	9	12	–	16	–	12
67	–	10	–	12	–	–	8	–	6
68	–	15	8	–	10	–	10	12	–
69	12	16	–	6	–	8	–	10	–
70	4	–	6	8	–	6	–	6	–
71	14	8	19	6	–	–	–	7	6
72	13	12	–	39	–	–	–	17	6
73	4	–	14	–	–	27	–	5	–
74	55	–	–	21	–	24	–	14	–
75	–	17	–	8	–	32	–	21	–
76	–	–	11	28	39	–	17	–	17
77	–	14	–	61	–	7	48	–	10
78	–	40	33	–	11	–	24	17	–
79	71	29	–	14	–	21	–	8	–
80	51	–	16	21	–	12	–	30	–
81	4	4	2	–	–	–	4	–	5
82	–	2	3	–	–	–	3	3	–
83	4	7	8	–	–	5	–	–	–
84	–	10	15	10	–	–	20	–	20
85	12	15	9	4	–	–	–	10	–
86	15	9	6	–	–	–	20	12	–
87	25	18	–	–	–	15	10	–	–
88	–	12	13	–	7	–	8	–	–

Вариант	Данные для расчета								
	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$X_{L1},$ Ом	$X_{L2},$ Ом	$X_{L3},$ Ом	$X_{C1},$ Ом	$X_{C2},$ Ом	$X_{C3},$ Ом
89	–	13	10	5	–	10	–	–	–
90	–	8	–	12	–	8	10	6	–
91	4	5	6	3	–	–	–	12	–
92	–	7	–	24	30	–	10	–	25
93	3	–	1	–	2	–	4	–	2
94	20	–	10	–	15	8	13	–	–
95	–	14	–	18	10	–	–	–	21
96	–	–	3	–	–	4	5	7	–
97	15	8	18	–	–	–	–	–	14
98	6	12	–	9	1	17	–	–	10
99	–	16	23	–	12	–	7	–	–
100	–	24	–	100	–	40	–	18	–

10. Типовой расчет задания

Расчет линейных электрических цепей синусоидального тока

Пример 10

Электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 25, рассчитать при частоте $f = 50 \text{ Гц}$ по данным (см. табл. 1). Построить топографическую векторную диаграмму.

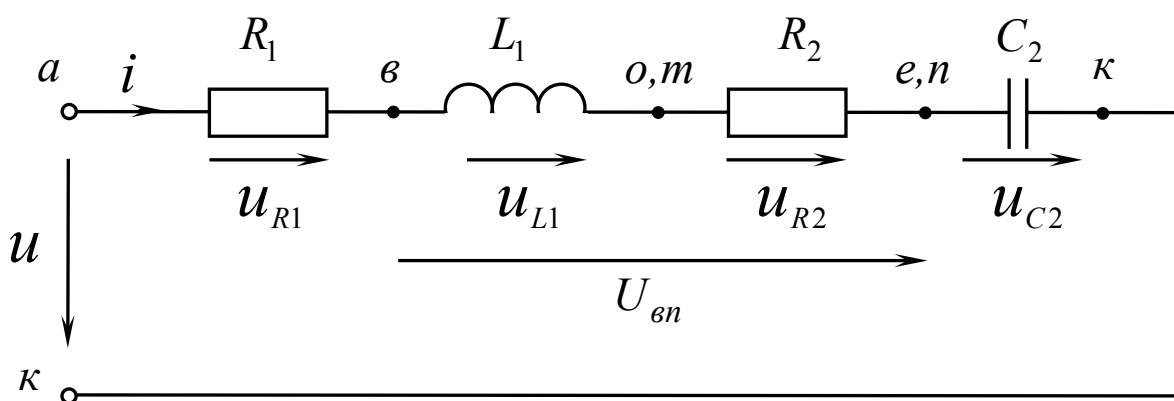


Рис. 25 – Схема к задаче 1, вариант 101

Вариант	Данные для расчета						Определить					
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$L_1, \text{ мГН}$	$C_2, \text{ мкФ}$	$U_{\text{вн}}, \text{ В}$	$\varphi_u, \text{ град}$						
101	3	1	22,3	318	21,15	30	i	u	$U_{\text{ао}}$	P	Q	S

На расчетной схеме показывать только заданные элементы.

Решение:

1. Определим мгновенное значение тока:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i).$$

I_m – амплитуда тока, $I_m = \sqrt{2} I$,
 I – действующее значение тока,

$$I = \frac{U_{\text{вн}}}{Z_{\text{вн}}} = ?$$

Определим реактивные сопротивления цепи:

$$X_{L1} = \omega L_1 = 2\pi f L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 22,3 \cdot 10^{-3} = 7 \text{ Ом}.$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{2\pi f C_2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 318 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ Ом};$$

$$\text{Угловая частота } \omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

Величина сопротивления участка цепи $Z_{\text{вн}}$:

$$Z_{\text{вн}} = \sqrt{X_{L1}^2 + R_2^2} = \sqrt{7^2 + 1^2} = 7,05 \text{ Ом}.$$

$$I = \frac{U_{\text{вн}}}{Z_{\text{вн}}} = \frac{21,15}{7,05} = 3 \text{ А}.$$

Начальная фаза тока $\varphi_i = \varphi_u - \varphi$,

где φ_u – начальная фаза напряжения,

φ – угол сдвига фазы тока по отношению к фазе напряжения.

Угол φ определяем из треугольника сопротивлений (рис. 26).

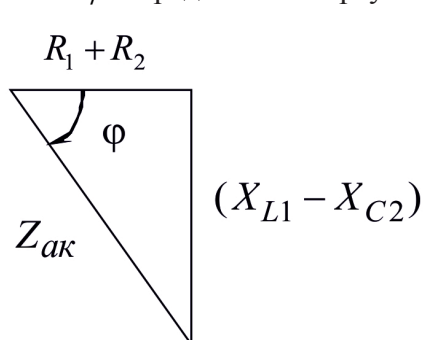


Рис. 26 – Треугольник сопротивлений

$$\varphi = \arctg \frac{X_{L1} - X_{C2}}{R_1 + R_2} =$$

$$= \arctg \frac{-3}{4} = -37^\circ.$$

$$\varphi_i = \varphi_u - \varphi = 30^\circ - (-37^\circ) = 67^\circ.$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) =$$

$$= \sqrt{2} \cdot 3 \sin(314t + 67^\circ) =$$

$$= 4,23 \sin(314t + 67^\circ) \text{ А}$$

2. Мгновенное значение напряжения источника:

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

$$U_m = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \cdot Z_{ак} \cdot I.$$

Полное сопротивление цепи:

$$Z_{ак} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_{L1} - X_{C2})^2} = \sqrt{4^2 + (-3)^2} = 5 \text{ Ом}.$$

$$U_m = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot 3 = 1,41 \cdot 15 = 21,15 \text{ В}.$$

$$U_{abh} = \varphi_a - \varphi_b.$$

3. Действующее значение напряжения на участке ao :

$$U_{ao} = Z_{ao}I = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2} I = \sqrt{3^2 + 7^2} \cdot 3 = 7,6 \text{ В}.$$

4. Активная мощность:

$$P = (R_1 + R_2) \cdot I^2 = UI \cos \phi = 4 \cdot 9 = 15 \cdot 3 \cos(-37^\circ) = 36 \text{ Вт}.$$

5. Реактивная мощность:

$$Q = (X_{L1} - X_{C2}) \cdot I^2 = UI \sin \phi = -3 \cdot 3^2 = 15 \cdot 3 \sin(-37^\circ) = -27 \text{ вар}.$$

6. Полная мощность:

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} = 15 \cdot 3 = \sqrt{36^2 + (-27)^2} = 45 \text{ ВА}.$$

7. Для построения топографической векторной диаграммы (рис. 27) необходимо сначала рассчитать комплексные напряжения на каждом элементе схемы, а затем начать построение диаграммы с общей величины – вектора тока \dot{I} , после чего построить последовательно друг за другом вектора напряжений, начиная с \dot{U}_{R1} .

$$\dot{I} = 3e^{j67^\circ}$$

Вектор тока \dot{I} под углом $\varphi_i = 67^\circ$ к оси $+1$ можно отложить в любом масштабе, масштаб напряжения $m_U = 3 \frac{\text{В}}{\text{см}}$. Все вектора связывают с осью $+1$, фазовый сдвиг указывают стрелкой от тока к напряжению.

$$\dot{U}_{R1} = R_1 \dot{I} = 9e^{j67^\circ} - \text{вектор } \dot{U}_{R1} \text{ совпадает по фазе с } \dot{I}.$$

$\dot{U}_{L1} = jX_{L1} \dot{I} = e^{j90^\circ} \cdot 7 \cdot 3e^{j67^\circ} = 21e^{j157^\circ}$ – чтобы получить направление \dot{U}_{L1} , вектор \dot{I} вращаем на $+90^\circ$ (против часовой стрелки).

$$\dot{U}_{R2} = R_2 \dot{I} = 1 \cdot 3e^{j67^\circ} = 3e^{j67^\circ} - \dot{U}_{R2} \text{ проводим параллельно току}.$$

$\dot{U}_{C2} = -jX_{C2} \dot{I} = -j10 \cdot e^{j67^\circ} = e^{-j90^\circ} 30e^{j67^\circ} = 30e^{-j23^\circ}$ – чтобы получить направление \dot{U}_{C2} необходимо вектор \dot{I} повернуть на -90° (по часовой стрелке).

$$\dot{U} = \dot{U}_{R1} + \dot{U}_{L1} + \dot{U}_{R2} + \dot{U}_{C2} = 15e^{j30^\circ} - \text{из расчета}.$$

Убедимся из диаграммы, что суммарный вектор \dot{U} равен напряжению источника:

$$U = 5 \text{ см} \cdot 3 \frac{\text{В}}{\text{см}} = 15 \text{ В}, \text{ измеряем } \varphi_u = 30^\circ.$$

Значит, расчеты выполнены верно.

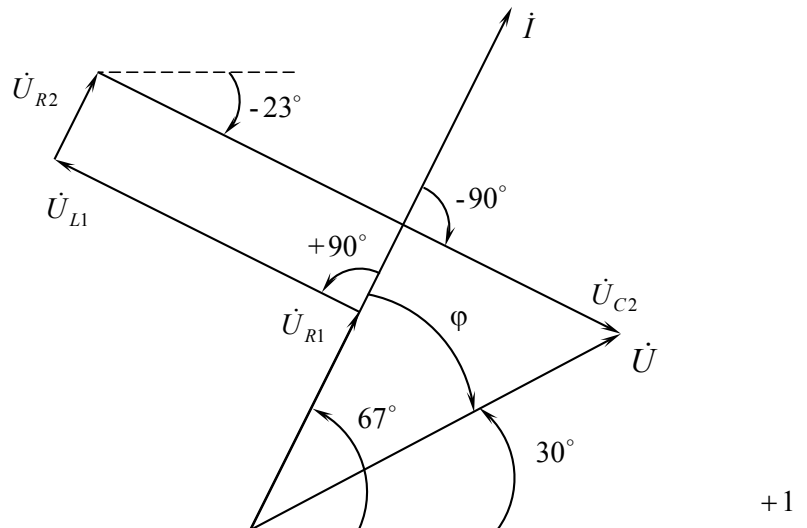


Рис. 27 – Построение векторной диаграммы

Пример 11

Рассчитать электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 28, по данным таблицы 2. Построить векторную диаграмму. Подсчитать баланс мощностей.

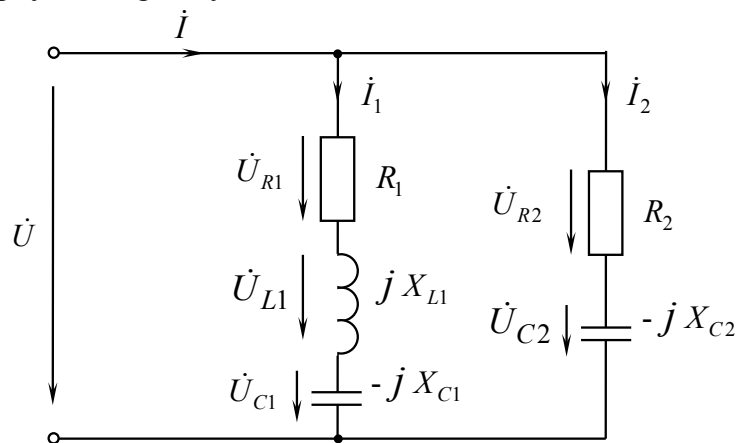


Рис. 28 – Схема к задаче 2, вариант 101

Таблица 2

Вариант	Данные для расчета						Определить		
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$X_{L1}, \text{ Ом}$	$X_{C1}, \text{ Ом}$	$X_{C2}, \text{ Ом}$	$I_1, \text{ А}$			
101	4	8	6,64	3,32	6	4	I_2	I	U

На расчетной схеме показывать только заданные элементы.

Решение:

1. Определим комплексные сопротивления первой ветви \underline{Z}_1 , второй ветви \underline{Z}_2 и эквивалентное сопротивление цепи \underline{Z} .

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= R_1 + jX_{L1} - jX_{C1} = 4 + j6,64 - j3,32 = 4 + j3,32 = \\ &= \sqrt{4^2 + 3,32^2} e^{j \arctg \frac{3,32}{4}} = 5,2 e^{j40^\circ}; \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - jX_{C2} = 8 - j6 = \sqrt{8^2 + 6^2} e^{j \arctg \frac{-6}{8}} = 10 e^{-j37^\circ};$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{5,2e^{j40^\circ} \cdot 10e^{-j37^\circ}}{4 + j3,32 + 8 - j6} = \frac{52e^{j3^\circ}}{12 - j2,68} =$$

$$= \frac{52e^{j3^\circ}}{12,3e^{-j12^\circ 30'}} = 4,22e^{j15^\circ 30'}$$

2. Принимаем начальную фазу заданной величины $\varphi_{i_1} = 0$, тогда

$$i_1 = 4e^{j0^\circ} = 4 \text{ A}.$$

Комплекс действующего значения входного напряжения:

$$\dot{U} = \underline{Z}i_1 = 5,2 \cdot 4e^{j40^\circ} = 20,8e^{j40^\circ} \text{ B}.$$

Действующее значение входного напряжения $U = 20,8 \text{ B}$.

$$3. \quad i_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{20,8e^{j40^\circ}}{10e^{-j37^\circ}} = 2,08e^{j77^\circ} \text{ A};$$

$$i_2 = 2,08 \text{ A}.$$

4. Входной ток \dot{I} можно определить двумя методами: по закону Ома и по первому закону Кирхгофа.

По закону Ома:

$$\dot{I} = \frac{U}{\underline{Z}} = \frac{20,8e^{j40^\circ}}{4,22e^{j15^\circ 30'}} = 4,93e^{j24^\circ 30'} \text{ A}.$$

По первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 4 + 2,08e^{j77^\circ} = 4 + 2,08\cos 77^\circ + j2,08\sin 77^\circ =$$

$$= 4 + 0,468 + j2,01 = 4,468 + j2,01 = \sqrt{4,468^2 + 2,01^2} e^{j\arctg \frac{2,01}{4,468}} =$$

$$= 5e^{j24^\circ 12'} \text{ A};$$

$$I = 5 \text{ A}.$$

Сравнение двух методов показывает, что погрешность полученных расчетов – в допустимых пределах.

5. Векторная диаграмма (рис. 29).

Выбираем масштаб тока $m_I = 0,5 \frac{\text{A}}{\text{см}}$, масштаб напряжения $m_U = 4 \frac{\text{B}}{\text{см}}$.

Сначала относительно оси +1 отложим рассчитанные токи \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , \dot{I} и убедимся, что и на диаграмме выполняется первый закон Кирхгофа (токи образуют параллелограмм).

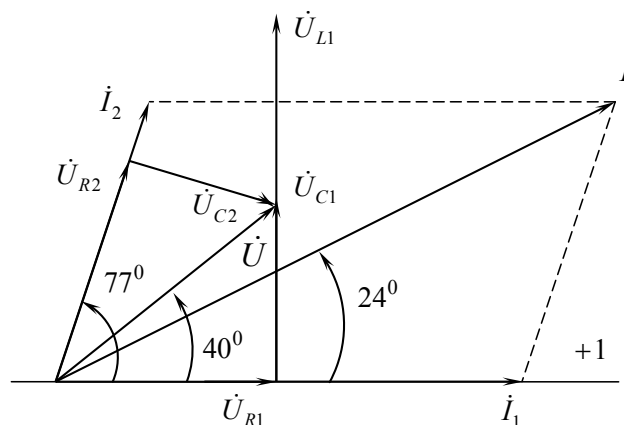


Рис. 29 – Векторная диаграмма к задаче 2

Затем рассчитаем комплексные напряжения на каждом элементе, отложим их вектора (для каждой ветви последовательно друг за другом) и убедимся, что выполняется второй закон Кирхгофа.

$$\dot{U}_{R1} = R_1 \dot{I}_1 = 4 \cdot 4 = 16 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{L1} = jX_{L1} \dot{I}_1 = j6,64 \cdot 4 = j26,6 = 26,6 e^{j90^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{C1} = -jX_{C1} \dot{I}_1 = -j3,32 \cdot 4 = -j13,3 = 13,3 e^{-j90^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U} = \dot{U}_{R1} + \dot{U}_{L1} + \dot{U}_{C1} = 20,8 e^{j40^\circ} \text{ – из расчета.}$$

$$\dot{U}_{R2} = R_2 \dot{I}_2 = 8 \cdot 2,08 e^{j77^\circ} = 16,64 e^{j77^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{C2} = -jX_{C2} \dot{I}_2 = -j6 \cdot 2,08 e^{j77^\circ} = 12,48 e^{-j13^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U} = \dot{U}_{R2} + \dot{U}_{C2} = 20,8 e^{j40^\circ} \text{ – из расчета.}$$

$$U = 5,2 \text{ см} \cdot 4 \frac{\text{В}}{\text{см}} = 20,8 \text{ В}, \phi_u = 40^\circ \text{ – из диаграммы.}$$

Результаты расчета и векторная диаграмма совпадают с достаточной точностью, значит, расчеты и построения диаграммы выполнены верно.

5. Подсчитаем баланс мощностей.

В линейной электрической цепи сумма активных мощностей источников ЭДС равна сумме активных мощностей потребителей, а сумма реактивных мощностей источников ЭДС равна сумме реактивных мощностей потребителей энергии, то есть существует баланс комплексных мощностей источников и потребителей.

$$\begin{aligned} \sum \tilde{S}_{\text{потр.}} &= \sum \tilde{S}_{\text{ист.}} \\ \sum (P_{\text{потр.}} + jQ_{\text{потр.}}) &= \sum (P_{\text{ист.}} + jQ_{\text{ист.}}) \\ \boxed{\sum P_{\text{потр.}} = \sum P_{\text{ист.}}} \\ \boxed{\sum Q_{\text{потр.}} = \sum Q_{\text{ист.}}} \end{aligned}$$

Сумма активных мощностей потребителей:

$$\sum P_{\text{потр.}} = R_1 \dot{I}_1^2 + R_2 \dot{I}_2^2 = 4 \cdot 4^2 + 8 \cdot 2,08^2 = 98,6 \text{ Вт.}$$

$$\sum Q_{\text{потр.}} = (X_{L1} - X_{C1}) \dot{I}_1^2 + (-X_{C2}) \dot{I}_2^2 = 3,32 \cdot 4^2 - 6 \cdot 2,08^2 = 27,2 \text{ вар}$$

Полная комплексная мощность источника:

$$\begin{aligned} \sum \tilde{S}_{\text{ист.}} = \dot{U} I &= 20,8 e^{j40^\circ} \cdot 5 e^{-j24^\circ 12'} = 104 e^{j15^\circ 48'} = 104 \cos(15^\circ 48') + \\ &+ j104 \sin(15^\circ 48') = 104 \cdot 0,96 + j104 \cdot 0,27 = 99,8 + j28 = P_{\text{ист.}} + Q_{\text{ист.}} \end{aligned}$$

Баланс мощностей:

$$\sum P_{\text{потр.}} = \sum P_{\text{ист.}}; \quad 98,6 \text{ Вт} \approx 99,8 \text{ Вт.}$$

$$\sum Q_{\text{потр.}} = \sum Q_{\text{ист.}}; \quad 27,2 \text{ вар} \approx 28 \text{ вар.}$$

На схеме показать только заданные элементы.

Пример 12

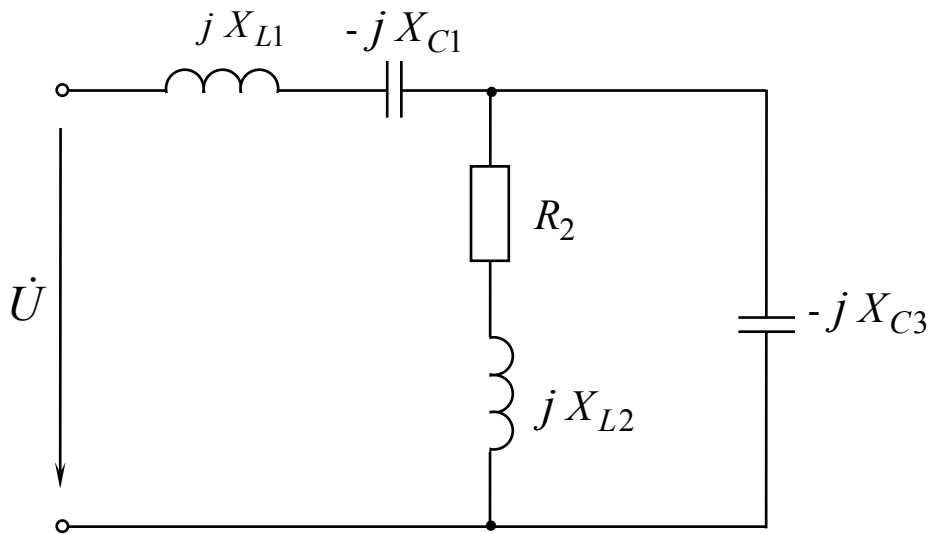


Рис. 30 – Схема к задаче 3, вариант 101

Определить эквивалентное сопротивление цепи (рис. 3) \underline{Z} в алгебраической и показательной форме по данным табл. 3.

Таблица 3

Вариант	Данные для расчета				
	R_2 , Ом	X_{L1} , Ом	X_{L2} , Ом	X_{C1} , Ом	X_{C3} , Ом
101	7	12	25	22	30

Решение:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z} &= jX_{L1} - jX_{C1} + \frac{(R_2 + jX_{L2})(-jX_{C3})}{R_2 + jX_{L2} - jX_{C3}} = j12 - j22 + \frac{(7 + j25)(-j30)}{7 + j25 - j30} = \\
 &= -j10 + \frac{-j210 - j^2 750}{7 - j5} = -j10 + \frac{-j210 + 750}{7 - j5} = \\
 &= -j10 + \frac{\sqrt{210^2 + 750^2} e^{j \arctg \frac{-210}{750}}}{\sqrt{7^2 + 5^2} e^{j \arctg \frac{-5}{7}}} = -j10 + \frac{778,85 e^{-j15^\circ 30'}}{8,6 e^{-j35^\circ 30'}} = \\
 &= -j10 + 90,5 e^{j20^\circ} = -j10 + 90,5 \cos 20^\circ + j90,5 \sin 20^\circ = \\
 &= -j10 + 85 + j31 = 85 + j21 = \sqrt{85^2 + 21^2} e^{j \arctg \frac{21}{85}} = 87,56 e^{j14^\circ}
 \end{aligned}$$

Список литературы

1. Башарин, С. А. Теоретические основы электротехники : учебник для учащихся учреждений высшего профессионального образования, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», квалификация (степень) «бакалавр» / С. А. Башарин, В. В. Федоров. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Академия, 2013. – 376 с.

2. Бессонов, Л. А. Электрические цепи : теоретические основы электротехники : учебник для бакалавров: для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки дипломированных специалистов «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», «Электроэнергетика», «Приборостроение» / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2012. – 701 с.

3. Кузовкин, В. А. Электротехника и электроника : учебник для бакалавров : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки: «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Автоматизация технологических процессов и производств» / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. – М. : Юрайт, 2013. – 430 с.

4. Лоторейчук, Е. А. Расчет электрических и магнитных цепей и полей: решение задач : учебное пособие для студентов учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по группе специальностей «Энергетика», «Электротехника», «Приборостроение», «Электроника и микроэлектроника», «Радиотехника и телекоммуникации», «Автоматизация и управление», «Информатика и вычислительная техника» / Е. А. Лоторейчук. – М. : Форум : ИНФРА-М, 2012. – 271 с.

5. Немцов, М. В. Электротехника и электроника : учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы среднего профессионального образования по дисциплине «Электротехника и электроника» по техническим специальностям / М. В. Немцов, М. Л. Немцова. – 6-е изд., стер. – М. : Академия, 2013 – 478 с.

6. Попов, В. П. Основы теории цепей : учебник для бакалавров для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим направлениям и специальностям / В. П. Попов ; Южный федеральный ун-т. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2013. – 696 с.

7. Прошин, В. М. Сборник задач по электротехнике : учебное пособие для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы Федерального государственного образовательного стандарта начального профессионального образования / В. М. Прошин, Г. В. Ярочкина. – 4-е изд., стер. – М. : Академия, 2013.

В. П. Максимов, И. Г. Минервин, Е. Д. Уткин,
О. А. Федоров

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Практикум

Часть II

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Под общей редакцией
В. П. Максимова

Корректор В. А. Яковлева
Верстка Г. С. Лосева



Подписано в печать 11.09.2014. Бумага «PaperOne».
Гарнитура «Times New Roman». Формат 60x81¹/₈.
Тираж 500 (1-й завод 1–100 экз.). Объем 6 п. л. Заказ № 847-14.

Издательство Сахалинского государственного университета
693007, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, каб. 32.
Тел. (4242) 45-23-16, факс (4242) 45-23-17.
E-mail: polygraph@sakhgu.ru,
izdatelstvo@sakhgu.ru

