

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

В. П. Максимов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть III. Трехфазные цепи переменного тока

Практикум

Рекомендовано Дальневосточным региональным учебно-методическим центром (ДВ РУМЦ) в качестве практикума для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профили «Электрические системы и сети», «Электроснабжение» вузов региона.

Южно-Сахалинск
СахГУ
2021

*Печатается по решению учебно-методического совета
Сахалинского государственного университета, 2020 г.*

Рецензенты:

Ермолаева Е. Л., доцент кафедры автоматизации
производственных процессов и электротехники
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Амурский государственный
университет», кандидат технических наук, доцент;
Пономарев А. Ю., заместитель директора ООО «СанЭко».

М171 Максимов, В. П. Теоретические основы электротехники. Часть 3:
Трехфазные цепи переменного тока : практикум / В. П. Максимов. –
Южно-Сахалинск : СахГУ, 2021. – 64 с.
ISBN 978-5-88811-619-7

Практикум содержит краткие теоретические сведения, упражнения,
типовое решение расчетно-графической работы по дисциплине «Те-
оретические основы электротехники» по разделу «Трехфазные цепи
переменного тока», а также контрольные задания для самостоятель-
ного решения студентами.

Практикум рекомендован студентам очной и заочной форм обуче-
ния по дисциплине «Теоретические основы электротехники» направ-
лений подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а
также студентам других технических направлений и специальностей,
изучающих электротехнику.

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.2я73

Учебное издание

МАКСИМОВ ВИКТОР ПЕТРОВИЧ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
Часть III. Трехфазные цепи переменного тока

Практикум

Корректор В. А. Яковлева.

Верстка Г. С. Артюхова.

Подписано в печать 26.02.2021. Бумага «X-BRITE».
Гарнитура «Arial». Формат 70х108^{1/16}.
Тираж 500 экз. (1-й завод 1–100 экз.).
Объем 5,6 усл. п. л. Заказ № 594-20.

Сахалинский государственный университет.
693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, каб. 32.
Тел./факс (4242) 45-23-16.
E-mail: izdatelstvo@sakhgu.ru,
polygraph@sakhgu.ru

ISBN 978-5-88811-619-7

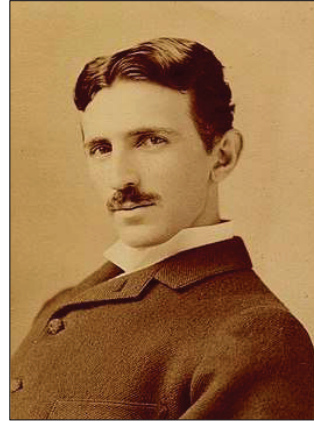
© Максимов В. П., 2021
© Сахалинский государственный
университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ	6
2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	16
2.1. Общие сведения	16
2.2. Симметричные трехфазные системы	17
2.3. Несимметричные трехфазные системы.....	20
3. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ EXCEL	23
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА В ПРОГРАММЕ ELECTRONICS WORKBENCH.....	27
5. ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНОЙ ДИАГРАММЫ В MICROSOFT VISIO	33
6. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ.....	35
6.1. Расчет симметричного режима трехфазной цепи при соединении нагрузки «звездой»	35
6.2. Расчет несимметричного режима трехфазной сети.....	38
6.3. Расчет соединения нагрузки звездой с нейтральным проводом	43
6.4. Расчет сложной трехфазной цепи	50
7. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ	55
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	59
ПРИЛОЖЕНИЯ	60

ВВЕДЕНИЕ

В процессе производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии в преобладающих случаях используется трехфазная система энергоснабжения, в которой в каждой фазе действуют три одинаковые по амплитуде синусоидальные ЭДС одной равной частоты, создаваемые одним источником энергии и сдвинутые друг относительно друга по фазе на 120° ($2\pi/3$). Рассуждая так, Никола Тесла и изобрел сначала переменный ток, а затем и трехфазную систему генерации тока с шестью проводами. Он расположил три катушки вокруг магнита на равном расстоянии под углами 120 градусов, если за центр углов принять ось вращения магнита.



**Никола Тесла
(1856–1943)**

В дальнейшем русский ученый электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский развил изобретение Н. Тесла, впервые предложив трех- и четырехпроводную систему передачи трехфазного переменного тока. С целью экономии дорогих цветных металлов он соединил все три обмотки генератора в одну точку, присоединил к ней провод и предложил передавать электроэнергию всего по четырем проводам. При симметричной нагрузке каждой фазы ток в этом общем проводе равняется нулю. Этот общий провод так и называли – нулевой. Поскольку ток в нем возникает только при неравномерности нагрузок фаз и численно он небольшой, гораздо меньше фазных токов, то представлялась возможность использовать в качестве «нулевого» провод меньшего сечения, чем для фазных проводов.



**Михаил Осипович
Доливо-Добровольский
(1862–1919)**

М. О. Доливо-Добровольский первым сконструировал и построил трехфазный генератор, трехфазный асинхронный электродвигатель и трехфазную линию электропередачи. Эта система обеспечивает наиболее выгодные условия передачи электрической энергии по проводам и позволяет построить простые по устройству и удобные в работе трансформаторы и асинхронные электродвигатели.

Технико-экономические преимущества трехфазной системы синусоидального напряжения проявляются с наилучшей стороны (снижается расход материалов проводников линии электропередачи, возрастает КПД устройств и т. п.), что способствует обеспечению электроэнергией промышленных и коммунальных потребителей, которые ее используют

для вращения асинхронных и синхронных двигателей, индукционных нагревателей, электромагнитов и т. п. От трехфазных сетей запитываются и однофазные потребители, а также потребители, нуждающиеся в постоянном токе.

Цель работы студентов по данной теме – изучение параметров и свойств трехфазных цепей, выявление зависимости линейных и фазных токов и напряжений, исследование схем подключения трехфазных потребителей к трехфазной системе электроснабжения, определение параметров системы в установившемся нормальном и аварийных режимах.

Самостоятельная работа студентов организуется с предварительного изучения необходимого теоретического материала. С целью более полного усвоения этого материала практикум содержит краткие теоретические сведения, наиболее типичные примеры, позволяющие осмыслить теоретические знания, а также приведены решения отдельных заданий расчетно-графической работы.

1. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

1. Результатом учебной деятельности студентов является выполнение и оформление различных студенческих работ, в том числе научных рефератов, докладов, расчетно-графических 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 студенческих работ предъявляются специальные требования, которые соответствуют действующим нормативным документам, принятым в сфере профессиональной деятельности. 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 в соответствии с профессиональными стандартами.

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

4. Научные студенческие работы оформляются в виде сброшюрованного документа. Вид брошюрования определяется выпускающей кафедрой.

5. Практикум оформляется на листах стандартной белой бумаги формата по ГОСТ 2.301-68 ЕСКД А4 (210×297 мм) с использованием принтерной печати на компьютере.

6. Основные требования к компьютерному набору. Набор текста осуществляется в редакторе Microsoft 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 – 2,0 см, нижнее – 2,5 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 мм, выполняемым с помощью клавиши табулятора (или автонастройки по умолчанию). Опечатки, описки, исправления, необработанные сканированные изображения не допускаются.

7. Текст оформляется в стандартных рамках с заполнением основ-

ных надписей (приложения А, Б и В). Нумерация страниц указывается в основной надписи. Страницы работы нумеруются все, включая титульный лист, содержание и приложения, но на титульном листе нумерация не указывается.

8. Сокращения русских слов и словосочетаний производится по ГОСТ 7.11-2004. 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 без пробела. 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 расшифровках формул. В конце общеупотребительных сокращений (А, В, Ом, Вт, МВт, ВАр, кА, мкТл, град, м, кг) точка не ставится.

10. Фамилии людей, названия учреждений, организаций, предприятий, названия изделий, приборов, установок и другие имена собственные, а также аббревиатуры приводятся в том виде, как они указаны в официальных документах на языке оригинала. Не допускается русская транскрипция иностранных имен собственных или их перевод на русский язык. Рекомендуется названия учреждений, организаций, предприятий оформлять только прописными буквами (кириллицей или латиницей).

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. Короткое тире отбивается пробелами с двух сторон, за исключением сочетаний, имеющих смысл «от» и «до» (например, 1941–1945 гг.).

12. Научной и технической документации 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, аббревиатура, не связанный однозначно с определенным понятием в современной научной литературе, при первом упоминании должен быть обязательно раскрыт и пояснен.

13. Иллюстрации.

13.1. Иллюстрации (чертежи, графики, электрические схемы, блок-схемы, диаграммы, рисунки, скриншоты экранных форм, фотографии) объединяются единым названием «рисунок». Характер иллюстрации может быть указан в ее названии (например, «Схема замещения

¹ ФГОС ВО настоятельно требует использовать только лицензионные компьютерные программы.

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. Иллюстрации обозначаются словом «Рисунок» с номером, которое помещают непосредственно под иллюстрацией. Иллюстрации должны иметь название, которое размещают так: «Рисунок Номер Тире», без точки в конце. При необходимости под названием иллюстрации помещают поясняющие данные (подрисуночный текст).

Например.

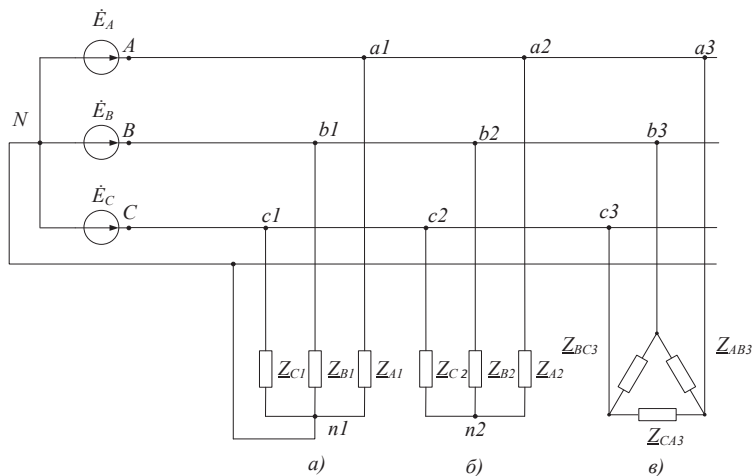


Рис. 1.1 – Трехфазная система с нулевым проводом:
а) соединение нагрузки «звездой» с нулевым проводом;
б) соединение нагрузки «звездой» без нулевого провода;
в) соединение нагрузки «треугольником»

13.3. Иллюстрации следует нумеровать арабскими цифрами порядковой нумерацией в пределах одного раздела или осуществлять сплошную нумерацию. Так, номер рисунка будет составным: номер раздела и через точку порядковый номер рисунка в нем (например, рисунок 2.1). Точка после номера рисунка не ставится. Перенос слов недопустим, используйте для разрыва строк (Shift + Enter).

Например.

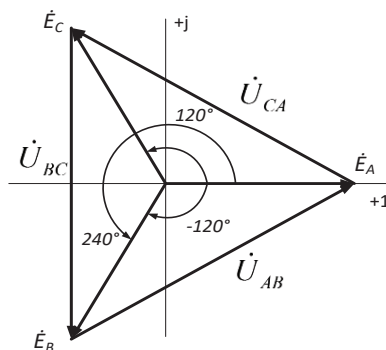


Рис. 1.2 – Векторная диаграмма фазных ЭДС и линейных напряжений трехфазной сети с нулевым проводом

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

13.5. Иллюстрации следует размещать в пределах одной страницы без какого-либо переноса. Если иллюстрация не умещается на одной странице, ее следует разбить на части или выполнить в виде приложения на листах формата A3, A2 или A1, которые также должны быть сброшюрованы в общий текст.

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 удалена от рисунка, например, дается в другой главе, целесообразно также указывать номер страницы, где приведен рисунок (см. рис. 17, с. 56).

13.7. Оформление текстовой части рисунков (схем, диаграмм, графиков) должно быть единым по всей работе. В оформлении текста полей рисунка при наличии возможности рекомендуется использовать шрифты графических документов *ISOCPEUR* (*ISOGOST*) размером, который соответствует размеру шрифта основного текста.

Например.

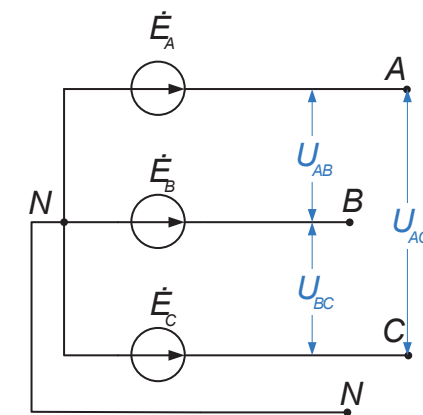


Рис. 1.3 – Пример оформления буквенных или текстовых элементов рисунков

13.8. Шрифт слова «Рисунок», его номер и название должны быть такими же, как и шрифт основного текста, то есть 14 пт., с таким же межстрочным интервалом. Названия выравниваются по центру без отступа.

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

14. Таблицы.

14.1. Многомерный текстовой материал с перечислениями, цифровые данные часто оформляются в виде таблиц. Для улучшения восприятия при создании таблиц можно использовать цветовую за-

ливку ячеек заголовка строк и столбцов (функция «Формат», «Границы и заливка», «Заливка»). Редактор Word дает возможность автоматически формировать таблицы стандартной структуры из шаблонов. Заголовки столбцов таблицы должны начинаться с прописной буквы, а подзаголовки, составляющие смысловое целое с заголовками, – со строчных.

14.2. Допускается использовать более мелкий шрифт текста в таблице, чем основной текст. Рекомендуется одинарный межстрочный интервал.

14.3. Все таблицы должны упоминаться в тексте. Таблицу следует размещать в работе непосредственно после текста, в котором на нее впервые обращают внимание, или на следующей странице.

14.4. Таблица должна иметь название, выполняемое строчными буквами (кроме первой – заглавной), выравниваемое по левому краю, без отступа от края самой таблицы и без точки в конце. Название должно быть кратким и полностью отражать содержание таблицы. Шрифт названия всех таблиц в документе должен быть единым, таким же, как шрифт основного текста, то есть 14 пт.

14.5. Таблицы следует нумеровать арабскими цифрами порядковой нумерацией в пределах раздела. Номер таблицы может быть составным: номер главы и через точку порядковый номер таблицы в нем (например, Таблица 2.1) или применяться сплошная нумерация (например, Таблица 17). 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 1.1 – Расчет электрической схемы

	U, В	I, мА	R, Ом	X_L, Ом	X_C, Ом
Контур 1	14	25	12	8	19
Контур 2	15	27	15	9	15
Контур 3	12	20	14	10	17

14.6. Если в документе приведена только одна таблица, ее нумеровать не следует, но обязательно указать слово «Таблица» и дать ее название. Таблицу следует располагать на одной странице. Если же строки или столбцы таблицы выходят за формат листа, таблицу делят на части, которые в зависимости от особенностей таблицы переносят на другие листы, размещают на одном листе рядом друг с другом или одну под другой.

14.7. Таблица состоит из ячеек, которые делятся на строки и столбцы (графы). Первая строка является заголовком таблицы. Текст первой ячейки каждого столбца является заголовком столбца. Первый столбец является боковиком. Текст первой ячейки каждой строки является заголовком строки. Если части таблицы размещаются рядом, в каждой части таблицы повторяют заголовок, при размещении частей одна под другой – повторяется боковик. Название таблицы указывают один раз над первой частью таблицы, а над последующими частями пишут «Продолжение таблицы __» и «Окончание таблицы __».

14.8. В боковике таблицы (граф № п.п.) допускается нумерация строк, но для сокращения числа столбцов номер может быть указан 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 заголовков будет повторяться.

14.9. Если цифровые данные в столбцах или строках таблицы выражены в разных единицах измерения, то их указывают, соответственно, в заголовках столбцов или при наименованиях параметров в строках боковика (для чего может предусматриваться специальная графа «Единица измерения» или «Ед. изм.»). Если все параметры, размещенные в таблице, определяются одной единицей измерения, то ее сокращенное обозначение помещают над таблицей, например, в конце названия таблицы.

14.10. Точки в конце заголовков и подзаголовков, выполненных без сокращений, в ячейках таблиц не ставятся. Точки после сокращений, знаки препинания, в том числе и точки между предложениями, проставляются обязательно.

14.11. Если параметры одного столбца имеют одинаковые значения в двух и более строках, то допускается объединение соответствующих ячеек данных столбцов в одну ячейку и проставление параметра один раз. То же относится и к одинаковым заголовкам разных строк.

14.12. Повторяющийся в строках 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 короткое тире.

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

14.16. Таблицы вместе с их названиями должны быть отделены снизу и сверху от основного текста пустой строкой.

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 (короткое тире или специальные маркеры) или нумерованными (числами или буквами кириллического алфавита).

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

16.3. При небольших перечислениях 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. В нумерованных списках при крупных текстовых фрагментах используются арабские цифры с точкой (например, 1., 2., 3. и т. д.), после которой текст начинается с прописной буквы и завершается точкой. При небольших 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 при нумерации 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, следует в буквенных списках использовать латинский алфавит.

16.7. При оформлении перечислений желательно избегать использования однотипного оформления перечислений. Для этого следует использовать различные формы нумерации, маркировки, применять для разных списков различные виды маркеров.

17. Примечания и сноски.

17.1. Примечания и сноски следует помещать в документе лишь при необходимости пояснения содержания текста абзаца, 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 абзацного отступа. Само слово «Примечание» не печатается.

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

17.3. Рекомендуется примечание печатать более мелким шрифтом (например, 12 пт).

17.4. Для единообразия примечаний и сносков их следует давать в виде сноски редактора Word на текущей странице (функция «Вставка», «Сноска», «Обычная»).

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

18.1. Математические 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

(или ×), деления (/ или ÷) 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), MathType 6.0 Equation или встроенный редактор формул Word.

18.4. Все формулы (уравнения), если их в документе более одной, как правило, нумеруются арабскими цифрами в пределах текущего пункта. В последнем случае номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой. Номер формулы указывают по правой стороне листа на уровне формулы в круглых скобках. Допускается нумеровать группы единообразных формул. Для небольших работ допускается сквозная нумерация формул.

18.5. На каждую формулу в тексте работы должно быть указание, например, «в формуле (3.1)».

18.6. Запрещается употреблять по тексту (вне формул и уравнений) математические знаки без цифр, например, > (больше), ≥ (больше или равно, не меньше), < (меньше), ≤ (меньше или равно, не больше), = (равно), ≠ (неравно), ~ (приблизительно равно), (тождественно), ∑ (сумма), ∟ (угол) и т. д., а также символы и знаки № (номер), % (процент), ° (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, «общей мощностью 1,5 млн Вт», «мощность понизилась в три раза». Если в тексте приводится несколько величин с одинаковой 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 пять-шесть раз». Если приводятся числа в виде десятичной дроби или их более двух, то числа пишутся цифрами «в 1,71 раза», «в 2, 3, а то и 7 раз».

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

19. Библиографические ссылки.

19.1. На все материалы работы, заимствованные автором из учебников, справочников, монографий, ресурсов Интернет (в том числе цитаты, таблицы, рисунки, фотографии), должны быть сделаны библиографические ссылки и составлен перечень этих использованных источников.

19.2. Библиографические ссылки на опубликованные источники (в том числе и Интернета) следует указывать порядковым номером перечня литературы, который представлен после заключения в квадратных скобках, например, [31]. Не рекомендуется приводить ссылки на источники в подстрочной сноске. Оформление ссылок осуществляется по ГОСТ Р 7.0.5-2008.

19.3. Источники неопубликованной информации, к которым нет общественного доступа, в этот список не включаются. Например, уставы предприятий, закрытые базы данных, секретные сведения оборонного или коммерческого характера.

19.4. Последовательность цитирования определяется указанием автора цитаты, самой цитаты (текст, формула, таблица или рисунок), ссылки на источник. При этом в ссылке кроме номера источника по списку указывается номер страницы, откуда взята цитата (текст, формула, таблица или рисунок), например, [31, с. 51].

19.5. 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)», «на основании уравнений (2.1–2.8)», «на рис. 1.8», «в табл. 3.1», «в прил. А». При этом для обозначения глав, пунктов, рисунков, таблиц следует использовать только сокращения «разд.», «п.», «рис.», «табл.».

19.6. 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». При выполнении работы следует руководствоваться материалами стандартов, которые устанавливают стандарт на буквенные обозначения основных электрических и магнитных величин. В скобках указываются допускаемые обозначения. Правила выполнения нормальных схем электрических соединений объектов электроэнергетики определены ГОСТ Р 56303-2014.

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

22. Графики должны быть разработаны в графическом редакторе, например, редакторе MathLab. Графики могут быть вычерчены с помощью чертежных инструментов 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. Расчетно-графическая работа оформляется как текстовый

документ с соблюдением требований ЕСКД, содержит рамки и основные надписи. Титульная страница расчетно-графической работы оформляется в соответствии с приложением А. Оформление второй и последующих страниц производится в соответствии с приложениями Б и В. Шифр документа, например,

ТОЭ.13.03.02.19999.003 ПЗ,

где

ТОЭ – аббревиатура дисциплины;

13.03.02 – код направления подготовки;

19999 – номер зачетной книжки;

003 – порядковый номер выполненной расчетно-графической работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники»;

ПЗ – вид документа: пояснительная записка.

25. Если работа не зачтена и необходимо внести исправления, то все необходимые правки необходимо дополнительно сделать, создав раздел «Работа над ошибками», и прикрепить его к тексту пояснительной записки. Нельзя вносить какие-либо исправления в текст, расчеты и графики, уже просмотренные преподавателем.

26. Студентам рекомендуется поэтапное выполнение заданий работы, 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. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Общие сведения

Трехфазная цепь является частным случаем многофазных электрических систем, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на определенный угол. Отметим, что обычно эти ЭДС, в первую очередь в силовой энергетике, синусоидальны. Однако в современных электромеханических системах, где для управления исполнительными двигателями используются преобразователи частоты, система напряжений в общем случае является несинусоидальной. Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, называют фазой, то есть фаза – это участок цепи, относящийся к соответствующей обмотке генератора или трансформатора, линии и нагрузке.

Таким образом, понятие «фаза» имеет в электротехнике два различных значения: фаза как аргумент синусоидально изменяющейся величины; фаза как составная часть многофазной электрической системы.

Разработка многофазных систем была обусловлена исторически. Исследования в данной области были вызваны требованиями развивающегося производства, а успехам в развитии многофазных систем способствовали открытия в физике электрических и магнитных явлений.

Важнейшей предпосылкой разработки многофазных электрических систем явилось открытие явления вращающегося магнитного поля (Г. Феррарис и Н. Тесла, 1888 г.). Первые электрические двигатели были двухфазными, но они имели невысокие рабочие характеристики. Наиболее рациональной и перспективной оказалась трехфазная система, основные преимущества которой будут рассмотрены далее. Большой вклад в разработку трехфазных систем внес выдающийся русский ученый-электротехник М. О. Доливо-Добровольский, создавший трехфазные асинхронные двигатели, трансформаторы, предложивший трех- и четырехпроводные цепи, в связи с чем по праву считающийся основоположником трехфазных систем.

Трехфазные цепи являются одним из видов цепей синусоидального тока, и, следовательно, для них в полной мере применимы методы расчета и анализа цепей в символической форме. Анализ трехфазных цепей удобно осуществлять с использованием векторных диаграмм, позволяющих достаточно просто определять фазовые сдвиги между токами и напряжениями. Однако существующая определенная специфика трехфазных цепей вносит характерные особенности в их расчет.

Трехфазные системы в настоящее время получили наибольшее распространение. На трехфазном токе работают все крупные электростанции и потребители, что связано с рядом преимуществ трехфазных цепей перед однофазными, важнейшими из которых являются:

- экономичность передачи электроэнергии на большие расстояния;
- самым надежным и экономичным, удовлетворяющим требованиям промышленного электропривода является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;

– возможность получения с помощью неподвижных обмоток вращающегося магнитного поля, на чем основана работа синхронного и асинхронного двигателей, а также ряда других электротехнических устройств;

– уравнивание симметричных трехфазных систем.

Основным признаком классификации трехфазных систем ЭДС, напряжений и токов является их симметричность.

2.2. Симметричные трехфазные системы

Условием симметричности является равенство мгновенных (комплексных) значений ЭДС фаз генератора. Мгновенные и комплексные значения ЭДС трехфазного симметричного генератора имеют вид:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\omega t + \psi) \rightarrow \dot{E}_A = E_A e^{j\psi}; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t + \psi - 120^\circ) \rightarrow \dot{E}_B = \dot{E}_A e^{-j120^\circ} = \dot{E}_A e^{j240^\circ} = a^2 \dot{E}_A; \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + \psi - 240^\circ) \rightarrow \dot{E}_C = \dot{E}_A e^{-j240^\circ} = \dot{E}_A e^{j120^\circ} = a \dot{E}_A, \end{aligned} \quad (1)$$

где ψ – начальный угол фазы А; a – оператор поворота, причем

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^3 = 1, \quad a^4 = a \text{ и т. д.}$$

Фазные обмотки трехфазного генератора можно соединить между собой по-разному. Это может осуществляться посредством объединения концов обмоток в общем узле N – соединение звездой (Y) (рис. 2.1, б). Фазные обмотки можно соединить и последовательно – соединение треугольником (Δ) (рис. 2.1, с).

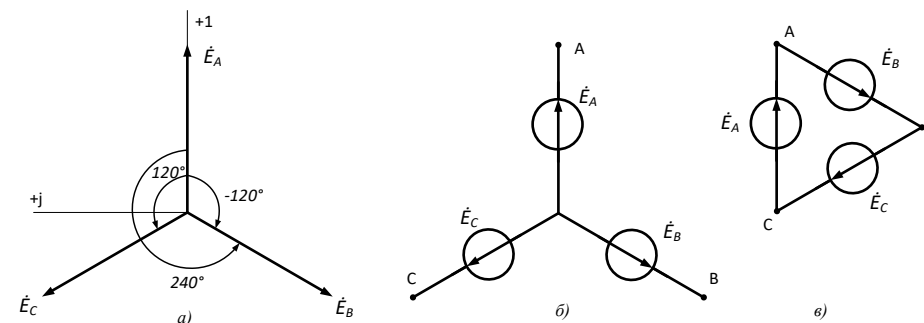


Рис. 2.1 – Соединение фаз генератора

Наиболее характерное свойство симметричной системы – это то, что сумма фазных ЭДС равна нулю, то есть

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (2)$$

Условием симметричности трехфазного приемника является равенство комплексных сопротивлений соответствующих фаз потребителя: то есть если $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$ (фазы нагрузки соединены звездой, рис. 2.2) или $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$ (фазы нагрузки соединены треугольником, см. рис. 2.3). В случае неравенства сопротивлений приемник является несимметричным.

Существуют трехфазные системы, в которых нулевые точки генератора N и нагрузки n соединяются проводом с сопротивлением $Z_N = 0$ или $Z_N \neq 0$ (см. рис. 2.4). Такой провод называют нулевым, или нейтральным, проводом.

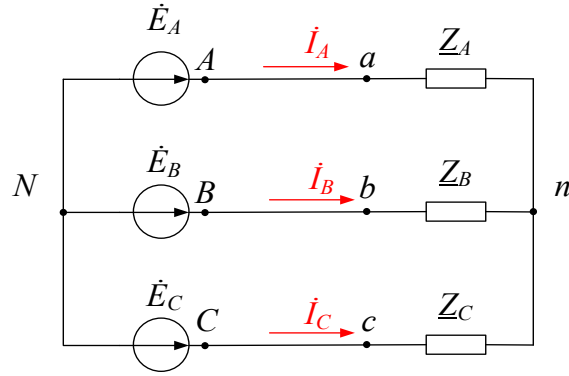


Рис. 2.2 – Фазы нагрузки потребителя соединены звездой

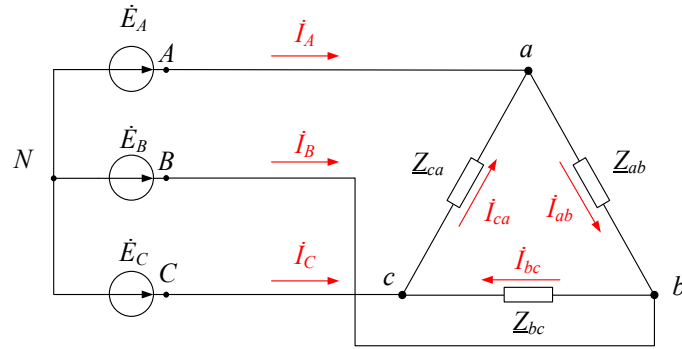


Рис. 2.3 – Фазы нагрузки потребителя соединены треугольником

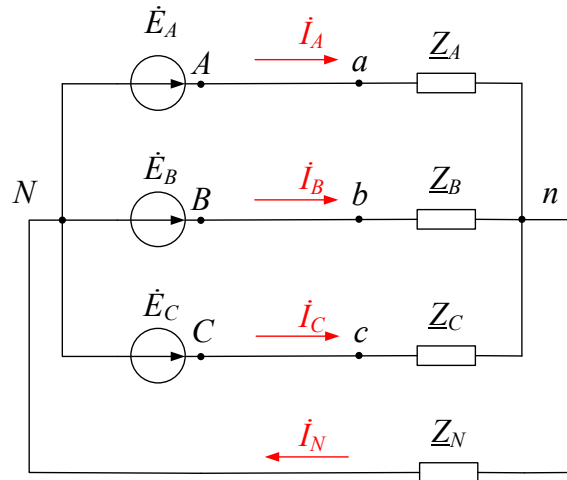


Рис. 2.4 – Фазы нагрузки потребителя соединены звездой с нулевым проводом

Если к симметричной трехфазной цепи приложена симметричная трехфазная система напряжений генератора, то в ней будет действовать симметричная система токов. Такой режим работы трехфазной цепи называется симметричным. В этом режиме токи и напряжения соответствующих фаз равны по модулю и сдвинуты по фазе на $\pm 120^\circ$.

Расчет таких цепей проводится для одной (базовой) фазы, в качестве которой обычно принимают фазу A. При этом соответствующие величины в других фазах получают формальным добавлением к аргументу переменной фазы A фазового сдвига $\pm 120^\circ$ при сохранении неизменным ее модуля.

Для симметричной трехфазной системы при соединении нагрузки звездой (см. рис. 2.2) существуют следующие зависимости между действующими значениями линейных и фазных напряжений и токов:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}; \quad I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}, \quad (3)$$

между комплексными значениями токов фаз:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{E}_A}{Z_a} = I_a e^{j\varphi_a}; \quad \dot{I}_b = \dot{I}_a e^{-j120^\circ} = I_a e^{j(\varphi_a - 120^\circ)}; \quad \dot{I}_c = \dot{I}_a e^{j120^\circ} = I_a e^{j(\varphi_a + 120^\circ)}. \quad (4)$$

При наличии нейтрального провода ток в этом проводе определяется по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c, \quad (5)$$

при отсутствии нейтрального провода:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0. \quad (6)$$

Для симметричной трехфазной системы при соединении нагрузки треугольником (см. рис. 2.3) действующие значения линейных и фазных напряжений и токов связаны соотношениями:

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}; \quad I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}, \quad (7)$$

комплексные значения токов фаз:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}} = I_{ab} e^{j\varphi}; \quad \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ab} e^{-j120^\circ} = I_{ab} e^{j(\varphi - 120^\circ)}; \quad \dot{I}_{ca} = \dot{I}_{ab} e^{j120^\circ} = I_{ab} e^{j(\varphi + 120^\circ)}, \quad (8)$$

комплексные значения линейных токов:

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \dot{I}_{ab} e^{-j30^\circ} = \sqrt{3} I_{ab} e^{j(\varphi - 30^\circ)}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_A e^{-j120^\circ} = \sqrt{3} I_{ab} e^{j(\varphi - 150^\circ)}; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_A e^{j120^\circ} = \sqrt{3} I_{ab} e^{j(\varphi + 90^\circ)}. \quad (9)$$

Полная, активная и реактивная мощности в симметричной трехфазной системе определяются соответственно по указанным ниже формулам для схем «звезда»:

$$\begin{aligned}
\underline{S} &= 3\dot{U}_\phi \dot{I}_\phi^*; \quad S = 3U_\phi I_\phi = \frac{3U_\phi I_\phi \sqrt{3}}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}U_\phi I_\phi; \\
P &= 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3I_\phi^2 R_\phi = \frac{U_\phi^2}{R_\phi}; \\
Q &= 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3}U_\phi I_\phi \sin \varphi = 3I_\phi^2 X_\phi = \frac{U_\phi^2}{X_\phi}.
\end{aligned} \quad (10)$$

для схем «треугольник»:

$$\begin{aligned}
\underline{S} &= 3\dot{U}_\phi \dot{I}_\phi^*; \quad S_\Delta = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_\phi I_\phi; \\
P &= 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3I_\phi^2 R_\phi = I_\phi^2 R_\phi; \\
Q &= 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3}U_\phi I_\phi \sin \varphi = 3I_\phi^2 X_\phi = I_\phi^2 X_\phi,
\end{aligned} \quad (11)$$

В (9) и (10) $\dot{I}_\phi^* = I e^{-j\varphi}$ сопряженное значение вектора тока.

2.3. Несимметричные трехфазные системы

Если хотя бы одно из условий симметрии не выполняется, трехфазная цепь работает в несимметричном режиме. Такие режимы при подключении статической нагрузки рассчитываются любым из известных методов расчета линейных электрических цепей с источниками гармонических воздействий. Как правило, падением напряжения на внутреннем сопротивлении генератора пренебрегают и фазные напряжения генератора заменяются соответствующими идеальными источниками ЭДС. Поскольку в трехфазных цепях, помимо значений токов, обычно представляют интерес также величины потенциалов узлов, в большинстве случаев для расчета применяется метод узловых потенциалов.

Если заданы линейные напряжения, удобно рассчитывать трехфазные цепи при соединении фаз нагрузки в *треугольник*. Пусть в схеме (см. рис. 2.5) нагрузка несимметрична и $\underline{Z}_{ab} \neq \underline{Z}_{bc} \neq \underline{Z}_{ca}$. Тогда при известных комплексах линейных напряжений в соответствии с законом Ома фазные токи:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}. \quad (12)$$

По найденным фазным токам приемника на основании первого закона Кирхгофа определяются линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \quad (13)$$

Если к трехфазному генератору, фазы которого соединены звездой (рис. 2.4), подключен приемник электрической энергии, фазы которого также соединены звездой, то в случае несимметричной трехфазной системы между нейтральными (нулевыми) точками приемника и генератора возникает напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_a + \dot{E}_B \underline{Y}_b + \dot{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}, \quad (14)$$

здесь $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ – векторы ЭДС соответствующих фаз генератора; $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c, \underline{Y}_N$ – комплексные проводимости соответствующих фаз нагрузки и нейтрального (нулевого) провода.

Напряжение на фазах нагрузки:

$$\dot{U}_a = \dot{I}_a \underline{Z}_a = \dot{E}_A - \dot{U}_N; \quad \dot{U}_b = \dot{I}_b \underline{Z}_b = \dot{E}_B - \dot{U}_N; \quad \dot{U}_c = \dot{I}_c \underline{Z}_c = \dot{E}_C - \dot{U}_N. \quad (15)$$

Токи в фазах:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a \underline{Y}_a; \quad \dot{I}_b = \dot{U}_b \underline{Y}_b; \quad \dot{I}_c = \dot{U}_c \underline{Y}_c. \quad (16)$$

Ток нейтрального провода:

$$\dot{I}_N = \dot{U}_N \underline{Y}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c. \quad (17)$$

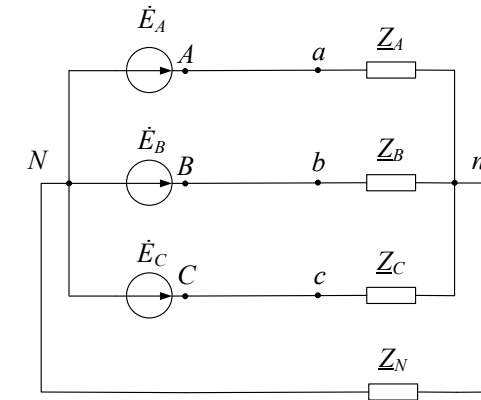


Рис. 2.5 – Трехфазная система «звезда» – «звезда» с нулевым проводом

При расчете трехфазной системы «звезда – звезда с нейтральным проводом с сопротивлением $\underline{Z}_N = 0$ » нет необходимости рассчитывать напряжение смещения нейтрали, поскольку $\dot{U}_N = 0$. В этом случае трехфазную систему можно рассматривать как совокупность трех независимых контуров и рассчитывать каждый контур известными методами расчета цепей синусоидального тока. Целесообразно использовать векторные диаграммы при расчете таких цепей.

В случае отсутствия нейтрального провода в формуле (13) проводимость нейтрального провода $\underline{Y}_N$ принимают равной нулю. При этом, если генератор симметричный, а симметрия нагрузки нарушена сопротивлением нагрузки, подключенном в одной из фаз (например, $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z} \neq \underline{Z}_a$), удобно для определения напряжения смещения нейтрали воспользоваться формулой:

$$\dot{U}_N = \dot{E}_A \frac{\underline{Y}_a - \underline{Y}}{\underline{Y}_a + 2\underline{Y}}, \quad (18)$$

для оставшихся случаев $\underline{Z}_a = \underline{Z}_c = \underline{Z} \neq \underline{Z}_b$ и $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z} \neq \underline{Z}_c$ соответственно:

$$\dot{U}_N = \dot{E}_B \frac{\underline{Y}_b - \underline{Y}}{\underline{Y}_b + 2\underline{Y}}; \quad \dot{U}_N = \dot{E}_C \frac{\underline{Y}_c - \underline{Y}}{\underline{Y}_c + 2\underline{Y}}. \quad (19)$$

Если нагрузка соединена звездой без нейтрального провода и известны линейные напряжения $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$, находятся по формулам:

$$\dot{U}_a = \frac{\dot{U}_{AB}\underline{Y}_b - \dot{U}_{CA}\underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}; \quad \dot{U}_b = \frac{\dot{U}_{BC}\underline{Y}_c - \dot{U}_{AB}\underline{Y}_a}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}; \quad \dot{U}_c = \frac{\dot{U}_{CA}\underline{Y}_a - \dot{U}_{BC}\underline{Y}_b}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}. \quad (20)$$

Для любой трехфазной системы сумма комплексных значений линейных напряжений равна нулю:

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0. \quad (21)$$

3. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ EXCEL

При решении задач, связанных с расчетом электрических цепей переменного тока, пользуются аналитическим символическим методом расчета цепей переменного тока. Основой этого метода являются комплексные числа, использование которых позволяет изображения синусоидальных величин представить в виде векторов на комплексной плоскости. При этом дифференциальные уравнения, с помощью которых описывают процессы в электрических цепях переменного тока, приводят к алгебраическим уравнениям.

В качестве примера использования Excel при расчете электрических цепей переменного тока выберем трехфазные цепи и рассмотрим следующую типовую задачу.

В электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 1, по заданным значениям ЭДС трехфазного источника и сопротивлениям нагрузки, имеющим различный характер в каждой фазе, требуется определить фазные токи нагрузки и ток в нейтральном проводе. Действующее значение ЭДС каждой фазы трехфазного генератора равно 220 В. Комплексные значения ЭДС в фазах можно в этом случае записать в виде:

$$\dot{E}_A = E_A = 220 \text{ В}$$

$$\dot{E}_B = \dot{E}_A e^{-j120^\circ} = 220 e^{-j120^\circ} = 220 \left(-0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -110 - j190,52 \text{ В}$$

$$\dot{E}_C = \dot{E}_A e^{j120^\circ} = 220 e^{j120^\circ} = 220 \left(-0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -110 + j190,52 \text{ В}$$

Сопротивления фаз нагрузки равны:

$$Z_A = 100 \text{ Ом}; \quad Z_B = (86,6 + j50) \text{ Ом}; \quad Z_C = (86,6 - j50) \text{ Ом}.$$

Расчет такой цепи можно произвести с помощью встроенных функций программы Excel категории «Инженерные», таких, как КОМПЛЕКСН, МНИМ.ДЕЛ, МНИМ.СУММ, МНИМ.ABS, МНИМ.АРГУМЕНТ, МНИМ.ПРОИЗВЕД.

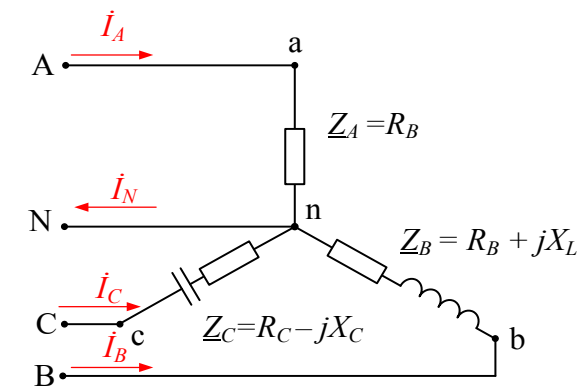


Рис. 3.1 – Электрическая несимметричная трехфазная цепь

Для расчета данной электрической трехфазной цепи нужно:

1. Создать новый лист Excel.
2. В ячейке A1 ввести текст «Расчет электрической цепи комплексным методом».
3. В ячейке A3 ввести текст «Расчет источника», в ячейку D3 ввести «Расчет нагрузки».
4. В ячейках A5:A7 ввести обозначение ЭДС источника E_A , E_B , E_C , в ячейках D5:D7 ввести обозначения полных сопротивлений фаз Z_A , Z_B , Z_C , в ячейках G5:G7 ввести обозначения токов фаз I_a , I_b , I_c .
5. Установить курсор в ячейку B5 и щелкнуть по пиктограмме **Мастер функций**, f_x .
6. Выбрать категорию *Инженерные*, функцию КОМПЛЕКСН.
7. На втором шаге внести действительную и вещественную часть ЭДС, а также указать символ мнимой единицы «j».
8. Установить курсор в ячейку E5 и щелкнуть по пиктограмме **Мастер функций**, f_x .
9. Выбрать категорию *Инженерные*, функцию КОМПЛЕКСН.
10. На втором шаге внести в качестве действительной части значение активного сопротивления фазы A, вещественной части – величину реактивного сопротивления фазы A с учетом знака, а также указать символ мнимой единицы «j».
11. Повторить пункты 5–10 в ячейках B6, B7 (для ввода ЭДС фазы B и фазы с генератора) и в ячейках E6, E7 (для ввода сопротивления фазы B и фазы C).
12. Установить курсор в ячейку H5 и щелкнуть по пиктограмме **Мастер функций**, f_x .
13. Ввести формулу =МНИМ.ДЕЛ(B5;E5) из категории *Инженерные*.
14. Затем нажать «Enter» для вставки формулы в ячейку.
15. Скопировать формулу из ячейки H5 в ячейки H6 и H7. Получили значение фазных токов в виде комплексных чисел.
16. В ячейку M3 ввести «Ток в нейтральном проводе».
17. Установить курсор в ячейку N5 и щелкнуть по пиктограмме **Мастер функций**.
18. Ввести формулу =МНИМ.СУММ(H5;H6;H7) из категории *Инженерные*.
19. Затем нажать «Enter» для вставки формулы в ячейку. Получили значение тока в нейтральном проводе в виде комплексного числа.
20. Для определения значений ЭДС, полного сопротивления, фазных токов нагрузки и тока в нейтральном проводе необходимо воспользоваться функцией, МНИМ.ABS.
21. Для определения сдвигов фаз можно воспользоваться функцией МНИМ.АРГУМЕНТ, которая возвращает значение угла в радианах.
22. Для перевода значения углов из радиан в градусы можно воспользоваться функцией ГРАДУСЫ.
23. Рабочий лист после выполнения всех операций должен выглядеть, как показано на рисунке 3.2.
24. Изменение режима нагрузки позволяет автоматически пересчитать нужные параметры электрической цепи.

Режим показа формул представлен на рисунке 3.3.

При обрыве нейтрального провода необходимо рассчитывать на-

	A	B	C	D	E	F
1	Расчет электрической цепи комплексным методом					
2						
3	Расчет источника			Расчет нагрузки		
4	Ea (В)	220	Za (Ом)	100	Ia (А)	2,2
5	Eb (В)	-110-190,525j	Zb (Ом)	86,6+50j	Ib (А)	-1,90530883358868-1,09999489977559j
6	Ec (В)	-110+190,525j	Zc (Ом)	86,6-50j	Ic (А)	-1,90530883358868+1,09999489977559j
7						
8	Ток в нейтральном проводе				In (А)	-1,61061766717736
9						
10	Действительное значение величин					
11	Ea (В)	220,0	Za (Ом)	100,0	Ia (А)	2,2
12	Eb (В)	220,0	Zb (Ом)	100,0	Ib (А)	2,2
13	Ec (В)	220,0	Zc (Ом)	100,0	Ic (А)	2,2
14						
15					In (А)	1,6
16	Сдвиги фаз в радианах					
17		генератора		нагрузки		между напряжением и током фаз
18	фа	0,000		0,000		0,000
19	фб	-2,094		0,524		-2,618
20	фс	2,094		-0,524		2,618
21						
22	Сдвиги фаз в градусах					
23	фа	0		0		0
24	фб	-120,00		30,00		-150,00
25	фс	120,00		-30,00		150,00
26						

Рис. 3.2 – Рабочий лист Excel с комплексным методом расчета электрических цепей переменного тока

1	Расчет электрической цепи комплексным методом					
2						
3	Расчет источника			Расчет нагрузки		
4	Ea (В)	=КОМПЛЕКСН(220; Za (Ом))		=КОМПЛЕКСН(Ia (А))		=МНИМ.ДЕЛ(B4;D4)
5	Eb (В)	=КОМПЛЕКСН(-110 Zb (Ом))		=КОМПЛЕКСН(Ib (А))		=МНИМ.ДЕЛ(B5;D5)
6	Ec (В)	=КОМПЛЕКСН(-110 Zc (Ом))		=КОМПЛЕКСН(Ic (А))		=МНИМ.ДЕЛ(B6;D6)
7						
8	Ток в нейтральном проводе				In (А)	=МНИМ.СУММ(F4;F5;F6)
9						
10	Действительное значение величин					
11	Ea (В)	=МНИМ.ABS(B4)	Za (Ом)	=МНИМ.ABS(D4 Ia (А))		=МНИМ.ABS(F4)
12	Eb (В)	=МНИМ.ABS(B5)	Zb (Ом)	=МНИМ.ABS(D5 Ib (А))		=МНИМ.ABS(F5)
13	Ec (В)	=МНИМ.ABS(B6)	Zc (Ом)	=МНИМ.ABS(D6 Ic (А))		=МНИМ.ABS(F6)
14						
15					In (А)	=МНИМ.ABS(F8)
16	Сдвиги фаз в радианах					
17		генератора		нагрузки		между напряжением и током фаз
18	фа	=МНИМ.АРГУМЕНТ(B4)		=МНИМ.АРГУМЕНТ(D4)		=МНИМ.АРГУМЕНТ(F4)
19	фб	=МНИМ.АРГУМЕНТ(B5)		=МНИМ.АРГУМЕНТ(D5)		=МНИМ.АРГУМЕНТ(F5)
20	фс	=МНИМ.АРГУМЕНТ(B6)		=МНИМ.АРГУМЕНТ(D6)		=МНИМ.АРГУМЕНТ(F6)
21						
22	Сдвиги фаз в градусах					
23	фа	=ГРАДУСЫ(B18)		=ГРАДУСЫ(D18)		=ГРАДУСЫ(F18)
24	фб	=ГРАДУСЫ(B19)		=ГРАДУСЫ(D19)		=ГРАДУСЫ(F19)
25	фс	=ГРАДУСЫ(B20)		=ГРАДУСЫ(D20)		=ГРАДУСЫ(F20)
26						

Рис. 3.3 – Рабочий лист Excel расчета электрических цепей переменного тока в режиме показа формул

пряжение смещения нейтрали U_{N-n} по формуле:

$$\dot{U}_{N-n} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_a + \dot{E}_B \underline{Y}_b + \dot{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N} = \frac{\frac{\dot{E}_A}{\underline{Z}_a} + \frac{\dot{E}_B}{\underline{Z}_b} + \frac{\dot{E}_C}{\underline{Z}_c}}{\frac{1}{\underline{Z}_a} + \frac{1}{\underline{Z}_b} + \frac{1}{\underline{Z}_c} + \frac{1}{\underline{Z}_N}}. \quad (14)$$

Для вычисления комплексных проводимостей $\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}$ необходимо воспользоваться функцией МНИМ.ДЕЛ, а для вычисления произведения $\dot{E}_a \cdot \underline{Y}_a$ – функцией МНИМ.ПРОИЗВЕД.

Часть рабочего листа с расчетом напряжения смещения нейтрали выглядит так, как показано на рисунке 3.4 (режим показа формул на рис. 3.5).

	A	B	C	D	E
27	Проводимости фаз				
28	Ya (См)	0,01			
29	Yb (См)	0,0086603810567665-0,00500022000968043j			
30	Yc (См)	0,0086603810567665+0,00500022000968043j			
31					
32	Ea·Ya	2,2			
33	Eb·Yb	-1,90530883358868-1,09999489977559j			
34	Ec·Yc	-1,90530883358868+1,09999489977559j			
35					
36	Напряжение смещения нейтрали				
37	UN-n	-58,9521500346273			
38					

Рис. 3.4 – Часть рабочего листа Excel с комплексным методом расчета напряжения смещения нейтрали в трехпроводной трехфазной электрической цепи

D42					
	A	B	C	D	E
27	Проводимости фаз				
28	Ya (См)	=МНИМ.ДЕЛ(1;D4)			
29	Yb (См)	=МНИМ.ДЕЛ(1;D5)			
30	Yc (См)	=МНИМ.ДЕЛ(1;D6)			
31					
32	Ea·Ya	=МНИМ.ПРОИЗВЕД(B4;B28)			
33	Eb·Yb	=МНИМ.ПРОИЗВЕД(B5;B29)			
34	Ec·Yc	=МНИМ.ПРОИЗВЕД(B6;B30)			
35					
36	Напряжение смещения нейтрали				
37	UN-n	=МНИМ.ДЕЛ(МНИМ.СУММ(B32;B33;B34);МНИМ.СУММ(B28;B30))			
38					
39					

Рис. 3.5 – Часть рабочего листа Excel с комплексным методом расчета напряжения смещения нейтрали в режиме показа формул

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА В ПРОГРАММЕ ELECTRONICS WORKBENCH

Цель работы заключается в экспериментальном исследовании нормальных и аварийных режимов работы трехфазной цепи с использованием программы Electronics Workbench.

Задачи работы состоят в том, чтобы осуществить опытные проверки основных соотношений в трехфазной системе при соединении приемников звездой и треугольником для симметричной и несимметричной нагрузок фаз, а также в аварийном режиме.

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал, в котором изложены общие сведения о трехфазных цепях при соединении нагрузки звездой и треугольником.

2. Сделать анализ построения векторных диаграмм напряжений и токов для следующих режимов работы трехфазной системы при соединении приемника звездой без нулевого провода в случаях, когда:

- а) активная нагрузка одинаковая во всех фазах;
- б) активная нагрузка во всех фазах разная;
- в) активная нагрузка в фазах А и В одинаковая, а линейный провод фазы С разорван.

3. Сделать анализ построения векторных диаграмм напряжений и токов для следующих режимов работы трехфазной системы при соединении приемников треугольником:

- а) активная нагрузка одинаковая во всех фазах;
- б) активная нагрузка во всех фазах разная;
- в) активная нагрузка одинаковая во всех фазах, но один из линейных проводов оборван;
- г) активная нагрузка в фазах АВ и ВС одинаковая, а третья фаза СА отключена.

Записать выражение для активной, реактивной и полной мощности трехфазного тока при соединении нагрузки звездой и треугольником для случая симметричной и несимметричной нагрузки.

Рабочее задание

Собрать трехфазную цепь, представленную на рисунке 4.1.

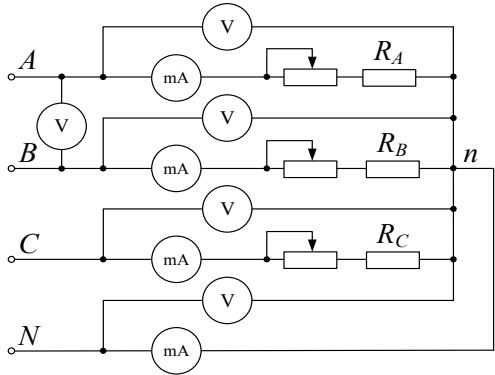


Рис. 4.1 – Трехфазная цепь с соединением нагрузки звездой

Для этого необходимо запустить программу ELECTRONICS WORKBENCH.

Для работы необходимо загрузить необходимые элементы электрической цепи. При нажатии кнопки  открывается окно, в котором курсором необходимо пометить файл <zv.ewb> и нажать кнопку «Ок». Появится набор элементов для сборки электрической цепи (рис. 4.2).

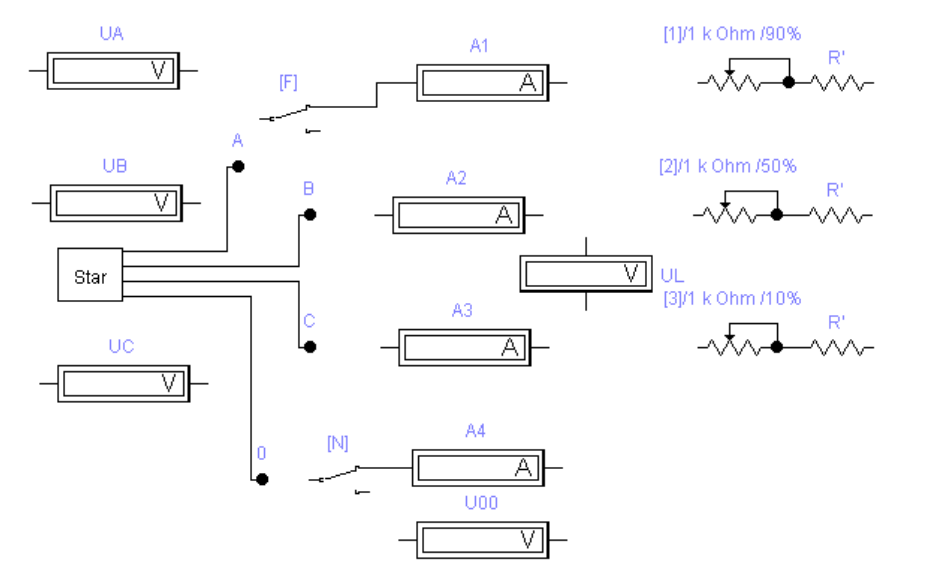


Рис. 4.2 – Элементы программы ELECTRONICS WORKBENCH

Все элементы электрической цепи соединяются проводниками в соответствии с электрической принципиальной схемой (рис. 4.1). Собранная схема приведена на рисунке 4.3.

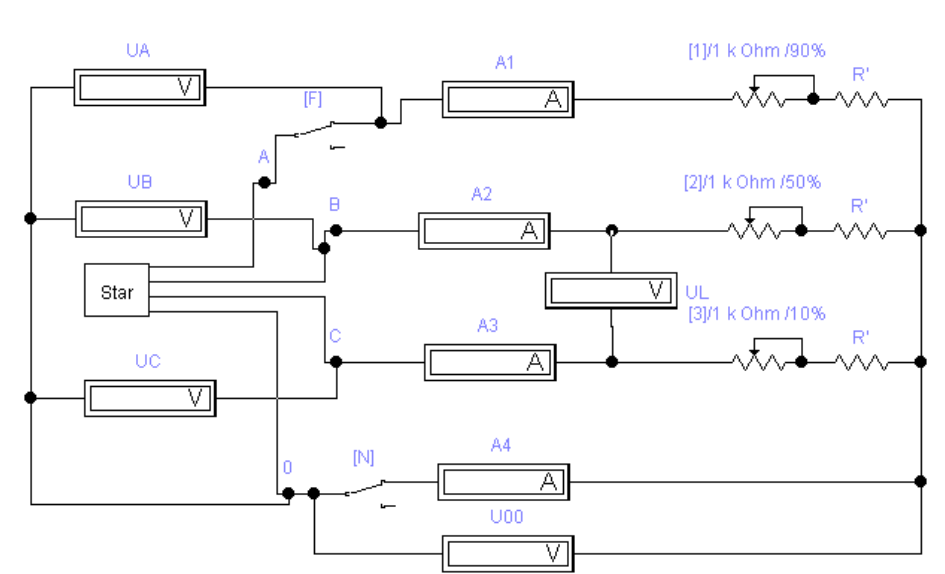


Рис. 4.3 – Собранная цепь программы ELECTRONICS WORKBENCH

После проверки собранной схемы преподавателем подключить ее к источнику трехфазного напряжения (необходимо нажать кнопку в верхнем правом углу ).

Изменяя сопротивления нагрузки (клавиши 1, 2, 3), исследовать режимы, указанные в пунктах таблицы 1. При необходимости отключить нейтральный провод в цепи (рис. 4.3). Результаты измерений свести в таблицу 4.1. Обесточить схему.

Таблица 4.1 – Данные результатов измерений соединения звездой

Соединение приемника звездой	Характер нагрузки	ИЗМЕРЕНО								ВЫЧИСЛЕНО			
		U	U _A	U _B	U _C	U _N	I _A	I _B	I _C	I _N	P _A	P _B	P _C
		В	В	В	В	В	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт
Звезда с нейтральным проводом	Симметричная												
	Несимметричная												
	Обрыв фазы												
Звезда без нейтрального провода	Симметричная												
	Несимметричная												
	Обрыв фазы												

При отключенном питании собрать новую цепь (рис. 4.4).

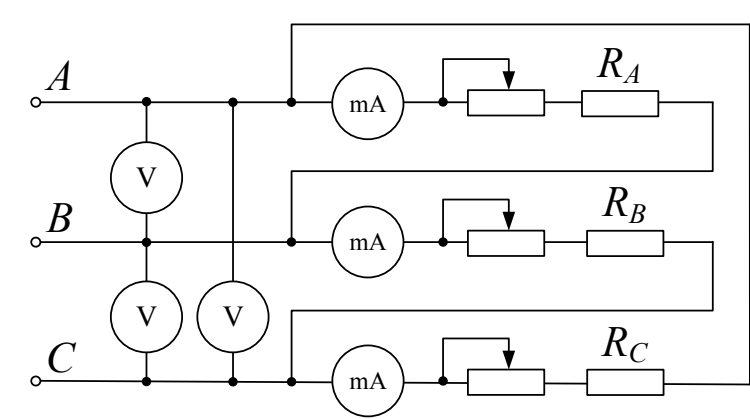


Рис. 4.4 – Трехфазная цепь с соединением нагрузки «треугольник»

Для работы необходимо загрузить необходимые элементы электрической цепи. При нажатии кнопки  открывается окно, в котором курсором необходимо пометить файл <tr.ewb> и нажать кнопку «Ок». Появится набор элементов для сборки электрической цепи (рис. 4.5).

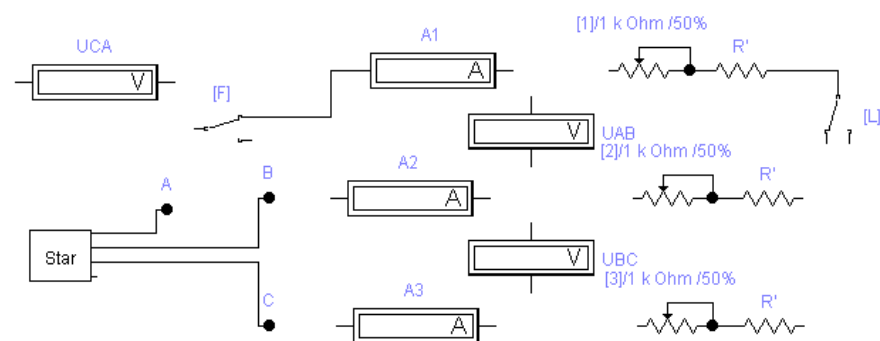


Рис. 4.5 – Элементы программы *ELECTRONICS WORKBENCH*

Все элементы электрической цепи соединяются проводниками в соответствии с электрической принципиальной схемой (рис. 4.4). Собранная схема приведена на рисунке 4.6.

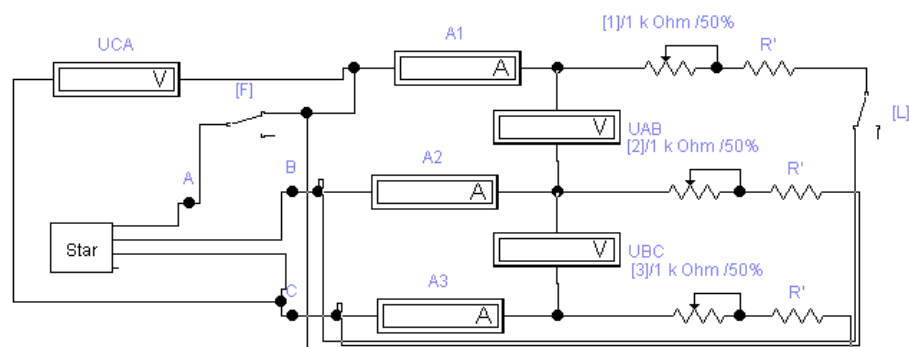


Рис. 4.6 – Собранная цепь программы *ELECTRONICS WORKBENCH*

После проверки собранной схемы преподавателем подключить ее к источнику трехфазного напряжения (необходимо нажать кнопку в верхнем правом углу).

Изменяя сопротивление нагрузки (клавиши 1, 2, 3), исследовать режимы, указанные в пунктах таблицы 4.2. Результаты измерений свести в таблицу 4.2.

Обесточить исследуемую цепь.

Проверить соотношения между линейным и фазным напряжениями и токами для случая симметричной нагрузки трехпроводной цепи при соединении приемников энергии звездой и треугольником.

Обработка результатов эксперимента:

1. По данным п. 2, 4, 5 проверить соотношения между фазными и линейными величинами при симметричной нагрузке для случаев соединения звездой и треугольником.

2. Рассчитать активные мощности потребления цепью для всех режимов работы.

Таблица 4.2 – Данные результатов измерений соединения «треугольник»

Соединение приемника треугольником	ИЗМЕРЕНО						ВЫЧИСЛЕНО						
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C	I_A	I_B	I_C	P_{AB}	P_{BC}	P_{CA}	P_{Σ}
	В	В	В	А	А	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт
Равномерная нагрузка													
Неравномерная нагрузка													
Обрыв фазы А при равномерной нагрузке													
Обрыв линейного провода при равномерной нагрузке													

3. Построить векторные топографические диаграммы для следующих режимов:

- симметричный режим для соединения звездой (четырёхпроводная цепь);
- несимметричный режим для соединения звездой (трехпроводная цепь);
- обрыв фазы А для соединения звездой (трехпроводная цепь);
- несимметричный режим при соединении треугольником;
- обрыв линейного провода при равномерной нагрузке (соединение треугольником).

Содержание отчета

На тетрадных листах в клеточку подготовить индивидуальный отчет в нижеследующем порядке.

- Цель работы.
- Исследование трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой, в том числе:
 - выполнить эскиз схемы (рис. 4.1²);
 - заполнить таблицу 4.1;
 - выписать расчетные формулы;
 - выполнить эскиз векторной диаграммы.
- Исследование трехфазной цепи при соединении нагрузки в треугольнике, в том числе:
 - выполнить эскиз схемы рис. (4.4);
 - заполнить таблицу 4.2;
 - выписать расчетные формулы;

² Эскизы выполняются от руки, без применения чертежных инструментов, но используя все принятые правила и обозначения. Рекомендуется использовать цветные элементы.

- выполнить эскиз векторной диаграммы.
- 4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как производить определение порядка следования фаз?
2. Почему (в каких случаях) важно иметь определенный порядок следования фаз в трехфазной системе?
3. Каковы соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении звездой и равномерной нагрузке?
4. На какой угол опережает линейное напряжение при соединении симметричной нагрузки звездой фазное напряжение?
5. В чем заключается роль нейтрального провода?
6. В чем отличие соединения звездой с нейтральным проводом от соединения звездой без нейтрального провода?
7. Чем опасно короткое замыкание фазы при соединении звездой с нейтральным проводом?
8. Чем опасно короткое замыкание фазы при соединении треугольником?
9. Каковы соотношения между фазными и линейными токами и фазными и линейными напряжениями при соединении приемников треугольником?

5. ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНОЙ ДИАГРАММЫ В MICROSOFT VISIO

Для построения векторной диаграммы в графическом редакторе Visio потребуются значения модулей векторов тока и напряжений и аргументы их углов. Например,

$$\dot{E}_A = 127e^{j90^\circ} = j127,02 \text{ В};$$

$$\dot{E}_B = 127e^{-j30^\circ} = 110 - j63,509 \text{ В};$$

$$\dot{E}_C = 127e^{-j150^\circ} = -110 - j63,509 \text{ В}.$$

В программе Microsoft Visio на вкладке «ВИД» откроем панель «Области задач», а в ней откроем окно «Размер и положение» (см. рис. 5.1).

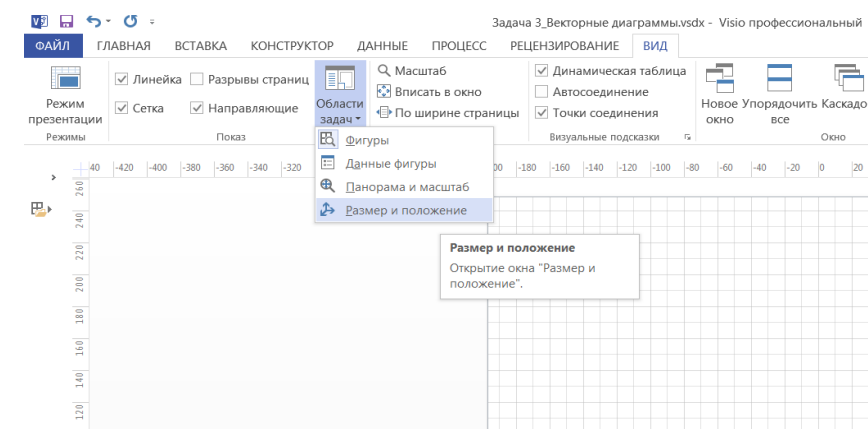


Рис. 5.1 – Открытие окна «Размер и положение»

Далее на рабочем поле рисунка строим несколько линий любой длины и произвольного направления. На каждой из этих линий наводим стрелку и задаем толщину стрелки (рис. 5.2).

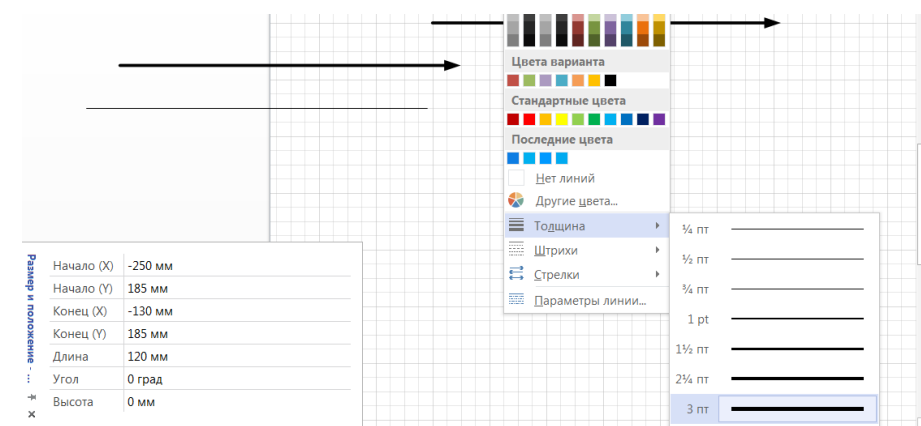


Рис. 5.2 – Выбор направления и толщины стрелки

Для каждого вектора в окне «Размер и положение» задаем желаемый модуль и аргумент. Например, один из векторов задан модулем 75 мм, углом – 30 град, началом вектора по оси «X» – 100 мм, началом по оси «Y» – 72 мм (рис. 5.3).

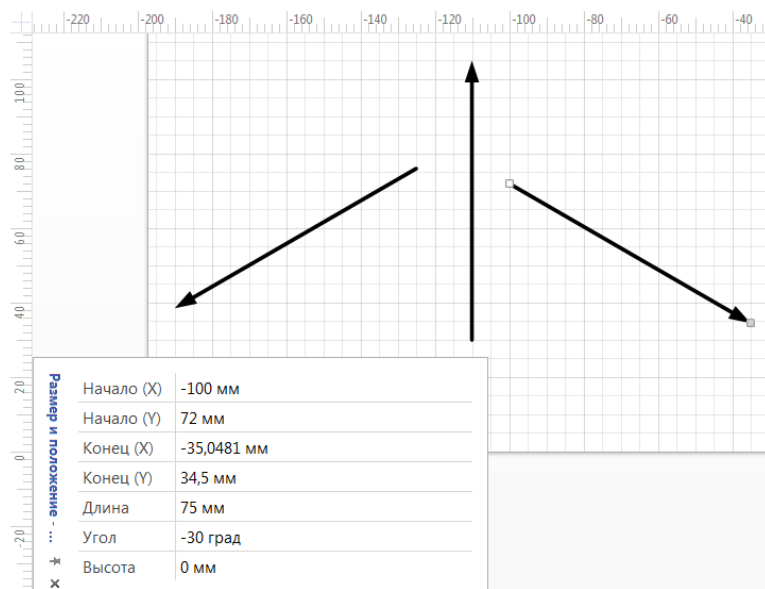


Рис. 5.3 – Размер и положение отдельного вектора

Далее следует свести все вектора в той последовательности, которая требуется, и диаграмма будет завершена.

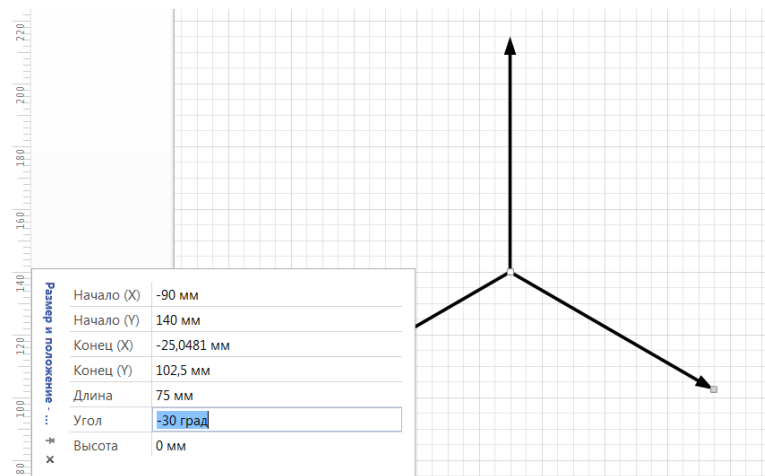


Рис. 5.4 – Итоговая векторная диаграмма

Готовые диаграммы следует группировать и использовать для построения более сложных диаграмм.

Использование окна «Размер и положение» в программе Microsoft Visio позволяет находить результаты графического построения сумм и разностей векторов, на что укажут поля «Длина» и «Угол» вектора.

6. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

6.1. Расчет симметричного режима трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой

К симметричному трехфазному генератору (рис. 6.1) с фазной ЭДС $E = 220$ В и внутренним сопротивлением $\underline{Z}_r = 0,2 + j0,4$ Ом через линию, сопротивление каждого провода которой $\underline{Z}_{лр} = 0,21 + j1,6$ Ом, подключена симметричная нагрузка $\underline{Z} = 7,8 + j3,2$ Ом, соединенная звездой. Определить напряжение между точками k и b .

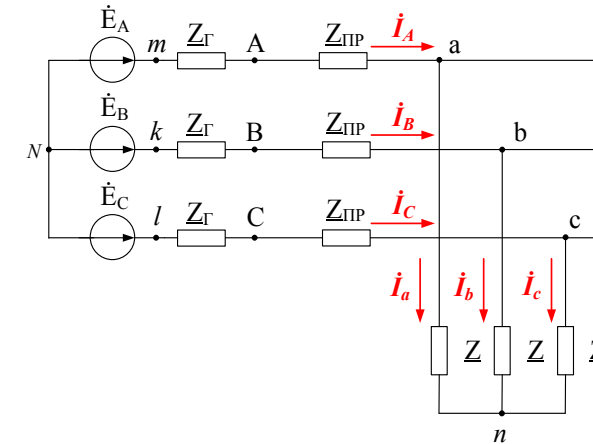


Рис. 6.1 – Расчетная схема

Фазные ЭДС генератора в комплексном виде:

$$\dot{E}_A = E_A = 220 \text{ В},$$

$$\dot{E}_B = \dot{E}_A e^{-j120^\circ} = 220 e^{-j120^\circ} = 220 \left(-0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -110 - j190,52 \text{ В},$$

$$\dot{E}_C = \dot{E}_A e^{j120^\circ} = 220 e^{j120^\circ} = 220 \left(-0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -110 + j190,52 \text{ В}.$$

Ввиду полной симметрии системы напряжение между нулевыми точками генератора и нагрузки равно нулю. Каждую фазу можно рассматривать независимо от других фаз и вести расчет по одной фазе, к примеру, фазе А.

Определим ток в фазе А по закону Ома (учитывая, что $\dot{E}_A = 220$ В):

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{\underline{Z}_\phi} = \frac{\dot{E}_A}{\underline{Z}_r + \underline{Z}_{лр} + \underline{Z}_A} = \frac{220}{0,2 + j0,4 + 0,21 + j1,6 + 7,8 + j3,2} = 21,17 e^{-j30^\circ} = 18,33 - j10,59 \text{ А}.$$

Токи в фазах В и С соответственно:

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B}{\underline{Z}_\phi} = \dot{I}_A e^{-j120^\circ} = 21,17 e^{-j150^\circ} = -18,33 - j10,59 \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C}{\underline{Z}_\phi} = \dot{I}_A e^{j120^\circ} = 21,17 e^{j90^\circ} = j21,17 \text{ А}.$$

Фазные токи совпадают с линейными токами.

Проверка:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 18,33 - j10,59 - 18,33 - j10,59 + j21,17 = 0,01 \approx 0.$$

Фазные напряжения на зажимах генератора, учитывая, что напряжения в других фазах сдвинуты соответственно на 120 и 240°:

$$\dot{U}_{A-N} = \dot{E}_A - \dot{I}_A \underline{Z}_r = 220 - (18,33 - j10,59) \cdot (0,2 + j0,4) =$$

$$= 212,098 - j5,214 = 212,162 e^{-j1,41^\circ} \text{ В}$$

$$\dot{U}_{B-N} = \dot{E}_B - \dot{I}_B \underline{Z}_r = -110 - j190,52 - (-18,33 - j10,59) \cdot (0,2 + j0,4) =$$

$$= -110,57 - j181,072 = 212,162 e^{-j121,41^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{C-N} = \dot{E}_C - \dot{I}_C \underline{Z}_r = -110 + j190,52 - (-j21,17) \cdot (0,2 + j0,4) =$$

$$= -101,528 + j186,292 = 212,162 e^{j118,59^\circ} \text{ В};$$

Фазные напряжения на нагрузке:

$$\dot{U}_{a-n} = \dot{I}_a \underline{Z} = (18,33 - j10,59) \cdot (7,8 + j3,2) = 176,862 - j23,946 = 178,476 e^{-j7,71^\circ} \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{b-n} = \dot{I}_b \underline{Z} = -109,168 - j141,195 = 178,476 e^{-j127,71^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{c-n} = \dot{I}_c \underline{Z} = -67,695 + j165,14 = 178,476 e^{j112,29^\circ} \text{ В.}$$

Линейные напряжения на выводах генератора:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{A-N} - \dot{U}_{B-N} = 212,098 - j5,214 - (-110,57 - j181,072) = 322,668 + j175,858 =$$

$$= 367,479 e^{j28,59^\circ} = \sqrt{3} \dot{U}_{A-N} e^{j30^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{B-N} - \dot{U}_{C-N} = -110,57 - j181,072 - (-101,528 + j186,292) = -9,042 - j367,364 =$$

$$= 367,475 e^{-j91,41^\circ} = \sqrt{3} \dot{U}_{A-N} e^{-j90^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{C-N} - \dot{U}_{A-N} = -101,528 + j186,292 - (212,098 - j5,214) = -313,626 + j191,506 =$$

$$= 367,472 e^{j148,59^\circ} = \sqrt{3} \dot{U}_{A-N} e^{j150^\circ} \text{ В.}$$

Линейные напряжения на нагрузке:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{a-n} - \dot{U}_{b-n} = 286,03 + j117,249 = 309,129 e^{j22,29^\circ} = \sqrt{3} \dot{U}_{a-n} e^{j30^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{b-n} - \dot{U}_{c-n} = -41,473 - j306,335 = 309,13 e^{-j97,71^\circ} = \sqrt{3} \dot{U}_{a-n} e^{-j90^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{c-n} - \dot{U}_{a-n} = -244,557 + j189,086 = 309,13 e^{j142,29^\circ} = \sqrt{3} \dot{U}_{a-n} e^{j150^\circ} \text{ В.}$$

Активная мощность, вырабатываемая генератором:

$$P_r = 3 E_A I_A \cos \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 21,17 \cos(-30^\circ) = 12100,28 \text{ Вт.}$$

где φ – угол между вектором напряжения и тока фазы А.

Мощность, потребляемая нагрузкой:

$$P_n = 3 I_A^2 R = 3 \cdot 21,17^2 \cdot 7,8 = 10487,15 \text{ Вт.}$$

Составим баланс активной и реактивной мощностей генератора и нагрузки и проверим его выполнимость.

Полная мощность генератора в комплексном виде:

$$\underline{S}_r = 3 \dot{E}_A \dot{I}_A^* = 3 \cdot 220 \cdot 21,17 e^{j30^\circ} = 13972,2 e^{j30^\circ} = 12100,28 + j6986,1 \text{ ВА},$$

где I_A – сопряженное значение тока фазы «А», если $I_A = 21,17 e^{-j30^\circ}$, то $I_A^* = 21,17 e^{j30^\circ}$.

Активная мощность генератора $P_r = 12100,28 \text{ Вт}$, реактивная мощность – $Q_r = 6986,1 \text{ ВАр}$.

Потребляемая активная мощность складывается из мощностей расхода на внутреннем сопротивлении генератора, сопротивлении линии и нагрузки:

$$P = 3 \cdot (P_0 + P_{np} + P_n) = 3 \cdot I_A^2 (R_0 + R_{np} + R_n) = 3 \cdot 21,17^2 \cdot 9 = 12100,56 \text{ Вт},$$

реактивная мощность в элементах внутреннего сопротивления генератора, линии и приемника:

$$Q = 3 \cdot (Q_0 + Q_{np} + Q_n) = 3 \cdot 21,17^2 \cdot 5,2 = 6991,435 \text{ ВАр}.$$

Допускается расхождение баланса активных мощностей и реак-

$$\Delta P = \frac{|P_r - P|}{P_r} \cdot 100\% = \frac{|12100,28 - 12100,56|}{12100,28} \cdot 100\% = 2,3 \cdot 10^{-3}\% < 0,5\%$$

тивных мощностей:

$$\Delta Q = \frac{|Q_r - Q|}{Q_r} \cdot 100\% = \frac{|6986,1 - 6991,435|}{6986,1} \cdot 100\% = 0,07\% < 0,5\%.$$

Поскольку баланс активных и реактивных мощностей выполняется, то расчет произведен верно.

Построение топографической диаграммы.

Рассчитаем потенциалы всех точек схемы (см. рис. 6.1), приняв потенциал нейтральной точки генератора N равным нулю:

$$\dot{\phi}_N = 0;$$

$$\dot{\phi}_m = \dot{E}_A = 220 \text{ В};$$

$$\dot{\phi}_A = \dot{\phi}_m - \dot{I}_A \underline{Z}_r = 220 - (18,33 - j10,59) \cdot (0,2 + j0,4) = 212,098 - j5,214 \text{ В};$$

$$\dot{\phi}_a = \dot{\phi}_A - \dot{I}_a \underline{Z}_{np} = 212,098 - j5,214 - (18,33 - j10,59) \cdot (1 + j1,6) = 176,824 - j23,952 \text{ В};$$

$$\dot{\phi}_n = \dot{\phi}_a - \dot{I}_a \underline{Z} = 176,824 - j23,952 - (18,33 - j10,59) \cdot (7,8 + j3,2) = -0,038 - j6 \cdot 10^{-3} \approx 0 \text{ В};$$

$$\dot{\phi}_k = \dot{E}_B = -110 - j190,52 \text{ В};$$

$$\dot{\phi}_B = \dot{\phi}_k - \dot{I}_B \underline{Z}_r = -110 - j190,52 - (-18,33 - j10,59) \cdot (0,2 + j0,4) = -110,57 - j181,07 \text{ В};$$

$$\dot{\phi}_b = \dot{\phi}_B - \dot{I}_B \underline{Z}_{np} = -110,57 - j181,07 - (-18,33 - j10,59) \cdot (1 + j1,6) = -109,184 - j141,152 \text{ В};$$

$$\dot{\phi}_n = \dot{\phi}_b - \dot{I}_b \underline{Z} = -109,184 - j141,152 - (-18,33 - j10,59) \cdot (7,8 + j3,2) = 0,098 + j0,106 \approx 0 \text{ В};$$

$$\dot{\phi}_l = \dot{E}_C = -110 + j190,52 \text{ В};$$

$$\dot{\phi}_C = \dot{\phi}_l - \dot{I}_C \underline{Z}_r = -110 + j190,52 - j21,17 \cdot (0,2 + j0,4) = -101,532 + j186,29 \text{ В};$$

$$\dot{\phi}_c = \dot{\phi}_C - \dot{I}_C \underline{Z}_{np} = -101,532 + j186,29 - j21,17 \cdot (1 + j1,6) = -67,66 + j165,12 \text{ В};$$

$$\dot{\varphi}_n = \dot{\varphi}_c - \dot{I}_c Z = -67,66 + j165,12 - j21,17 \cdot (7,8 + j3,2) = 0,084 - j6 \cdot 10^{-3} \approx 0 \text{ В.}$$

Совмещенная векторная диаграмма токов и потенциальная диаграмма напряжений представлена на рисунке 6.2.

Определим напряжение между точками k и b :

$$\dot{U}_{k-b} = \dot{\varphi}_k - \dot{\varphi}_b = (-110 - j190,52) - (-109,184 - j141,152) = -0,816 - j49,368 = 49,375 e^{-j90,95^\circ} \text{ В,}$$

мгновенное значение напряжения:

$$u_{k-b}(t) = 49,375\sqrt{2} \sin(\omega t - 90,95^\circ) \text{ В.}$$

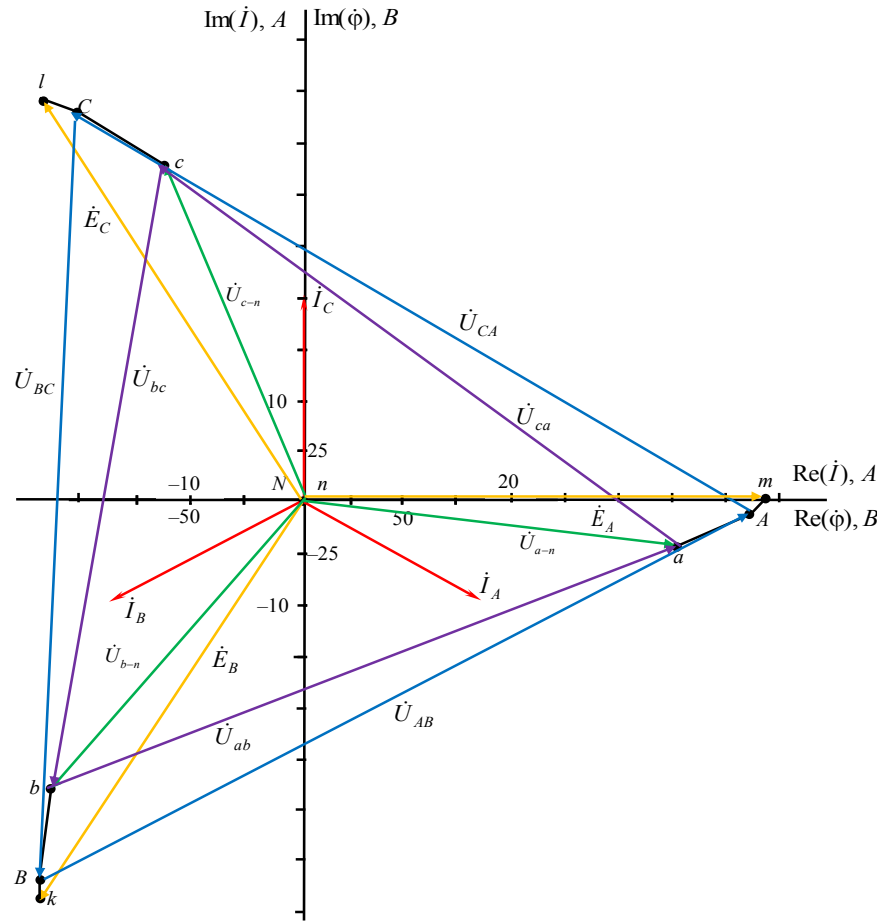


Рис. 6.2 – Векторная диаграмма токов и потенциальная диаграмма напряжений

6.2. Расчет несимметричного режима трехфазной сети

Рассчитать несимметричный режим работы трехфазной сети, используя данные предыдущего примера. Несимметричный режим возникает вследствие короткого замыкания на активном сопротивлении в фазе «А» ($R_A = 0$) (рис. 6.3).

Между нулевыми точками генератора и нагрузки ($N-n$) возникает напряжение смещения нейтрали по формуле:

$$\dot{U}_{N-n} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_A + \dot{E}_B \underline{Y}_B + \dot{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_{N-n}}. \quad (14)$$

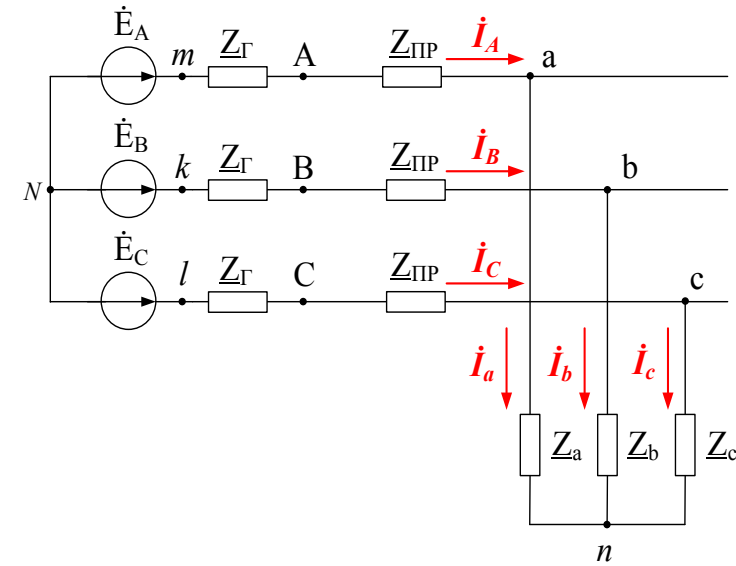


Рис. 6.3 – Расчетная схема

Для определения величины $\dot{U}_{N-n}$ вычислим полные комплексные проводимости фаз, помня о том, что комплексное сопротивление нагрузки фазы А равно $\underline{Z}_a = j3,2 \text{ Ом}$, сопротивления нагрузки фаз В и С $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z} = 7,8 + j3,2 \text{ Ом}$:

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_\Gamma + \underline{Z}_{\Pi\Gamma} + \underline{Z}_a} = \frac{1}{0,2 + j0,4 + 1 + j1,6 + j3,2} = 0,042 - j0,183 \text{ См;}$$

$$\underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_\Gamma + \underline{Z}_{\Pi\Gamma} + \underline{Z}} = \frac{1}{0,2 + j0,4 + 1 + j1,6 + 7,8 + j3,2} = 0,083 - j0,048 \text{ См,}$$

проводимость нейтрального провода $\underline{Y}_N = 0$.

Фазные ЭДС генератора в комплексном виде:

$$\dot{E}_A = E_A = 220 \text{ В;}$$

$$\dot{E}_B = \dot{E}_A e^{-j120^\circ} = 220 e^{-j120^\circ} = 220 \left(-0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -110 - j190,52 \text{ В;}$$

$$\dot{E}_C = \dot{E}_A e^{j120^\circ} = 220 e^{j120^\circ} = 220 \left(-0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -110 + j190,52 \text{ В.}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{N-n} &= \frac{220(0,042 - j0,183) + ((-110 - j190,52) + (-110 + j190,52))(0,083 - j0,048)}{0,042 - j0,183 + 2(0,083 - j0,048)} = \\ &= \frac{-9,02 - j29,7}{0,208 - j0,279} = 52,93 - j71,79 = 89,193 e^{-j53,6^\circ} \text{ В.} \end{aligned}$$

Токи всех фаз в соответствии с (14):

$$\dot{I}_A = (\dot{E}_A - \dot{U}_{N-n}) \underline{Y}_a = 20,155 - j27,559 = 34,143e^{-j53,82^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = (\dot{E}_B - \dot{U}_{N-n}) \underline{Y}_b = -19,222 - j2,034 = 19,33e^{-j173,96^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = (\dot{E}_C - \dot{U}_{N-n}) \underline{Y}_c = -0,932 + j29,592 = 29,607e^{j91,8^\circ} \text{ A}.$$

Проверка показывает, что $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 1 \cdot 10^{-3} - j1 \cdot 10^{-3} \approx 0$.

Напряжения на фазах нагрузки:

$$\dot{U}_{a-n} = \dot{I}_A \underline{Z}_a = (20,155 - j27,559) \cdot j3,2 = 88,199 + j64,496 = 109,265e^{j36,18^\circ} \text{ B};$$

$$\dot{U}_{b-n} = \dot{I}_B \underline{Z}_b = (-19,222 - j2,034) \cdot (7,8 + j3,2) = -143,423 - j77,376 = 162,964e^{-j151,65^\circ} \text{ B};$$

$$\dot{U}_{c-n} = \dot{I}_C \underline{Z}_c = (-0,932 + j29,592) \cdot (7,8 + j3,2) = -101,964 + j227,835 = 249,611e^{j114,11^\circ} \text{ B}.$$

Напряжение на каждой фазе генератора:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A-N} &= \dot{E}_A - \dot{I}_A \underline{Z}_r = 220 - (20,155 - j27,559) \cdot (0,2 + j0,4) = 204,945 - j2,55 = \\ &= 204,961e^{-j0,71^\circ} \text{ B}; \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{B-N} = \dot{E}_B - \dot{I}_B \underline{Z}_r = -106,962 - j182,424 = 211,47e^{-j120,39^\circ} \text{ B};$$

$$\dot{U}_{C-N} = \dot{E}_C - \dot{I}_C \underline{Z}_r = -97,977 + j184,974 = 209,32e^{j117,91^\circ} \text{ B}.$$

Линейные напряжения на выводах генератора и нагрузки:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{A-N} - \dot{U}_{B-N} = 311,907 + j179,874 = 360,057e^{j29,97^\circ} \text{ B};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{B-N} - \dot{U}_{C-N} = -8,985 - j367,398 = 367,508e^{-j91,4^\circ} \text{ B};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{C-N} - \dot{U}_{A-N} = -302,922 + j187,524 = 356,268e^{j148,24^\circ} \text{ B};$$

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{a-n} - \dot{U}_{b-n} = 231,622 + j141,872 = 271,618e^{j31,49^\circ} \text{ B};$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{b-n} - \dot{U}_{c-n} = -41,459 - j305,211 = 379,74e^{-j97,74^\circ} \text{ B};$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{c-n} - \dot{U}_{a-n} = -190,163 + j163,339 = 250,682e^{j139,34^\circ} \text{ B}.$$

Активная мощность, вырабатываемая генератором, складывается из активных мощностей каждой фазы генератора: $P_r = P_A + P_B + P_C$.

Определим активную мощность каждой фазы генератора:

$$P_A = \operatorname{Re} \left[\dot{E}_A \dot{I}_A^* \right] = \operatorname{Re} [220 \cdot (20,155 + j27,559)] = 4434,1 \text{ Bm};$$

$$P_B = \operatorname{Re} \left[\dot{E}_B \dot{I}_B^* \right] = \operatorname{Re} [(-110 - j190,52) \cdot (-19,222 + j2,034)] = 2501,938 \text{ Bm};$$

$$P_C = \operatorname{Re} \left[\dot{E}_C \dot{I}_C^* \right] = \operatorname{Re} [(-110 + j190,52) \cdot (-0,932 - j29,592)] = 5740,388 \text{ Bm}.$$

Тогда $P_r = 12676,426 \text{ Bm}$.

Мощность, расходуемая в нагрузке, равна сумме активных мощностей фаз B и C, так как в нагрузке фазы A отсутствует резистивное сопротивление: $P_n = I_B^2 R + I_C^2 R = 19,33^2 \cdot 7,8 + 29,607^2 \cdot 7,8 = 9751,742 \text{ Bm}$.

Составим баланс активной и реактивной мощностей генератора и нагрузки и проверим его выполнимость.

Комплексная мощность генератора:

$$\begin{aligned} S_r &= \dot{E}_A \dot{I}_A^* + \dot{E}_B \dot{I}_B^* + \dot{E}_C \dot{I}_C^* = 220 \cdot (20,155 + j27,559) + \\ &+ (-110 - j190,52) \cdot (-19,222 + j2,034) + (-110 + j190,52) \cdot (-0,932 - j29,592) = \\ &= 13972,2e^{j30^\circ} = 12676,426 + j12578,971 \text{ BVA}. \end{aligned}$$

Активная мощность генератора $P_r = 12676,426 \text{ Bm}$, реактивная мощность – $Q_r = 12578,971 \text{ BAr}$.

Потребляемая активная мощность складывается из мощностей расхода на внутреннем сопротивлении фаз генератора, сопротивлений линии и нагрузки: $P = P_A + P_B + P_C = 12650,903 \text{ Bm}$, реактивная мощность в элементах внутреннего сопротивления генератора, линии и приемника каждой фазы: $Q = Q_A + Q_B + Q_C = 12563,033 \text{ BAr}$.

Допускается расхождение баланса активных мощностей:

$$\Delta P = \frac{|P_r - P|}{P_r} \cdot 100\% = \frac{|12676,426 - 12650,903|}{12676,426} \cdot 100\% = 0,2\% < 0,5\%$$

и реактивных мощностей:

$$\Delta Q = \frac{|Q_r - Q|}{Q_r} \cdot 100\% = \frac{|12578,971 - 12563,033|}{12578,971} \cdot 100\% = 0,13\% < 0,5\%.$$

Поскольку баланс активных и реактивных мощностей сходится, то расчет произведен верно.

Произведем построение топографической диаграммы. Рассчитаем потенциалы всех точек схемы (см. рис. 4.3), приняв потенциал нейтральной точки генератора N равным нулю:

$$\phi_N = 0;$$

$$\phi_m = \dot{E}_A = 220 \text{ B};$$

$$\phi_A = \phi_m - \dot{I}_A \underline{Z}_r = 220 - (20,155 - j27,559) \cdot (0,2 + j0,4) = 204,945 - j2,55 \text{ B};$$

$$\begin{aligned} \phi_a &= \phi_A - \dot{I}_A \underline{Z}_{\text{лп}} = 204,945 - j2,55 - (20,155 - j27,559) \cdot (1 + j1,6) = \\ &= 140,696 - j7,239 \text{ B}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_n &= \phi_a - \dot{I}_A \underline{Z}_a = 140,696 - j7,239 - (20,155 - j27,559) \cdot j3,2 = \\ &= 52,507 - j71,735 \text{ B}; \end{aligned}$$

$$\phi_k = \dot{E}_B = -110 - j190,52 \text{ B};$$

$$\begin{aligned} \phi_B &= \phi_k - \dot{I}_B \underline{Z}_r = -110 - j190,52 - (-19,222 - j2,034) \cdot (0,2 + j0,4) = \\ &= -106,969 - j182,424 \text{ B}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_b &= \phi_B - \dot{I}_B \underline{Z}_{\text{лп}} = -106,969 - j182,424 - (-19,222 - j2,034) \cdot (1 + j1,6) = \\ &= -91,001 - j149,635 \text{ B}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_n &= \phi_b - \dot{I}_B \underline{Z}_b = -91,001 - j149,635 - (-19,222 - j2,034) \cdot (7,8 + j3,2) = \\ &= 52,423 - j72,259 \text{ B}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{\varphi}_C &= \dot{\varphi}_l - \dot{I}_C \underline{Z}_T = -110 + j190,52 - (-0,932 + j29,592) \cdot (0,2 + j0,4) = \\ &= -97,977 + j184,974 \text{ В};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{\varphi}_c &= \dot{\varphi}_C - \dot{I}_C \underline{Z}_{\text{ЛП}} = -97,977 + j184,974 - (-0,932 + j29,592) \cdot (1 + j1,6) = \\ &= -49,698 + j156,873 \text{ В};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{\varphi}_n &= \dot{\varphi}_c - \dot{I}_C \underline{Z} = -49,698 + j156,873 - (-0,932 + j29,592) \cdot (7,8 + j3,2) = \\ &= 52,266 - j70,962 \text{ В}.\end{aligned}$$

Совмещенная векторная диаграмма токов и потенциальная диаграмма напряжений представлена на рисунке 6.4.

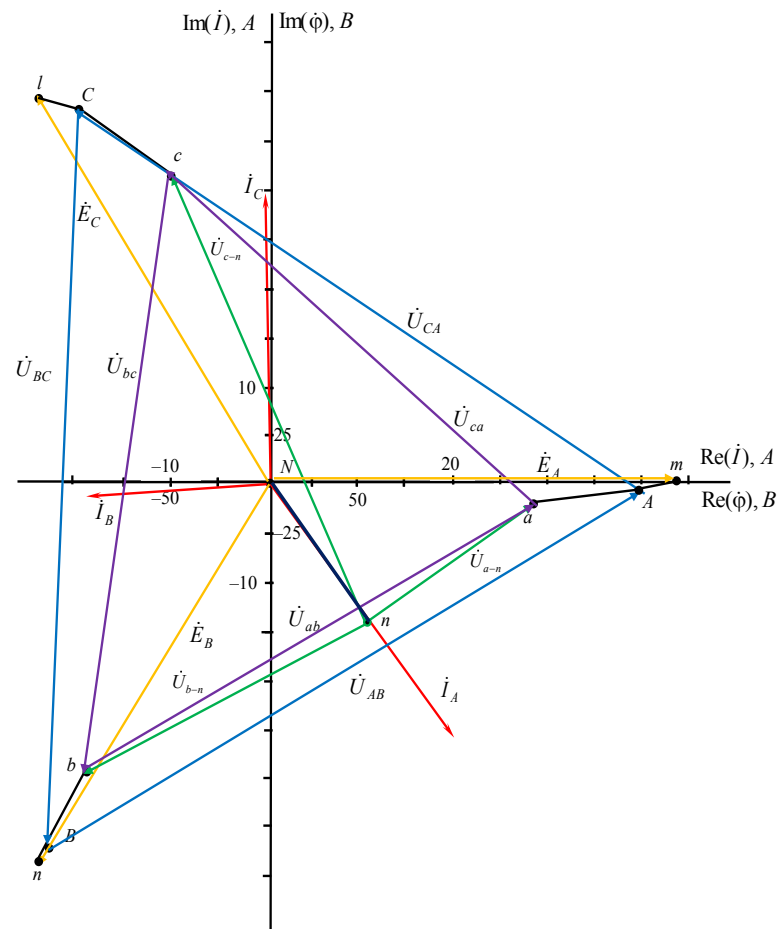


Рис. 6.4 – Векторная диаграмма токов и потенциальная диаграмма напряжений

Определим напряжение между точками k и b :

$$\begin{aligned}\dot{U}_{k-b} &= \dot{\varphi}_k - \dot{\varphi}_b = (-110 - j190,52) - (-91,001 - j149,635) = -18,999 - j40,885 = \\ &= 45,084 e^{-j114,9^\circ} \text{ В},\end{aligned}$$

мгновенное значение напряжения:

$$u_{k-b}(t) = 45,084\sqrt{2} \sin(\omega t - 114,9^\circ) \text{ В}.$$

6.3. Расчет соединения нагрузки звездой с нейтральным проводом

К симметричному трехфазному генератору G (рис. 6.5) с номинальным линейным действующим напряжением $U = 220 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $\underline{Z}_G = 0,1 + j0,5$ через линию электропередачи, сопротивление каждого провода которой $\underline{Z}_L = 0,5 + j2$, подключена несимметричная нагрузка, соединенная звездой с нейтральным проводом. Комплексные сопротивления нагрузок в алгебраической форме:

$$\underline{Z}_a = 19,4 + j7,5 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_b = 15,4 - j20,5 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_c = 23,5 - j2,5 \text{ Ом}.$$

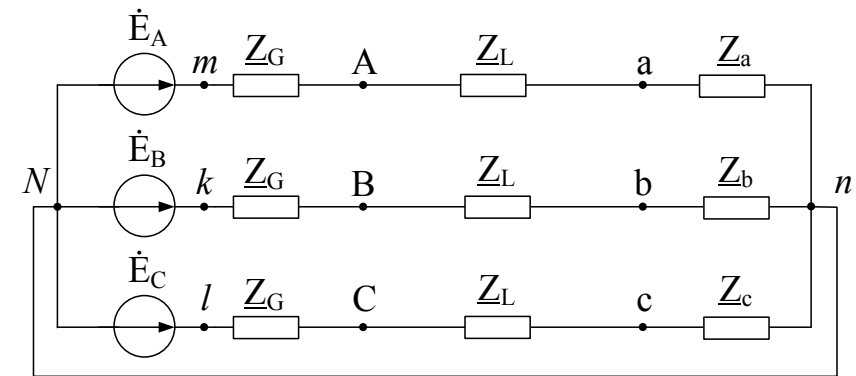


Рис. 6.5 – Расчет соединения нагрузки звездой с нейтральным проводом

ЭДС симметричного трехфазного источника имеют действующее значение E_ϕ меньше линейного напряжения в $\sqrt{3}$ раз:

$$E_\phi = \frac{U_\phi}{\sqrt{3}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В}.$$

Принимая начальный угол фазного напряжения E_A , $\psi_A = 90^\circ$, комплексные фазные ЭДС можно записать в виде:

$$\dot{E}_A = 127 e^{j90^\circ} = j127,02 \text{ В};$$

$$\dot{E}_B = 127 e^{-j30^\circ} = 110 - j63,509 \text{ В};$$

$$\dot{E}_C = 127 e^{-j150^\circ} = -110 - j63,509 \text{ В}.$$

Расчет полных сопротивлений каждой фазы:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_G + \underline{Z}_L + \underline{Z}_a = 20 + j10 = 22,4 e^{j27^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_B = \underline{Z}_G + \underline{Z}_L + \underline{Z}_b = 16 - j18 = 24,1 e^{-j48^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_C = \underline{Z}_G + \underline{Z}_L + \underline{Z}_c = 24,1 = 24,1 e^{j0^\circ} \text{ Ом}.$$

Тогда фазные токи определяются по закону Ома для каждой фазы:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{Z_A} = \frac{127e^{j90^\circ}}{22,4e^{j27^\circ}} = 5,6696e^{j63^\circ} A;$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B}{Z_B} = \frac{127e^{-j30^\circ}}{24,1e^{-j48^\circ}} = 5,273e^{j18^\circ} A;$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C}{Z_C} = \frac{127e^{-j150^\circ}}{24,1e^{j0^\circ}} = 5,2697e^{-j150^\circ} A.$$

Ток нейтрального провода в соответствии с первым законом Кирхгофа для нейтральной точки n :

$$\begin{aligned} \dot{I}_{N-n} &= \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 5,6696e^{j63^\circ} + 5,273e^{j18^\circ} + 5,2697e^{-j150^\circ} = \\ &= (2,6 + j5,1) + (5,1 + j1,5) + (-4,6 - j2,7) = 3,1 + j3,9 = 5,0e^{j52^\circ} A. \end{aligned}$$

Произведем построение топографической диаграммы. Рассчитаем потенциалы всех точек схемы (см. рис. 6.5), приняв потенциал нейтральной точки генератора N равным нулю:

$$\dot{\phi}_N = 0;$$

$$\dot{\phi}_m = \dot{E}_A = j127 = 127e^{j90^\circ} B;$$

$$\dot{\phi}_A = \dot{\phi}_m - \dot{I}_A Z_G = j127 - (2,540 + j5,081) \cdot (0,1 + j0,5) = 2,286 + j125,239 B;$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_a &= \dot{\phi}_A - \dot{I}_A Z_L = 2,286 + j125,239 - (2,540 + j5,081) \cdot (0,5 + j2) = \\ &= 11,178 + j117,618 B; \end{aligned}$$

$$\dot{\phi}_n = \dot{\phi}_a - \dot{I}_A Z_a = 11,178 + j117,618 - (2,540 + j5,081) \cdot (19,4 + j7,5) = 0 B;$$

$$\dot{\phi}_k = \dot{E}_B = 110 - j63,509 B;$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_B &= \dot{\phi}_k - \dot{I}_B Z_G = 110 - j63,509 - (5,005 + j1,661) \cdot (0,1 + j0,5) = \\ &= 110,330 - j66,177 B; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_b &= \dot{\phi}_B - \dot{I}_B Z_L = 110,330 - j66,177 - (5,005 + j1,661) \cdot (0,5 + j2) = \\ &= 111,151 - j77,019 B; \end{aligned}$$

$$\dot{\phi}_n = \dot{\phi}_b - \dot{I}_B Z_b = 111,151 - j77,019 - (5,005 + j1,661) \cdot (15,4 - j20,5) = 0 B;$$

$$\dot{\phi}_l = \dot{E}_C = -110 - j63,509 B;$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_C &= \dot{\phi}_l - \dot{I}_C Z_G = -110 - j63,509 - (-4,564 - j2,635) \cdot (0,1 + j0,5) = \\ &= -110,861 - j60,963 B; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_c &= \dot{\phi}_C - \dot{I}_C Z_L = -110,861 - j60,963 - (-4,564 - j2,635) \cdot (0,5 - j2) = \\ &= -113,849 - j50,517 B; \end{aligned}$$

$$\dot{\phi}_n = \dot{\phi}_c - \dot{I}_C Z_c = -113,849 - j50,517 - (-4,564 - j2,635) \cdot (23,5 - j2,5) = 0 B.$$

Определим напряжение между точками k и b :

$$\begin{aligned} \dot{U}_{k-b} &= \dot{\phi}_k - \dot{\phi}_b = 110 - j63,509 - (111,151 - j77,019) = -1,151 + j13,511 = \\ &= 13,56e^{j94,87^\circ} B, \end{aligned}$$

мгновенное значение напряжения:

$$u_{k-b}(t) = 13,56\sqrt{2} \sin(\omega t + 94,87^\circ) B.$$

Расчет задачи соединения нагрузки звездой с нейтральным проводом следует осуществить с помощью программы EXCEL. В таблицах 6.1–6.2 приведен пример расчета задачи 3 в режиме показа формул и в режиме расчетных значений.

Таблица 6.1 – Форма листа Excel расчета задачи 3 в режиме показа формул

Дано						
Уном, В	220		Комплекс	модуль	арг(рад)	град
ZG	0,1	0,5	=КОМПЛЕКСН (B3;C3;»j»)	=МНИМ. ABS(D3)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D3)	=F3*180/ПИ()
ZL	0,5	2	=КОМПЛЕКСН (B4;C4;»j»)	=МНИМ. ABS(D4)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D4)	=F4*180/ПИ()
ZA	19,4	7,5	=КОМПЛЕКСН (B6;C6;»j»)	=МНИМ. ABS(D6)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D6)	=F6*180/ПИ()
ZB	15,4	-20,5	=КОМПЛЕКСН (B7;C7;»j»)	=МНИМ. ABS(D7)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D7)	=F7*180/ПИ()
ZC	23,5	-2,5	=КОМПЛЕКСН (B8;C8;»j»)	=МНИМ. ABS(D8)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D8)	=F8*180/ПИ()
Решение						
UA	=E11*COS (F11)	=E11*SIN (F11)	=КОМПЛЕКСН (B11;C11;»j»)	=\$B\$2/(3)^0,5	=ПИ()*G11/180	90
UB	=E12*COS (F12)	=E12*SIN (F12)	=КОМПЛЕКСН (B12;C12;»j»)	=\$B\$2/(3)^0,5	=ПИ()*G12/180	=G11-120
UC	=E13*COS (F13)	=E13*SIN (F13)	=КОМПЛЕКСН (B13;C13;»j»)	=\$B\$2/(3)^0,5	=ПИ()*G13/180	=G11+120
ZAa	=E15*COS (F15)	=E15*SIN (F15)	=МНИМ. СУММ (\$D\$3; \$D\$4;D6)	=МНИМ. ABS(D15)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D15)	=F15*180/ПИ()

Продолжение таблицы 6.1

ZBb	=E16*COS (F16)	=E16*SIN (F16)	=МНИМ. СУММ (\$D\$3; \$D\$4;D7)	=МНИМ. ABS(D16)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D16)	=F16*180/ ПИ()
ZCc	=E17*COS (F17)	=E17*SIN (F17)	=МНИМ. СУММ (\$D\$3; \$D\$4;D8)	=МНИМ. ABS(D17)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D17)	=F17*180/ ПИ()
IA	=E19*COS (F19)	=E19*SIN (F19)	=МНИМ. ДЕЛ (D11;D15)	=МНИМ. ABS(D19)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D19)	=F19*180/ ПИ()
IB	=E20*COS (F20)	=E20*SIN (F20)	=МНИМ. ДЕЛ (D12;D16)	=МНИМ. ABS(D20)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D20)	=F20*180/ ПИ()
IC	=E21*COS (F21)	=E21*SIN (F21)	=МНИМ. ДЕЛ (D13;D17)	=МНИМ. ABS(D21)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D21)	=F21*180/ ПИ()
Ток в нейтральном проводе						
IN-n	=E24*COS (F24)	=E24*SIN (F24)	=МНИМ. СУММ (D19; D20;D21)	=МНИМ. ABS(D24)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D24)	=F24*180/ ПИ()
φА			0			
	=E27*COS (F27)	=E27*SIN (F27)	=МНИМ. СУММ (D26;D11)	=МНИМ. ABS(D27)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D27)	=F27*180/ ПИ()
	=E28*COS (F28)	=E28*SIN (F28)	=МНИМ. РАЗН(D27; (МНИМ. ПРОИЗВЕД (\$D\$19;D3)))	=МНИМ. ABS(D28)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D28)	=F28*180/ ПИ()
	=E29*COS (F29)	=E29*SIN (F29)	=МНИМ. РАЗН(D28; (МНИМ. ПРОИЗВЕД (\$D\$19;D4)))	=МНИМ. ABS(D29)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D29)	=F29*180/ ПИ()
			=МНИМ. РАЗН(D29; (МНИМ. ПРОИЗВЕД (\$D\$19;D6)))	=МНИМ. ABS(D30)		
φВ			0			
	=E33*COS (F33)	=E33*SIN (F33)	=МНИМ. СУММ (D32;D12)	=МНИМ. ABS(D33)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D33)	=F33*180/ ПИ()

Окончание таблицы 6.1

	=E34*COS (F34)	=E34*SIN (F34)	=МНИМ. РАЗН(D33; МНИМ. ПРОИЗВЕД (D20;D3))	=МНИМ. ABS(D34)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D34)	=F34*180/ ПИ()
	=E35*COS (F35)	=E35*SIN (F35)	=МНИМ. РАЗН(D34; МНИМ. ПРОИЗВЕД (D20;D4))	=МНИМ. ABS(D35)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D35)	=F35*180/ ПИ()
			=МНИМ.РАЗН (D35; МНИМ. ПРОИЗВЕД (D20;D7))	=МНИМ. ABS(D36)		
φС			0			
	=E39*COS (F39)	=E39*SIN (F39)	=МНИМ. СУММ (D38;D13)	=МНИМ. ABS(D39)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D39)	=F39*180/ ПИ()
	=E40*COS (F40)	=E40*SIN (F40)	=МНИМ. РАЗН(D39; (МНИМ. ПРОИЗВЕД (\$D\$21;D3)))	=МНИМ. ABS(D40)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D40)	=F40*180/ ПИ()
	=E41*COS (F41)	=E41*SIN (F41)	=МНИМ. РАЗН(D40; (МНИМ. ПРОИЗВЕД (\$D\$21;D4)))	=МНИМ. ABS(D41)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D41)	=F41*180/ ПИ()
			=МНИМ. РАЗН(D41; (МНИМ. ПРОИЗВЕД (\$D\$21;D8)))	=МНИМ. ABS(D42)		
Uк-b	=E44*COS (F44)	=E44*SIN (F44)	=МНИМ.РАЗН (D33;D35)	=МНИМ. ABS(D44)	=МНИМ. АРГУМЕНТ (D44)	=F44*180/ ПИ()

Таблица 6.2 – Форма листа Excel расчета задачи 3 в режиме расчетных значений

Дано						
Uном, В	220		Комплекс	модуль	арг(рад)	град
ZG	0,1	0,5	0,1+0,5j	0,509902	1,373401	78,69007
ZL	0,5	2	0,5+2j	2,061553	1,325818	75,96376
ZA	19,4	7,5	19,4+7,5j	20,79928	0,3689	21,1364
ZB	15,4	-20,5	15,4-20,5j	25,64001	-0,92652	-53,0854

Продолжение таблицы 6.2

Дано						
ZC	23,5	-2,5	23,5-2,5j	23,6326	-0,10598	-6,07246
Решение						
UA	7,78E-15	127,0171	7,7807376926262E-15+127,017059221718j	127,0171	1,570796	90
UB	110	-63,5085	110-63,5085296108588j	127,0171	-0,5236	-30
UC	-110	-63,5085	-110-63,5085296108589j	127,0171	3,665191	210
ZAa	20	10	20+10j	22,36068	0,463648	26,56505
ZBb	16	-18	16-18j	24,08319	-0,84415	-48,3665
ZCc	24,1	0	24,1	24,1	0	0
IA	2,540341	5,080682	2,54034118443436+5,08068236886872j	5,680376	1,107149	63,43495
IB	5,005437	1,661834	5,00543712585424+1,66183366590734j	5,274096	0,320555	18,36646
IC	-4,56432	-2,63521	-4,5643153526971-2,63520869754601j	5,270417	-2,61799	-150
Ток в нейтральном проводе						
IN-n	2,981463	4,107307	2,9814629575915+4,10730733723005j	5,075342	0,942903	54,02439
φA			0			
	7,78E-15	127,0171	7,7807376926262E-15+127,017059221718j	127,0171	1,570796	90
	2,286307	125,2388	2,28630706599093+125,238820392614j	125,2597	1,552543	88,95415
	11,1775	117,6178	11,1775012115112+117,617796839311j	118,1477	1,476048	84,57135
			0	0		
φB			0			
	110	-63,5085	110-63,5085296108588j	127,0171	-0,5236	-30
	110,3304	-66,1774	110,330373120368-66,1774315403766j	128,6555	-0,54028	-30,9558
	111,1513	-77,0192	111,151321889256-77,0192226250387j	135,2279	-0,60596	-34,7189
			2,1316282072803E-13j	2,13E-13		
φC			0			

Окончание таблицы 6.2

Дано						
	-110	-63,5085	-110-63,5085296108589j	127,0171	-2,61799	-150
	-110,861	-60,9629	-110,861172813503-60,9628510647558j	126,5175	-2,63882	-151,193
	-113,849	-50,5166	-113,849432532246-50,5166160105886j	124,5537	-2,72398	-156,072
			9,9475983006414E-13-9,9475983006414E-14j	1E-12		
Uк-в	-1,15132	13,51069	-1,151321889256 + 13,5106930141799j	13,55966	1,655807	94,87073

Векторные диаграммы токов и напряжений представлены на рисунках 6.6–6.7.

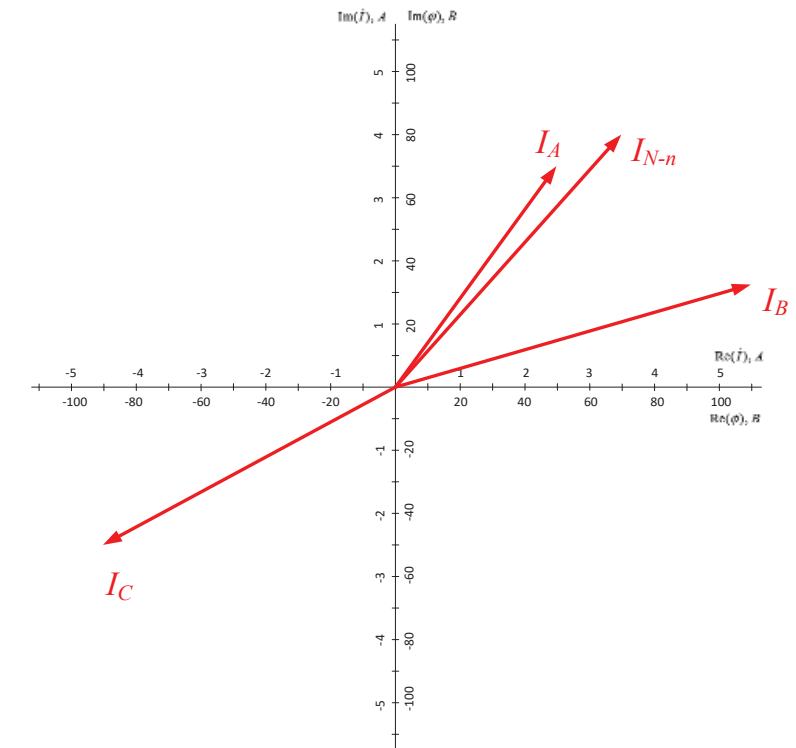


Рис. 6.6 – Векторная диаграмма токов

Мощности фаз определяются аналогично любой цепи синусоидального тока (см. раздел «Электрические цепи синусоидального тока»).

Активные мощности фаз:

$$P_a = I_a^2 \cdot R_a = 5,68^2 \cdot 20 = 649,8 \text{ Вт},$$

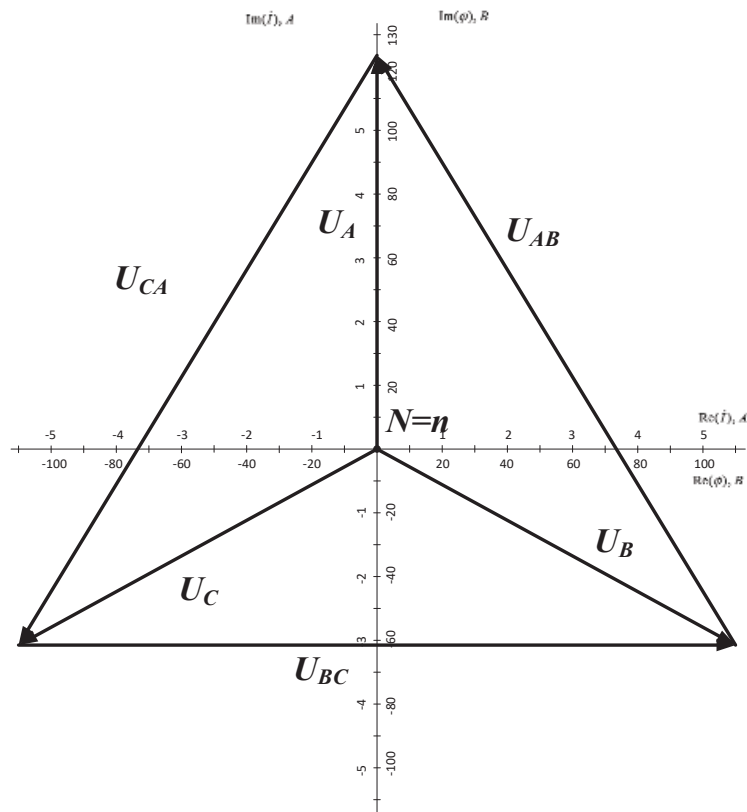


Рис. 6.7 – Векторная диаграмма напряжений

$$P_b = I_b^2 \cdot R_b = 5,27^2 \cdot 16 = 449,4 \text{ Вт},$$

$$P_c = I_c^2 \cdot R_c = 5,27^2 \cdot 24,1 = 673,1 \text{ Вт}.$$

Реактивные мощности фаз:

$$Q_a = I_a^2 \cdot X_a = 5,68^2 \cdot 10 = 324,9 \text{ ВАр},$$

$$Q_b = I_b^2 \cdot X_b = 5,27^2 \cdot 18 = 505,6 \text{ ВАр}.$$

6.4. Расчет сложной трехфазной цепи

К трехфазной цепи с нулевым проводом (рис. 6.8) с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ и сопротивлением каждого провода $Z_{\text{л}} = 5 + j2 \text{ Ом}$ подключены две симметричные нагрузки.

Комплексные сопротивления нагрузок в алгебраической форме:

$$Z_1 = -j15 \text{ Ом};$$

$$Z_2 = 8 + j2 \text{ Ом}.$$

К указанному условию задачи:

1) нарисовать схему замещения фазы и выполнить расчет линейных и фазных токов, линейных и фазных напряжений;

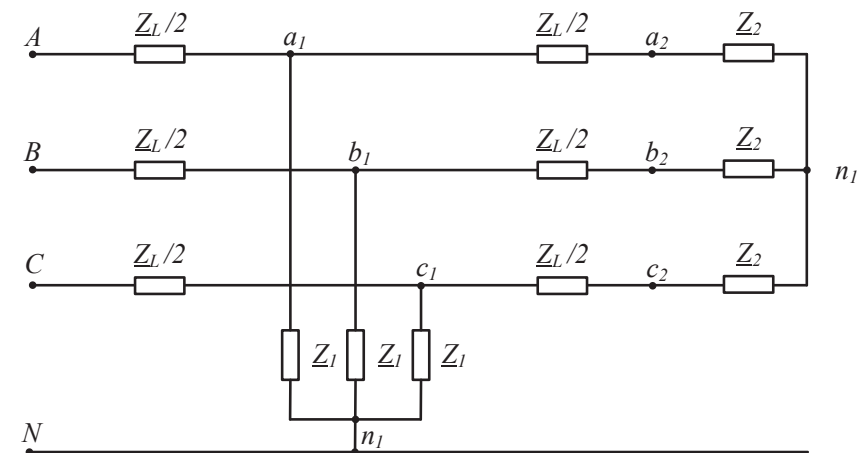


Рис. 6.8 – Схема сложной трехфазной цепи

2) записать уравнения баланса мощностей для рассчитанной фазы и проверить его выполнение;

3) найти линейные и фазные токи и напряжения других фаз;

4) рассчитать активную, реактивную и полную мощность трехфазной цепи;

5) нарисовать схему включения двух ваттметров для измерения активной мощности трехфазной цепи, рассчитать их показания и активную трехфазную мощность;

6) нарисовать топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов трехфазной цепи.

Решение:

1. На схеме представим положительные направления токов. Так как все нейтральные точки источника N и нагрузок n_1 и n_2 имеют одинаковый потенциал, то, не нарушая режима, можно соединить их проводом с нулевым сопротивлением. После этого фазы не будут иметь никаких общих точек, кроме точек нулевого провода. В связи с этим они не будут оказывать влияния друг на друга и можно рассмотреть каждую фазу в отдельности.

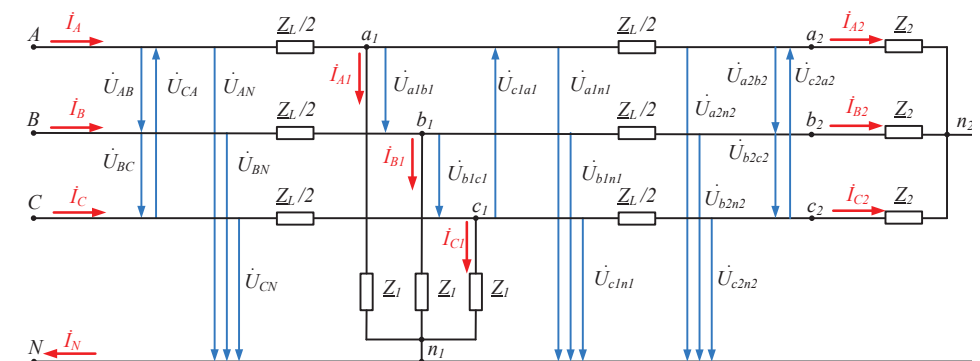


Рис. 6.9 – Расчетная схема

2. Для симметричных цепей воспользуемся однолинейной цепью. В качестве расчетной воспользуемся фазой А.

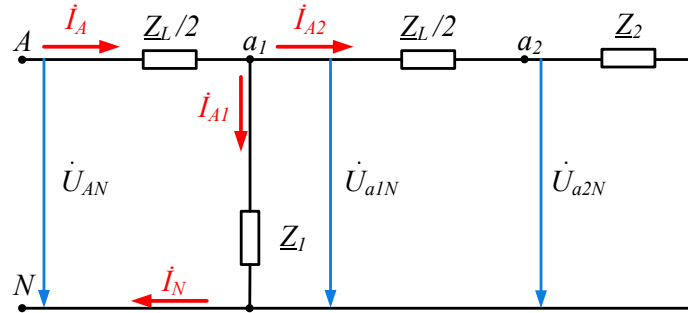


Рис. 6.10 – Однолинейная схема замещения

Для полученной схемы находим соответствующие токи и напряжения.

Напряжение каждой фазы будет:

$$\dot{U}_A = \frac{\dot{U}_{ном}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В.}$$

Принимаем начальную фазу напряжения $\dot{U}_{AN}$ равной нулю, то есть:

$$\dot{U}_{AN} = U_{AN} \cdot e^{j0^\circ} = 127e^{j0^\circ} = 127 \text{ В.}$$

Фазные и линейные токи:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN}}{\frac{Z_L}{2} + \left[\frac{\left(\frac{Z_L}{2} + Z_2 \right) \cdot Z_1}{\frac{Z_L}{2} + Z_2 + Z_1} \right]} = 10,35e^{j16^\circ} \text{ А.}$$

$$\dot{I}_{A1} = \dot{I}_A \cdot \frac{\frac{Z_L}{2} + Z_2}{\frac{Z_L}{2} + Z_2 + Z_1} = 7,1e^{j81^\circ} \text{ А.}$$

$$\dot{I}_{A2} = \dot{I}_A \cdot \frac{Z_1}{\frac{Z_L}{2} + Z_2 + Z_1} = 9,7e^{-j25^\circ} \text{ А.}$$

Фазные и линейные напряжения:

$$\dot{U}_{a1N} = \dot{I}_{A1} \cdot Z_1 = \dot{I}_{A2} \cdot \frac{Z_L}{2} + Z_2 = 106,4e^{-j9^\circ} \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{a2N} = \dot{I}_{A2} \cdot Z_2 = 80,3e^{-j11^\circ} \text{ В.}$$

3. Запишем уравнения баланса мощностей для рассчитанной фазы и проверим его выполнение:

$$\underline{S}_{AN} = \dot{U}_{AN}^* \dot{I}_A = 127 \cdot 10,35e^{-j16^\circ} = 13972,2e^{-j16^\circ} = 1264 - j362,338 \text{ ВА;}$$

$$\underline{S}_{AN} = (\dot{U}_{AN} - \dot{U}_{a1N}) \times \dot{I}_A + \dot{U}_{a1N} \times \dot{I}_{A1} + (\dot{U}_{a1N} - \dot{U}_{a2N}) \times \dot{I}_{A2} + \dot{U}_{a2N} \times \dot{I}_{A2} = 1264 - j362,338 \text{ ВА.}$$

4. По соотношениям симметричного режима определяем остальные линейные напряжения:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AN} \cdot \sqrt{3}e^{j\frac{\pi}{6}} = 220e^{j30^\circ} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{a1b1} = \dot{U}_{a1} \cdot \sqrt{3}e^{j\frac{\pi}{6}} = 184e^{j21^\circ} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{a2b2} = \dot{U}_{a2} \cdot \sqrt{3}e^{j\frac{\pi}{6}} = 139e^{j18^\circ} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{Aa1} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{a1N} = 28e^{j38^\circ} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{a1a2} = \dot{U}_{a1N} - \dot{U}_{a2N} = 26e^{-j3^\circ} \text{ В.}$$

Токи и напряжения фазы В и С определяем с учетом сдвига фаз на 120° :

IB	−2,50555688762923−10,0466211865474j
IB1	5,49185934306684−4,48608390522222j
IB2	−7,99741623069607−5,56053728132516j
Ub1N	−67,2912585783336−82,3778901460029j
Ub2N	−52,8582552829183−60,4791307119935j
UBC	−1,98951966012828E−13−220,000000000001j
Ub1c1	−29,5955422908984−181,842774600469j
Ub2c2	−26,9109193289913−136,49528794272j
UBb1	3,78272896747458−27,6221098539975j
Ub1b2	−14,4330032954153−21,8987594340094j
IC	−7,44785072593439+7,19318650858768j
IC1	−6,63099229696436−2,51304775249569j
IC2	−0,816858428970008+9,70623426108336j
Uc1N	−37,6957162874354+99,4648844544658j
Uc2N	−25,9473359539268+76,016157230727j
UCA	−190,525588832577+110,000000000001j
Uc1a1	−142,682691153205+116,551878762929j
Uc2a2	−104,752927190772+91,5531837494601j
UCc1	−25,8128133234236+10,5351155455345j
Uc1c2	−11,7483803335086+23,4487272237389j

5. Активная, реактивная и полная мощность трехфазной цепи.

В симметричной трехфазной системе активные, реактивные и полные мощности фаз одинаковы. И соответствующие мощности трехфазной системы равны утроенной мощности одной фазы. Соотношения между линейными и фазными величинами в симметричной системе, соединенной звездой, примем по формуле (3), соответственно получаем:

$$P = 3U_{AB}I_A \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10,35 \cos(16^\circ) = 3792,2 \text{ Вт};$$

$$Q = 3U_{AB}I_A \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10,35 \sin(16^\circ) = 1087,4 \text{ ВАр};$$

$$S = 3U_{AB}I_A = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10,35 = 3945,4 \text{ ВА}.$$

6. Схема включения двух ваттметров для измерения активной мощности трехфазной цепи, расчет их показаний и активной трехфазной мощности.

Величина P_1 может быть замерена ваттметром W_1 , а величина P_2 – ваттметром W_2 , включенными, как показано на рисунке.

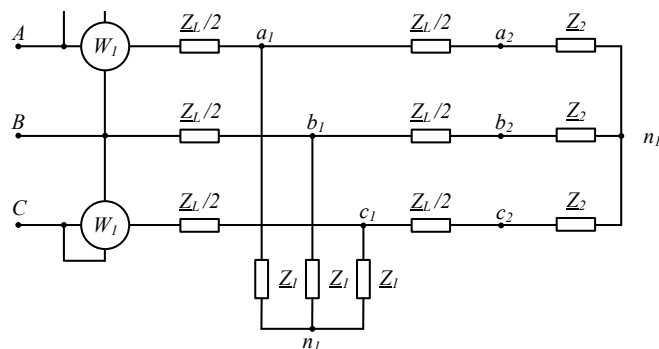


Рис. 6.11 – Схема включения двух ваттметров

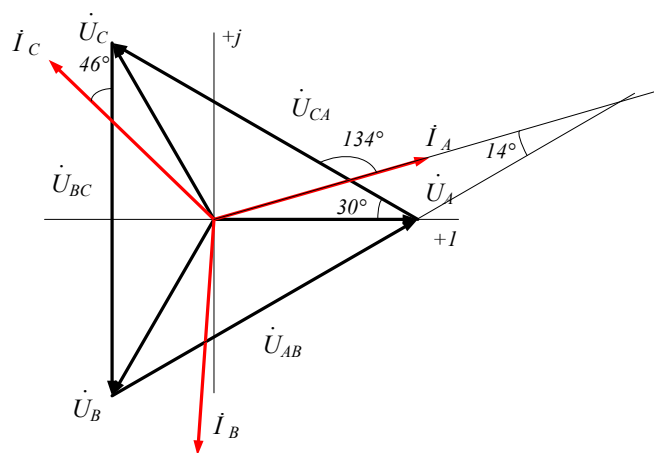


Рис. 6.12 – Векторная диаграмма

Из векторной диаграммы следует:

$$P_1 = U_{AB}I_A \cos(\widehat{U_{AB}I_A}) = 220 \cdot 10,35 \cos(14^\circ) = 2210 \text{ Вт};$$

$$P_2 = U_{BC}I_C \cos(\widehat{U_{BC}I_C}) = 220 \cdot 10,35 \cos(46^\circ) = 1582,2 \text{ Вт};$$

$$P = P_1 + P_2 = 2210 + 1582,2 = 3792,2 \text{ Вт};$$

$$Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2) = \sqrt{3}(2210 - 1582,2) = 1087,8 \text{ ВАр}.$$

7. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Задание 1. Трехфазная сеть с соединением нагрузки звездой.

Исходные данные. В трехфазную сеть (рис. 7.1) к симметричному трехфазному генератору с фазной ЭДС $\dot{E}$ и внутренним сопротивлением $\underline{Z}_r$ через линию электропередачи, сопротивление каждого провода которой $\underline{Z}_{\text{лп}}$, подключена симметричная нагрузка потребителя $\underline{Z}$. Значение ЭДС и сопротивлений взять в таблицах 7.1–7.2.

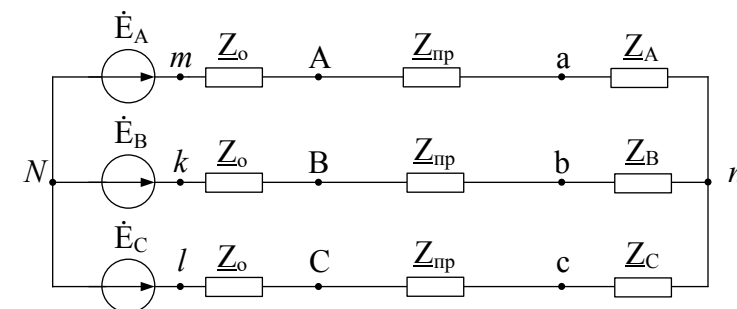


Рис. 7.1 – Трехфазная сеть с соединением нагрузки звездой

Таблица 7.1 – Исходные данные задания 1 (по начальной букве фамилии)

Начальная буква фамилии	Е, В	$\underline{Z}_r$	$\underline{Z}_{\text{лп}}$
А К Ф	225	$0,1 + j0,2$	$0,13 + j1,4$
Б Л Х	127	$0,2 + j0,4$	$0,5 + j2,5$
В М Ц	380	$0,5 + j0,9$	$1,8 + j12,4$
Г Н Ч	380	$0,4 + j1,2$	$0,5 + j2,0$
Д О Ш	400	$0,4 + j0,8$	$0,7 + j1,4$
Е П Щ	600	$0,2 + j0,6$	$1,2 + j2,4$
Е Р Ы	225	$0,1 + j0,2$	$0,6 + j3,2$
Ж С Э	450	$0,3 + j0,6$	$0,3 + j1,4$
З Т Ю	127	$0,2 + j0,4$	$0,5 + j2,5$
И У Я	380	$0,5 + j0,9$	$1,8 + j10,5$

Таблица 7.2 – Исходные данные задания 1 (по начальной букве имени)

Начальная буква имени	Симметричная нагрузка каждой фазы (Ом)			Искомое напряжение между точками
	R	X_L	X_C	
А К Ф	5	20	–	U_{k-a}
Б Л Х	7	10	6	U_{m-b}
В М Ц	12	8	16	U_{b-c}

Продолжение таблицы 7.2

Начальная буква имени	Симметричная нагрузка каждой фазы (Ом)			Искомое напряжение между точками
	R	X_L	X_C	
Г Н Ч	16	–	12	U_{k-b}
Д О Ш	5	10	5	U_{m-k}
Е П Щ	12	–	25	U_{m-a}
Е Р Ы	5	12	16	U_{m-k}
Ж С Э	12	20	–	U_{l-c}
З Т Ю	17	10	10	U_{A-b}
И У Я	12	8	5	U_{A-n}

Определить:

- фазные и линейные токи;
- фазные и линейные напряжения на зажимах генератора и нагрузки;
- активную мощность, вырабатываемую генератором. Активные, реактивные и полную мощности, потребляемые нагрузкой потребителя. Составить баланс мощностей;
- рассчитать потенциалы всех точек схемы. Построить топографические диаграммы токов и напряжений. Определить мгновенное напряжение между указанными точками.

Задание 2.

Рассчитать несимметричный режим работы трехфазной сети, используя данные задания 1 (рис. 7.1). Несимметричный режим создать за счет приравнивания активного сопротивления только в фазе «А» к нулю.

Определить:

- комплексные проводимости фаз;
- напряжение смещения нейтрали;
- фазные токи;
- фазные и линейные напряжения на зажимах генератора и нагрузки;
- активную мощность, вырабатываемую генератором. Активные, реактивные и полную мощности, потребляемые нагрузкой потребителя. Составить баланс мощностей;
- рассчитать потенциалы всех точек схемы. Построить топографические диаграммы токов и напряжений.

Задание 3.

Исходные данные. В трехфазную сеть с нулевым проводом (рис. 7.2) к симметричному трехфазному генератору с фазной ЭДС $\dot{E}_A = 220 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $\underline{Z}_G = 0,2 + j0,3$ через линию электропередачи, сопротивление каждого провода которой $\underline{Z}_L = 1,5 + j2,8$, подключена несимметричная нагрузка потребителя $\underline{Z}$. Значение сопротивлений фаз взять в таблице 7.3.

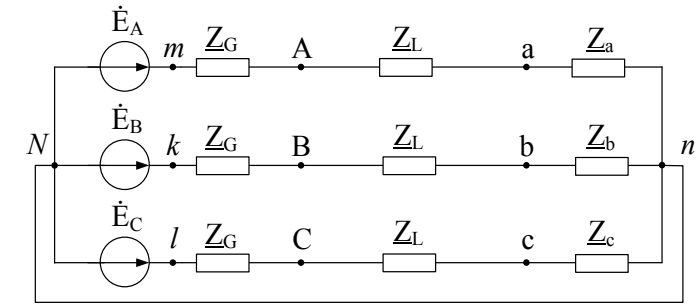


Рис. 7.2 – Трехфазная сеть с соединением нагрузки звездой с нулевым проводом

Таблица 7.3 – Исходные данные задания 3 (по начальной букве фамилии)

Начальная буква фамилии	$\underline{Z}_a$	$\underline{Z}_b$	$\underline{Z}_c$	Искомое напряжение между точками
А К Ф	$0,4 + j0,8$	$0,1 + j0,2$	$0,3 + j1,4$	U_{m-b}
Б Л Х	$0,7 + j1,4$	$0,2 + j0,4$	$0,5 + j2,5$	U_{a-c}
В М Ц	$0,3 + j1,4$	$0,5 + j0,9$	$1,8 + j2,4$	U_{A-c}
Г Н Ч	$0,3 + j0,6$	$0,4 + j1,2$	$0,5 + j2,0$	U_{c-A}
Д О Ш	$0,1 + j0,2$	$0,4 + j0,8$	$0,7 + j1,4$	U_{m-B}
Е П Щ	$1,8 + j10,5$	$0,2 + j0,6$	$1,2 + j2,4$	U_{d-k}
Е Р Ы	$1,8 + j12,4$	$0,1 + j0,2$	$0,6 + j3,2$	U_{m-l}
Ж С Э	$0,2 + j0,4$	$0,3 + j0,6$	$0,3 + j1,4$	U_{A-k}
З Т Ю	$0,5 + j2,0$	$0,2 + j0,4$	$0,5 + j2,5$	U_{l-A}
И У Я	$0,5 + j2,5$	$0,5 + j0,9$	$1,8 + j0,5$	U_{c-B}

Определить:

- фазные и линейные токи;
- фазные и линейные напряжения на зажимах генератора и нагрузки;
- значение тока в нулевом проводе;
- активную мощность, вырабатываемую генератором. Активные, реактивные и полную мощности, потребляемые нагрузкой потребителя. Составить баланс мощностей;
- рассчитать потенциалы точек, указанных на схеме;
- построить топографические диаграммы токов, фазных и линейных напряжений на нагрузке;
- определить мгновенное напряжение между заданными точками.

Задание 4.

Исходные данные. К трехфазной цепи с нулевым проводом (рис. 7.3) с линейным напряжением U_L и сопротивлением каждого провода $\underline{Z}_L$ подключены две симметричные нагрузки.

Комплексные сопротивления нагрузок представлены в алгебраической форме: Z_1 и Z_2 .

Значение сопротивлений фаз взять в таблице 7.4.

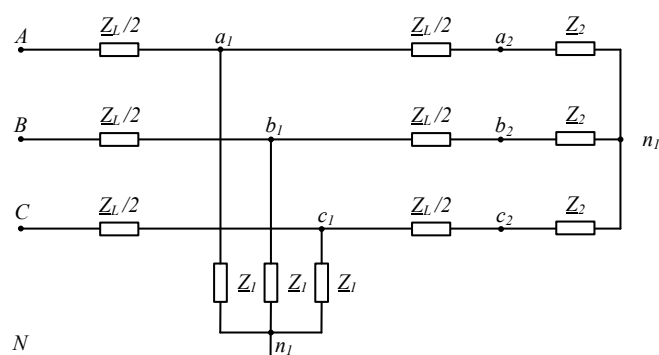


Рис. 7.3 – Трехфазная сеть с соединением генератора и нагрузки «треугольник – треугольник»

Таблица 7.4 – Исходные данные задания 4 (по начальной букве имени)

Начальная буква фамилии	U_n	Z_L	Z_1	Z_2
А К Ф	110	$0,4 + j0,8$	$0,1 + j0,2$	$0,3 - j1,4$
Б Л Х	380	$0,7 - j1,4$	$0,2 - j0,4$	$0,5 + j2,5$
В М Ц	220	$0,3 + j1,4$	$0,5 + j0,9$	$1,8 - j12,4$
Г Н Ч	660	$0,3 - j0,6$	$0,4 + j1,2$	$0,5 + j2,0$
Д О Ш	220	$0,1 + j0,2$	$0,4 + j0,8$	$0,7 - j1,4$
Е П Щ	110	$1,8 + j10,5$	$0,2 - j0,6$	$1,2 + j2,4$
Ё Р Ы	380	$1,8 - j12,4$	$0,1 + j0,2$	$0,6 - j3,2$
Ж С Э	660	$0,2 + j0,4$	$0,3 - j0,6$	$0,3 + j1,4$
З Т Ю	127	$0,5 + j2,0$	$0,2 + j0,4$	$0,5 - j2,5$
И У Я	110	$0,5 - j2,5$	$0,5 + j0,9$	$1,8 + j10,5$

К указанному условию задачи следует:

- 1) нарисовать схему замещения фазы и выполнить расчет линейных и фазных токов, линейных и фазных напряжений;
- 2) записать уравнения баланса мощностей для рассчитанной фазы и проверить его выполнение;
- 3) найти линейные и фазные токи и напряжения других фаз;
- 4) рассчитать активную, реактивную и полную мощность трехфазной цепи;
- 5) нарисовать схему включения двух ваттметров для измерения активной мощности трехфазной цепи, рассчитать их показания и активную трехфазную мощность;
- 6) нарисовать топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов трехфазной цепи.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: в 2 т. – Т. 1: Электрические цепи : учебник для академического бакалавриата / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – М. : изд-во «Юрайт», 2019. – 831 с. – (Бакалавр. Академический курс) // ЭБС «Юрайт» [сайт]. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/bcode/431365> (дата обращения: 10.12.2019).
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: в 2 т. – Т. 2: Электромагнитное поле : учебник для академического бакалавриата / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – М. : изд-во «Юрайт», 2019. – 389 с. – (Бакалавр. Академический курс) // ЭБС «Юрайт» [сайт]. – Режим работы: <https://biblio-online.ru/bcode/423927> (дата обращения: 10.12.2019).
3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник для академического бакалавриата: в 2 ч. – Ч. 2 / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – М. : изд-во «Юрайт», 2018. – 346 с. – (Бакалавр. Академический курс) // ЭБС «Юрайт» [сайт]. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/bcode/421400> (дата обращения: 10.12.2019).
4. Новожилов, О. П. Электротехника (теория электрических цепей): учебник для среднего профессионального образования: в 2 ч. / О. П. Новожилов. – Ч. 1. – М. : изд-во «Юрайт», 2019. – 403 с. – (Профессиональное образование) // ЭБС «Юрайт» [сайт]. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/bcode/431170> (дата обращения: 10.12.2019).
5. Новожилов, О. П. Электротехника (теория электрических цепей) : учебник для академического бакалавриата: в 2 ч. / О. П. Новожилов. – Ч. 2. – М. : изд-во «Юрайт», 2019. – 247 с. – (Бакалавр. Академический курс) // ЭБС Юрайт [сайт]. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/bcode/434603> (дата обращения: 10.12.2019).
6. Потапов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Сборник задач : учеб. пособие для академического бакалавриата / Л. А. Потапов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : изд-во «Юрайт», 2019. – 245 с. – (Бакалавр. Академический курс) // ЭБС Юрайт [сайт]. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/bcode/437992> (дата обращения: 10.12.2019).
7. Теоретические основы электротехники. Сборник задач : учеб. пособие для бакалавров / Л. А. Бессонов [и др.] ; под ред. Л. А. Бессонова. – 5-е изд., испр. и доп. – М. : изд-во «Юрайт», 2019. – 527 с. – (Бакалавр. Академический курс) // ЭБС «Юрайт» [сайт]. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/bcode/426249> (дата обращения: 10.12.2019).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ РГР

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«САХАЛИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт естественных наук и техносферной безопасности
Кафедра электроэнергетики и физики

Допущено к защите:

Дата _____

XXXXXXXX Hxxxxx Hxxxxx

ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Расчетно-графическая работа

по дисциплине «Теоретические основы электротехники»

Направление подготовки: 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника

Профиль подготовки: Электрические системы и сети

Форма обучения: _____

Срок освоения ОПОП: _____

Курс: _____

Квалификация выпускника: бакалавр

Научный руководитель:

УУУУУУУУ У.У. _____

Южно-Сахалинск – 2020

Задача 1 (вариант № 99).

Исходные данные.

Электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 1.1, рассчитать при частоте $f = 50 \text{ Гц}$ по данным (см. табл. 1.1). Построить топографическую векторную диаграмму.

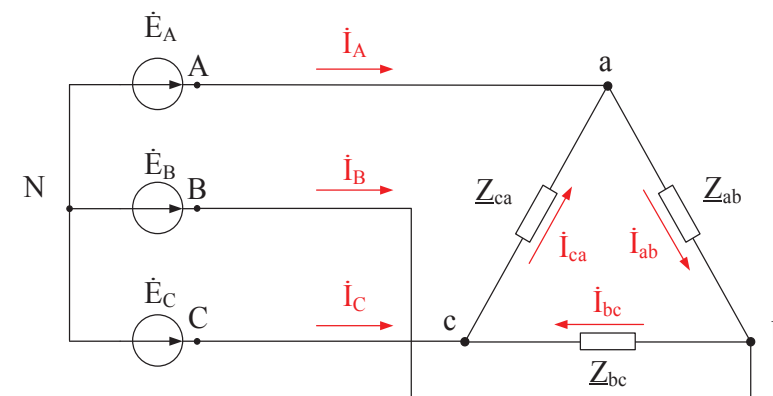


Рисунок 1.1 – Схема к задаче 1

Таблица 1.1 – Исходные данные варианта

№ варианта	U, В	Потребитель 1 (Ом)			Потребитель 2 (Ом)			Потребитель 3 (Ом)		
		R ₁	X _{L1}	X _{C1}	R ₂	X _{L2}	X _{C2}	R ₃	X _{L3}	X _{C3}
101	320	5	135	–						

					ТОЭ.13.03.02.19999.000 ПЗ								
Изм	Лист	№ докум.	Подпис	Дат	ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (РГР)				Лит.	Лист	Листов		
Разраб.		XXXXXXXXXX									2	2	
Провер.		УУУУУУУУ							ФГБОУ ВО «СахГУ»				
Н. контр.													
Утверд.													

Решение:

1. Определим мгновенное значение тока:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i), \quad (1.1)$$

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

$$I = \frac{U_{en}}{Z_{en}} = ?$$

Определим реактивные сопротивления цепи:

$$X_{L1} = \omega L_1 = 2\pi f L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 22,3 \cdot 10^{-3} = 7 \text{ Ом} \quad (1.2)$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{2\pi f C_2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 318 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ Ом}. \quad (1.3)$$

Угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}$.Величина сопротивления участка цепи Z_{en} :

$$Z_{en} = \sqrt{X_{L1}^2 + R_2^2} = \sqrt{7^2 + 1^2} = 7,05 \text{ Ом}. \quad (1.4)$$

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

Начальная фаза тока $\varphi_i = \varphi_u - \varphi$,где φ_u – начальная фаза напряжения, град, φ – угол сдвига фазы тока по отношению к фазе напряжения, град.Угол φ определяем из треугольника сопротивлений (рис. 1.2).

						ТОЭ.13.03.02.19999.000 ПЗ	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат			3

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ УДАЛЕННОГО ДОСТУПА

Ссылка и QR-код решения задачи 1:
<https://drive.google.com/open?id=1DQKmn6p8emK8DaNjRwDCxreHCAcUdy27>



Ссылка и QR-код решения задачи 2:
<https://drive.google.com/open?id=1EU6ykfSs1MXZuAnQjyPJkOafjrjK9n01f>



Ссылка и QR-код решения задачи 3:
<https://drive.google.com/open?id=1AErc34zJyz-450SbinnWcPjDIEyhV6OI>



Ссылка и QR-код решения задачи 4:
<https://drive.google.com/open?id=1VjMXhpNULm0MgymO8Dja81-YCM3ArOoC>

