

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Кафедра «Системы электроснабжения»

С.И. Макашёва

**ОЦЕНКА НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ
В ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ**

Методические указания
по выполнению контрольной работы

Хабаровск
Издательство ДВГУПС
2015

УДК 621.316.722(075.8)
ББК 327-051.1я73
М 154

Рецензент – кафедра «Электроника, электротехника и электромеханика»
ДВГУПС, кандидат технических наук, доцент
В.Г. Скорик

Макашёва, С.И.

М 154 Оценка несимметрии напряжений в трехфазной системе :
методические указания по выполнению контрольной работы /
С.И. Макашёва. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – 40 с. : ил.

Методические указания соответствуют ФГОС ВО по направлению подготовки бакалавров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Рассмотрены теоретические сведения, порядок расчета и оценки несимметрии напряжений трехфазной системы. Главное внимание уделено расчёту и анализу коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности. Даны рекомендации по оформлению работы, контрольные вопросы на закрепление пройденного материала.

Предназначены для студентов старших курсов заочной формы обучения, изучающих дисциплины «Электромагнитная совместимость и качество электрической энергии», «Электромагнитная совместимость и средства защиты», «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике».

УДК 621.316.722(075.8)
ББК 327-051.1я73

© ДВГУПС, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ И ПОРЯДКУ СДАЧИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	5
1.1. Цели, задачи, структура и объем контрольной работы.....	5
1.2. Правила оформления контрольной работы.....	6
1.3. Порядок сдачи контрольной работы.....	10
2. ОЦЕНКА НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ	12
2.1. Основные теоретические сведения о несимметрии напряжений в трехфазных системах	12
2.1.1. Причины появления несимметрии напряжений в трёхфазной системе.....	15
2.1.2. Последствия влияния несимметрии напряжений на работу электроприемников	16
2.1.3. Мероприятия по уменьшению несимметрии напряжений ..	18
2.1.4. Нормирование и расчет несимметрии напряжений	19
2.2. Порядок выполнения контрольной работы	33
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	34
ТИПИЧНЫЕ НЕТОЧНОСТИ, ДОПУСКАЕМЫЕ СТУДЕНТАМИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ	35
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	36
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ФОРМА ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	37
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ РИСУНКОВ (ГРАФИКОВ) ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ	38
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ (ФРАГМЕНТ) ТЕКСТА С ФОРМУЛАМИ И ТАБЛИЦЕЙ	39
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ПРИМЕР БЛАНКА ЗАДАНИЯ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ	40

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитная совместимость (ЭМС) – это способность электро-технического оборудования удовлетворительно функционировать в условиях электромагнитных воздействий со стороны окружающей среды, а также не оказывать недопустимого воздействия на другое электротехническое оборудование и окружающую среду.

Важнейшими вопросами в проблематике ЭМС являются оценка и нормирование электромагнитных помех (ЭМП). Согласно федеральному закону от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ (ред. от 03 декабря 2012 г.) «О техническом регулировании», электромагнитная помеха – это электромагнитное явление, процесс, которые снижают или могут снижать качество функционирования технического средства. В теории ЭМС принято рассматривать воздействие помех как излучаемых в пространстве (индуктивные помехи), так и распространяющихся по проводникам (кондуктивные помехи). Показатели качества электрической энергии (ПКЭ) с точки зрения ЭМС характеризуют кондуктивные помехи, поэтому их контроль, расчет и оценка степени соответствия существующим нормативным документам являются важными задачами обеспечения ЭМС.

Влияние ЭМП, вызванных низким качеством электрической энергии (КЭ) на аппаратуру связи и прочую аппаратуру, включенную в электрическую сеть, может быть разнообразным – от непредсказуемых временных ухудшений характеристик канала передачи информации до физического повреждения и даже возгорания аппаратуры и ее кабелей, поэтому особенно важно научиться математически рассчитывать ПКЭ, оценивать, прогнозировать и предотвращать подобные последствия.

Данные методические указания позволяют студентам самостоятельно и за короткое время разобраться в решаемых вопросах без помощи преподавателя. Методические указания содержат рекомендации по выполнению и оформлению работы, основные теоретические сведения и методики расчета. По вопросам, которые изложены только частично, по тексту даются ссылки на рекомендуемую литературу для более углубленного изучения. Также приводятся примеры тестовых заданий для закрепления пройденного материала и самопроверки студентами своих знаний.

Методические указания могут быть использованы студентами дневного и заочного отделений не только при выполнении контрольной работы, но и при проработке вопросов, излагаемых в лекционном курсе, при подготовке к лабораторным работам и последующим зачету и экзамену.

1. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ И ПОРЯДКУ СДАЧИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

1.1. Цели, задачи, структура и объем контрольной работы

Контрольная работа – это самостоятельная работа студента, обучающегося на заочном отделении. Выполняя контрольную работу, студент совершенствует знания и умения, полученные в процессе изучения курса «Электромагнитная совместимость», учится самостоятельно осваивать методики расчета и принципы работы с методической и справочной литературой, готовится к решению более сложных и ответственных задач, включая написание итоговой выпускной квалификационной работы.

Цели выполнения контрольной работы включают:

- систематизацию и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений по дисциплине «Электромагнитная совместимость и средства защиты» («Электромагнитная совместимость и качество электрической энергии»);
- углубление теоретических знаний в вопросах расчета, нормирования и оценки показателей качества электрической энергии;
- формирование умений применять теоретические знания при решении поставленных вопросов;
- формирование умений использовать справочную литературу и нормативную документацию;
- развитие творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- закрепление навыков оформления технических документов в соответствии с требованиями единой системы технической и конструкторской документации (ЕСТД и ЕСКД).

Контрольная работа содержит элементы учебно-исследовательской работы студента (УИРС), которые выполняются непосредственно при изучении дисциплины и включают в себя:

- формирование навыков творческого профессионального мышления путём овладения научными методами познания и исследования;
- овладение методами анализа, сравнения, классификации, систематизации и обобщения;
- выработку навыков библиографической работы, самостоятельной работы с учебно-справочной, периодической, нормативной литературой и другими источниками информации, включая сетевые ресурсы;

- развитие умения нестандартно мыслить (находить множество разных вариантов решения при одних и тех же условиях, непротиворечивые решения противоречивых ситуаций) и применять знания на практике.

Задание на контрольную работу в виде исходных данных к расчету содержится в бланке задания. Бланк задания выдается каждому студенту лично во время установочной сессии, номер варианта, сроки выдачи и сдачи работы на проверку записаны на бланке. Пример типового задания на контрольную работу представлен в прил. 4.

Пояснительная записка к контрольной работе по своей структуре включает следующие элементы:

- титульный лист;
- бланк задания;
- содержание;
- введение (раскрывается актуальность и значение темы, формируется цель работы);
- расчетную часть (расчеты по используемым методикам, описательная часть, в которой излагается принцип действия, конструкция, технологические особенности и другие обоснования принятых решений);
- заключение (приводятся в цифрах основные полученные технические параметры, делаются выводы относительно достижения поставленных целей);
- список используемых источников (литературные и сетевые источники);
- приложения (таблицы, схемы, графики, диаграммы, листинги используемых программ и т.п.).

Общий объем пояснительной записки не должен превышать 7–10 листов (включая графический материал). Пояснительная записка к контрольной работе должна давать достаточно полное представление о принципе решения поставленной задачи.

1.2. Правила оформления контрольной работы

Пояснительная записка (ПЗ) к контрольной работе оформляется и разрабатывается в соответствии с требованиями ЕСТД и ЕСКД. Каждый структурный элемент пояснительной записки рекомендуется приводить с нового листа.

Титульный лист является первым листом пояснительной записки, входит в общее число листов ПЗ, но номер листа на нем не проставляется. Рекомендуемый образец оформления титульного листа приведен в прил. 1.

В **содержании** приводятся заголовки всех структурных элементов контрольной работы, начиная с введения. Содержание включает наименование всех разделов с их номерами. В содержании напротив каждого номера и наименования раздела (подраздела) пробелами отделяется, выравнивается по левому краю листа номера страниц, на которых размещается начало материала разделов, подразделов и пунктов. Содержание нумеруется вторым листом ПЗ, сквозная нумерация страниц проставляется.

Введение содержит постановку задачи, цели и краткое описание общих методов решения поставленной задачи. Таким образом, введение кратко отвечает на вопросы: 1) что именно будет рассматриваться в работе; 2) для чего это делается; 3) какими способами будет достигаться решение поставленной задачи; 4) какие ожидаемые результаты будут получены в работе. Введение не должно заслонять основного содержания. По объему введение занимает примерно 1 страницу, достаточным считается объем не менее половины страницы. Введение нумеруется третьим листом ПЗ, нумерация страниц проставляется.

Задание на контрольную работу помещается непосредственно за введением, входит в общую нумерацию листов ПЗ и выносится в содержание, но отдельного номера (как разделы или подразделы) не имеет.

В **основной части** приводится описание методологии решения поставленной задачи, кратко излагается суть производимых вычислений, кратко приводятся основные моменты используемых расчетных методик со ссылкой на используемую литературу, расчетные формулы с примерами расчета (подстановкой числовых значений) и полученные результаты с обязательным указанием единиц измерения искомых величин.

Расчетно-пояснительная записка должна быть написана грамотно, с правильным применением технических терминов, определений и буквенных обозначений физических и математических величин (в соответствии с установленными стандартами). Расчеты, приводимые в пояснительной записке, должны быть выполнены в системе единиц СИ.

Основная часть контрольной работы может быть разбита на разделы и подразделы, если это необходимо. Разделы имеют сквозную нумерацию, номера листов проставляются на каждом листе.

Результаты однотипных расчетов сводятся в таблицы (вид таблиц студент разрабатывает самостоятельно). Результаты работ иллюстрируются графическими зависимостями, их вид также разрабатывается студентом индивидуально и самостоятельно, в соответствии с рекомендациями расчетных методик.

Заключение содержит качественные и количественные оценки результатов расчёта, таким образом, отвечая целям и задачам работы,

обозначенным ранее во введении. По объему заключение, как правило, не превышает 1 страницы.

Список использованной литературы содержит перечень источников, использованных при выполнении контрольной работы. Указывают только те источники, на которые имеются ссылки в тексте пояснительной записки. Литература в списке располагается в порядке появления ссылок на неё в тексте.

Приложения содержат вспомогательный материал (листинги программ, крупные рисунки, чертежи и т. п.). Рисунки, приводимые по тексту ПЗ и в приложениях, должны быть наглядными, хорошо читаемыми, каждый рисунок должен иметь название и порядковый номер, их нумерация может быть как сквозной во всем документе, так и в пределах раздела.

Текст **основной части** расчетно-пояснительной записки содержит сплошной текст, формулы, расчеты, таблицы, иллюстрационный материал (рисунки, схемы, диаграммы). Описание производимых действий рекомендуется выполнять следующим образом: «мы рассчитали», «нами рассчитано», «мощность определяется», «график построен по результатам, приведенным в таблице 2.1» и т.п.

Каждый раздел рекомендуется начинать с нового листа. Номер подраздела состоит из номера раздела и подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела точка не ставится. Разделы и подразделы должны иметь заголовки, которые следует писать с прописной буквы.

Все листы пояснительной записки имеют сквозную нумерацию. Номер страницы проставляют арабскими цифрами внизу страницы по центру без точки (за исключением титульного листа).

Поля страниц рекомендованы следующие: верхнее – 2 см; нижнее – 3 см; левое – 2 см; правое – 1,5 см.

Текст пояснительной записки набирается с соблюдением следующих правил:

- абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца;
- все слова внутри абзаца разделяются только одним пробелом;
- перед знаком препинания пробелы не ставятся, после знака препинания – один пробел.

Рекомендуемый **стиль для набора текста** – обычный, шрифт Arial Суг, 14 пт; строчный; выравнивание по ширине; межстрочный интервал – одинарный; запрет висячих строк; с переносом слов. Абзацы в тексте начинают отступом, равным 0,75 см.

Расчетные **формулы** должны иметь порядковый номер (допускается сквозная нумерация или нумерация внутри каждого раздела). Формулы набираются в редакторе формул, их вид и размер должен быть легко

читаем. Номера формул обозначают арабскими цифрами в круглых скобках, располагаются у правого края полосы без отточия между ними и формулой. Пример оформления формул в тексте приведен в прил. 2.

Таблицы, рисунки, формулы и неравенства следует отделять от основного текста абзацем. Текст формулы следует располагать по центру страницы, порядковый номер формулы – в правом краю страницы, той же строкой, что и сама формула. К расчетным формулам и неравенствам дается пояснение символов и числовых коэффициентов, непосредственно под формулой. Первая строка расшифровки начинается словом «где» без двоеточия после него.

После приведения в тексте расчетной формулы обязательна расшифровка всех величин, входящих в формулу, с указанием их размерности. Далее приводится один подробный пример расчета с подстановкой всех числовых значений соответствующей размерности.

Результаты расчета допускается сводить в **таблицы**, также таблицы следует применять для лучшей наглядности и удобства сравнения показателей. Вид таблиц самостоятельно разрабатывается студентом.

Название следует помещать над таблицей и нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой, например, «Табл. 3.1 Сводная ведомость грузов». На все таблицы должны быть приведены ссылки в тексте, при ссылке следует писать слово «табл.» с указанием её номера. Таблицу помещают сразу под текстом, в котором впервые дана на неё ссылка, или на следующей странице (если размер таблицы этого требует).

Рисунки и таблицы, приводимые в тексте ПЗ, следует отделять от основного текста абзацем. Рисунки должны располагаться непосредственно сразу после текста, в котором они впервые упоминаются, или на следующей странице (если это обосновано размерами рисунка).

Рисунки должны быть выполнены в программе Microsoft VISIO. Если студент намеревается привести в пояснительной записке рисунки, диаграммы и т.п., полученные в других программах (к примеру, MathCAD, Excel и т.п.), то рисунки из этих программ следует вставить в Microsoft VISIO, обработать до вида, требуемого настоящими правилами оформления, и, только после этого, сохранив как объект VISIO, поместить в текст ПЗ. Прямая вставка рисунков из иных программ, кроме WORD и VISIO недопустима.

Рисунки нумеруют арабскими цифрами сквозной нумерацией и именуются, например: «Рис. 2. График суточной активной мощности потребителя». Для подрисовочной подписи рекомендуется шрифт на 2 кегля

меньше обычного шрифта (Arial, 12 пт). Выравнивание по ширине рисунка выполняется в том случае, если подрисовочная подпись короткая и уместается в одну строку. Если подрисовочная подпись занимает более одной строки, то ее выравнивают по ширине рисунка и она не должна выходить за его пределы. Примеры оформления рисунков и подрисовочных подписей приведены в прил. 2.

Ссылки на таблицы, рисунки и графики, приводимые по тексту ПЗ, выполняют следующим образом:

- «...как показано на рис. 2.1, наибольшему значению мощности соответствует период времени с 2 до 3 часов»;
- «... расчеты для остальных потребителей по формуле (2.8) произведем аналогично и результаты сведем в табл. 2.5».

Ссылки на литературу по тексту пояснительной записки выполняются указанием в квадратных скобках порядкового номера источника в соответствии со списком литературы. Например: «Согласно [1] выбираем провод типа АС-10/1,8; с допустимым током $I_{\text{доп}} = 84 \text{ А}$ ».

Используемая литература в списке использованных источников записывается по системе: порядковый номер, автор, название, место издания, издательство, год издания, количество страниц. Например:

«3. Конюхова, Е.А. Электроснабжение объектов [Текст] : учеб. пособие / Е.А. Конюхова. – 10-е изд., стер. – М. : Академия, 2013. – 320 с.

4. Электронный ресурс <http://scbist.com>».

Примеры оформления рисунков, таблиц, фрагментов текста с формулами и ссылками на них и используемые литературные источники приведены в прил. 2 и 3.

Более детально требования к оформлению работ и примеры оформления текстовых частей, рисунков, таблиц и формул приводятся в [8].

1.3. Порядок сдачи контрольной работы

Выполненная контрольная работа (оформленная надлежащим образом пояснительная записка со схемами, чертежами, эскизами, скрепленная в виде единого документа формата А4) своевременно (согласно графику выполнения работы и срокам, указанным в бланке задания) сдается на проверку преподавателю, ведущему этот вид работы.

Распечатанную перед сдачей на проверку ПЗ студенту необходимо еще раз внимательно просмотреть и «от руки» устранить (при необходимости) опечатки, не распечатанные элементы и т.п.

Согласно стандартам ДВГУПС, контрольная работа сдается на проверку до начала экзаменационной сессии соответствующего курса. Работа на проверку сдается секретарю кафедры с фиксированием даты в журнале учета контрольных и курсовых работ.

Проверенная преподавателем в течение недели работа возвращается секретарю кафедры, который передает проверенную работу студенту для доработки и устранения замечаний в том случае, если таковые имеются. На титульном листе преподаватель оставляет запись «к устранению замечаний» или «к доработке». Замечания записываются преподавателем на обороте титульного листа и/или по тексту пояснительной записки. Устранение замечаний (исправление ошибок) производится на чистой стороне листа, противоположному листу с внесенными замечаниями. Не допускается изъятие студентом листов с замечаниями из проверенной работы и замена листов на новые.

Исправленная работа с внесенными исправлениями сдается студентом на проверку повторно (также через секретаря кафедры), но уже не фиксируется в журнале учета курсовых и контрольных работ.

В случае, если замечания по работе несущественные, то на титульном листе преподаватель записывает «к защите после устранения замечаний» – такую работу повторно на проверку сдавать не нужно, так как она уже допущена к защите, достаточно внести исправления, устранить замечания и явиться на защиту контрольной работы.

В случае, если по работе не имеется замечаний и она соответствует всем критериям оценки, приведенным ниже, то работа допускается к защите. В таком случае на ее титульном листе преподаватель оставляет запись «к защите».

Критериями оценки контрольной работы являются:

- своевременность сдачи, соответствие заданию;
- соответствие требованиям (по структуре, оформлению, содержанию, правильности выполнения расчётов, адекватности выводов по результатам работы);
- индивидуальность исполнения, глубина и качество проработки вопросов (стилистика расчетов и оформления ПЗ, самостоятельность и оригинальность суждений при формировании выводов о проделанной работе).

Таким образом, студенту в соответствии со своим заданием надлежит выполнить расчеты и построение графиков (таблиц), оформить надлежащим образом ПЗ и сдать ее на проверку ведущему преподавателю. В случае возврата отчета на доработку – устранить замечания и повторно сдать на проверку. В случае выполнения всех выше обозначенных критериев оценки работа допускается к защите. Защита контрольных работ производится по усмотрению преподавателя либо в

виде устного опроса, либо в виде тестирования. Защита данной контрольной работы, как правило, проводится в тестовой форме. Примеры тестовых заданий приведены в п. 2.3 данных методических указаний.

2. ОЦЕНКА НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ

Контрольная работа является самостоятельной работой студента. В процессе выполнения контрольной работы студент учится на практике применять теоретические знания и умения, полученные в процессе изучения курса «Электромагнитная совместимость», самостоятельно работать с методической, нормативной и справочной литературой, что в дальнейшем поможет приобрести навык решения более сложных и ответственных задач. Одной из важных задач для студентов является закрепление практических навыков по оформлению технических документов (пояснительной записки, содержащей результаты расчетов, рисунки, чертежи и т.д.) в соответствии с требованиями ЕСТД и ЕСКД.

Цель контрольной работы: ознакомиться с назначением, принципами расчета ПКЭ и оценки соответствия нормативным требованиям в точке передачи электрической энергии на примере одного из показателей качества электрической энергии – коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности.

Задание на выполнение контрольной работы: задание содержит исходную информацию о данных часового контроля напряжений на шинах подстанции переменного тока, на основании которых производится расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности и оценка его соответствия требованиям существующих нормативных документов.

Бланк задания на контрольную работу выдается каждому студенту лично на установочной сессии, номер варианта задания указан в бланке. Пример бланка задания на контрольную работу приведен в прил. 4.

2.1. Основные теоретические сведения о несимметрии напряжений в трехфазных системах

Согласно [1], уровень электромагнитной совместимости в системе электроснабжения – это регламентированный уровень кондуктивной электромагнитной помехи, используемый в качестве опорного для координации между допустимым уровнем помех, вносимым техническими средствами пользователей электрических сетей, и уровнем помех, вос-

принимаемым техническими средствами, подключенными к электрической сети, без нарушения их нормального функционирования. Качество электрической энергии характеризует меру электромагнитного воздействия системы электроснабжения на приборы, аппараты, электрооборудование через кондуктивные электромагнитные помехи, распространяющиеся по электрической сети. Таким образом, КЭ характеризует электромагнитную среду, в которой функционирует подключенное к ней оборудование, и представляет собой степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ.

По определению того же ГОСТ 32144-2013 [1], несимметрия напряжений – это состояние трехфазной системы энергоснабжения переменного тока, в которой среднеквадратические значения основных составляющих междуфазных напряжений или углы сдвига фаз между основными составляющими междуфазных напряжений не равны между собой. Пример несимметричной трехфазной системы напряжений приведен на рис. 2.1, а.

Как известно из курса электротехники, любую несимметричную трехфазную систему можно представить в виде суммы трех симметричных систем – прямой, обратной и нулевой последовательности, как показано на рис. 2.1. Такой метод получил широкое применение в научной практике и носит название метода симметричных составляющих.

На рис. 2.1, б, приведены векторные диаграммы трех симметричных трехфазных систем:

1) система прямой последовательности - ее составляют три вектора – \bar{U}_{1A} , \bar{U}_{1B} и \bar{U}_{1C} , имеющие одинаковый модуль (длину) и сдвинутые друг относительно друга на угол, равный 120° . Вектор \bar{U}_{1A} , вращаясь против часовой стрелки, опережает вектор \bar{U}_{1B} , а вектор \bar{U}_{1B} опережает вектор \bar{U}_{1C} . Иными словами, порядок чередования векторов в системе прямой последовательности прямой (такой же, как и в исходной несимметричной системе): А–В–С. Система прямой последовательности уравновешенная, сумма векторов трех фаз равна нулю;

2) система обратной последовательности – ее составляют векторы \bar{U}_{2A} , \bar{U}_{2B} и \bar{U}_{2C} . Они так же, как и в системе прямой последовательности, имеют одинаковую длину и сдвинуты друг относительно друга на угол, равный 120° . Но чередование фаз идет в обратном порядке: А–С–В. При вращении против часовой стрелки ось 0-х сначала пересекает вектор \bar{U}_{2A} , затем вектор \bar{U}_{2C} , а затем уже вектор \bar{U}_{2B} . Система обратной последовательности также уравновешенная (т.е. сумма векторов трех фаз равна нулю);

3) система нулевой последовательности – образуется векторами \bar{U}_{0A} , \bar{U}_{0B} и \bar{U}_{0C} , которые одинаковы по модулю и направлению (сонаправленные). Система нулевой последовательности симметричная, но не уравновешенная.

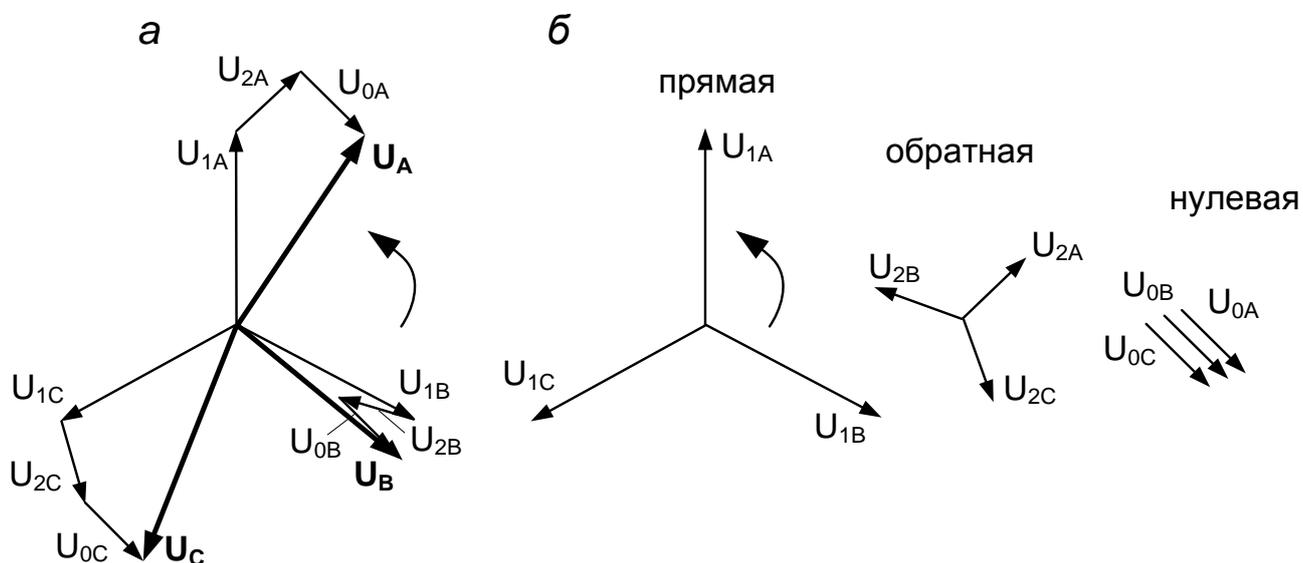


Рис. 2.1. Разложение несимметричной системы векторов фазных напряжений (а) на симметричные составляющие (б) прямой, обратной и нулевой последовательностей

На рис. 2.1, а, графически показано, как при помощи сложения одноименных векторов напряжений трех последовательностей (для каждой фазы) получается исходная, несимметричная система напряжений.

В соответствии с [1], несимметрию напряжений в трехфазных системах характеризуют следующие ПКЭ:

- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{U2} ;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{U0} .

Подчеркнем, что данные коэффициенты имеют смысл лишь для трехфазных систем, единицей их измерения являются проценты.

Еще одним важным замечанием является тот факт, что система векторов междуфазных (линейных) напряжений \bar{U}_{BA} , \bar{U}_{AC} , \bar{U}_{CB} замкнута (составляется в треугольник), поэтому нулевая последовательность в ней присутствовать не может (и коэффициент K_{U0} для неё отсутствует/равен 0). В связи с этим для трехфазных сетей напряжением выше 1 кВ наибольший практический интерес представляют вопросы расчета и оценки коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{U2}), чему и будет посвящена расчетно-графическая часть данной контрольной работы.

2.1.1. Причины появления несимметрии напряжений в трёхфазной системе

Напомним, что несимметрия – это электромагнитное явление, которое является кондуктивной электромагнитной помехой, т.е. она распространяется по проводникам электрической сети и через обмотки трансформаторов и может действовать в электрических сетях с разными значениями напряжения. Как и все прочие кондуктивные электромагнитные помехи, несимметрия может ухудшить качество функционирования устройств, электроустановок или систем вплоть до их повреждения.

Изменения характеристик напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии пользователю электрической сети, относящихся к частоте, значениям, форме напряжения и симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения, подразделяют на две категории – продолжительные изменения характеристик напряжения и случайные события [1].

Продолжительные изменения характеристик напряжения электропитания представляют собой длительные отклонения характеристик напряжения от номинальных значений и обусловлены, в основном, изменениями нагрузки или влиянием нелинейных нагрузок.

Случайные события представляют собой внезапные и значительные изменения формы напряжения, приводящие к отклонению его параметров от номинальных. Данные изменения напряжения, как правило, вызываются непредсказуемыми событиями (например, повреждениями оборудования пользователя электрической сети) или внешними воздействиями (например, погодными условиями или действиями стороны, не являющейся пользователем электрической сети).

Несимметрия трехфазной системы напряжений относится к продолжительным изменениям характеристик напряжения. Она обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии (включение в трехфазную сеть несимметричных нагрузок, получающих питание от одной или двух фаз трехфазной сети) или несимметрией элементов электрической сети [1]. Источником несимметрии также являются несимметричные режимы, которые обусловлены тремя причинами [2, 3]:

- 1) неодинаковой нагрузкой фаз элементов сети, вызываемой работой электроприемников с нестабильной нагрузкой фаз (например, дуговые и сталеплавильные печи) и однофазных электроприемников (освещение, бытовые приборы, однофазная нагрузка электроподвижного состава железных дорог и т.п.);

2) неполнофазной работой линий, вызванной кратковременным отключением одной из фаз линии при коротких замыканиях или более длительным отключением при пофазных ремонтах, наличием поперечных реакторов не во всех фазах линии и т.п.;

3) неравенством фазных параметров линий, обусловленным различным расположением проводов на опоре. Несимметрия напряжений, вызванная этим фактором, на порядок меньше первых двух, и устраняется для линий 330÷750 кВ путем транспозиции проводов (поочередное изменение расположения проводов на опорах в пределах шага транспозиции).

На практике наиболее частой причиной несимметрии напряжений является неравенство токовых нагрузок фаз.

2.1.2. Последствия влияния несимметрии напряжений на работу электроприемников

Качество электроэнергии непосредственно связано с экономичностью производства, поскольку отклонения ПКЭ от номинальных приводят к снижению коэффициентов полезного действия, мощности, производительности, срока службы и других показателей потребителей электроэнергии [2–4]. Другим отражением качества электроэнергии является его влияние на сам предмет производства, т.е. на качество продукции. Действительно, отклонение показателей качества энергии от номинальных ведет непосредственно к нарушению технологических процессов (обработки, проката, гальванизации, нагрева и т. п.).

Снижение качества электрической энергии может приводить к ряду негативных последствий технологического и электромагнитного характера. В общем случае [3], отрицательное влияние электрической энергии низкого качества проявляется в следующих аспектах:

- увеличение потерь активной мощности и электрической энергии;
- невыполнение паспортных характеристик электрооборудования;
- сокращение срока службы электрооборудования;
- увеличение капитальных вложений в электрическую систему;
- нарушение нормального хода технологических процессов потребителей.

Как известно, основной нагрузкой в электрических системах являются электрические двигатели, доля которых составляет 60% всей нагрузки систем электроснабжения. В этой связи, особо выделяют негативное влияние несимметрии напряжений на работу электрических машин переменного тока. В этом случае в электрических машинах переменного тока возникают магнитные поля, вращающиеся не только с синхронной скоростью в направлении вращения ротора, но и в противоположном

направлении с удвоенной синхронной скоростью. В результате этого возникает тормозной электромагнитный момент, а также дополнительный нагрев активных частей машины, главным образом, ротора, за счет токов двойной частоты. Дополнительный нагрев электрических машин вынуждает снижать их располагаемую мощность, чтобы сохранить нормированный срок службы.

При возникновении несимметрии в синхронных машинах наряду с возникновением дополнительных потерь и нагревом статора и ротора могут возникать опасные вибрации в результате появления знакопеременных вращающих моментов и тангенциальных сил, пульсирующих с двойной частотой сети. При значительной несимметрии вибрация может оказаться опасной, в особенности при недостаточной прочности или наличии дефектов сварных соединений [2].

При работе электрооборудования в номинальном режиме дополнительные потери несимметрии напряжений приводят к перегреву токоведущих частей выше допустимой температуры. К примеру, при работе электродвигателя с номинальным вращающим моментом и коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности, равном 4%, срок службы его сокращается примерно в 2 раза только за счет дополнительного нагрева. К повышению температуры весьма чувствительна изоляция обмоток, срок службы которой существенно снижается.

Конденсаторные установки при несимметрии напряжений неравномерно загружаются реактивной мощностью по фазам, что делает невозможным полное использование установленной конденсаторной мощности. Кроме того, конденсаторные установки в этом случае усиливают уже существующую несимметрию, так как выдача реактивной мощности в сеть в фазе с наименьшим напряжением будет меньше, чем в остальных фазах (пропорционально квадрату напряжения на конденсаторной установке).

Несимметрия напряжений не оказывает заметного влияния на работу воздушных и кабельных линий, но срок службы оборудования этих линий может существенно снизиться.

При появлении в трехфазной сети 380 В напряжения нулевой последовательности ухудшаются режимы однофазных электроприемников. Токи нулевой последовательности постоянно протекают через заземлители и значительно высушивают грунт, увеличивая сопротивление заземляющих устройств. Это может быть недопустимо для работы релейной защиты, из-за усиления воздействия токов нулевой последовательности на низкочастотные установки связи. При появлении токов нулевой последовательности увеличиваются суммарные токи в отдельных фазах сети.

Несимметрия напряжений значительно влияет и на однофазные электроприемники. Так, к примеру, если фазные напряжения не равны, то лампы накаливания, подключенные к фазе с более высоким напряжением, имеют больший световой поток, но значительно меньший срок службы по сравнению с лампами, подключенными к фазе с меньшим напряжением. Несимметрия напряжений усложняет работу релейной защиты, ведет к ошибкам при работе счетчиков электроэнергии и т.д., поэтому несимметрию необходимо выявлять и уменьшать.

2.1.3. Мероприятия по уменьшению несимметрии напряжений

В настоящее время суммарная нагрузка отдельных предприятий содержит 85...90 % несимметричной нагрузки, поэтому крайне необходимо своевременно применять меры по выявлению, оценке и уменьшению несимметрии напряжений.

Уменьшения несимметрии можно добиться следующими путями [2–4]:

- снижением сопротивления сети токам обратной и нулевой последовательностей и снижением значений самих этих токов (путем выделения симметричных и несимметричных нагрузок на отдельные трансформаторы, использование на трансформаторах шунтовых симметрирующих устройств, перераспределение мощностей компенсирующих устройств по фазам сети так, чтобы компенсировать токи обратной последовательности и т.д.);

- симметрированием однофазной нагрузки: 1) путем применения схемных решений по перераспределению однофазной нагрузки между фазами линии электропередачи, т.е. включение нагрузок в сеть таким образом, чтобы несимметричность их электропотребления взаимно компенсировалась; 2) путем использования схем включения на оставшиеся фазы реакторов и конденсаторных батарей (схема Штейнметца) [3];

- использованием различных симметрирующих устройств: 1) несимметричное включение батареи конденсаторов; 2) использование в месте подключения однофазной нагрузки специальных симметрирующих устройств, включающих в себя конденсатор и реактор; 3) в случае временного непредсказуемого характера несимметрии в сети – применение автоматических симметрирующих устройств.

Отметим, что выбор конкретного мероприятия по уменьшению несимметрии напряжений на практике определяется технико-экономическим обоснованием, так как задача обеспечения ЭМС в целом ставит своей конечной целью снижение электромагнитных помех не до нулевого уровня (поскольку, зачастую, это слишком затратно), а до приемлемого, нормируемого уровня.

2.1.4. Нормирование и расчет несимметрии напряжений

В настоящее время в РФ нормативно-правовая база по вопросам качества электрической энергии находится в стадии реформирования и приведения в единое соответствие с системой европейских стандартов. Группу стандартов объединяет общее название «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная» [5]. ГОСТы, входящие в эту группу, по аналогии с европейскими документами, разнесены по следующему принципу – сами ПКЭ и их нормы приведены в одних ГОСТах [1], методы их измерений и расчета – в других [6], требования к средствам измерения – в третьих.

Показатели и нормы качества электрической энергии в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц приведены в ГОСТ 32144-2013 [1]. Для рассматриваемых в контрольной работе ПКЭ в ГОСТе установлены следующие нормы [1]:

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{U2} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{U0} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2% в течение 95% времени интервала в одну неделю;
- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{U2} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{U0} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Таким образом, оценка соответствия ПКЭ указанным в [1] нормам производится в течение расчетного периода, равного 1 неделе (10080 минут), причем замеры и расчеты усредняются за 10 минут.

Стандартом устанавливаются два вида норм – нормально допустимые и предельно допустимые значения (НДЗ и ПДЗ соответственно). Отметим, что такие названия использовались для обозначения норм в предыдущих изданиях ГОСТов по качеству электрической энергии, но в настоящем ГОСТ 32144-2013 такая аббревиатура уже не используется. Для более ясного понимания сложного языка нормативной документации в учебных целях воспользуемся этой аббревиатурой для лучшего понимания механизма оценки ПКЭ.

Качество электрической энергии по коэффициентам несимметрии по обратной (K_{U2}) и нулевой (K_{U0}) последовательностям будет счи-

таться удовлетворительным при одновременном соблюдении следующих условий:

- 1) в течение 95% времени измерений (9576 мин) значения ПКЭ находятся в нормально допустимых пределах (значения K_{U2} и K_{U0} меньше НДЗ, равного 2%, иными словами, находятся в пределах от нуля до 2%);
- 2) остальное время замера (5% от недели или 504 минуты) значения коэффициентов могут быть больше НДЗ, но меньше ПДЗ, иными словами, находятся в пределах от 2 до 4%.

При невыполнении одного из условий, КЭ считается неудовлетворительным, и далее следует процедура начисления штрафных надбавок виновнику за пониженное качество электроэнергии по рассматриваемому показателю качества электроэнергии, что будет рассмотрено далее.

Таким образом, недостаточно знать только значение ПКЭ. Для оценки КЭ необходимо знать, как долго значения ПКЭ находились в тех или иных пределах.

Сформулируем основные положения, необходимые для оценки качества электрической энергии по несимметрии напряжений:

- 1) показатели качества электрической энергии по несимметрии напряжений определяются как значения за расчетный период времени (сутки);
- 2) нормально допустимое и предельно допустимое значения обоих коэффициентов несимметрии напряжений равны соответственно 2,0 и 4,0%;
- 3) нормы на коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{U2}) одинаковы для сетей любых напряжений;
- 4) коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности (K_{U0}) имеет смысл только для четырехпроводных электрических сетей 0,4 кВ;
- 5) для оценки соответствия требованиям нормативных документов необходимо помимо численных значений ПКЭ знать длительность (время) нахождения ПКЭ в допустимых пределах.

Рассмотрим технологию расчета и анализа коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности для принятия решения о соответствии качества электрической энергии по этому ПКЭ требованиям ГОСТа [1, 6].

Согласно [6] расчёт коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{U2} , %, производят по выражению

$$K_{U2} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100, \quad (2.1)$$

где U_2 – напряжение обратной последовательности, В; U_1 – напряжение прямой последовательности, В.

Задача определения напряжений прямой и обратной последовательности достаточно просто решается при наличии современных средств измерительной и вычислительной техники, но отличается значительным объемом однотипных вычислений, которые машина выполняет быстро. В рамках данной контрольной работы введем следующие допущения, которые помогут нам, не меняя сути решаемой задачи, значительно сократить объем производимых вычислений.

Напряжение обратной последовательности U_{2i} , В, для каждого i -го наблюдения вычисляем по приближенной формуле:

$$U_{2i} = 0,62 (U_{нб\ i} - U_{нм\ i}), \quad (2.2)$$

где $U_{нб\ i}$, $U_{нм\ i}$ – наибольшее и наименьшее действующие значения из трех междуфазных (линейных) напряжений основной частоты в i -м наблюдении, В.

При этом относительная погрешность определения $K_{U_{2i}}$ по упрощенной формуле (2.2), не превышает 8% по сравнению с формулой, учитывающей все три линейных напряжения, как это записано в [6].

Далее допускается вычислять $K_{U_{2i}}$, %, для каждого i -го наблюдения по упрощенной формуле:

$$K_{U_{2i}} = \frac{U_{2i}}{U_{ном\ мф}} \cdot 100, \quad (2.3)$$

где $U_{ном\ мф}$ – номинальное значение междуфазного (линейного) напряжения, В.

При этом относительная погрешность определения $K_{U_{2i}}$ с использованием формулы (2.3) вместо формулы (2.1) численно равна значению отклонения напряжения прямой последовательности U_{1i} от номинального междуфазного напряжения $U_{ном\ мф}$. Как правило, это значение в большинстве случаев менее 5%, что удовлетворяет требуемой инженерной точности при выполнении контрольной работы.

Рассмотрим пример расчета коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{U_2} для подстанции переменного тока. Оговоримся сразу, что в качестве примера с целью уменьшения объема вычислений мы будем рассматривать интервал времени наблюдений, значительно отличающийся от требований ГОСТ 32144-2013. Подобное допущение целесообразно в учебных целях и не меняет сути производимых при этом расчетов.

Пример 2.1. Для подстанции переменного тока были произведены замеры междофазных напряжений на шинах 110 кВ за время наблюдений, равное 24 минутам. По результатам этих замеров, представленных в табл. 2.1, требуется:

- 1) определить значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности в каждом i -м замере $K_{U2 i}$;
- 2) найти среднее за время наблюдений значение K_{U2cp} и в первом приближении произвести оценку соответствия значения K_{U2cp} требованиям ГОСТ 32144-2013.

Таблица 2.1 – Результаты замеров напряжений на шинах подстанции

Номер замера $i =$	Время замера	Усредненное значение междофазных напряжений в i -м замере, кВ		
		$U_{AB i}$	$U_{BC i}$	$U_{CA i}$
1	01:00	110,0	112,0	111,4
2	02:00	112,5	112,2	111,4
3	03:00	110,4	109,1	112,0
4	04:00	112,0	112,4	114,1
5	05:00	111,3	112,3	110,9
6	06:00	110,0	114,0	110,8
7	07:00	111,6	114,0	112,0
8	08:00	110,5	112,0	112,4
9	09:00	114,0	113,0	112,4
10	10:00	111,8	114,0	108,0
11	11:00	112,8	112,0	110,9
12	12:00	112,0	113,0	110,0
13	13:00	114,5	111,5	107,0
14	14:00	111,3	112,3	110,3
15	15:00	114,2	114,2	110,7
16	16:00	117,0	115,0	113,0
17	17:00	112,4	115,0	109,9
18	18:00	116,9	115,0	110,0
19	19:00	114,2	112,4	112,0
20	20:00	110,0	111,4	105,0
21	21:00	110,0	112,4	108,0
22	22:00	114,3	111,0	110,0
23	23:00	109,5	111,0	108,0
24	24:00	114,2	111,0	109,0

Решение

Расчет будем вести по приближенным формулам (2.2) и (2.3). Сначала определим наибольшее и наименьшее действующие значения напряжений из трех междофазных напряжений основной частоты в каждом i -м наблюдении $U_{нб}$, $U_{нм}$. Так, в первом замере (01 мин 00 сек)

из трех значений $U_{AB\ i=1} = 110,0$ кВ, $U_{BC\ i=1} = 112,0$ кВ и $U_{CA\ i=1} = 111,4$ кВ выбираем $U_{нб(1)\ i=1} = 112,0$ кВ, $U_{нм\ i=1} = 110,0$ кВ, результаты занесем в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчета K_{U_2} на шинах 110 кВ подстанции

Номер замера $i =$	Значение междуфазных напряжений, кВ			$U_{нб(1)\ i},$ кВ	$U_{нм(1)\ i},$ кВ	$U_{2\ i},$ кВ	$K_{U_2\ i},$ %
	$U_{AB\ i}$	$U_{BC\ i}$	$U_{CA\ i}$				
1	110,0	112,0	111,4	112,0	110,0	1,24	1,13
2	112,5	112,2	111,4	112,5	111,4	0,68	0,62
3	110,4	109,1	112,0	112,0	109,1	1,80	1,63
4	112,0	112,4	114,1	114,1	112,0	1,30	1,18
5	111,3	112,3	110,9	112,3	110,9	0,87	0,78
6	110,0	114,0	110,8	114,0	110,0	2,48	2,26
7	111,6	114,0	112,0	114,0	111,6	1,49	1,35
8	110,5	112,0	112,4	112,4	110,5	1,18	1,07
9	114,0	113,0	112,4	114,0	112,4	0,99	0,90
10	111,8	114,0	108,0	114,0	108,0	3,72	3,38
11	112,8	112,0	110,9	112,8	110,9	1,18	1,07
12	112,0	113,0	110,0	113,0	110,0	1,86	1,69
13	114,5	111,5	107,0	114,5	107,0	4,65	4,22
14	111,3	112,3	110,3	112,3	110,3	1,24	1,13
15	114,2	114,2	110,7	114,2	110,7	2,17	1,98
16	117,0	115,0	113,0	117,0	113,0	2,48	2,26
17	112,4	115,0	109,9	115,0	109,9	3,16	2,88
18	116,9	115,0	110,0	116,9	110,0	4,28	3,89
19	114,2	112,4	112,0	114,2	112,0	1,36	1,24
20	110,0	111,4	105,0	111,4	105,0	3,97	3,61
21	110,0	112,4	108,0	112,4	108,0	2,73	2,48
22	114,3	111,0	110,0	114,3	110,0	2,67	2,43
23	109,5	111,0	108,0	111,0	108,0	1,86	1,69
24	114,2	111,0	109,0	114,2	109,0	3,22	2,9
$K_{U_2\ cр}$							2,24

Затем по формуле (2.2) определим действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений в i -м наблюдении U_2 . Расчет сразу будем производить в киловольтах, для первого наблюдения получаем

$$U_{2i=1} = 0,62 \cdot (112 - 110) = 1,24 \text{ кВ.}$$

Определим $K_{U_2\ i=1}$ в первом наблюдении по формуле (2.3).

$$K_{U_2\ i=1} = \frac{U_{2i}}{U_{ном_мф}} \cdot 100 = \frac{1,24}{110} \cdot 100 = 1,13\%.$$

Аналогичным образом рассчитаем значения $K_{U_2\ i}$ для оставшихся измерений и представим результаты в виде табл. 2.2.

Далее определим среднее значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{U2cp} в процентах как результат усреднения N наблюдений K_{U2i} по формуле:

$$K_{U2cp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{U2i}^2}{N}}. \quad (2.4)$$

В рассматриваемом нами примере на интервале времени 24 минуты фиксировались усредненные за каждую минуту значения K_{U2i} , поэтому $N = 24$.

Вывод. Полученное в результате расчета по формуле (2.4) значение K_{U2cp} составило 2,24%, что превышает нормально допустимое значение, равное 2%, следовательно, необходимо предусмотреть мероприятия по снижению несимметрии напряжений. Сказать однозначно, удовлетворительное ли качество электрической энергии по рассматриваемому ПКЭ нельзя, так как согласно нормативным документам помимо самого значения ПКЭ необходимо знать время выхода ПКЭ за нормально и предельно допустимые значения за всю длительность наблюдения, а нам это неизвестно, так как в рамках задачи мы это не рассчитывали.

Для окончательного принятия решения о соответствии рассматриваемого ПКЭ требованиям стандарта, необходимо найти время выхода значений ПКЭ за нормируемые пределы. Время выхода ПКЭ за НДЗ принято называть T_1 , а время выхода за ПДЗ – T_2 . В вопросах качества электрической энергии принято определять T_1 и T_2 по статистическим (интегральным) характеристикам.

Изменения параметров электрической сети, мощности и характера нагрузки во времени являются основной причиной изменения ПКЭ. Таким образом, ПКЭ – это величины случайные и их измерения и обработка должны базироваться на вероятностно-статистических методах. Поэтому, как уже отмечалось, в стандартах устанавливаются нормы ПКЭ и оговаривается необходимость их выполнения в течение 95 % времени наблюдений (для нормально допустимых значений).

Наиболее полную характеристику случайных величин дают законы их распределения (нормальный, равномерный и т.д.). Нормальное распределение играет исключительную роль в теории вероятностей и математической статистике. Это наиболее часто встречающийся закон распределения, его главная особенность в том, что он является предельным законом, к которому приближаются другие законы распределения при определенных условиях.

Опыт эксплуатации показывает наличие суточных, недельных и более длительных циклов изменения несимметрии напряжений во времени, что

позволяет находить вероятности появления тех или иных значений ПКЭ за рассматриваемые промежутки времени. Статистические данные подтверждают, что наиболее точно закон распределения несимметрии напряжений в электрических сетях может быть описан с помощью нормального закона распределения, которым и пользуются в практике контроля КЭ.

Аналитическое описание нормального закона осуществляется с помощью двух параметров: математического ожидания случайной величины (μ) и стандартного отклонения от среднего – среднего квадратического (квадратичного) отклонения (σ).

Применение вероятностно-статистических методов поясним на следующем примере. Для упрощения приборов контроля КЭ непрерывные случайные величины, которыми являются ПКЭ, заменяются при контроле дискретными последовательностями их значений. Наиболее удобной формой представления информации об изменениях случайной величины является гистограмма.

Гистограмма – графическое представление статистического ряда исследуемого показателя (случайной величины), изменение которого носит случайный характер. При этом весь диапазон изменения случайной величины напряжения делится на интервалы равной ширины (кванты). Затем находится вероятность (частота) попадания искомой случайной величины в этот интервал и производится построение гистограммы.

В нашем случае, вероятность попадания значения K_{U2} в интервал, обозначенный буквой m – $P(K_{U2})_m$, определяется как

$$P(K_{U2})_m = \frac{N_m}{N}, \quad (2.5)$$

где N_m – число попаданий K_{U2} в интервал m ; N – общее число наблюдений.

С помощью гистограммы находится и вероятность выхода исследуемого ПКЭ за нормально допустимые значения, по ней же находят величины T_1 и T_2 . Рассмотрим, как выполняется построение и расчет гистограммы на примере коэффициента K_{U2} , и определим относительное время выхода T_1 и T_2 за нормально и предельно допустимые значения, в итоге сделаем вывод о соответствии или не соответствии КЭ требованиям ГОСТ 32144-2013.

Для построения гистограммы по данным статистического ряда, полученного в результате эксперимента (за общее время), сначала определяют предварительное число квантов (интервалов) K , на которое должна быть разбита ось $0 - K_{U2}$, с помощью оценочной формулы:

$$K = 1 + 3,2 \cdot \lg N. \quad (2.6)$$

Найденное количество квантов (интервалов) округляют до ближайшего большего числа. Для построения и последующего анализа гистограммы удобнее, чтобы количество квантов было нечетным – рекомендуемое количество – 7 или 9 квантов. Порядковый номер кванта согласно описанному выше будет обозначаться буквой m , и принимать значения m от единицы до $m = K$.

Далее определяют длину интервала (кванта) ΔK_{U2}

$$\Delta K_{U2} = \frac{K_{U2max} - K_{U2min}}{K} \quad (2.7)$$

Полученную длину интервала часто округляют для удобства вычислений, в контрольной работе рекомендуется ограничиться двумя знаками после запятой (сотые доли).

Далее находят и графически отмечают границы каждого интервала вплоть до последнего так, чтобы в совокупности они точно перекрывали всю область от K_{U2min} до K_{U2max} , как показано на рис. 2.2.

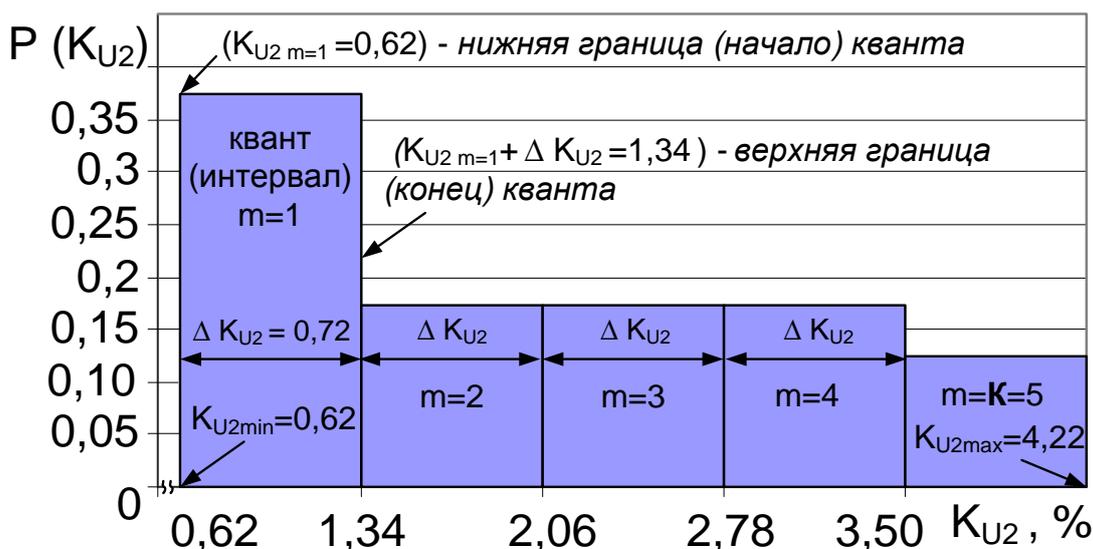


Рис. 2.2. Построение гистограммы плотности распределения K_{U2}

На следующем этапе подсчитывают количество попаданий искомого ПКЭ в каждый интервал (квант) – т.е. подсчитывают, сколько значений ПКЭ попало в каждый интервал – это количество попаданий и есть число N_m , шт. При этом, всю выборку (все значения случайной величины) принято называть вариационным рядом случайной величины, а каждое значение – членом вариационного ряда.

Затем из общего числа наблюдений N нужно выбрать и подсчитать число таких членов вариационного ряда K_{U2L} , которые попадают в рассматриваемый m -интервал и для которых справедливо неравенство:

$$K_{U2m} \leq K_{U2L} < (K_{U2m} + \Delta K_{U2}), \quad (2.8)$$

где K_{U2m} и $(K_{U2m} + \Delta K_{U2})$ – соответственно нижняя и верхняя границы m -го интервала.

Таким образом подсчитывают число наблюдений N_m , попавший в каждый квант m (интервал). При подсчете важно, что при использовании формулы (2.8) значения K_{U2} , совпавшие с границей соседних интервалов, нужно подсчитать только один раз. Своеобразной проверкой является сумма всех попаданий случайной величины в каждый интервал – она должна равняться общему числу наблюдений.

Далее рассчитывают по формуле (2.5) вероятность попадания коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{U2} в интервал, обозначенный буквой m – $P(K_{U2})_m$ и строят гистограмму плотности распределения (иначе – плотности вероятности) случайной величины.

По результатам построения гистограммы определяют вероятностные характеристики рассматриваемого коэффициента K_{U2} – математическое ожидание (μ), дисперсию (D) и среднее квадратическое (квадратичное) отклонение (σ):

$$\mu[K_{U2}] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{U2i}; \quad (2.9)$$

$$D[K_{U2}] = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (K_{U2i} - \mu[K_{U2}])^2; \quad (2.10)$$

$$\sigma[K_{U2}] = \sqrt{D[K_{U2}]}. \quad (2.11)$$

Математическое ожидание определяет средний уровень случайной величины за контролируемый период. Рассеяние случайной величины характеризуется дисперсией. Она равна математическому ожиданию квадрата отклонений случайной величины от ее среднего значения. Среднее квадратическое отклонение является стандартным отклонением, мерой разброса данных и характеризует рассеяние гистограммы, т.е. разброс отклонения случайной величины относительно ее математического ожидания.

Разберем более подробно порядок построения и анализа гистограммы на примере 2.2.

Пример 2.2

По результатам расчета коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{U2} на шинах 110 кВ подстанции переменного тока по данным замеров (см. пример 2.1) требуется:

- 1) построить гистограмму плотности распределения K_{U2} за период измерений (24 минуты);
- 2) определить математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение и дисперсию K_{U2} ;
- 3) произвести оценку соответствия K_{U2} требованиям ГОСТ 32144-2013.

Решение

Запишем результаты расчета примера 2.1 в виде статистического ряда (выборка измерений, произведенных через 1 мин) и представим их в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Статистический ряд K_{U2}

Номер замера $i =$	Время производства замера	$K_{U2i}, \%$
1	01:00	1,13
2	02:00	0,62
3	03:00	1,63
4	04:00	1,18
5	05:00	0,78
6	06:00	2,26
7	07:00	1,35
8	08:00	1,07
9	09:00	0,90
10	10:00	3,38
11	11:00	1,07
12	12:00	1,69
13	13:00	4,22
14	14:00	1,13
15	15:00	1,98
16	16:00	2,26
17	17:00	2,88
18	18:00	3,89
19	19:00	1,24
20	20:00	3,61
21	21:00	2,48
22	22:00	2,43
23	23:00	1,69
24	24:00	2,9

Находим предварительное количество квантов (интервалов), на которые должна быть разбита ось абсцисс от минимального K_{U2min} до максимального значения – K_{U2max} , с помощью ф. 2.6.

$$K = 1 + 3,2 \cdot \lg N = 1 + 3,2 \cdot \lg 24 = 5,42.$$

Для удобства построения примем ближайшее нечетное число квантов K , равное 5.

Определим длину интервала по формуле (2.7).

$$\Delta K_{U2} = \frac{K_{U2max} - K_{U2min}}{K} = \frac{4,22 - 0,62}{5} = 0,72\%.$$

Примем $\Delta K_{U2} = 0,72\%$. Рассчитываем границы интервалов и подсчитываем количество наблюдений N_m , попавших в каждый интервал (квант). Границы первого ($m = 1$) интервала: нижняя граница – 0,62%; верхняя граница – $[K_{U2min} + \Delta K_{U2}] = 0,62 + 0,72 = 1,34\%$.

Число попавших в этот интервал значений K_{U2} от 0,62 до 1,34% составило 9 шт.

Рассчитаем по формуле (2.5) плотность вероятности K_{U2} .

$$P(K_{U2})_{m=1} = \frac{N_m}{N} = \frac{9}{24} = 0,375.$$

Результаты представим в виде табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Данные для построения гистограммы

Номер интервала m	Граница m -го интервала	Число попаданий в интервал N_m , шт.	Плотность вероятности $P(K_{U2})_m$
1	0,62÷1,34	9	0,375
2	1,34÷2,06	4	0,167
3	2,06÷2,78	4	0,167
4	2,78÷3,50	4	0,167
5	3,50÷4,22	3	0,125
Сумма		24	1,001 \approx 1

При расчете данных надо убедиться в правильности произведенных вычислений – для этого есть два способа проверки:

1) сумма всех попаданий случайной величины в каждый интервал должна равняться общему числу наблюдений $\sum N_{mi} = N$;

2) сумма плотностей вероятностей случайной величины на каждом интервале равняется единице $\sum P(K_{U2})_{mi} = 1$.

В нашем примере примечательным является то, что на трех из пяти интервалов значения плотности вероятности $P(K_{U2})_m$ получились одинаковыми – 0,166666. При округлении до 0,167 в результате сложения всех $P(K_{U2})$ получаем 1,001 (единица), следовательно, расчёт выполнен верно.

В контрольной работе рекомендуется выполнять округление значений $P(K_{U2})_m$ до тысячных долей (три знака после запятой).

Далее можно переходить к построению гистограммы. На основании расчетных данных построим гистограмму плотности распределения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности $P(K_{U2})$ – эмпирический аналог функции плотности распределения вероятностей коэффициента K_{U2} (рис. 2.3).

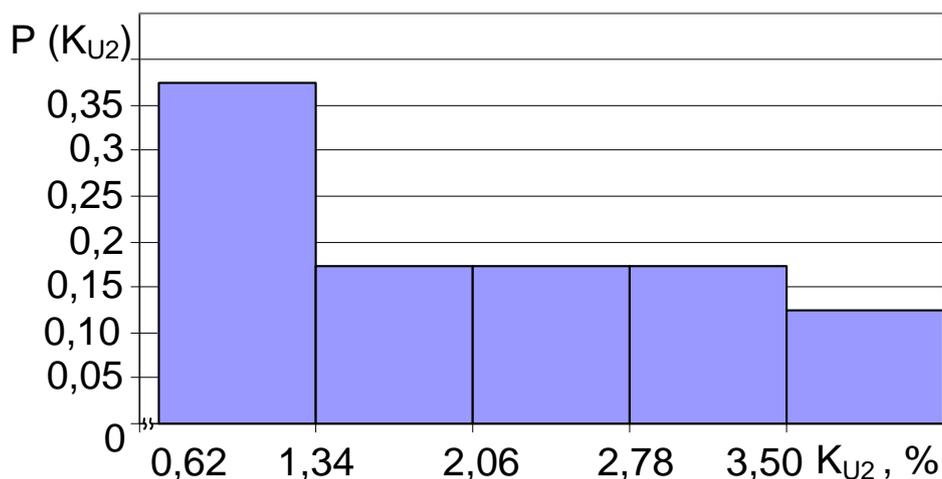


Рис. 2.3. Гистограмма плотности распределения K_{U2}

Определим математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение и дисперсию рассматриваемого коэффициента K_{U2} ; по формулам (2.9)–(2.11).

Математическое ожидание

$$\mu[K_{U2}] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{U2i} = \frac{1}{24} (1,13 + 0,62 + \dots + 2,9) = 1,996\%.$$

Дисперсия

$$D[K_{U2}] = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (K_{U2i} - \mu[K_{U2}])^2 =$$

$$= \frac{1}{24-1} [(1,13 - 1,996)^2 + (0,62 - 1,996)^2 + \dots + (2,9 - 1,996)^2] = 1,04.$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma[K_{U2}] = \sqrt{D[K_{U2}]} = \sqrt{1,04} = 1,02\%.$$

На основании статистической обработки результатов проделанных расчетов произведем оценку соответствия K_{U2} требованиям ГОСТ 32144-2013. Площадь фигуры, ограниченной кривой $P(K_{U2})$, представляет собой интегральную вероятность плотности распределения искомого ПКЭ, иными словами, если провести границы нормально и предельно допустимых зна-

чений так, как показано на рис. 2.4, то по площади фигуры, выходящей за эти пределы, можно в первом приближении оценить время выхода T_1 и T_2 за нормы ГОСТа.

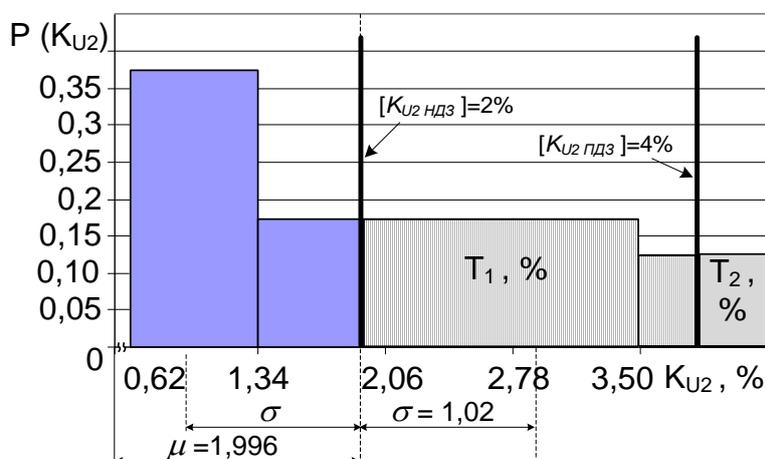


Рис. 2.4. Оценка соответствия K_{U2} требованиям ГОСТ 32144-2013 и определение относительного времени превышения нормированных значений T_1 и T_2

Согласно ГОСТ 32144-2013 нормально допустимое значение разрешается превышать в течение не более 5% от расчетного периода (5% от недели). Несмотря на то, что мы в нашем примере взяли гораздо меньший временной интервал – 24 минуты, но и за это время в первом приближении можно найти T_1 и T_2 и ответить на вопрос – качество электроэнергии по рассматриваемому ПКЭ удовлетворительное или нет.

В нашем примере из анализа рис. 2.4 невооруженным глазом видно, что площадь фигуры, вышедшая за отметку нормально допустимого значения $[K_{U2_ндз}] = 2\%$, то есть T_1 намного превышает допустимые 5% от всего времени замера ($T_1 \approx 50\%$ без точного расчета, приблизительная визуальная оценка). Также мы видим превышение и предельно допустимого значения $[K_{U2_пдз}] = 4\%$, $T_2 \approx 10\%$, т.е. $T_2 > 0$, что свидетельствует о неблагоприятной ситуации по несимметрии напряжений, существующей на рассматриваемой нами подстанции. Таким образом, можем заключить, что качество электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности на данном объекте неудовлетворительное.

Следовательно, чтобы сократить материальный ущерб от повреждения работоспособности аппаратуры вследствие несимметрии напряжений, на данной подстанции необходимо разработать и принять соответствующие организационно-технические мероприятия по уменьшению несимметрии напряжений.

Относительно штрафных санкций за электрическую энергию низкого качества, необходимо отметить следующие моменты, присутствующие в современной нормативно-правовой базе РФ [7].

1. В настоящее время в РФ отсутствует сформированная нормативная основа, позволяющая за искажение параметров КЭ применить гражданско-правовую ответственность в виде законной неустойки (надбавки).

2. Отсутствие у сторон договора энергоснабжения публичной обязанности уплачивать неустойку в случае внесения вклада в ухудшение КЭ влечет невозможность понуждения контрагентов к заключению данного договора на условиях гражданско-правовой ответственности за искажение ПКЭ. Таким образом, сегодня проблематично применение мер гражданско-правовой ответственности за ухудшение ПКЭ как со стороны энергоснабжающих организаций, так и со стороны потребителей.

3. Порядок и методики расчета фактического вклада потребителя в уровень ПКЭ и условия, касающиеся определения стороны, виновной в понижении качества ЭЭ, часто договорно не оговариваются в виду отсутствия нормативно-правовых актов, регламентирующих эти вопросы.

4. Ранее такие условия были определены и записаны в Инструкции Госкомцен и Минтопэнерго РФ № 01-12/1443-11, ВК-7539 от 30 ноября 1993 г. «О порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию», которая признана утратившей силу на территории РФ с 01 января 2001 г.

5. Ответственность энергоснабжающей организации в настоящее время сводится к п. 2 ст. 542 ГК РФ. Реально применяемая мера юридической ответственности за снижение качества ЭЭ – административная ответственность по ст. 19.19 КоАП РФ.

Несмотря на указанные аспекты состояния нормативно-правовых документов в области КЭ, воспользуемся методикой определения надбавок за пониженное качество ЭЭ, изложенной в Инструкции Госкомцен и Минтопэнерго РФ «О порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию», так как методика позволяют адекватно оценить и соизмерить степень ухудшения ПКЭ и именно ее основные положения используются в измерительной практике и по сей день (к примеру, при построении гистограмм ПКЭ современными измерительно-вычислительными комплексами (ИВК) для определения T_1 и T_2).

Надбавка за пониженное качество ЭЭ по каждому отдельно взятому ПКЭ определяется по формуле [4]:

$$H = 0,2 \cdot (T_1 - 5) + T_2, \% \quad (2.12)$$

Если значение T_2 получилось равным нулю (нет превышения предельно допустимых значений), а значение T_1 меньше 5 %, то надбавка считается равной нулю.

Существовавшая ранее практика заключалась в том, что конкретное значение скидки (надбавки) в зависимости от степени нарушения КЭ могла варьироваться от 0,2 до 10 % от тарифа на электрическую энергию. Оплата по тарифу со скидкой (надбавкой) за КЭ производилась за весь объем электрической энергии, отпущенной (потребленной) в расчетный период. Если в нарушении КЭ была виновна энергоснабжающая организация, то штрафная санкция реализовалась в виде скидки с тарифа, если был виновен потребитель – то в виде надбавки.

Рассмотрим этот «механизм» в цифрах на примере 2.3.

Пример 2.3

На основании результатов испытаний КЭ на шинах 110 кВ подстанции, представленных в табл. 2.6, рассчитать надбавку к среднему тарифу за весь объем ЭЭ, потребленной за расчетный период.

Таблица 2.6 – Результаты испытаний ПКЭ по K_{U2}

Значения K_{U2} , %				T_1 , %	T_2 , %
измеренные		нормируемые			
наибольшее $K_{U2\text{ нб}}$	среднее $K_{U2\text{ ср}}$	предельно допустимое	нормально допустимое		
5,46	2,59	4	2	23,38	0,81

Решение

Рассчитаем надбавку к среднему тарифу по формуле (2.12) как:

$$H = 0,2 \cdot (T_1 - 5) + T_2 = 0,2 \cdot (23,38 - 5) + 0,81 = 4,49 \%$$

Вывод. Надбавка за неудовлетворительное КЭ по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности составила $H = 4,49\%$.

Денежный эквивалент надбавки за расчетный период определяется путем умножения количества потребленной ЭЭ, кВт·ч, за расчетный период на полученное значение надбавки и на значение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии.

2.2. Порядок выполнения контрольной работы

В контрольной работе в качестве исходных данных студенту выдается бланк задания с результатами замеров междофазных (линейных) напряжений в точке отпуска электрической энергии за расчетный период (прил. 4).

По данным измерений напряжений на шинах высшего напряжения понизительной подстанции переменного тока требуется следующее.

1. Рассчитать статистический ряд коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{U2} , %, за расчетный период.

2. Построить гистограмму плотности распределения K_{U2} , рассчитать и отметить на гистограмме математическое ожидание K_{U2} , дисперсию и среднеквадратическое отклонение.

3. Отметить на гистограмме НДЗ и ПДЗ исследуемого ПКЭ.

4. Определить (визуально в первом приближении) по гистограмме время выхода полученных значений K_{U2} за нормально (T_1) и предельно допустимые значения (T_2) (в соответствии с существующими нормативными документами).

5. Рассчитать размер надбавки (Н, %) за пониженное качество электрической энергии по рассматриваемому ПКЭ.

6. На основании проделанной работы оценить степень соответствия качества электрической энергии требованиям нормативных документов и в случае неудовлетворительного КЭ предложить мероприятия по его улучшению.

7. Сделать краткие выводы относительно полученных результатов.

Примеры расчета и построения таблиц, оформления гистограмм представлены в примерах 2.1–2.3 и прил. 1–4 данных методических указаний.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Ниже приводятся примеры тестовых заданий, формулировка и форма отображения которых используются в тесте АСТ для защиты контрольной работы.

Задание 1

Вставьте пропущенное слово.

Электромагнитная совместимость – это _____ электротехнического оборудования работать удовлетворительно в электромагнитной среде и при этом не создавая недопустимого электромагнитного влияния на окружающую среду

Задание 2

Выберите один правильный вариант ответа из предлагаемых.

Несимметрия напряжений характеризуется коэффициентом _____ .

- 1) несимметрии напряжений по обратной последовательности;
- 2) несимметрии напряжений по прямой последовательности;
- 3) искажения синусоидальности напряжений;
- 4) n-й гармонической составляющей напряжения.

Задание 3

Установите соответствие между названием и обозначением величин векторов напряжения...

- | | |
|--------------------------------|-------------------|
| 1) прямой последовательности | А) \bar{U}_{2A} |
| 2) нулевой последовательности | Б) \bar{U}_{0A} |
| 3) обратной последовательности | В) \bar{U}_{1A} |

Задание 4

Выберите один правильный вариант ответа.

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности символьно обозначается как ...

- 1) k_{U2} ;
- 2) k_{U0} ;
- 3) $k_{\text{нул}U}$;
- 4) $k_{U\text{нул}}$.

Задание 5

Отметьте правильный ответ.

Нормально допустимое значение ПКЭ принято обозначать как ...

- 1) НДЗ;
- 2) ДПЗ;
- 3) ПДУ ПКЭ;
- 4) НЗ ПКЭ.

ТИПИЧНЫЕ НЕТОЧНОСТИ, ДОПУСКАЕМЫЕ СТУДЕНТАМИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

В качестве заключения хотелось бы отметить наиболее распространенные ошибки, совершаемые студентами при выполнении и оформлении контрольной работы.

1. Пояснительная записка студентом после распечатывания не вычитана, поэтому в ней содержатся не пропечатанные элементы – отсутствуют отдельные линии на графиках, символы в формулах и т.п.

2. В содержании пронумерованы те разделы ПЗ, которые нумеровать не надо (введение, заключение, исходные данные).

3. Оформление работы не соответствует требованиям ЕСКД и ЕСТД.

4. При символьном написании показателей качества электрической энергии их обозначения и расшифровка этих обозначений не соответствуют существующим ГОСТам [1, 6].

5. Одно и то же символьное обозначение параметра используется для разных числовых значений без присвоения индивидуального индекса.

6. Не указаны единицы измерения.

7. В расчет взяты величины, не приведенные к единой размерности.

8. Выводы по работе выполнены пространно, не указаны основные полученные результаты в цифрах.

Указанные моменты приведены для того, чтобы помочь студентам избежать подобных ситуаций и успешно выполнить, оформить и защитить контрольную работу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – Введ. 2014-07-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

2. Управление качеством электроэнергии [Текст] : учеб. пособие для вузов / И.И. Карташев [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МЭИ, 2011. – 360 с.

3. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии : рук. для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М. : ЭНАС, 2009. – 456 с.

4. Макашева, С.И. Мониторинг качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения переменного тока : моногр. / С.И. Макашева. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2008. – 104 с.

5. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://protect.gost.ru>

6. ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии [Текст]. – Введ. 2014-01-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 57 с.

7. Ответственность за снижение качества электроэнергии. Обзор арбитражной практики [Электронный ресурс] / А.А. Машкин [и др.] // Новости электротехники [Электрон. журн.]. – 2008. – № 6 (54). – Режим доступа : <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/54/12.php>

8. Игнатенко, И.В. Методическое руководство к структуре и оформлению курсовых и выпускных квалификационных работ [Текст] : методические указания / И.В. Игнатенко, А.Ф. Титов. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2014. – 85 с.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ФОРМА ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА
КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Дальневосточный государственный университет путей сообщения

Кафедра «Системы электроснабжения»

Пояснительная записка

к контрольной работе по дисциплине
«Электромагнитная совместимость и средства защиты»

ОЦЕНКА НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ
(название контрольной работы)

Студент _____
(Фамилия И.О. студента)

Номер зачетной книжки _____
(шифр зачетной книжки)

Дата сдачи на проверку _____

Проверил _____
(Фамилия И.О. преподавателя)

Хабаровск
2015

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ РИСУНКОВ (ГРАФИКОВ) ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

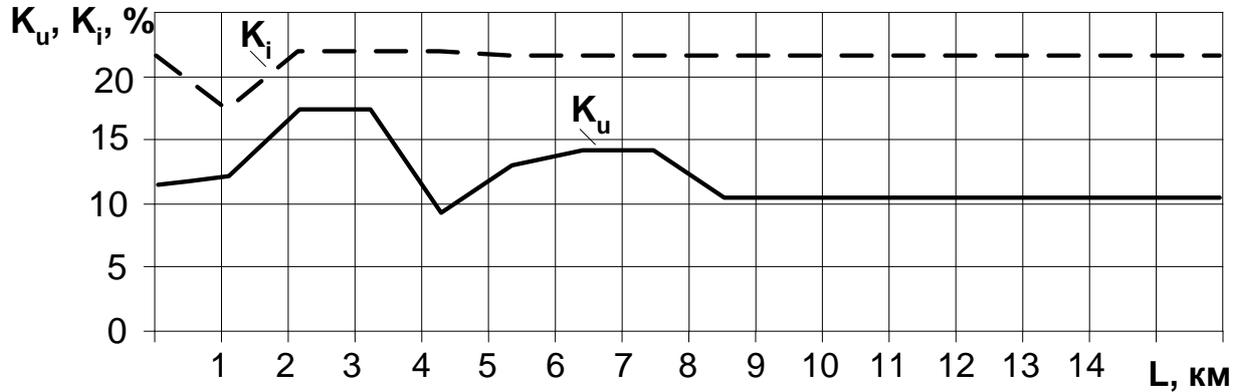


Рис. 5. Значения коэффициентов искажения синусоидальности кривых тока K_i и напряжения K_u на токоприемнике электровоза ВЛ 80С при движении по участку Губерово–Ружино ДвостЖД

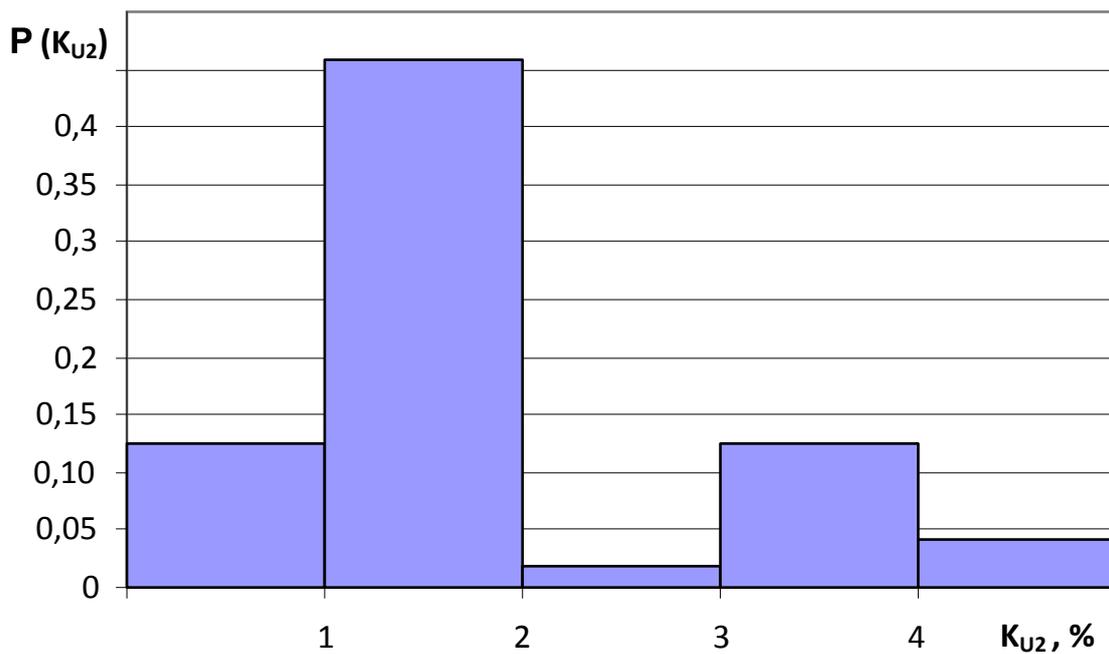


Рис. 5.2. Гистограмма плотности распределения K_{U2}

ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ (ФРАГМЕНТ) ТЕКСТА
С ФОРМУЛАМИ И ТАБЛИЦЕЙ

4.1 Выбор оптимального варианта настройки ФКУ ТП Ружино по напряжению

Для нахождения амплитуды n-ой гармонической составляющей необходимо усреднить измеренные значения $K_{U(n)}$ и по процентному содержанию высших гармонических составляющих (ВГС) в кривой питающего напряжения определить значение напряжения для каждой n-й гармоники U'_n , В по выражению из [5]:

$$U'_n = U_{\text{ном}} \cdot \frac{A_{U(n)}}{100}, \quad (4.1)$$

где $U_{\text{ном}}$ – расчетное значение питающего напряжения, В; $A_{U(n)}$ – процентное содержание напряжения n-й гармоники в кривой питающего напряжения, %.

Приведем пример расчета напряжения 3-й гармоники по формуле (4.1):

$$U'_3 = 25725,23 \cdot \frac{3,96}{100} = 1018,34 \text{ В}$$

Все остальные расчёты по формуле (4.1) проводим аналогично для двух режимов и сводим в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики ВГС напряжения

Номер ВГС, n	Частота ВГС, f_n , Гц	Процентное содержание, $A_{U(n)}$, %, при состоянии ФКУ		Среднее значение напряжения U'_n , В, при состоянии ФКУ	
		откл	вкл	откл	вкл
3	150	3,96	1,7	1018,34	449,30
5	250	3,6	2,7	928,16	730,25
7	350	2,8	1,9	708,93	506,74

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ПРИМЕР БЛАНКА ЗАДАНИЯ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

Задание на контрольную работу по дисциплине
«Электромагнитная совместимость и средства защиты»

Вариант 1 ФИО _____

Выдано _____ . 20__ Срок сдачи на проверку _____ . 20__

ФИО преподавателя _____

№ замера п/п	Напряжение, В			№ замера п/п	Напряжение, В		
	U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}
1	215636,5	226350,2	212065,9	16	215009,7	225462,2	212078,3
2	215053	226595,7	212070,3	17	214038,8	223614,5	212071,2
3	214608,3	226664,6	212070,9	18	213384,8	222345,5	212070,2
4	214957,1	226282,4	212073,2	19	214536,9	223552,7	212075,8
5	216394,8	225589,5	212073,4	20	213087,2	223167,7	212063,6
6	215728,8	225216,9	212087,2	21	213586,5	222533,6	212060,9
7	216727,8	224877,1	212087,1	22	215138,9	221151,4	212061,8
8	215349,8	225059,4	212081,3	23	216509,6	222363,4	212069,3
9	215804,1	225368	212081,3	24	217061,6	221886,8	212067,2
10	214464,2	225906,9	212072,9	25	217268,6	222265,4	212066,2
11	214033,8	225718,7	212069,1	26	217746	222097,9	212060,2
12	214268,7	225607,1	212062,1	27	216317,9	221619,9	212054,8
13	215821,3	225206,1	212073,1	28	215847,5	221140,4	212047,5
14	214815,5	225048,7	212073,3	29	215398,4	219929,3	212047,2
15	214093,5	225783,1	212064,8	30	215653	218780,8	212046

Длительность замера – 30 минут