

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И. РАЗЗАКОВА**

На правах рукописи

УДК 621.316.1

Абдиева Зарина Эдилбековна

**ИССЛЕДОВАНИЕ, РАСЧЕТ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ И
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ 380-220 В
ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ**

Специальность 05.20.02 - Электротехнологии и
электрооборудование в сельском хозяйстве

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
профессор Суеркулов М.А.

Бишкек-2021

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 380 В	13
1.1. Современное состояние проблемы несимметрии в сельских электрических сетях	15
1.2. Классификация несимметрии в сельских электрических сетях.....	19
1.3. Влияние несимметрии токов и напряжений на работу потребителей электрической энергии	26
1.3.1. Синхронные машины.....	27
1.3.3. Конденсаторные установки	31
1.3.4. Многофазные выпрямители.....	32
1.3.5. Трансформаторы, кабельные и воздушные линии	33
1.3.6. Однофазные потребители.....	35
1.4. Влияние несимметрии токов на показатели качества электрической энергии	37
ВЫВОД 1.....	43
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ СЭС, И ПРОГРАММА РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ НЕСИММЕТРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ.....	45
2.1. Методы анализа несимметрии	47
2.1.1. Метод симметричных составляющих для расчета показателей несимметрии токов и напряжений	47
2.1.2. Анализ способов учета наличия несимметрии нагрузки при расчете потерь мощности	49
2.2. Методы определения потерь электроэнергии в сельских сетях.....	67

2.2.3. Метод графического интегрирования.....	69
2.2.4. Расчет потерь ЭЭ с использованием величины τ – времени максимальных потерь.....	70
2.2.4. Вычисление потерь ЭЭ по времени 2τ	71
2.2.5. Определение потерь электроэнергии по величине средних нагрузок узлов	73
2.3. Способ измерения потерь электроэнергии в электрических сетях с помощью термостата	77
2.4. Управление переключениями нагрузок с исследованием режимов несимметрии в электрических сетях.	87
Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИИ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ НАПРЯЖЕНИЙ.....	91
3.1. Исследование и результаты.....	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	110

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. К настоящему времени весь топливно-энергетический комплекс страны (электроэнергетика, угольная промышленность, добыча и распределение газа, производство нефтепродуктов и возобновляемые источники энергии) находятся в сложном положении. «Национальная электрическая сеть Кыргызстана» (НЭСК) сообщила о том, что по всей республике наблюдается повышение потребления электроэнергии, в связи с чем призвала граждан экономно расходовать электричество.

На сегодняшний день энергосбережение является главным направлением энергетической политики Кыргызстана в новых экономических условиях. Минимизация экономических затрат при электроснабжении – большая комплексная задача. С ней тесно связаны задачи повышения качества электроэнергии и надежности электроснабжения. При этом важное место занимают мероприятия по снижению потерь электроэнергии и её рациональному использованию.

Потери электроэнергии в энергосистеме Кыргызстана за I квартал 2020 года составили 839 млн. 470,340 тыс. кВт.ч. В том числе потери электроэнергии по ОАО “НЭСК” составили 274 млн. 503,173 тыс. кВт.ч или 5,58% от поступления в сети НЭС Кыргызстана и 17,06% от поступления в сети энергосистемы Кыргызстана. По РЭКом потери составили 564 млн. 967,167 тыс. кВт.ч или 11,48% от поступления в сети. (<https://esep.energo.kg/?p=483> Кыргызский Энергетический Расчетный Центр)

Правительство Кыргызстана своим постановлением рекомендовало энергокомпаниям сократить уровень потерь до 12 процентов. Энергетики

рапортуют о достигнутых целях. Однако никто не может ответить, как эти самые потери высчитывают. Выяснилось, что методика измерения и расчета потерь электроэнергии отсутствует.

Совершенствование методов расчёта потерь - длительный эволюционный процесс, который развивается параллельно с ростом знаний о структуре потерь, с увеличением объёмов исходной информации, которую реально можно использовать для расчётов, с расширением возможностей информационных технологий и программного обеспечения. Это совершенствование, безусловно, необходимо для повышения объективности определения приоритетов расхода финансовых и материальных ресурсов на снижение потерь.

Международные исследования показали, что относительные потери электроэнергии при ее передаче и распределении в сетях большинства стран можно считать удовлетворительными, если они не превышают 4-5 процентов. Потери на уровне 10 процентов можно считать максимально допустимыми с точки зрения физики передачи энергии по сетям.

Известно, что в распределительных сельских электрических сетях напряжением 0,4кВ весьма актуальна проблема снижения коммерческих и технических потерь электроэнергии, обусловленных в основном хищением, утечкой и несимметрией токов, напряжений в фазах, а также проблема, связанная со слабым контактным соединением, износом и обрывом проводов линий электропередач.

Одним из факторов, влияющим на величину потерь, является наличие трансформаторов, которые выдают на выходе несимметричные фазные напряжения. Кроме того, неравномерно распределенная по фазам нагрузка вызывает несимметрию. Вследствие чего появляется большой ток в нулевом

проводе фидера. Этот ток приводит к паразитным потерям, достигающим до одной трети потерь в фидере 0,4 кВ.

Исследования эксплуатационных режимов сельскохозяйственных электрических сетей 0,38 кВ смешанными нагрузками, как крестьянские и фермерские хозяйства, животноводческие комплексы, кошары и предприятия по производству сельхозпродукции; тепличные и теплично-парниковые хозяйства; птицефабрики, инкубаторные птицеводческие станции, племптицезаводы (хозяйства), рыбопроизводные заводы (хозяйства), рыбхозы, рыбоводно-мелиоративные станции, племрыбопитомники, племрыбпункты, пчелопитомники и пчелопасеки, лесхозы, проведенные вузами и научно-исследовательскими институтами показали, что в сети возникает значительная несимметрия токов, то есть режимы работы сельских сетей 0,38кВ являются объективно несимметричными.

Несимметрия токов в сети вызывает несимметрию напряжений на зажимах трёхфазных электроприёмников, коэффициент нулевой последовательности напряжений во многих случаях превышает в 2...2,5 раза допустимое значение. Электрооборудование, используемое в электрических сетях и электроустановках, рассчитано для работы в симметричном режиме, поэтому несимметрия токов и напряжений в сети приводит к снижению эффективности его работы. При величине коэффициентов несимметрии токов обратной и нулевой последовательности в сети, равной 25...30%, потери мощности и электрической энергии в линиях 0,38кВ и трансформаторах потребителей увеличиваются на 30...50% по сравнению с симметричным режимом работы.

Несимметрия напряжений и токов трехфазной системы является одним из важных показателей КЭЭ, характеризующих режим электропотребления. Работа СЭС промышленных предприятий в условиях

несимметрии токов и напряжений вызывает экономический ущерб, составной частью которого является увеличение потерь активной мощности и потребление активной и реактивной мощностей. Методы расчета дополнительных потерь активной мощности и электроэнергии, обусловленных несимметрией представляют особый интерес, так как дополнительные потери активной мощности должны входить в общий баланс предприятия независимо от причин их возникновения. Применение в электроустановках напряжением до 1кВ однофазных и нелинейных нагрузок обострило в последние годы проблему высших гармоник нагрузочных токов в распределительных сетях.

Основной причиной возникновения длительных несимметричных режимов электрических систем является несимметрия распределения потребителей электрической энергии по фазам сети. К таким потребителям в первую очередь следует отнести электротехнологические установки, преобладающее большинство которых, вследствие несимметричного исполнения и особенностей самого технологического процесса, обуславливает несимметрию режима питающей электрической сети, что отрицательно влияет на работу потребителей и ведет к ухудшению показателей качества электрической энергии. Подключение таких потребителей к электрической сети вызывает в последней несимметрию токов и напряжений, которая отрицательно сказывается на работе всех звеньев системы: генераторов, линий электропередачи и трансформаторов, приемников электроэнергии.

При работе многофазной системы в несимметричном режиме снижается пропускная способность элементов сети, происходит дополнительный нагрев электрических машин, увеличиваются потери активной мощности и энергии в системах электроснабжения. Несимметрия

токов вызывает несимметрию напряжений, что в свою очередь приводит к отклонениям фазных и линейных напряжений сети.

Перечисленные выше факторы снижают технико-экономические показатели процессов передачи, преобразования и потребления электроэнергии, а иногда приводят к авариям в системах электроснабжения. Поэтому в соответствии с ГОСТ 32144-2013, устанавливающим нормы качества электрической энергии, нормально допустимая несимметрия напряжений у приёмников электроэнергии, присоединенных к электрическим сетям общего назначения, не должна превышать 2%, максимально 4% [ГОСТ 32144-2013, Межгосударственный стандарт электрическая энергия совместимость технических средств электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения].

Большой вклад в разработку методов расчета показателей качества и потерь электроэнергии, а также способов и средств снижения этих потерь обусловленных несимметрией токов в сетях 0,38 кВ внесли И.А. Будзко, В.Э. Воротницкий, О.Г. Гриб, Н.Д. Григорьев, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, Ф.Д. Косоухов, В.Г. Кузнецов, М.С. Левин, Т.Б. Лещинская, И.В. Наумов, С.М. Розанов, В.А. Скороходов, Н.Н. Сырых, А.К. Шидловский, С.А. Кулагин, Н.А. Мельников, И. Ф. Бородин и др. [1-3, 5-16, 18, 20-23, 25-27, 30, 32-35, 38, 42, 43, 45-52, 54, 56-64, 66-75, 78-92, 95-100, 102-106, 108, 109, 113-116, 117-125 и др.].

Анализ проблемы несимметрии в сельских электрических сетях 0,38 кВ показал, что существующие методы расчёта показателей несимметрии и потерь электроэнергии в этих сетях не позволяют установить закономерности их изменения от параметров нагрузки и сети, провести

анализ потерь при различных режимах работы электроприёмников и разработать наиболее эффективные способы и средства снижения несимметрии и обусловленных ею потерь, так как в этих методах несимметрия токов в сетях учитывается приближёнными способами. Кроме того, большинство научных работ не рассматривают проблему качества электрической энергии в целом. Так, например, повышение качества напряжения за счёт снижения уровня несимметрии напряжений рассматривалось в отрыве от проблемы снижения потерь мощности и энергии в сети, и, наоборот, вопросы снижения потерь не затрагивали проблему несимметрии напряжений [19, 76, 92, 127, 119, 128, 154, 153, 251, 252, 262, 268]. В месте с этим, до настоящего времени не разработаны общие методы расчёта сетей с несимметричными рассредоточенными нагрузками, которые широко распространены в сельскохозяйственных районах. Отсутствие комплексности в подходе к решению проблемы несимметрии приводило в отдельных случаях к недостаточно верным выводам и рекомендациям по способам и средствам для снижения потерь электроэнергии в сетях 0,38 кВ, обусловленных несимметрией токов.

Таким образом все вышеизложенные позволяет сделать вывод об актуальности исследований потерь при несимметрии токов и напряжений. Поэтому важным и актуальным направлением исследований является развитие методов, совершенствование и разработка математических моделей для расчетов и анализа показателей качества электрической энергии.

Степень разработанности темы исследования. Имеющиеся научные публикации позволяют получить довольно полное представление о современном состоянии и перспективах в области разработки методов и средств повышения качества электрической энергии. Тем не менее,

существующие методики расчетов характеристик электроэнергетических систем не в полной мере учитывают несимметрию, в том числе высокую скорость их изменения во времени.

Объект исследования. *Сельские электрические сети 380 В*

Предмет исследования. *Потери электроэнергии при несимметричных режимах в сетях 380 В*

Цель исследования является развитие методов расчета потерь электроэнергии в сельских электрических сетях напряжением 380 В, вызванных наличием нагрузок с несимметричным характером

Основные задачи исследования:

1. Исследование несимметричных режимов сельских электрических сетей напряжением 380 В;
2. Анализ методов расчета потерь ЭЭ и определение зависимости от уровня несимметрии при несимметричном режиме.
3. Разработка способа измерения потерь электроэнергии в сельских электрических сетях 0,38 кВ, при различных режимах потребления электроэнергии.
4. Нахождения численного значения для определения рассеивания энергии при номинально заданной температуре, с учетом повышения сопротивления токопроводящих жил.
5. Разработка экспериментальной установки, физической модели элементов трехфазной электрической сети с помощью Arduino.

Научную новизну диссертационной работы составляют: способ измерения потерь электроэнергии в сельских электрических сетях с помощью разработанной экспериментальной установки, основным элементом которой являются колбы. В колбах расположены физические модели элементов трехфазной электрической сети. Основным устройством установки является Arduino, с помощью которого проводится экспериментальное исследование по влиянию несимметрии на потери электроэнергии; выявления коэффициента разности рассеивания энергии при повышении сопротивления токопроводящих жил при номинально заданной температуре.

Практическая значимость состоит в том, что результаты исследований могут быть использованы энергетическими компаниями Кыргызстана для энергосбережения и улучшения качественного состава ЭЭ, отпускаемой коммунально-бытовым и производственным потребителям; полученные экспериментальные и теоретические данные могут использоваться в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров КГТУ им. И. Раззакова.

На защиту выносятся:

- 1) результаты анализа методов расчета несимметричных режимов работы электрических сетей 0,38 кВ;
- 2) компьютерная программа расчёта показателей несимметрии токов и напряжений;
- 3) результаты анализа экспериментальных исследований несимметричных режимов в действующих электрических сетях 0,38 кВ на основе разработанной установки

Методы исследования. Для достижения задач определенных в диссертационной работе применялись основные положения теории электрических цепей и метода симметричных составляющих, численного программирования и натурального эксперимента.

Степень достоверности, апробация работы и публикации. Достоверность произведенных исследований подтверждается корректностью использованных методов расчётов симметричных составляющих токов и напряжений. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных научно-практических конференциях КГТУ международной научно-практической конференции ежегодной конференции бакалавров, магистров и

По теме диссертационной работы опубликовано ??? печатных работ, в том числе один патент на изобретение КР и 3 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК КР

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов, списка литературы из 46 наименований и 2 приложений. Работа изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков и 8 таблиц.

Результаты исследований использованы в ОАО «Северэлектро» и учебном процессе Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова.

Личный вклад автора. Результаты экспериментальных исследований, представленные в диссертации, получены автором лично. Вклад автора в работы, выполненные в соавторстве, заключается в обсуждениях и постановке задач на этапах научной работы, в получении, анализе и оформлении полученных результатов.

ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 380 В

За последние годы произошло значительное увеличение установленной мощности электрооборудования сельскохозяйственных предприятий, а также в быту сельских жителей. По численности и составу электроустановок, требованиям к надёжности их электроснабжения и качеству электроэнергии они приблизились к промышленным потребителям. Основной отличительной чертой современного сельского электроснабжения является то, что сельскохозяйственные потребители сосредоточили на своем балансе значительное количество линий электропередачи, трансформаторных подстанций, электродвигателей и других производственных и бытовых электроустановок.

В 2020 году по сравнению с предыдущим годом увеличилось потребление электроэнергии в сфере сельского хозяйства в Кыргызской Республике - на 3,1%.

В энергосистеме эксплуатируется 18 электрических станций установленной мощностью 3666 мВт, включая 16 гидроэлектростанций и 2 тепловые электростанции, эксплуатируются более 10 тыс. км высоковольтных линий электропередачи напряжением 35 - 500 кВ, более 70 000 км распределительных сетей 10 – 0,4 кВ,

В связи со значительным увеличением стоимости электроэнергии одной из основных задач, стоящих перед современной промышленностью, являются повышение эффективности производства при экономном расходовании материальных ресурсов, в том числе топлива и энергии.

Поэтому вопросы снижения потерь электроэнергии приобретают первостепенное значение.

В отопительном сезоне 2020-2021 годов ситуация резко обострилась. В самые холодные дни мощности работали сверх установленных планов по выработке. Было достигнуто максимальное потребление электроэнергии за все время существования энергосистемы Кыргызстана – 73 млн кВт/ч.

В целом по республике в 2020 году предприятиями энергетической отрасли произведено 15,4 млрд. кВт. часов электроэнергии, что на 1,9% больше, чем в 2019 году. При этом, около 91% ее объема выработано гидроэлектростанциями.

Таблица 1.1. Производство и распределение электроэнергии в 2020 году

	Млн. кВт. часов	В процентах к 2019
Произведено электроэнергии	15 404,2	101,9
Получено из-за пределов республики 1	352,6	131,0
Потреблено электроэнергии	15 456,7	102,3
Промышленностью 2	7 061,8	106,4
Сельским хозяйством	3 262,3	103,1
Прочие	2 717,7	91,3
Общие потери	2 414,9	103,3
Отпущено за пределы республики	300,1	111,4

<http://www.stat.kg/ru/news/deyatelnost-predpriyatij-elektroenergetiki-respubliki-v-2020-godu-harakterizovalas-rostom-osnovnyh-pokazatelej/>

Одним из путей сокращения потерь электроэнергии является повышение ее качества, от чего зависит экономическая эффективность производства. Снижение КЭЭ приводит не только к увеличению потерь напряжения и мощности в сетях, уменьшению их пропускной способности, но и к нарушению нормальной работы и снижению срока службы

электрооборудования, снижению количества и качества производимой продукции и уменьшению производительности труда. По экспериментальным и расчетным данным, снижение напряжения на 1% влечет снижение производительности электрооборудования от 0,1 до 2,0% [33].

1.1. Современное состояние проблемы несимметрии в сельских электрических сетях

В последние 20 лет наблюдается тенденция роста мощности нелинейных, несимметричных и резкопеременных нагрузок на предприятиях, в сельско- хозяйственных объектах. При этом растет число и мощность однофазных электроприборов. Все это привело к увеличению уровня электромагнитных помех в электрических сетях потребителей и энергосистем, которые, различаясь по своей природе, характеру изменения и интенсивности, оказывают неблагоприятное воздействие на силовые электроустановки, системы автоматики и телемеханики, связи и релейной защиты. преобразователи напряжений и частоты, двигатели постоянного тока, системы бесперебойного электропитания (ИБП), специальные трансформаторы, электрофильтры, газоразрядные лампы...генерируют гармоники, которые вызывают помехи в сети, конденсаторных установках, увеличивают искажения напряжения, а также при определенных условиях приводят к несимметричным и несинусоидальным режимам

Несимметричным режимом работы многофазной электрической сети считается такой режим, при котором условия работы фаз неодинаковы.

Степень несимметрии трехфазной четырехпроводной системы характеризуются коэффициентами напряжения обратной и нулевой последовательностей, а также коэффициентами обратной и нулевой последовательностей токов. При этом потери мощности, обусловленные несимметрией токов могут характеризоваться коэффициентом потерь мощности, равным отношению потерь мощности в несимметричном режиме, к соответствующим потерям мощности, обусловленным протеканием токов прямой последовательности [60-64]. Кратковременные несимметричные режимы имеют место при различного рода аварийных ситуациях и протекают в относительно короткие промежутки времени. Длительные нормальные режимы характерны для ряда несимметричных устройств: преобразователей фаз, симметрирующих элементов, несимметричных электродвигателей и т. д. Повышение несимметрии нагрузок приводит к заметным нарушениям симметрии токов и напряжений в трехфазных электрических сетях, особенно распределительных. Различают продольную и поперечную несимметрию. Продольная несимметрия возникает вследствие различия индуктивных сопротивлений отдельных фаз реакторов, которое допускается в пределах 10 % [80]. В настоящее время несимметрия, несинусоидальность, перенапряжения и колебания напряжений в электрических сетях и системах общего и специального назначения стали постоянно действующими факторами, существенно снижающими эффективность работы, как самих систем электроснабжения (СЭС), так и потребителей, подключенных к ним.

Причинами возникновения несимметричных режимов работы электрической системы, практически во всех случаях, является неравномерность распределения нагрузок по фазам и снижение нагрузок трёхфазных потребителей (электродвигателей, мощных трехфазных нагревателей).

В качестве описания состояния сельской сети 380 В, для примера рассмотрим РЭС ОАО «Северэлектро», который территориально разделен на три зоны - Чуйская область, г. Бишкек и Таласская область. В эксплуатации находятся трансформаторы 6-10/0,4кВ в количестве 8881 шт. суммарной установленной мощностью 2197,213 тыс. кВА. Более 60% электрооборудований работают выше нормативного срока, большая потеря из-за холостого хода т.к. в летний период трансформаторы загружены на 20%, а зимой загружены на 80-100% и выше. Работают трансформаторы в основном в несимметричном режиме, в результате этого трансформаторы выходят из строя, при этом происходит большая потеря электроэнергии. Из-за большого изменения климата (значительная разница температур в зимний и летний период) в зависимости от сезона наблюдается изменение сопротивления линии, в результате этого увеличивается потери в линии. Протяженность воздушных линий 0,4кВ составляет 11159,26 км, линии выполнены проводами А-16, А-35, А-50. Последние годы резко возросло потребление электроэнергии населением, а существующие линии 0,4кВ 30 лет назад были спроектированы только для целей освещения. В настоящее время каждый абонент потребляет в среднем 10кВт вместо проектного 3 кВт, существующие линии на эту нагрузку не рассчитаны и работают с большими перегрузками и потерями ЭЭ. Воздушные линии 0,4кВ были спроектированы по старым нормативным данным. Протяженность воздушной линии в магистрали иногда достигает до 8 км, а по новым нормативам и требованиям [2] должны быть не более 1км. Линии 0,4кВ проходят через густонаселенные местности, вдоль дорог и зеленых насаждений. Из-за близости к автодорогам, автомобили часто разбивают опоры линии электропередач. Ветки зеленых насаждений касаются голых проводов и часть электроэнергии уходит через стволы деревьев в землю, тем самым теряется часть электроэнергии. Из-за ветра происходит хлест проводов, в результате которого случается короткое замыкание на линии.

Характер нагрузки сети 0,4кВ следующий: несимметричные, двигательные, несинусоидальные, импульсные, резистивные. Выше перечисленные недостатки часто приводят к повреждению проводов линии и потери электроэнергии.

Более подробно рассмотрим участок, расположенный в сельской местности, питающих потребителей Аламединский РЭС, Воронцовский участок ОАО «Северэлектро». В этой местности расположены множество сельско-хозяйственных объектов как, база отдыха «Форель» (форелевое хозяйство), небольшие теплицы, мельница, пчеловодские производства, фермы для скота, включающие в себя дом, сараи для КРС, МРС, времянку, баню, денники для лошадей и курятник. и др..

На сельскохозяйственных предприятиях производственный процесс осуществляется средствами, оказывающими воздействие на животных и растения. К таким средствам относятся системы электрического нагрева:

1) электрокалориферы ($P_n = 5-100$ кВт), используемые для создания оптимальных параметров воздуха (температура, влажность, концентрация пыли и т.д.); 2) электроводонагреватели ($P_n = 5-1000$ кВт) для нагрева воды при отсутствии централизованного горячего водоснабжения; 3) электроустановки для сушки сельскохозяйственной продукции и кормов; 4) лампы термоизлучателей, используемые для облучения скота и птицы.

Для привода механизмов в сельском хозяйстве, как правило, используются асинхронные двигатели (синхронные двигатели и двигатели постоянного тока используются очень редко).

Мельницы, измельчители кормов, овощетерки, насосы для орошения, подъемно-транспортные механизмы – механизмы, для которых специально выпускаются электродвигатели, что обусловлено сложными условиями эксплуатации (химически активная атмосфера животноводческих помещений, большая запыленность зерноочистительно-сушильных комплексов, высокая влажность в кормоцехах, а также необходимость работать под открытым небом). Также большое значение в сельском хозяйстве имеют осветительные и облучающие электроустановки. Они оказывают биологическое воздействие на животных и растения. Облучатели используются для дезинфекции воздуха, ультрафиолетового облучения, обогрева инфракрасными лучами.

1.2. Классификация несимметрии в сельских электрических сетях

Несимметричный режим работы сельской электрической сети 0,4 кВ. является объективно существующей. Даже при равномерном подключении нагрузок возникает вероятность несимметрии токов. При вероятностной несимметрии нагрузки каждой фазы изменяется во времени. Несимметричные режимы в электрических сетях возникают по следующим причинам: 1) неодинаковые нагрузки в различных фазах, 2) неполнофазная работа линий или других элементов в сети, 3) различные параметры линий в разных фазах. Из-за несимметрии в сети могут быть следующие возмущения: в асинхронных и синхронных машинах возникают дополнительные потери нагрев в статоре и вибрации ротора; сокращается срок службы изоляции трансформаторов; синхронные двигатели и батареи конденсаторов уменьшают выработку реактивной мощности.]. Балансировка нагрузок по фазам значительно улучшает основные показатели качества ЭЭ.

В действующих сетях 0,38 кВ распределение однофазных электроприемников по фазам производится крайне неравномерно, в силу чего создается перегрузка одних, и недогрузка других фаз. В результате чего получается, так называемый «перекос фаз», или неслучайная несимметрия токов.

На стадии проектирования какого-либо сельскохозяйственного объекта, а также коммунально-бытового сектора при рассмотрении способов расположения схемы распределительной сети 0,38 кВ необходимо учитывать характер нагрузки и установленную мощность отдельных потребителей электроэнергии для того, чтобы осуществить их равномерное распределение по фазам сети. Кроме этого, в процессе эксплуатации низковольтной линии электропередачи 0,38 кВ с развитием сельскохозяйственных объектов и коммунально-бытового сектора к линии дополнительно подключается большое количество новых электроприемников, которые, в свою очередь, также необходимо подключать с учетом равномерной загрузки фаз.

Несимметрия токов вызывает появление тока в нулевом проводе, а вместе с тем и напряжение смещения нейтральной точки системы фазных напряжений. В результате этого напряжение фаз на зажимах электроприемников становятся неодинаковыми. Несимметрия напряжения является одной из характеристик качества электрической энергии (КЭЭ), в значительной мере определяющей экономичность и надежность электроснабжения. Несимметрия напряжения характеризуется двумя:

– коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности (k_{2U})

–коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности (k_{0U}).

Значения (k_{2U}) и (k_{0U}) определяются по следующим формулам:

$$(k_{2U}) = U_2 / U_1$$

$$(k_{0U}) = U_0 / U_1$$

где U_1 - действующее значение напряжения прямой последовательности (номинальное напряжение сети), В; U_2 — действующее значение напряжения обратной последовательности. В; U_0 - действующее значение напряжения нулевой последовательности, В.

Одним из сложных режимов сети является несимметричные режимы. В РЭС существует кратковременные (аварийные) и длительные (эксплуатационные) несимметричные режимы. В работающих сетях 0,4кВ распределение однофазных электроприемников по фазам производится крайне неравномерно. В силу этого создается перегрузка одних и недогрузка других фаз. В результате чего получается перекос фаз или несимметрия тока. Многолетние наблюдения в РЭС 0,4кВ [3,4,5] показали, что как правила от симметричного подключения однофазных потребителей нарушаются в 90% случаев.



Рис. 1.1. Классификация несимметричных режимов.

В системах электроснабжения различают кратковременные (аварийные) и длительные (эксплуатационные) несимметричные режимы. Кратковременные несимметричные режимы обычно связаны с различными аварийными процессами, как например несимметричные короткие замыкания, обрывы одного или двух проводов в воздушной линии с замыканием на землю и т.д. Длительные несимметричные режимы обычно обусловлены несимметрией элементов электрической сети неполнофазными ответвлениями (одно-, двухфазные ответвления) или подключением к системе электроснабжения несимметричных (одно-, двух- или трехфазных) нагрузок.

Аварийные (кратковременные) несимметричные режимы работы трехфазных цепей.

Для соединения трехфазной цепи в звезду возможны следующие аварийные режимы работы [7]:

- обрыв фаз (рис. 1.2а);
- обрыв нулевого провода (рис. 1.2б);
- короткое замыкание фазы при обрыве нуля (рис. 1.3в);

– обрыв фазы и нуля (рис. 1.3в).

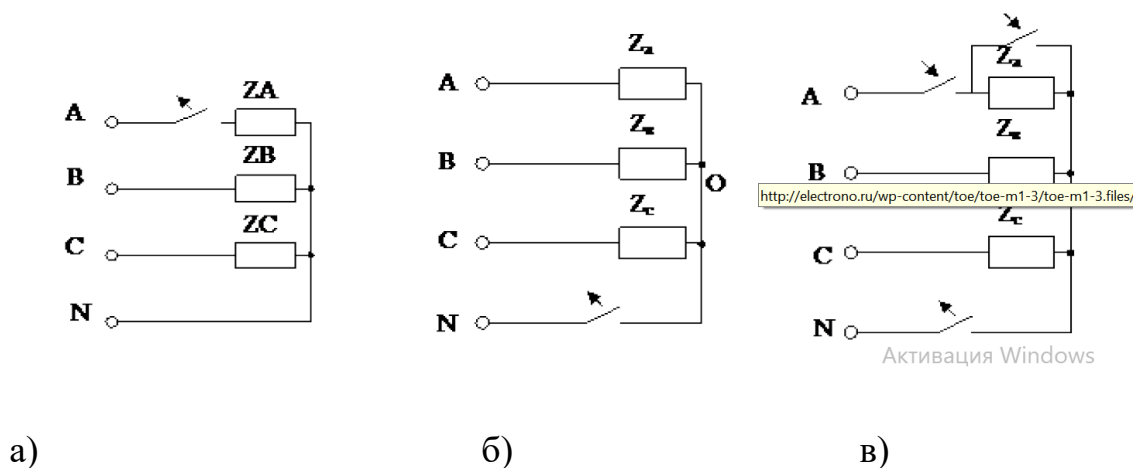


Рис. 1.2. Аварийные режимы работы

Несимметрию напряжений и токов, вызванную подключением к сети многофазных и однофазных несимметричных нагрузок (однофазные электроустановки, электросварочные устройства, тяговые нагрузки, трехфазные установки с несимметричным потреблением мощности по фазам и др.) называют поперечной. Поперечная несимметрия возникает также при неравенстве активных и реактивных сопротивлений отдельных фаз некоторых приемников электроэнергии. Примером поперечной несимметрии могут служить: междуфазное КЗ; однофазное и двухфазное КЗ на землю в электрических сетях с заземленной нейтралью; однофазное замыкание на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью; режим с несимметричными нагрузками в СЭС.

Несимметрию напряжений и токов, обусловленную несимметрией элементов сети, называют продольной. Примером продольной несимметрии являются неполнофазные режимы воздушных линий и несимметрия параметров фаз отдельных элементов сети. Продольная несимметрия обусловлена несимметрией одного (или нескольких) элементов электрической сети СЭС, если параметры схемы замещения отдельных фаз

этого элемента не одинаковы. Примером продольной несимметрии могут служить неполнофазные режимы СЭС, когда в одном из элементов электрической сети произошел обрыв фазы и передача электроэнергии через этот элемент осуществляется по двум фазам.

В дополнение к вышесказанному можно добавить, что существующие в сетях несимметричные режимы можно разделить в зависимости от ее типа (несимметрия напряжений, несимметрия токов, фазовая несимметрия) или ее характера (амплитудная, фазовая, амплитудно-фазовая) (рисунок 1.3.)

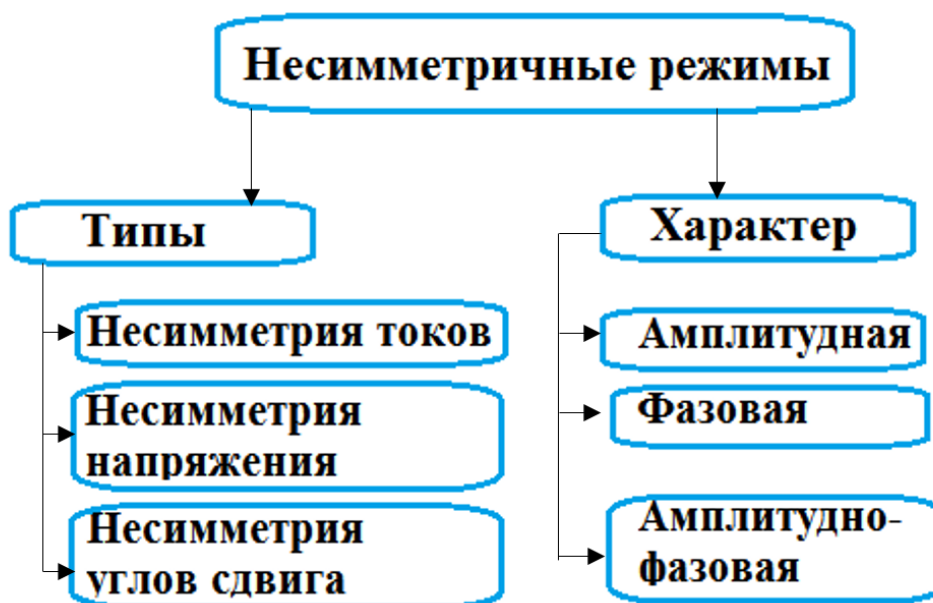


Рис 1.3. Типы несимметричных режимов.

В действующих сетях 0,38 кВ распределение однофазных электроприемников по фазам производится крайне неравномерно, в силу чего создается перегрузка одних, и недогрузка других фаз. В результате чего получается, так называемый «перекос фаз», или неслучайная несимметрия токов.

На стадии проектирования какого-либо сельскохозяйственного объекта, а также коммунально-бытового сектора при рассмотрении

способов расположения схемы распределительной сети 0,38 кВ необходимо учитывать характер нагрузки и установленную мощность отдельных потребителей электроэнергии для того, чтобы осуществить их равномерное распределение по фазам сети. Кроме этого, в процессе эксплуатации низковольтной линии электропередачи 0,38 кВ с развитием сельскохозяйственных объектов и коммунально-бытового сектора к линии дополнительно подключается большое количество новых электроприемников, которые, в свою очередь, также необходимо подключать с учетом равномерной загрузки фаз.

Следует отметить, что перераспределение нагрузок производить необходимо, так как проведенными исследованиями установлено, что потери электрической энергии, обусловленные случайной несимметрией токов, могут быть снижены на 15...20% [108]. Перераспределение нагрузок значительно улучшает основные показатели качества (отклонение напряжения, коэффициент несимметрии обратной последовательности напряжения и коэффициент несимметрии нулевой последовательности напряжения).

Кроме того, неравномерному характеру распределения однофазных электроприемников по фазам электрической сети, как правило, сопутствуют случайные включения и отключения данных потребителей электрической энергии. Эти предпосылки определяют возникновение кроме случайной несимметрии токов, несимметрии статической (случайной) или вероятностной, которая достигает значительных величин.

Таким образом, несимметричный режим работы электрической сети 0,38 кВ является объективно существующим, так как даже при пофазно равномерном подключении нагрузок возникает вероятностная несимметрия токов.

При вероятностной несимметрии нагрузка каждой фазы изменяется во времени независимо от изменения нагрузок других фаз, поэтому трехфазное регулирование напряжения, применяемое в сельских электрических сетях 0,38 кВ, не в состоянии обеспечить нормированное напряжение на зажимах токоприемников без применения дополнительных мер по симметрированию фазных токов в электрических сетях, так как оно предполагает равное воздействие на все три фазы.

Однофазные электроприемники разделяются по мощности и характеру работы на ряд групп с подобными режимными показателями графиков нагрузок и совпадающим порядком мощности электроприемников в каждой группе. Двумя основными из этих групп является производственная осветительная и коммунально-бытовая нагрузки, которые представляют собой главный источник несимметричных режимов работы сельских распределительных сетей 0,38 кВ.

Несимметричные нагрузки, являясь потребителями токов и мощности прямой последовательности, одновременно представляют собой источники токов обратной и нулевой последовательности. Эти токи, протекая по элементам СЭС, вызывают в них дополнительно потери напряжения соответствующих последовательностей. От взаимодействия токов и напряжений разных последовательностей возникают искажающие потоки мощности обратного направления [59, 95].

1.3. Влияние несимметрии токов и напряжений на работу потребителей электрической энергии

Несимметрия напряжений и токов трехфазной системы является одним из важнейших показателей качества электрической энергии.

Причиной появления несимметрии напряжений и токов являются различные несимметричные режимы системы электроснабжения. Подключение таких мощных несимметричных одно- и трехфазных нагрузок к трехфазным сетям вызывает в системах электроснабжения длительный несимметричный режим, который характеризуется несимметрией напряжений и токов [15].

1.3.1. Синхронные машины

Большую группу синхронных машин в сельском хозяйстве составляют синхронные двигатели, которые обычно изготавливаются мощностью до нескольких тысяч киловатт и предназначены для привода мощных вентиляторов, мельниц, насосов и других устройств, не требующих регулирования частоты вращения.

При несимметрии токов и напряжений, обусловленной несимметричной нагрузкой, в статорах синхронных генераторов проходят токи прямой, обратной и нулевой последовательностей. Токи прямой последовательности создают магнитное поле, вращающееся синхронно с ротором, а обратной последовательности - магнитное поле, вращающееся с двойной синхронной частотой в направлении, обратном направлению вращения ротора, в результате чего магнитный поток, создаваемый токами обратной последовательности, пересекает полюсы ротора с двойной частотой вращения и наводит в последних электродвижущую силу (ЭДС с частотой 100 Гц. Эта ЭДС обуславливает в обмотке возбуждения пульсирующее поле, которое можно разложить на две составляющие: поле, вращающееся в направлении вращения ротора и наводящее в статоре ЭДС тройной частоты, и поле, вращающееся в направлении, обратном направлению вращения ротора, которое наводит в статоре ЭДС с частотой вращения основного поля обратной последовательности, частично компенсируя его [67-68]. Электродвижущая сила тройной частоты вызывает

в статоре токи прямой и обратной последовательностей такой же частоты. Магнитное поле токов обратной последовательности индуцирует в массивных металлических частях ротора значительные вихревые токи, имеющие двойную частоту и создающие дополнительный пульсирующий с двойной частотой электромагнитный момент. Вихревые токи вызывают повышенный нагрев ротора, а пульсирующий момент - вибрацию вращающейся части машины. При значительной несимметрии вибрация может оказаться опасной для конструкций машины. Особенно опасна несимметрия напряжения для мощных современных турбо- и гидрогенераторов, выполняемых с пониженным тепловым запасом. Располагаемая мощность синхронных машин при несимметричной нагрузке определяется следующими условиями:

- температура ни в одной части ротора не должна превосходить допустимой для данного класса изоляции или материала.

- ток в статоре наиболее загруженной фазы не должен превышать номинальный ток.

- механические вибрации машины, которые могут возникать при несимметричной нагрузке, не должны превосходить допустимых пределов.

С учетом термических и механических характеристик современных синхронных машин, ГОСТ 183-74 на электрические машины и «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей» допускают длительную работу турбогенераторов и синхронных компенсаторов при разнице токов в фазах статора, не превышающей 10% номинального значения при условии, что ни один из фазных токов не превосходит номинального значения. При аналогичных условиях для гидрогенераторов разница токов допускается не более 20 %.

1.3.2. Асинхронные двигатели

Асинхронные двигатели нашли очень широкое применение в различных отраслях сельского хозяйства. Их используют в электроприводе станков, подъёмно-транспортных машин, транспортёров, насосов, вентиляторов. Маломощные двигатели используются в устройствах автоматики.

Несимметрия напряжения неблагоприятно сказывается на работе и сроке службы асинхронных двигателей. Сопротивление асинхронных электродвигателей токам обратной последовательности в 5-7 раз меньше сопротивления токам прямой последовательности [110]. При наличии даже небольшой по значению составляющей напряжения обратной последовательности возникает значительный ток обратной последовательности. Этот ток накладывается на ток прямой последовательности и вызывает дополнительный нагрев ротора и статора, что приводит к быстрому старению изоляции и уменьшению располагаемой мощности двигателя. Например, при несимметрии напряжений в 4 % срок службы полностью загруженного асинхронного двигателя сокращается в 2 раза, а при несимметрии напряжений, равной 5 %, располагаемая мощность двигателей уменьшается на 5-10 %, при несимметрии 10 % - на 20—25 % в зависимости от исполнения двигателя [45,110].

В асинхронных двигателях несимметрия напряжений обуславливает противодействующий, вращающий момент, который уменьшает полезный момент. Уменьшение полезного момента (M_2) за счет противодействующего по отношению к моменту при несимметричной нагрузке ($M_{ном}$) определяется выражением [10]

$$\frac{M_2}{M_{ном}} = \frac{s}{2-s} \frac{Z_1^2 U_2^2}{Z_2^2 U_{ном}^2} = \frac{s}{2-s} \frac{Z_1^2}{Z_2^2} k_{2U}^2 \quad (1)$$

где s - скольжение; k_{2U} - коэффициент несимметрии; U_2 - напряжение обратной последовательности; Z_1 и Z_2 - полные сопротивления прямой и обратной последовательностей двигателя.

Таким образом, уменьшение вращающего момента зависит от квадрата коэффициента несимметрии напряжений, что отрицательно сказывается на технологическом процессе и может привести к браку или недоотпуску продукции, к значительным экономическим убыткам и простоем оборудования.

Суммарные добавочные потери мощности в асинхронных электродвигателях из-за несимметрии напряжений в сети равны 37,3%, от суммарных потерь в этих машинах, если бы последние работали при средней нагрузке и номинальном напряжении [37].

Проведенные исследования [77МОНГ] показали, что уменьшение вращающего и пускового моментов асинхронного двигателя при несимметрии напряжений равно квадрату коэффициента несимметрии напряжений. При этом, более 20% асинхронных двигателей выходят из строя в результате их работы в несимметричных электрических системах [51, 52]. Установлено [71], что допустимой несимметрией напряжений для асинхронных электродвигателей следует считать несимметрию в 2%. Как видно из выражения (1.2), снижение вращающего момента при этом будет также незначительным. Для сохранения срока службы машины при несимметрии больше 2% требуется либо снижение мощности на валу

двигателя, либо увеличение его номинальной мощности. При коэффициенте несимметрии напряжения равном 10% располагаемая мощность асинхронного двигателя уменьшается на 20-50% [77].

1.3.3. Конденсаторные установки

Подключение симметричной по емкости трехфазной конденсаторной батареи к электрической сети с несимметричным напряжением может вызвать еще большую несимметрию. При несимметрии напряжений конденсаторные установки неравномерно загружаются реактивной мощностью по фазам. Отношение реактивной мощности конденсаторной установки при несимметричном напряжении ($Q_{НСМ}$) к реактивной мощности при симметричном напряжении в номинальном режиме ($Q_{НОМ}$) определяется из выражения

$$\frac{(Q_{НСМ})}{(Q_{НОМ})} = \frac{U_2^2}{U_{НОМ}^2} (1 + k_{2U}) \quad ()$$

Нормальная длительная эксплуатация конденсаторной установки возможна при условии, что ни в одной фазе, в том числе и в наиболее загруженной, мощность потерь не превышает номинального значения. Это условие делает невозможным полное использование установленной реактивной мощности. Ее можно использовать только до уровня располагаемой мощности. Располагаемая мощность - это верхний предел реактивной мощности трехфазной конденсаторной установки, которая может быть полезно использована при несимметричном напряжении без

снижения срока службы конденсаторов наиболее загруженной фазы. Располагаемая мощность при несимметричном напряжении ($Q_{расп}$) всегда меньше номинальной мощности ($Q_{ном}$).

$$Q_{расп} = Q_{ном} U_2^2 (1 + k_{2U}) \frac{1}{U_{н,з,ф}^2} \quad ()$$

Где $U_{н,з,ф}$ - напряжение наиболее загруженной фазы.

1.3.4. Многофазные выпрямители

Несимметрия напряжений оказывает отрицательное влияние на режим работы многофазных выпрямителей. Если при симметричном напряжении токи (например, в мостовой схеме) одинаковы во всех выпрямителях и имеют одинаковую продолжительность протекания, то при несимметричном напряжении они могут значительно отличаться. В результате допустимая мощность выпрямителя снижается, так как часть выпрямителей оказывается недогруженной. Несимметрия напряжений снижает также эффективность работы трех-, шести-, двенадцатифазных и других схем выпрямления. При несимметрии напряжений появляются гармоники (пульсации) двойной частоты выпрямленного с помощью таких схем тока, амплитуда которых пропорциональна коэффициенту несимметрии напряжений. Эти гармоники, резонируя в не рассчитанных на их появление сглаживающих фильтрах, перегружают конденсаторы и выводят их из строя [5,10,28,31,38].

Несимметрия напряжений снижает также эффективность работы 3, 6, 12-фазных и других систем выпрямления. При несимметрии напряжений появляются гармоники (пульсации) двойной частоты выпрямленного с помощью таких схем тока, амплитуда которых пропорциональна

коэффициенту несимметрии напряжений. Эти гармоники, резонируют в не рассчитанных на их появление сглаживающих фильтрах, перегружают конденсаторы и выводят их из строя. Наличие этих пульсаций в напряжении тяговой сети даже при работе сглаживающих фильтров отрицательно влияет на работу связи.

1.3.5. Трансформаторы, кабельные и воздушные линии

Несимметрия токов в линиях электропередачи, распределительных сетях и трансформаторах уменьшает пропускную способность трехфазной системы. Несимметрично расположенная нагрузка приводит к тому, что одна из фаз работает с перегрузкой, тогда как другие фазы недогружены. При передаче электроэнергии по сетям низкого напряжения потеря мощности, в случае несимметричного распределения токов по фазам, может быть в три-четыре раза больше, чем при симметричном режиме [38, 51, 62]. Действительно, в симметричном режиме потери энергии составляют $3I^2r$, где r - активное сопротивление фазы линии. Если же в одной из фаз ток увеличить, а в другой уменьшить на величину ΔI , то потери увеличатся:

$$I^2r + (I + \Delta I)^2r + (I - \Delta I)^2r = 3I^2r + 2\Delta I^2r.$$

Несимметрия в трансформаторах обусловлена, как несимметрией подведенных напряжений, так и несимметрией нагрузок, подключенных к ЛЭП.

При несимметрии напряжения под «полезной» мощностью трансформатора понимается мощность, соответствующая току прямой последовательности.

Мощность, соответствующая току прямой последовательности при нагрузке, когда в одной из обмоток полный ток достигает номинального

значения, принято называть располагаемой мощностью трансформатора. При несимметрии токов в трансформаторах, обладающих большим сопротивлением нулевой последовательности (например, в случае соединения обмоток по схеме «звезда – звезда – нуль»), добавочные потери от магнитных потоков нулевой последовательности могут достигать 25-35% потерь холостого хода [62], потери напряжения при этом составляют 15-20%, вместо 4% при симметричном режиме [78].

Создаваемые токами нулевой последовательности магнитные потоки, замыкаются через бак, дно, крышку и другие ферромагнитные части трансформатора и разогревают их. Разогрев ухудшает охлаждение активной части трансформатора, что вызывает нагрев изоляции обмоток сверх нормы, и трансформатор при загрузке ниже номинальной может оказаться перегруженным, причём часто до выхода из строя. Данное обстоятельство вынуждает повышать установленную номинальную мощность трансформаторов на 1...2 ступени больше необходимой. Это дает незначительный эффект, но существенно снижает потери напряжения и электроэнергии в сети [56]. Существенным признаком при несимметрии нагрузки является повышенный шум у трансформаторов.

Дополнительные потери мощности в сети, обусловленные несимметрией токов, характеризуются коэффициентом увеличения потерь мощности [62]: P_K

$$K_P = \Delta P_H / \Delta P_C = 1 + K_{2I}^2 + K_{0I}^2 (r_0 / r_1),$$

где P_H – потери мощности в сети при несимметричном режиме;

P_C – потери мощности в сети, обусловленные протеканием токов прямой последовательности;

K_{2I} – коэффициент несимметрии токов обратной последовательности;

K_{0I} – коэффициент несимметрии токов нулевой последовательности;

r_0, r_1 – сопротивления, соответственно, нулевой и прямой

последовательностей.

В частном случае, для трехфазной четырехпроводной линии [62]:

где r_N, r_Φ – активные сопротивления нулевого и фазного проводов линии.

Таким образом, уменьшить потери электроэнергии (мощности) в линии электропередачи можно, уменьшая величину протекающего по ним тока, либо уменьшая сопротивления этих линий.

Что касается несимметрии напряжений, то она не оказывает существенного влияния на работу трансформаторов и линий электропередачи.

1.3.6 .Однофазные потребители.

При современном уровне электрификации быта, качество электроэнергии на вводе у потребителя значительно определяет качество и эксплуатационные параметры бытовых электроприборов, их надежность и долговечность. Исследования показали, что число бытовых потребителей, получающих некачественную электроэнергию, составляет в сельской

местности более половины всех абонентов [62, 82]. В современном АПК, как в быту, так и в производстве, имеется довольно много однофазных потребителей электроэнергии, режим работы которых сильно зависит от стабильности величины напряжения.

Потребители электрической энергии, подключенные на разные фазы несимметричной системы, могут оказаться, либо под повышенным, либо под пониженным напряжением, причем оба условия нежелательны. Особенно это относится к элементам с нелинейной вольтамперной характеристикой. Вызванные несимметрией токов отклонения фазных напряжений от номинальных значений, отрицательно влияют на работу таких потребителей.

Рассмотрим влияние несимметрии напряжений на источники света. Если фазные напряжения неодинаковы, то те лампы, которые подключены к фазе с более высоким напряжением, имеют меньший срок службы, но более высокий световой поток, в отличие от ламп, подключенных к фазе с меньшим напряжением. Результаты опытов показали, что при увеличении напряжения на 5% световой поток ламп увеличивается на 20%, а срок службы уменьшается в 2 раза. При снижении напряжения на 5% световой поток уменьшается на 18%, а срок службы увеличивается в 2,4 раза. При повышении напряжения на 10% срок службы люминесцентных ламп сокращается на 20-30%, а при снижении напряжения (порядка 25-30%) зажигание газоразрядных ламп вообще невозможно [71]. Следует также отметить, что при неравномерном распределении ламп по фазам сети, сами лампы могут быть причиной появления несимметрии токов и напряжений.

Несимметрия в трехфазной четырехпроводной системе также отрицательно влияет на работу релейной защиты, снижает устойчивость

электрических систем, систем автоматики, ведет к ошибкам при учете электроэнергии и т.д.

1.4. Влияние несимметрии токов на показатели качества электрической энергии

Обеспечение качества электрической энергии на зажимах приемников электроэнергии и снижение ее потерь при распределении – одна из наиболее сложных задач, решаемых при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения.

Качество электрической энергии у потребителей, наряду с надёжностью электроснабжения, является одной из важных характеристик электрических сетей при рассмотрении вопроса её эффективного потребления. Низкое качество электрической энергии оказывает существенное влияние, как на рабочие, так и на технико-экономические характеристики элементов сети и характеристики электроприёмников. При ухудшении качества напряжения, повышается нагрев элементов сети, увеличиваются потери мощности. Кроме того, происходит снижение эксплуатационной надёжности и сокращение срока службы электродвигателей; возникает ряд отрицательных электромагнитных явлений в сетях, увеличиваются дополнительные потери электрической энергии, обусловленные несимметрией токов (при несимметричных режимах работы распределительных сетей эти потери составляют 49,2 %, что составляет 32 % общих потерь в электрических сетях) [72]. Например, около 4 % всей потребляемой электрической энергии дополнительно теряется в асинхронных электродвигателях при их работе в сетях с постоянно несимметричной системой напряжений, возникающей

вследствие несимметрии токов [17]. Так увеличение напряжения на 10 % ведет; к возрастанию светового потока и освещенности рабочей поверхности до 40 %, уменьшается срок службы ламп накаливания втрое; к увеличению потребления реактивной мощности сети, что снижает коэффициент мощности. Уменьшение напряжения сети на 10 % приводит к уменьшению светового потока ламп накаливания до 40 %; уменьшению момента вращения электродвигателя на 20 % [20].

С каждым годом в сельских распределительных сетях 0,38 кВ наблюдается рост нагрузок. Причём увеличивается, как правило, мощность однофазных потребителей (электроплиты, электрочайники и т.п.). Следствием этого является увеличение несимметрии токов и напряжений, то есть значений их симметричных составляющих обратной и нулевой последовательностей - Например, ток обратной последовательности в трёхфазных асинхронных электродвигателях может достигать больших значений даже при малых значениях напряжения обратной последовательности (из-за небольшого сопротивления обратной последовательности) [54]. Это приводит к дополнительному нагреву электродвигателей, быстрому старению изоляции и сокращению сроков их службы [35]. В низковольтных сетях из-за несимметрии нагрузок и неравномерности графика потребления значительно увеличиваются потери мощности, ухудшается качество электрической энергии у потребителей (в низковольтных сетях потеря электрической энергии по расчёту должна быть 2...3 % от передаваемой мощности, в действительности она составляет 12...18 % [72]). По причине несимметрии напряжений в сети, суммарные добавочные потери мощности в двигателях равны 37,3 % от суммарных потерь в этих же машинах, если они работают при средней нагрузке и номинальном напряжении [72], Несимметрия токов приводит к возрастанию потерь мощности и энергии в сетях на 30...,50 %, по сравнению с симметричным режимом [26]. Кроме того, причиной низкого качества

электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ является высокий уровень реактивной мощности ($\cos \phi = 0,6 \dots 0,8$), появление которой связано с применением большого числа асинхронных электродвигателей и отсутствием соответствующих компенсирующих устройств. Сельские распределительные сети 0,38 кВ характеризуются значительной несимметрией токов и напряжений, которые являются одной из основных причин снижения качества электрической энергии и увеличения потерь мощности в сети.

В системах электроснабжения могут иметь место следующие отрицательные последствия, обусловленные снижением качества электрической энергии [70, 71]:

- 1) увеличение потерь во всех элементах системы;
- 2) рост потребления электроэнергии и требуемой мощности электрооборудования;
- 3) сокращение срока службы (в некоторых случаях выход из строя) электрооборудования;
- 4) увеличение капитальных вложений в системы электроснабжения;
- 5) ложные срабатывания релейной защиты и автоматики;
- 6) сбои в работе электронных устройств управления и вычислительной техники (станки с числовым программным управлением, электронные вычислительные машины и т. п.);
- 7) помехи в линиях связи;

8) нарушение нормальной работы производства, брак продукции.

Значение показателей качества электроэнергии регламентирует ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Несимметрия трехфазной системы напряжений обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети.

Показателями КЭ, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности .

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} 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_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4% в течение 100% времени интервала в одну неделю.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к несимметрии напряжений, установленным в настоящем

стандарте, должны быть проведены измерения по ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.7, класс А.

Несимметрию напряжений в трехфазной системе энергоснабжения оценивают методом симметричных составляющих. В условиях несимметрии дополнительно к напряжению прямой последовательности U_1 в трехфазной системе электроснабжения существует, по крайней мере, одна из следующих составляющих: напряжение обратной последовательности U_2 и/или напряжение нулевой последовательности U_0 .

Измерения основной составляющей входного сигнала проводят на основном интервале времени измерений (10 периодов для систем электроснабжения частотой 50 Гц или 12 периодов — для систем частотой 60 Гц).

1 Влияние гармоник должно быть минимизировано применением фильтра или алгоритма дискретного преобразования Фурье.

2 Оценка несимметрии только на основе среднеквадратических значений фазных напряжения не учитывает влияния угловых сдвигов на несимметрию, что может привести к непредсказуемым результатам при наличии гармоник. Оценка несимметрии на основе расчетов напряжений обратной и нулевой последовательности обеспечивает более точные и пригодные для непосредственного применения результаты

Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_2 , %, определяют по формуле

$$K_2 = (U_2/U_1)100. \quad (1)$$

Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_2 , %, может быть рассчитан (U_{ijfund} — основная составляющая напряжения между фазами i и j) по формуле:

$$K_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} 100\%, \text{ где } \beta = \frac{U_{12fund}^4 + U_{23fund}^4 + U_{31fund}^4}{(U_{12fund}^2 + U_{23fund}^2 + U_{31fund}^2)^2}. \quad ()$$

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_Q , %. Определяют по формуле:

$$K_Q = (U_0/U_1) 100. \quad ()$$

Примечание — Значение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности по определению равно нулю при измерении междуфазных напряжений. Однако напряжения «фаза — нейтраль» или «фаза — земля» могут содержать напряжения нулевой последовательности.

Наиболее точное определение значений $U_1(1)_i, U_2(1)_i$ и $U_0(1)_i$ возможно лишь при использовании метода симметричных составляющих [62]. Согласно этому методу, несимметричная трехфазная система может быть представлена в виде трех симметричных, образующих прямую U_1 , обратную U_2 и нулевую U_0

последовательности. В результате исследований установлено, что каждому проценту величины коэффициента несимметрии напряжений соответствует 1,73% дополнительного отклонения напряжения.

В свою очередь отклонение напряжения также приводит к дополнительным потерям мощности и сокращению срока службы электрооборудования.

ВЫВОД 1

Аналитический обзор литературных источников, анализ опубликованных и самостоятельно измеренных данных по режимам работы сельских распределительных электрических сетей, что несимметрия трехфазных напряжений и токов, как явление ухудшающее качество электрической энергии является одним из наиболее часто встречающимся.

Сельские распределительные сети напряжением 380 В работают в условиях значительной несимметрии токов и напряжений, обусловленных неравномерностью распределения однофазных нагрузок по фазам сети и случайным характером их работы, что приводит к значительному ухудшению показателей качества и сопутствующим им дополнительным потерям электрической энергии.

Расчет потерь активной мощности, вызванных отклонением показателей качества электрической энергии от нормативных параметров, представляют особую важность, так как длительные несимметричные режимы работы элементов сети сопутствуются увеличением в них потерь мощности и энергии и снижением надежности их работы.

В действующих системах электроснабжения изменение показателей качества электрической энергии происходит непрерывно. В то время как контроль за выше обозначенными показателями ведется (должен вестись) периодически, с интервалами усреднения данных 10 минут (согласно требованиям ГОСТ) [17].

Для упрощения процесса анализа результатов измерений предполагается, что показатели качества электроэнергии остаются

неизменными в течение длительного интервала времени между измерениями. Вышеуказанное допущение в свою очередь не позволяет получить полную картину происходящих в структурных элементах системы электроснабжения процессов и достоверно оценить возникающие при отклонениях параметров качества электрической энергии дополнительные потери мощности.

Значения потерь мощности в отдельных элементах распределительной сети, возникающих в результате воздействия несимметрии, позволяют оценить их общую величину и определить экономический ущерб, обусловленный снижением качества электрической энергии. Все это необходимо для предварительных расчетов экономической целесообразности применения мероприятий по повышению качества электрической энергии.

Тем не менее, в общеизвестных работах при анализе дополнительных потерь мощности мало учитываются соотношения между токами различных фазовых последовательностей, являющихся причиной возникновения несимметрии уровней напряжений. В свою очередь это не позволяет достоверно определить причины и источники, приводящие к возникновению дополнительных потерь мощности и оценить увеличение этих потерь в сравнении с нормальным (симметричным) режимом энергопотребления.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ СЭС, И ПРОГРАММА РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ НЕСИММЕТРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Как было показано в первой главе, одной из причин низкой эффективности использования электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ является несимметрия токов, обусловленная неравномерно распределённой, имеющей случайный характер работы, однофазной нагрузкой, приводящей к снижению качества и увеличению дополнительных потерь мощности в этих сетях.

Поэтому в условиях эксплуатации электрических сетей определение показателей несимметрии токов и напряжений целесообразно проводить по результатам измерений модулей токов и напряжений.

Вопросам расчета потерь напряжения и мощности в электрических сетях при наличии отклонение параметров качества электрической энергии от требуемых нормативных значений, в частности при наличии несимметрии токов и напряжений, посвящен ряд публикаций [1, 4, 5, 7, 8].

Но в большом разнообразии известных методик расчета потерь типичным остается допущение, что выражения, применяемые в них при расчетах, справедливы при условии потребления мощностей потребителями в неискаженном (номинальном) режиме.

Связно это с тем, что при проектировании работа электрических сетей предполагается в номинальном, симметричном, синусоидальном и равномерно активном режиме.

Вместе с тем, основываясь на результаты практических измерений [2, 3], можно утверждать, что в настоящее время в действующих электрических сетях довольно часто распространено явление длительной фазной несимметрии нагрузки.

Как известно, длительные несимметричные режимы возникают в первую очередь при пофазной разнице параметров системы, либо в случае неполнофазных режимов работы электрооборудования или при подключении несимметричных нагрузок [4, 5, 8].

При таких режимах работы в сети присутствует как амплитудная, так и угловая несимметрия токов и соответственно напряжений, приводящие в свою очередь к появлению токов и напряжений с порядком следования фаз отличного от прямого обратной и нулевой последовательности.

Тем не менее, в применяемых в практике методах расчета потерь соотношения между токами и напряжениями различных фазовых последовательностей не учитываются. Данное обстоятельство осложняет определение первопричин, вызывающих увеличение дополнительных потерь мощности и целесообразность применения способов их ограничения.

Рассмотрим наиболее широко известные и применяемые способы учета влияния несимметрии нагрузок фаз при расчете величины потери мощности.

2.1. Методы анализа несимметрии

2.1.1. Метод симметричных составляющих для расчета показателей несимметрии токов и напряжений

Трехфазные сети, являются разновидностью цепей синусоидального тока, и поэтому расчет и исследование процессов в них производится теми же методами и приемами, что и однофазных сетях.

Точность значений величин, относящихся к показателям несимметрии напряжений и токов, и потерь мощности (электрической энергии) имеет существенное влияние на разработку и выбор действий, направленных на повышение качества электрической энергии и уменьшения суммарной величины потерь в распределительных сетях и оборудовании.

Существующие и известные в настоящее время алгоритмы (методы) для установления уровней несимметрии и связанных с ней потерями мощности в структурных элементах электрической сети, основаны в большей мере на результатах данных измерений в сетях, обработанных вероятно-статистическим способом, либо на predeterminedenных заранее параметрах элементов, составляющих сеть в целом [33, 118 – 120].

При расчете и анализе режимов работы трехфазных цепей с несимметричными нагрузками, наиболее распространенным и часто применяемым является метод симметричных составляющих.

Метод симметричных составляющих – это математическая теория К. Фортескую для расчета трехфазных электрических цепей, основанная на замене любой (несимметричной) системы на сумму величин трех симметричных систем, которые отличны друг от друга

последовательностью фаз и носят названия система прямой, обратной и нулевой последовательностей соответственно (рисунок 2.1.) [121].

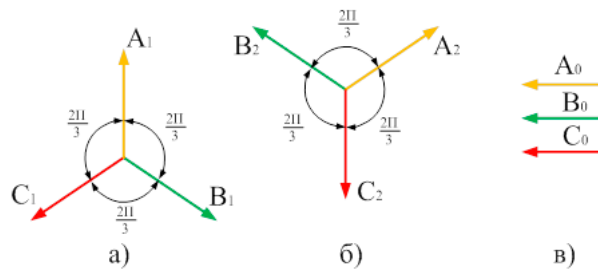


Рисунок 2.1. Векторные диаграммы последовательностей:

а) прямая; б) обратная; в) нулевая.

Для учета сдвига на 120° относительно друг друга фаз ЭДС и напряжений генератора, применяется оператор поворота (фазовый множитель), записываемый в комплексной форме и позволяющий сократить запись уравнений метода симметричных составляющих в математической форме:

$$a = a^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

()

Поворот вектора в положительном направлении на 120° , т.е. против часов стрелки, достигается умножением исходного вектора на оператор поворота a .

Сообразно поворот вектора в отрицательном направлении на 120° , что в свою очередь аналогично повороту вектора в положительную сторону на 240° ,

Осуществляется умножением исходного вектора на оператор a^2 :

Таким образом трехфазная симметричная система векторов образуется их векторов a^0 , a^1 и a^2 .

Основное свойство симметрии фазных величин заключается в равенстве нулю суммы фазных операторов. Для трехфазной системы это очевидно из равенства:

При помощи оператора a можно, например, записать токи и напряжения фаз трехфазной системы как:

$$\begin{cases} I_B = a^2 I_A; \\ I_C = a I_A. \end{cases} \quad \begin{cases} U_B = a^2 U_A; \\ U_C = a U_A. \end{cases} \quad ()$$

Любую несимметричную систему трех токов, напряжений, потоков мощности одинаковой частоты, обозначив их А,В,С – можно однозначно представить в виде трех систем: прямой, обратной и нулевой последовательностью фаз. Таким образом, несимметричные системы фазных напряжений и несимметричная система фазных токов могут быть разложены на три трехфазные симметричные системы – прямую, обратную и нулевую последовательность напряжений и токов соответственно.

2.1.2. Анализ способов учета наличия несимметрии нагрузки при расчете потерь мощности

Вопросам расчета потерь напряжения и мощности в электрических сетях при наличии отклонение параметров качества электрической энергии

от требуемых нормативных значений, в частности при наличии несимметрии токов и напряжений, посвящен ряд публикаций [15, 22, 37, 50, 52, 91, 122].

В большом разнообразии известных методик расчета потерь типичным остается допущение, что выражения, применяемые в них при расчетах, справедливы при условии потребления мощностей потребителями в неискаженном (номинальном) режиме. Связно это с тем, что при проектировании работа электрических сетей предполагается в номинальном, симметричном, синусоидальном и равномерно активном режиме.

Вместе с тем, основываясь на результаты практических измерений [103, 104, 123 – 127], можно утверждать, что и ранее и в настоящее время в действующих электрических сетях довольно часто распространено явление длительной фазной несимметрии нагрузки.

Длительные несимметричные режимы возникают в первую очередь при пофазной разнице параметров системы, либо в случае неполнофазных режимов работы электрооборудования или при подключении несимметричных нагрузок [37, 50, 52, 125].

При таких режимах работы в сети присутствует как амплитудная, так и угловая несимметрия токов и соответственно напряжений, приводящие в свою очередь к появлению токов и напряжений с порядком следования фаз отличного от прямого – обратной и нулевой последовательности.

Рассмотрим наиболее широко известные и применяемые способы учета влияния несимметрии нагрузок фаз при расчете величины потери мощности.

Основной директивной методикой по расчету потерь является приказ Государственного комитета промышленности, энергетики и недропользования Кыргызской Республики от «18» сентября 2020 г. № 01-7/334 «Методика расчета нормативов потерь электрической энергии» [117].

Настоящая Методика разработана в целях организации работ по расчету, обоснованию и прогнозированию технических потерь электроэнергии и их снижения в электрических сетях организаций, осуществляющих передачу и распределение электроэнергии.

Для электрических сетей 0,4 кВ, в силу их большого количества, протяжённости и слабой информационной обеспеченности, в качестве основного метода инструкцией [10] рекомендован метод оценки потерь по обобщённой информации. В то же время, как было отмечено ранее, уже сегодня в электрических сетях этого класса напряжения с развитием розничных рынков электроэнергии и внедрением АПИС КУЭ (автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учёта электроэнергии) бытовых потребителей вполне реальными и перспективными становятся поэлементные оперативные расчёты.

Нагрузочные потери электроэнергии в каждом элементе электрических сетей могут быть рассчитаны одним из двух методов в зависимости от информационной обеспеченности (методы представлены в порядке понижения точности получаемых результатов расчета):

- 1) оперативных расчетов;
- 2) средних нагрузок.

Метод оценки потерь по обобщенной информации о схемах и нагрузках сети применяется для расчета потерь электроэнергии в электрических сетях напряжением 0,4 кВ.

Нагрузочные потери электроэнергии в сети 0,4 кВ рассчитываются следующими методами оценки потерь электроэнергии на основе зависимости потерь от обобщенной информации о схемах и нагрузках сети и поэлементного расчета потерь мощности и электроэнергии с использованием схемы электрической сети и ее режимных параметров.

1) Метод оценки потерь электроэнергии на основе зависимости потерь от обобщенной информации о схемах и нагрузках сети.

Потери электроэнергии в N линиях 0,4 кВ со средним сечением головных участков $F_{г\text{ ср}}$, мм², поступлением электроэнергии в линии $W_{0,4}$, тыс. кВт·ч, за период Д, дней, рассчитываются в соответствии с методом оценки потерь электроэнергии на основе зависимости потерь от обобщенной информации о схемах и нагрузках сети (*) по формуле:

$$\Delta W = k_{0,4} \cdot \left(\frac{W_{0,4}}{N} \right)^2 \cdot \frac{(1 - d_n)^2 \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) \cdot L_{\text{экв}}}{F_{г\text{ ср}} \cdot Д} \cdot \frac{1 + 2 \cdot k_3}{3 \cdot k_3}, \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч},$$

)

г $L_{\text{экв}}$ - эквивалентная суммарная длина линий, км;

д
е

- $\operatorname{tg} \varphi$ - средний коэффициент реактивной мощности;
- $k_{0,4}$ - коэффициент, учитывающий характер распределения нагрузок по длине линии и неодинаковость нагрузок фаз;
- d_n - доля электроэнергии, потребляемая на расстоянии 1-2 пролета от ТП, по отношению к суммарному поступлению в сеть 0,4 кВ.

* П р и м е ч а н и е:

Метод оценки потерь электроэнергии на основе зависимости потерь от обобщенной информации о схемах и нагрузках сети может применяться для расчета потерь электроэнергии в совокупности линий общим количеством не менее суммарного количества линий, отходящих от 150 шт. ТП 6-10/0,4 кВ или более. Для электрических сетей меньшего объема применяется метод поэлементного расчета потерь мощности и электроэнергии с использованием схемы электрической сети и ее режимных параметров.

2) Метод поэлементного расчета потерь мощности и электроэнергии с использованием схемы электрической сети и ее режимных параметров.

Расчет потерь электроэнергии выполняется методом средних нагрузок по формуле:

$$\Delta W_{nj} = k_l k_k K_{\text{нер}} \Delta P_{\text{ср}} T_j k_{\phi}^2, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad ()$$

где $\Delta P_{\text{ср}}$ - потери мощности в сети при средних за расчетный интервал нагрузках узлов, кВт;

k_{ϕ}^2 - квадрат коэффициента формы графика суммарной нагрузки сети за расчетный интервал;

k_k - коэффициент, учитывающий различие конфигураций графиков активной и реактивной нагрузки различных ветвей сети;

$K_{\text{нер}}$ - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузок по фазам (для однофазного участка сети коэффициент равен 1), определяется по формуле (45);

T_j - продолжительность j -го расчетного интервала, ч.

В зависимости от исполнения участка для расчета потерь мощности и напряжения в сети при средних за расчетный интервал нагрузках узлов используются следующие формулы:

Участок сети с тремя фазами:

Потери мощности на участке сети определяются по формуле:

$$\Delta P_{3\phi} = 3 \cdot I_{1\phi \text{ ср}}^2 \cdot R_{1\phi} \cdot 10^{-3} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{3\phi \text{ ср}}^2 + Q_{3\phi \text{ ср}}^2}{U_{\phi \text{ ср}}^2} \cdot R_{1\phi} \cdot 10^3, \text{ кВт}, \quad ()$$

где $I_{1\phi \text{ ср}}$ - средний за расчётный интервал T фазный ток в одной фазе, А;

$R_{1\phi}$ - активное сопротивление одной фазы, Ом;

$P_{3\phi \text{ ср}}$, $Q_{3\phi \text{ ср}}$ - средние суммарные значения активной и реактивной мощности за период T в трех фазах, МВт, Мвар;

$U_{\phi \text{ ср}}$ - среднее фазное напряжение в узле элемента за период T , кВ.

Участок сети с двумя фазами:

Потери мощности определяются по формуле:

$$\Delta P_{2\phi} = 2 \cdot I_{1\phi \text{ ср}}^2 \cdot R_{1\phi} \cdot 10^{-3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{2\phi \text{ ср}}^2 + Q_{2\phi \text{ ср}}^2}{U_{\phi \text{ ср}}^2} \cdot R_{1\phi} \cdot 10^3, \text{ кВт}, \quad ()$$

где $I_{1\phi \text{ ср}}$ - средний за расчётный интервал T фазный ток в одной фазе,
А;

$R_{1\phi}$ - активное сопротивление одной фазы, Ом;

$P_{2\phi \text{ ср}}, Q_{2\phi \text{ ср}}$ - средние суммарные значения активной и реактивной мощности за период T в двух фазах, МВт, Мвар;

$U_{\phi \text{ ср}}$ - среднее фазное напряжение в узле элемента за период T , кВ.

Участок сети с одной фазой:

Потери мощности определяются по формуле:

$$\Delta P_{1\phi} = I_{1\phi \text{ ср}}^2 \cdot R_{1\phi} \cdot 10^{-3} = \frac{P_{1\phi \text{ ср}}^2 + Q_{1\phi \text{ ср}}^2}{U_{\phi \text{ ср}}^2} \cdot R_{1\phi} \cdot 10^3. \quad ()$$

где $I_{1\phi \text{ ср}}$ - средний за расчётный интервал T фазный ток в одной фазе,
А;

$R_{1\phi}$ - активное сопротивление одной фазы, Ом;

$P_{1\phi \text{ ср}}, Q_{1\phi \text{ ср}}$ - средние суммарные значения активной и реактивной мощности за период T в одной фазе, МВт, Мвар;

$U_{\phi \text{ ср}}$ - среднее фазное напряжение в узле элемента за период T , кВ.

Коэффициент $K_{\text{нер}}$ определяется по формуле:

$$K_{\text{нер}} = 3 \frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{(I_a + I_b + I_c)^2} \cdot \left(1 + 1,5 \frac{R_n}{R_\phi}\right) - 1,5 \frac{R_n}{R_\phi}, \quad (9)$$

г I_a , I_b , I_c - измеренные токовые нагрузки фаз;
 д R_n - отношение сопротивлений нулевого и фазного проводов.
 е R_ϕ

При отсутствии данных о токовых нагрузках фаз следует принимать:

для линий с $R_n/R_\phi = 1$ $K_{\text{нер}} = 1,13$;
 для линий с $R_n/R_\phi = 2$ $K_{\text{нер}} = 1,2$.

Среднее значение $K_{\text{НЕР}}$ определенное по (22) свидетельствует о возможном увеличении потерь за исследуемый период на 10,5%, при аналогичных входящих данных выражения (46) и (48) дают средний результат КН и КДПН в 23,5% и 25% соответственно.

Полученные результаты указывают, на сколько потери мощности с учетом несимметрии могут превышать потери мощности, обусловленные протеканием только токов прямой последовательности в исследуемой сети за выбранный временной интервал.

2.3. Методика и уравнения расчета несимметричных режимов СЭС

Многие несимметричные режимы, возникающие в результате аварий, рассматривались в различных курсах [95], однако самый общий и самый распространённый случай продольной несимметрии не был рассмотрен. Это тот случай, когда не происходит аварий, но сопротивления фаз различны, то есть фазы неравномерно загружены, из-за чего и происходит нарушение симметрии трёхфазной цепи. Следовательно, необходимо рассмотреть

общий случай однократной продольной несимметрии для анализа работы электрической сети и анализа показателей качества электрической энергии, поставляемой потребителю; на основе общего уже можно рассматривать любые частные случаи, в том числе и аварийные. Имея математическую модель для общего случая можно решить любые практические задачи, связанные с нарушением симметрии, продольной и поперечной несимметрией.

2.3.1. Общий случай однократной продольной и поперечной несимметрии

Для расчёта общего случая однократной несимметрии рассмотрим несимметричный участок сети (рис. 2.2).

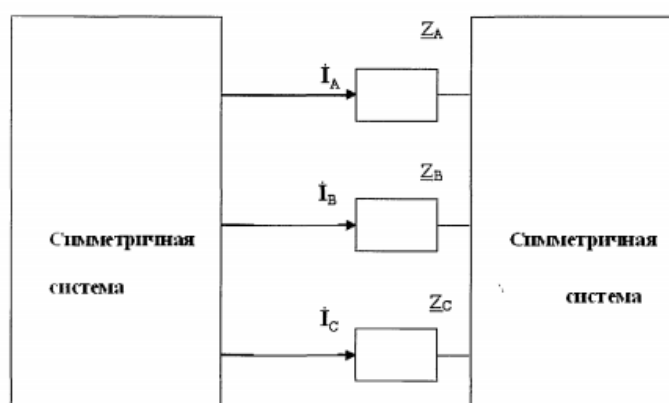


Рис. 2.2. Несимметричный участок сети

Известно, что несимметричную трехфазную систему векторов можно заменить совокупностью трех симметричных систем прямой, обратной, нулевой последовательностей, которую представим следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} A &= A_1 + A_2 + A_0; \\ B &= a^2 \cdot A_1 + a \cdot A_2 + A_0; \\ C &= a \cdot A_1 + a^2 \cdot A_2 + A_0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где A, B, C - трехфазная несимметричная система векторов;
 A_1, A_2, A_0 - симметричные составляющие прямой, обратной, нулевой

последовательности: $a = e^{j2\pi/3} = \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ и $a^2 = e^{j4\pi/3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$.

фазные множители (1 -здесь и далее все величины в виде комплексных векторов).

Общий случай поперечной несимметрии можно представить схематично в следующем виде (рис. 2.3), где $k^{(n)}$ - вид поперечной несимметрии; $\Delta \dot{U}_A, \Delta \dot{U}_B, \Delta \dot{U}_C$ - падения напряжений в фазах в точке повреждения (несимметрии); $\Delta \dot{U}_{1k}, \Delta \dot{U}_{2k}, \Delta \dot{U}_{0k}$ - симметричные составляющие падений напряжения.

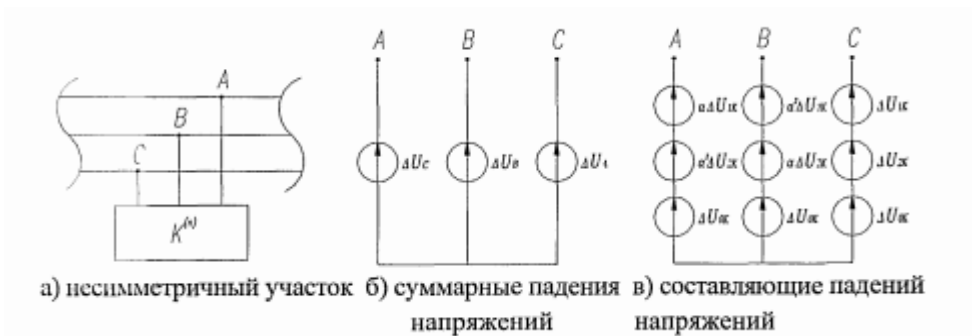


Рис. 2.3. Общий случай поперечной несимметрии

Для использования метода симметричных составляющих в сложных СЭС используем схемы замещения последовательностей (рис. 2.4), для которых получим следующие системы уравнений.

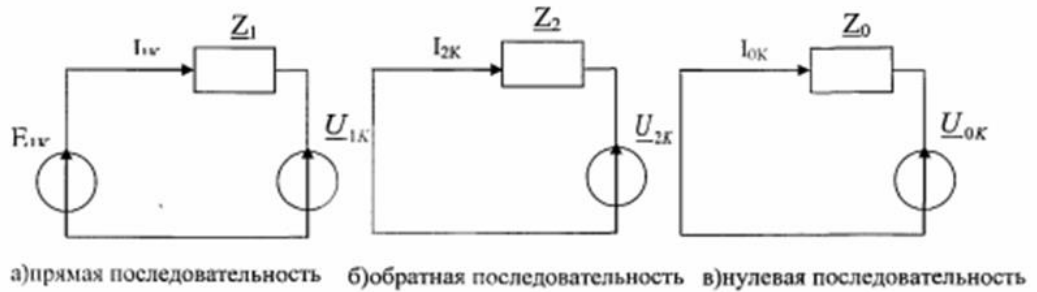


Рис. 2.4. Схемы замещения последовательностей

$$\begin{aligned}
 \Delta \underline{U}_{1k} &= \underline{E}_{1k} - \underline{I}_{1k} \underline{Z}_1; \\
 \Delta \underline{U}_{2k} &= -\underline{I}_{2k} \underline{Z}_2; \\
 \Delta \underline{U}_{0k} &= -\underline{I}_{0k} \underline{Z}_0.
 \end{aligned}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta \underline{U}_A &= \underline{I}_A \underline{Z}_A; \\
 \Delta \underline{U}_B &= \underline{I}_B \underline{Z}_B; \\
 \Delta \underline{U}_C &= \underline{I}_C \underline{Z}_C,
 \end{aligned}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$$

)

где \underline{E}_{k1} - суммарная ЭДС прямой последовательности при поперечной несимметрии; $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ - полные токи фаз А, В и С в фазных координатах; $\underline{I}_{1k}, \underline{I}_{2k}, \underline{I}_{0k}$ - симметричные составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте повреждения при поперечной несимметрии; $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$ - полные сопротивления фаз А, В и С относительно места повреждения в фазных координатах; $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_0$ - сопротивления сети в симметричных координатах; $\Delta \underline{U}_A, \Delta \underline{U}_B, \Delta \underline{U}_C$ - падения напряжений в фазах в точке повреждения (несимметрии).

Общий случай продольной несимметрии схематично представим в следующем виде (рис. 2.5), где $L^{(n)}$ - вид продольной несимметрии; $\Delta U_{1L}, \Delta U_{2L}, \Delta U_{0L}$ - симметричные составляющие падений напряжения. Используя метод суперпозиции, составим схемы замещения последовательностей, аналогичные приведенным на рис. 2.5, и получим следующие уравнения:

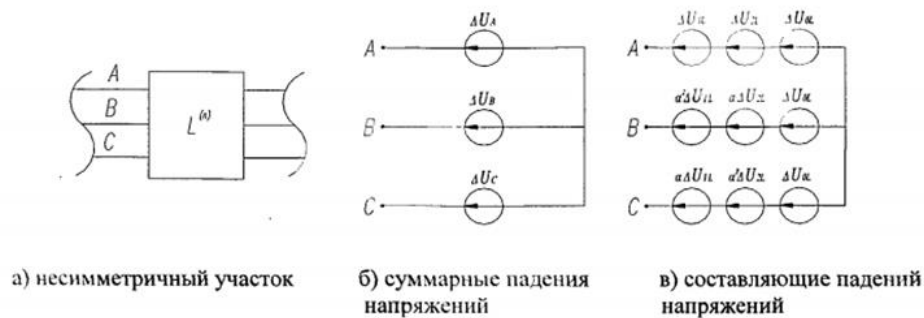


Рис. 2.5. Общий случай продольной несимметрии

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{1L} &= E_{1L} - I_{1L} Z_1; \\ \Delta U_{2L} &= -I_{2L} Z_2; \\ \Delta U_{0L} &= -I_{0L} Z_0 \end{aligned} \right\} \quad ()$$

где I_{1L}, I_{2L}, I_{0L} - токи прямой, обратной, нулевой последовательности в месте разрыва.

С математической точки зрения нетрудно заметить схожесть формул (2.2) и (2.4), которые отличаются лишь физическим смыслом, то есть типом несимметрии. Математическая модель в виде уравнений (2.2) и (2.4) позволяет исследовать общий случай несимметрии, используя одинаковые

формулы для расчета как продольной, так и поперечной несимметрии, однако, с оговоркой типа несимметрии.

Запишем уравнения () и () в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \underline{U}_1 &= \underline{E}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_1; \\ \Delta \underline{U}_2 &= -\underline{I}_2 \underline{Z}_2; \\ \Delta \underline{U}_0 &= -\underline{I}_0 \underline{Z}_0. \end{aligned} \right\} \quad ()$$

Разложив, в системе уравнений (2.3), векторы токов и напряжений на симметричные составляющие и подставив в уравнения системы (2.3) выражения из системы (2.5), получим следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1(\underline{Z}_A + \underline{Z}_1) + \underline{I}_2(\underline{Z}_A + \underline{Z}_2) + \underline{I}_0(\underline{Z}_A + \underline{Z}_0) &= \underline{E}_1; \\ a^2 \underline{I}_1(\underline{Z}_B + \underline{Z}_1) + a \underline{I}_2(\underline{Z}_B + \underline{Z}_2) + \underline{I}_0(\underline{Z}_B + \underline{Z}_0) &= a^2 \cdot \underline{E}_1; \\ a \underline{I}_1(\underline{Z}_C + \underline{Z}_1) + a^2 \underline{I}_2(\underline{Z}_C + \underline{Z}_2) + \underline{I}_0(\underline{Z}_C + \underline{Z}_0) &= a \cdot \underline{E}_1. \end{aligned} \right\} \quad ()$$

Решая систему уравнений (2.6), найдем выражения для токов последовательностей, выраженных через сопротивления фаз и последовательностей и суммарную ЭДС прямой последовательности:

$$I_1 = \frac{3Z_2 Z_0 + (Z_2 + Z_0)(Z_A + Z_B + Z_C) + Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_A Z_C}{3Z_A Z_B Z_C + 3Z_1 Z_2 Z_0 + (Z_1 + Z_2 + Z_0)(Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_A Z_C) + (Z_A + Z_B + Z_C)(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0)} \cdot E_1;$$

$$I_2 = \frac{a^2 Z_A Z_B + Z_B Z_C + a \cdot Z_A Z_C - Z_0(Z_A + a \cdot Z_B + a^2 \cdot Z_C)}{3Z_A Z_B Z_C + 3Z_1 Z_2 Z_0 + (Z_1 + Z_2 + Z_0)(Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_A Z_C) + (Z_A + Z_B + Z_C)(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0)} \cdot E_1;$$

$$I_0 = \frac{a \cdot Z_A Z_B + Z_B Z_C + a^2 \cdot Z_A Z_C - Z_2(Z_1 + a^2 \cdot Z_B + a \cdot Z_C)}{3Z_A Z_B Z_C + 3Z_1 Z_2 Z_0 + (Z_1 + Z_2 + Z_0)(Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_A Z_C) + (Z_A + Z_B + Z_C)(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0)} \cdot E_1.$$

Используя метод симметричных составляющих и выражения (2.7, 2.8, 2.9) можно найти полные токи фаз. Следовательно, можно найти токи в фазах в самом общем случае, когда сопротивления фаз неодинаковы. Представим правило эквивалентности прямой последовательности в общем виде. Анализируя выражения (2.7, 2.8, 2.9) и системы уравнений (2.4) и (2.5), приходим к выводу, что токи обратной и нулевой последовательностей и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности. Следовательно, задача расчёта любого несимметричного режима, прежде всего, состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте предполагаемой несимметрии.

Хотя правило эквивалентности прямой последовательности было сформулировано ранее в литературе [95], однако общей формулы никто не выводил, а рассматривались лишь частные случаи.

Проведя некоторые преобразования, выражение (2.4) можно представить в следующем виде:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{Z_1 + \Delta Z};$$

$$\Delta Z = \frac{3Z_A Z_B Z_C + (Z_2 + Z_0)(Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_A Z_C) + Z_2 Z_0 (Z_A + Z_B + Z_C)}{(Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_A Z_C) + (Z_2 + Z_0)(Z_A + Z_B + Z_C) + 3Z_2 Z_0},$$

где ΔZ - добавочное сопротивление.

Введя обозначения: $k_{ABC} = Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_A Z_C$ и $k_\Sigma = Z_A + Z_B + Z_C$ выражение (2.11) можно записать в виде:

$$\Delta Z = \frac{3Z_A Z_B Z_C + k_{ABC}(Z_2 + Z_0) + k_\Sigma(Z_2 Z_0)}{k_{ABC} + k_\Sigma(Z_2 + Z_0) + 3Z_2 Z_0}. \quad (2.12)$$

Тем самым получено и обобщено правило эквивалентности прямой последовательности.

2.3.2. Обрыв одной фазы

В электрических сетях из всех видов продольной несимметрии чаще всего происходит разрыв одной фазы (рис. 2.5), поэтому в подтверждение правильности формул (2.7, 2.8, 2.9) рассмотрим именно этот случай.

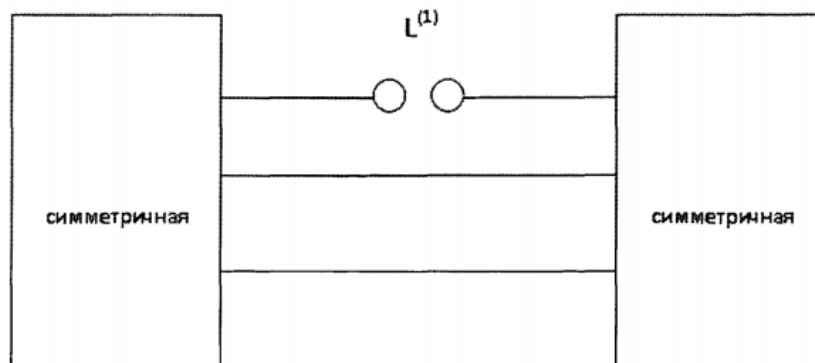


Рис. 2.6. Обрыв одной фазы

Для данной схемы (рис. 2.5) имеем: $Z_B = Z_C = 0, Z_A = \infty$. Подставляя эти значения в формулы (2.7, 2.8, 2.9), получаем выражения для расчета случая однократной продольной несимметрии:

$$\dot{I}_{1L} = \frac{Z_2 + Z_0}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0} \dot{E}_1; \quad (2.13)$$

$$\dot{I}_{2L} = \frac{-Z_0}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0} \dot{E}_1; \quad (2.14)$$

$$\dot{I}_{0L} = \frac{-Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0} \dot{E}_1; \quad (2.15)$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{1L} + \dot{I}_{2L} + \dot{I}_{0L} = 0, \quad (2.16)$$

где $\dot{I}_{1L}, \dot{I}_{2L}, \dot{I}_{0L}$ - токи прямой, обратной, нулевой последовательности в месте разрыва.

2.3.3. Однофазное короткое замыкание

Рассмотрим теперь случай поперечной несимметрии. При авариях, коротких замыканиях, замыканиях между фазами самым распространённым (70% случаев) является однофазное короткое замыкание. Для данной схемы (рис. 2.6) имеем: $Z_B = Z_C = \infty, Z_A = 0$

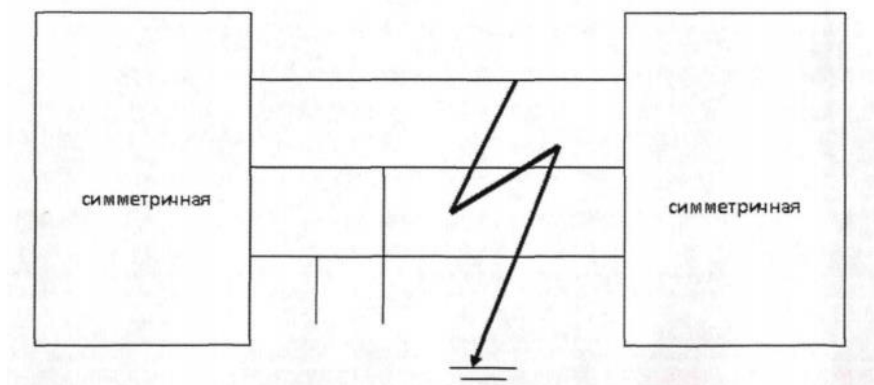


Рис. 2.7 . Однофазное короткое замыкание

Подставляя эти значения в формулы (2.7, 2.8, 2.9) получаем следующие выражения:

$$\dot{I}_{1к} = \frac{\dot{E}_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0};$$

$$\dot{I}_{1к} = \frac{\dot{E}_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0};$$

$$\dot{I}_{0к} = \frac{\dot{E}_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0};$$

$$\dot{I}_A = \frac{3\dot{E}_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_C = 0,$$

где $\dot{I}_{1к}$, $\dot{I}_{2к}$, $\dot{I}_{0к}$ - токи прямой, обратной, нулевой последоват
месте короткого замыкания.

Следовательно, при помощи обобщённых формул (2.7, 2.8, 2.9) можно рассматривать любые частные случаи как продольной так и поперечной несимметрии и получать совершенно конкретные, необходимые на практике результаты. Значит, математическая модель в виде уравнений (2.7, 2.8, 2.9)

является универсальной для расчёта режимов работы системы при нарушении симметрии.

При помощи полученных моделей можно рассчитывать различные по сложности случаи нарушения симметрии: все виды коротких замыканий, замыканий между фазами, причём с учётом сопротивления дуги; любые виды продольной несимметрии, разрывы фаз, когда в месте разрыва есть сопротивление.

Аналогичные итоги были получены, когда в зависимости от метода вычисления коэффициентов потерь мощности для учета несимметрии нагрузки получались различные величины, отражающие возможное увеличение потерь на одинаковом временном интервале [94, 132, 133].

Проанализировав результаты расчетов и полученные зависимости можно утверждать, что в случае наличия в сети несимметрии, необоснованное использование вышеуказанных методов учета дополнительных потерь мощности, может привести к различию фактического влияния несимметрии токов и напряжений на величину потерь и полученных при расчете дополнительных потерь мощности оценочных значений.

2.2. Методы определения потерь электроэнергии в сельских сетях

Для вычисления нагрузочных потерь используются разработанные алгоритмы и методы. Как известно, низковольтные сельские сети имеют сложную и разветвленную структуру и, следовательно, требуется выявление погрешностей и их причин при использовании расчетов оценки уровня потерь ЭЭ в сельских сетях [7-9].

Проанализируем наиболее распространенные расчетные методы определения потерь на примере участка радиальной сети с известными графиками нагрузок потребителей. Вычислительные алгоритмы расчетных методов определения потерь ЭЭ условно можно разделить на два временных этапа. На первом этапе развитие получили алгоритмы методов определения в соответствии с числом часов наибольших потерь τ [10-12].

В дальнейшем исследования уровня потерь ЭЭ стали проводиться с помощью детерминированного и вероятностно-статистического способа задания информации. В современных экономических условиях в стране проблема потерь электроэнергии является актуальной. По данным многочисленных исследований, при передаче ЭЭ от источников питания до потребителей теряется, примерно, 15–20 % отпущенной с шин источников питания ЭЭ. В [10] обрисована структура фактических (отчетных) потерь электроэнергии в электрических сетях энергоснабжающих организаций. "Фактические (отчетные) потери электроэнергии определяют как разность электроэнергии, поступившей в сеть, и электроэнергии, отпущенной из сети потребителям" [10]. По [10] эти потери раскладываются на несколько составляющих, таких как "потери в элементах сети имеющие чисто физический характер, расход электроэнергии на работу оборудования,

установленного на подстанциях и обеспечивающего передачу электроэнергии, погрешности фиксации электроэнергии приборами ее учета и, наконец, хищения электроэнергии, неоплату или неполную оплату показаний счетчиков и т.п." По рассуждению авторов [10-12] потери с экономической позиции – эта часть электроэнергии, на которую ее зарегистрированный полезный отпуск потребителям оказался меньше электроэнергии, произведенной на своих электростанциях и закупленной у других ее производителей. В [10] показаны методы расчета потерь в сетях и методы анализа потерь и выбора мероприятий по их снижению. Как известно, электрические сети низкого напряжения характеризуются отсутствием значительной части информации о схемных и режимных параметрах оборудования. Достоверные данные о значениях сопротивлений контактных групп коммутационных устройств, а также информацию о потребляемой приемниками электроэнергии мощности, как правило, невозможно использовать в расчетах ввиду ее отсутствия. При этом для расчетов применяются различного рода допущения и упрощения. В этом случае при проведении вычислений возникает погрешность метода, т.е. методическая погрешность. Из-за недостоверности исходной информации возникает информационная погрешность. Вследствие этого реальная величина потерь ЭЭ не будет соответствовать вычисленной.

В результате предлагаемых исследований выявлены особенности применения представленных алгоритмов методов определения потерь ЭЭ в сетях сельского электроснабжения [13-15].

2.2.3. Метод графического интегрирования

Для метода графического интегрирования характерна достаточно высокая достоверность. По этому методу потери ЭЭ ΔW находятся с использованием графика нагрузок по продолжительности (рис. 2.8).

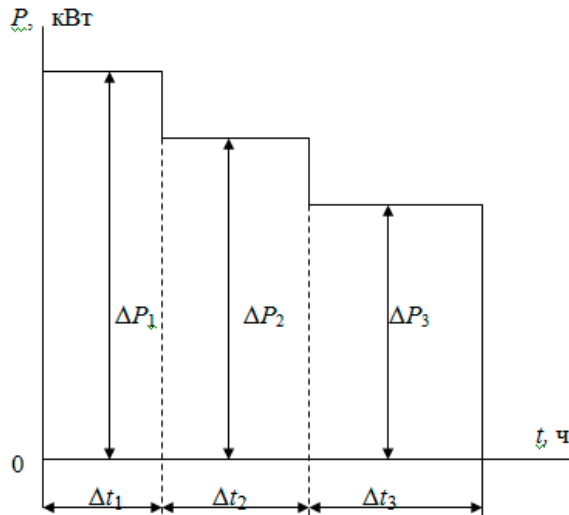


Рис. 2.8.. График нагрузки

Потери ЭЭ определяются

$$\Delta W = \int_0^t \Delta P \cdot dt = \sum \Delta P_i \cdot \Delta t_i, \quad ()$$

где $i \Delta P$ – величина активных потерь за временной промежуток Δt_i

Δt_i временные промежутки исследуемого графика нагрузки.

Применение метода графического интегрирования позволяет получить достоверные результаты. Однако, необходимость наличия исходных данных о зависимостях графиков нагрузок для каждого элемента

сети делает рассматриваемый метод практически сложно применяемым [10].

2.2.4. Расчет потерь ЭЭ с использованием величины τ – времени максимальных потерь

При расчете данным методом выбирается значение, при котором потери мощности имеют максимальное значение. Величина потерь ЭЭ определяется

$$\Delta W = \Delta P_{\text{нб}} \cdot \tau, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{нб}}$ – максимальное значение потерь активной мощности; τ – значение времени максимальных потерь. Тогда величина потерь ЭЭ определяется

$$\Delta W = \Delta P_1 \cdot \Delta t_1 + \Delta P_2 \cdot \Delta t_2 + \dots + \Delta P_n \cdot \Delta t_n = \Delta P_{\text{нб}} \cdot \tau,$$

(2)

где n – значение рассматриваемых интервалов времени графика нагрузок с постоянной мощностью.

Величину τ можно определить по известному значению времени максимальной нагрузки $T_{\text{нб}}$. Определим величину годового электропотребление

$$W = P_1 \cdot \Delta t_1 + P_2 \cdot \Delta t_2 + \dots + P_n \cdot \Delta t_n = \sum P_i \Delta t_i = P_{\text{нб}} \cdot T_{\text{нб}}, \quad (3)$$

Вычисление потерь ЭЭ по вышеизложенному алгоритму проводится в представленной последовательности:

1) вычисляется время максимальной нагрузки $T_{\text{нб}}$;

2) по значениям графических зависимостей $\tau = f(T_{\text{нб}}, \cos\varphi)$, представленных на рис.2 определяется время наибольших потерь активной мощности τ ;

3) рассчитывается величина $\Delta P_{\text{нб}}$ в максимальном режиме;

4) используя выражение (2) вычисляется годовая величина потерь ЭЭ. Предлагаемый алгоритм основан на допущении соответствия величины наибольших потерь ЭЭ режиму максимальной нагрузки и условия того, что графики активной и реактивной мощности подобны, что существенно повышает погрешность рассматриваемого метода.

2.2.4. Вычисление потерь ЭЭ по времени 2τ

Рассматриваемый метод повышает достоверность расчета учитывая неоднородность графиков нагрузки за сутки. Для вычисления потерь по представленному алгоритму предварительно вычисляются параметры режимов максимальных и минимальных нагрузок.

График нагрузок по продолжительности за сутки (рис. 2.9, а) разделяется на две части в соответствии сданными режимами – продолжительность времени режима наибольших нагрузок $_{\text{нб}} t$ (рис. 3, б), а продолжительность времени режима наименьших нагрузок – $_{\text{нм}} t$ (рис. 3, в).

Тогда за сутки электропотребление составит

$$W_c = P_{\text{нб}} \cdot t_{\text{нб}} + P_{\text{нм}} \cdot t_{\text{нм}},$$

Сумма $t_{\text{нб}}$ и $t_{\text{нм}}$ составляет 24 часа

$$t_{\text{нб}} + t_{\text{нм}} = 24.$$

Суточное электропотребление определяется

Расчетные потери ЭЭ за период времени T определяются

$$\Delta W_c = \Delta W \cdot \left[\frac{W_{\text{ф.с.}}}{W_c} \right]^2 \cdot \Delta T,$$

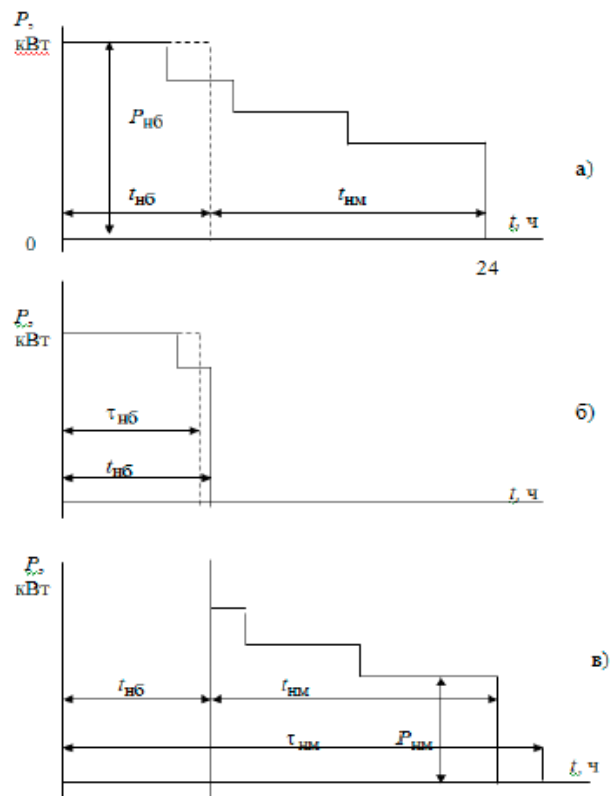


Рис. 2.9. График нагрузок по продолжительности за сутки:

a – продолжительность графика $t_{\text{нб}} + t_{\text{нм}}$; *б* – продолжительность графика $t_{\text{нб}}$; *в* – продолжительность графика $t_{\text{нм}}$

Практическое применение рассматриваемого метода усложняется значительной трудоемкостью сбора необходимой информации.

2.2.5. Определение потерь электроэнергии по величине средних нагрузок узлов

Предлагаемый алгоритм применяется, если известна информация за рассматриваемое время ΔT об изменении величины мощности в узлах сети. Величины средней мощности в узлах рассчитывается с помощью показаний счетчиков как отношение активной электроэнергии при потреблении в узле к расчетному времени. Тогда потери ЭЭ определяются

$$\Delta W = \Delta P_{\text{ср}} \cdot \Delta T_{\text{ср}}, \quad ()$$

где $\Delta P_{\text{ср}}$ – величина потерь активной мощности при заданных в узлах средних значениях мощности; ΔT – расчетное время, ч.

Метод расчета потерь ЭЭ по средним нагрузкам узлов можно применять в сетях с относительно постоянными нагрузками.

Рассмотрим возможные погрешности методов при определении потерь ЭЭ в низковольтных сетях. На рис. 4 показана радиальная схема низковольтной сети, а на рис. 5 и рис. 6 – графики изменения мощности за сутки. В табл. 1 приведены результаты вычислений суточных потерь ЭЭ в низковольтной сети рассматриваемыми методами и показана погрешность каждого метода. При этом в качестве эталонного метода рассматривается метод графического интегрирования. Тогда минимальная величина погрешности (9 %) характеризует алгоритм с использованием значения 2π ,

а максимальная величина (-56 %) □ присуща расчету по значению средних нагрузок.

Погрешности представленных методов могут возникать из-за неточности определения значений потерь максимальных и минимальных потерь, неточности расчета времени наибольших потерь, неучета параметров графика нагрузки потребителей.

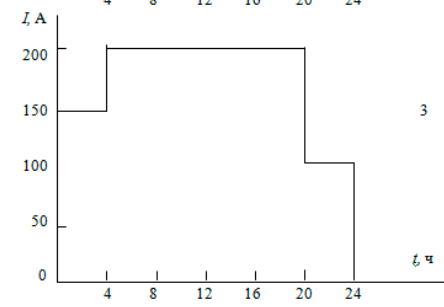
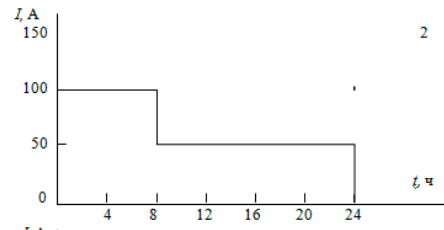
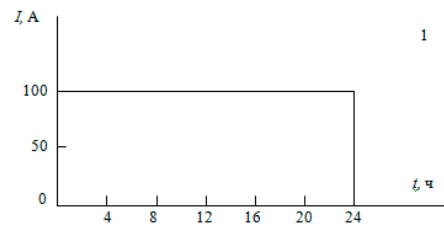
Приведенные выше факторы снижают достоверность расчетных значений потерь. При этом достаточная точность характерна для метода графического интегрирования при имеющейся исходной информации.

Для увеличения точности расчетов уровней потерь ЭЭ по представленным алгоритмам необходим учет таких параметров оборудования, как нагревание проводов и сопротивлений контактных групп низковольтных аппаратов.

Таблица Расчетные значения потерь ЭЭ и погрешностей вычислений

Метод определения потерь	Расчетное значение потерь ЭЭ, кВт ч	Величина погрешности вычислений, %	Возможные причины возникновения погрешностей
Метод графического интегрирования	307	0	
Метод времени максимальных потерь t	260	-16	По времени максимальных потерь t – неточность вычисления времени максимальных потерь t
Метод расчета $2t$	280	-9	Неточность расчета величин максимальных и минимальных потерь активной мощности, значительная трудоемкость сбора необходимой исходной информации
Вычисление по среднеквадратичным значениям нагрузки	186	-56	Принятые допущения для учета параметров нагрузочных зависимостей

Рис. 4. Схема участка радиальной цеховой сети



Графики нагрузок 1–3 потребителей

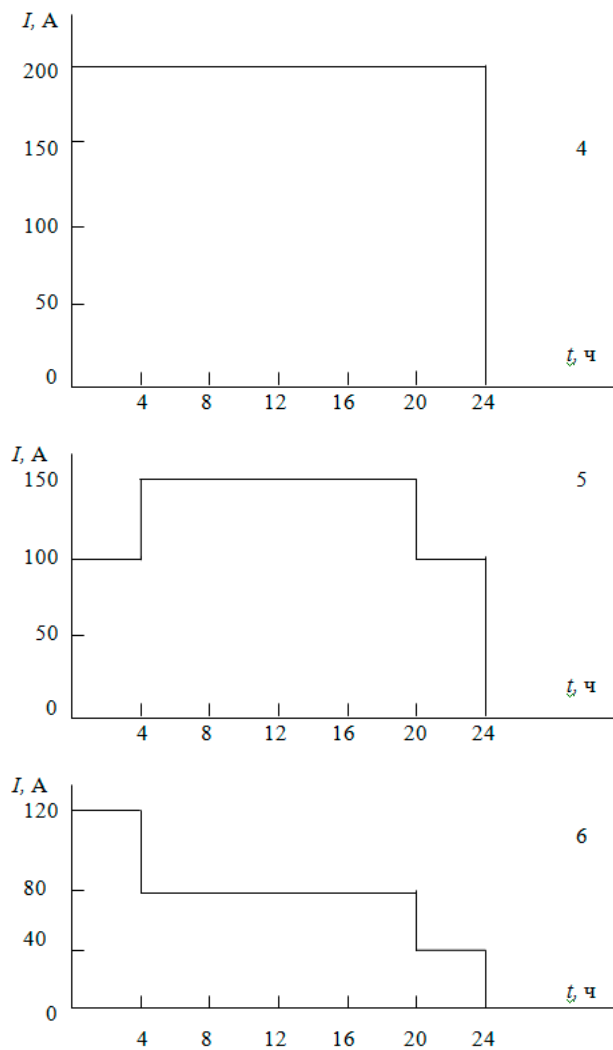


Рис. 6. Графики нагрузок 4–6 потребителей

Проведенный анализ наиболее распространенных методов расчета потерь ЭЭ в низковольтных сетях показал, что

- рассмотренные детерминированные методы расчета отличаются достаточно высокими погрешностями (9-56%) вычислений потерь ЭЭ при недостатке достоверных данных о схемных и режимных параметрах и возможных принятых допущениях.

- целесообразность выбора метода расчета потерь должна быть обусловлена соответствием методических и информационных погрешностей.

2.3. Способ измерения потерь электроэнергии в электрических сетях с помощью термостата

С развитием оптового и розничных рынков электроэнергии, с новыми хозяйственными и экономическими отношениями субъектов этих рынков всё более актуальными становятся и новые задачи расчёта технологических потерь электроэнергии, в том числе:

- оперативный мониторинг потерь мощности и электроэнергии на получасовых и часовых интервалах не только для сети в целом, но и для отдельных участков, линий и трансформаторов с целью своевременного принятия решений по снижению этих потерь;
- оперативный расчёт, анализ и прогнозирование потерь от транзитных потоков мощности и электроэнергии, разделение этих потерь между участниками рынка электроэнергии по степени их влияния на величину транзитных потерь;
- прогноз потерь электроэнергии на сутки вперёд для повышения точности прогнозирования балансов электроэнергии на соответствующих торговых площадках;
- прогноз потерь электроэнергии на среднесрочную и долгосрочную перспективу с учётом прогнозов электропотребления, развития электрических сетей, ввода нового генерирующего оборудования, климатических условий для повышения обоснованности программ

развития электроэнергетики, программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности электросетевого комплекса.

В работе предложен способ измерения потерь электроэнергии в электрических сетях с помощью разработанной экспериментальной установки, основным элементом которой являются термостаты. В термостатах расположены физические модели элементов трехфазной электрической сети. Основным устройством установки является Arduino, с помощью которого проводится экспериментальное исследование по влиянию несимметрии на потери электроэнергии.

Потери электроэнергии в электрических сетях неизбежны, поэтому важно чтобы они не превышали утвержденного экономически обоснованного нормативного уровня, который объясняется технологическим расходом электроэнергии, связанным с затратами самой передаваемой электроэнергии по элементам электрических сетей и вызывающих, в первую очередь, их нагрев. Превышение норм технологического расхода электроэнергии говорит о существующих проблемах.

В 1964 г. был разработан Я.Ф. Кузьминым и Л.А. Эглитис-Цауне способ измерения потерь активной мощности, в котором были использованы два ваттметра, один из которых включают на разность токов на входе и выходе элемента сети и на напряжение на входе его, а другой ваттметр – на разность напряжений на входе и выходе и на ток на выходе элемента [1]. Разработанный нами способ измерения потерь электроэнергии в элементах электрической сети с помощью термостатов, отличается тем, что, с целью повышения точности измерения потерь электроэнергии, а также с развитием информационных технологий и современных устройств, применили электронное устройство «Arduino». Arduino является устройством сопряжения между компьютером и исполнительными

элементами, применяется для управления электронными устройствами с возможностью приема сигналов от цифровых и аналоговых датчиков, которые могут быть подключены к нему [2].

В электрических сетях постоянно изменяется сила тока и напряжения, что затрудняет математически получить точные результаты о рассеивании энергии в элементах электрических сетей по закону Джоуля-Ленца. Для упрощения получения данных рассеивания энергии в элементах электрических сетей применяем физическую модель исследования в виде термостатов. Физическая модель разработана для трехфазной сети в виде трех термостатов на каждую фазу. Термостат состоит из корпуса, выполненного из нержавеющей стали, с двойными стенками, между которыми выкачан воздух (создан вакуум) для уменьшения теплопроводности и конвекции между колбой термостатов и внешней средой. Следующими элементами термостата являются физическая модель элемента электрической сети (токопроводящая жила) и наполнитель. Для уменьшения теплового излучения внутренние поверхности стеклянной колбы покрыты слоем из отражающего, зеркального материала. Наружный корпус термостатов со стеклянной колбой изготовлены из металла (рис. 2), в котором находится электронный термодатчик, с заданным коэффициентом рассеивания тепловой энергии в окружающую среду в зависимости от разности температуры внутри термостатов от окружающей среды. Термостаты наполняются трансформаторным маслом, с известной теплоемкостью и весом. Температура трансформаторного масла передается электронному термодатчику, с выходом на Arduino.

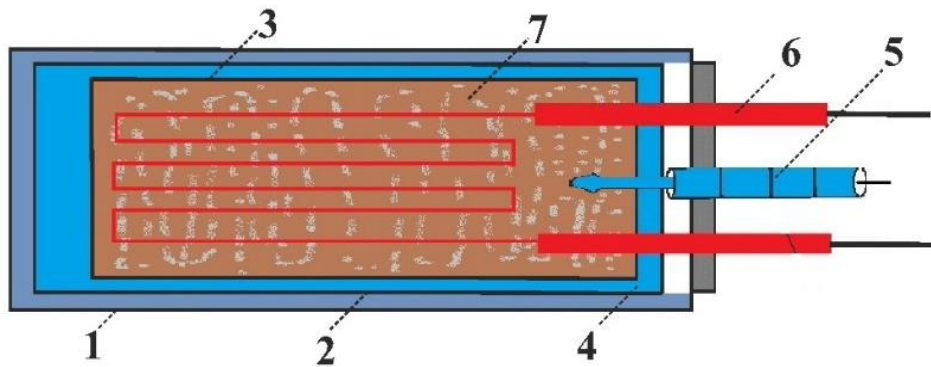


Рис. 2.10. Термостат: 1 – корпус; 2 – внешний стеклянный сосуд; 3 – внутренний стеклянный сосуд; 4 – вакуум; 5 – электронный термодатчик; 6 – токоведущий элемент; 7 – трансформаторное масло.

Как известно [4], уравнение для определения перегрева жил токопроводов относительно температуры окружающей среды имеет вид

$$\tau \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta = \vartheta_{ж.н} \left(\frac{I}{I_n} \right)^2, \quad (1)$$

где τ - реальная постоянная нагрева токопровода; ϑ - температура перегрева токопровода; $\vartheta_{ж.н}$ - максимально допустимая температура жил; I - ток нагрузки; I_n - длительно допустимый ток токопровода.

Более точное уравнение, учитывающее зависимость сопротивления и постоянной нагрева токопровода от температуры, имеет вид [5]

$$\tau(\vartheta) \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta = K_R(\vartheta) \cdot \vartheta_{ж.н} \left(\frac{I}{I_n} \right)^2; \quad (2)$$

$$\text{где } \tau(\vartheta) = \frac{\tau_0}{1 + 0.3(1 - \frac{\vartheta}{\vartheta_{ж.н}})}, \quad ()$$

τ_0 - значение постоянной нагрева при длительно допустимой температуре жил $\vartheta_{ж.н}$; α - температурный коэффициент сопротивления токопровода.

Физическая модель, в виде токопроводящих жил с подобранными сечениями (0,5мм², 0,75мм² и 1,0мм² в каждом термостате), удельным сопротивлением, весом и длиной находятся в термостатах. Теплоемкость и вес изоляции токопроводящих жил известны, что позволяет точно определить количество рассеиваемой энергии токопроводящих жил, по формулам:

Сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\rho l}{s} \quad ()$$

где R — сопротивление, Ом; ρ - удельное сопротивление, Ом·мм²/м; l — длина провода, м; s — площадь сечения провода, мм².

Удельное сопротивление чистой электротехнической меди при 20°С составляет 0,0172Ом·мм²/м.

Удельное сопротивление меди изменяется с температурой, но для температур, характерных для сферы ИТ, эти изменения невелики. Изменение удельного сопротивления рассчитывается по формулам:

$$\Delta\rho = \alpha \cdot R \cdot \Delta T \quad ()$$

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)) \quad ()$$

где $\Delta\rho$ – изменение удельного сопротивления, ρ_1 – удельное сопротивление при температуре, принятой в качестве базового уровня (обычно 20°C), ΔT – градиент температур, α – температурный коэффициент удельного сопротивления для данного материала (размерность °C⁻¹). В диапазоне от 0°C до 100°C для меди принят температурный коэффициент 0,004 °C⁻¹. Рассчитаем удельное сопротивление меди при 60°C.

$$\rho_{60^{\circ}\text{C}} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + \alpha \cdot (60^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C})) = 0,0172 \cdot (1 + 0,004 \cdot 40) \approx 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} ()$$

k_n - коэффициент разности рассеивания энергии при повышении сопротивления токопроводящих жил выше 25°C.

Рассчитаем k_n при 60°C и сечением жилы 0,5 мм²:

$$k_{60} = \frac{((\rho_{60^{\circ}\text{C}} \cdot 5^2) - (\rho_{25^{\circ}\text{C}} \cdot 5^2))}{(\rho_{55^{\circ}\text{C}} \cdot 5^2)} = \frac{((0,39904 \cdot 25) - (0,35088 \cdot 25))}{0,39216 \cdot 25} = 0,122807018 (8)$$

Далее в таблицах 2.1, 2.2. и 2.3 приведены результаты ρ , R и k_n , при сечении кабеля 0,5; 0,75; 1,0 мм².

Таблица 2.1. Значения ρ , R и K_n при сечении кабеля 0,5 мм²

0,5 мм ²	t	ρ	R, Ом	k_n
1	25	0,017544	0,35088	0
2	30	0,017888	0,35776	0,019607843
3	35	0,018232	0,36464	0,038461538
4	40	0,018576	0,37152	0,056603774
5	45	0,01892	0,37840	0,074074074
6	50	0,019264	0,38528	0,090909091
7	55	0,019608	0,39216	0,107142857
8	60	0,019952	0,39904	0,122807018
9	65	0,020296	0,40592	0,137931034
10	70	0,02064	0,41280	0,152542373

11	75	0,020984	0,41968	0,166666667
12	80	0,021328	0,42656	0,180327869
13	85	0,021672	0,43344	0,193548387
14	90	0,022016	0,44032	0,206349206
15	95	0,02236	0,44720	0,21875
16	100	0,022704	0,45408	0,230769231

Таблица 2.2. Значения ρ , R и K_n при сечении кабеля $0,75 \text{ мм}^2$

$0,75 \text{ мм}^2$	t	ρ	$R, \text{ Ом}$	k_n
1	25	0,017544	0,233920	0
2	30	0,017888	0,238507	0,019607843
3	35	0,018232	0,243093	0,038461538
4	40	0,018576	0,247680	0,056603774
5	45	0,01892	0,252267	0,074074074
6	50	0,019264	0,256853	0,090909091
7	55	0,019608	0,261440	0,107142857
8	60	0,019952	0,266027	0,122807018
9	65	0,020296	0,270613	0,137931034
10	70	0,02064	0,275200	0,152542373
11	75	0,020984	0,279787	0,166666667
12	80	0,021328	0,284373	0,180327869
13	85	0,021672	0,288960	0,193548387
14	90	0,022016	0,293547	0,206349206
15	95	0,02236	0,298133	0,21875
16	100	0,022704	0,302720	0,230769231

Таблица 2.3. Значения ρ , R и K_n при сечении кабеля $1,0 \text{ мм}^2$

$1,0 \text{ мм}^2$	t	ρ	$R, \text{ Ом}$	k_n
1	25	0,017544	0,17544	0
2	30	0,017888	0,17888	0,01961
3	35	0,018232	0,18232	0,03846
4	40	0,018576	0,18576	0,05660
5	45	0,01892	0,18920	0,07407
6	50	0,019264	0,19264	0,09091
7	55	0,019608	0,19608	0,10714
8	60	0,019952	0,19952	0,12281
9	65	0,020296	0,20296	0,13793
10	70	0,02064	0,20640	0,15254
11	75	0,020984	0,20984	0,16667
12	80	0,021328	0,21328	0,18033
13	85	0,021672	0,21672	0,19355
14	90	0,022016	0,22016	0,20635

15	95	0,02236	0,22360	0,21875
16	100	0,022704	0,22704	0,23077

Далее определяем теплоёмкость трансформаторного масла. Вес масла 2 кг. Результаты расчетов приведены в таблице 2.4.

Таблица 2. 4. Значения теплоёмкости трансформаторного масла

t	C,кДж/(кг ⁰ С)	C,кДж/(кг ⁰ С), при массе 2 кг
25	1,698	3,395
30	1,729	3,458
35	1,759	3,517
40	1,788	3,576
45	1,817	3,634
50	1,846	3,692
55	1,876	3,751
60	1,905	3,81
65	1,935	3,869
70	1,964	3,928
75	1,995	3,99
80	2,026	4,052
85	2,056	4,111
90	2,085	4,17
95	2,115	4,229
100	2,144	4,288

Удельная теплоемкость поливинилхлорида $1,51 \text{кДж} / \text{кг}^0\text{С}$, вес поливинилхлорида равен $0,0893 \text{кг}$, $C_{\text{ПВХ}} = 0,1348 \text{кДж}$.

Удельная теплоёмкость меди $0,383 \text{кДж} / \text{кг}^0\text{С}$, вес меди $0,20025 \text{кг}$, $C_{\text{медь}} = 0,0767383 \text{кДж}$.

При известных значениях теплоемкости и рассеивания тепла термостатов в окружающую среду находим количество рассеиваемой энергии токопроводящих жил при повышении температуры в термостатах на 1°C с 25°C до 26°C .

Далее в таблице 5 приведены результаты рассеивание энергия за 1 час при температуре окружающей среды 21°C в кДж.

Таблица 2.5. Результаты рассеивание энергия за 1 час

Время в часах	$^{\circ}\text{C}$	рассеивание энергия за 1 час при температуре окружающей среды 21°C в кДж
1	100	36,503
1	95	35,6083
1	90	32,688
1	85	31,2208
1	80	31,123
1	75	30,876
1	70	30,546
1	65	29,9299
1	60	27,6464
1	55	25,017864
1	50	21,9555
1	45	20,3546
1	40	19,4186
1	35	17,0123
1	30	15,7441
1	25	14,4072

Находим количество рассеивания энергии в термостатах при повышении температуры на 1°C при первоначальной температуре термостата 30°C и заложенным сечением жилы $0,5\text{мм}^2$:

$$\begin{aligned}
Q_{0,5} &= \left(\left(C_{\text{масло } 30^{\circ}\text{C}} + C_{\text{медь}} + C_{\text{ПВХ}} \right) + \left(k_{\text{расс.}30^{\circ}\text{C}} \cdot t \right) \right) - \\
& \left(\left(\left(C_{\text{масло } 30^{\circ}\text{C}} + C_{\text{медь}} + C_{\text{ПВХ}} \right) + \left(k_{\text{расс.}30^{\circ}\text{C}} \cdot t \right) \right) \cdot k_{30^{\circ}\text{C}} \right) \cdot 1^{\circ}\text{C} = \\
& = \left((3,458 + 0,0767383 + 0,1348) + (15,7441 \cdot 1) \right) - \\
& \left(\left((3,458 + 0,0767383 + 0,1348) + (15,7441 \cdot 1) \right) \cdot 0,019607843 \right) \cdot 1 = 19,032979 \text{ кДж}
\end{aligned}$$

()

где $C_{\text{масло}}$ - теплоемкость трансформаторного масла в термостате, $C_{\text{медь}}$ - теплоемкость меди в термостате, $C_{\text{ПВХ}}$ - теплоемкость поливинилхлорида в термостатах, $k_{\text{расс.}}$ - коэффициент рассеивания тепловой энергии термоса в окружающую среду в зависимости от разности температуры внутри термоса от окружающей среды, t - время, k_n - коэффициент разности рассеивания энергии при повышении сопротивления токопроводящих жил выше 25°C .

Для решения проблем, связанных с измерением потерь электроэнергии в электрических сетях создана экспериментальная установка для исследования влияния показателей качества электроэнергии на элементы электрической сети (рис. 2.11), основным элементом которой является предлагаемый термостат, представляющий физическую модель исследования. С их помощью проведены экспериментальные исследования в лаборатории кафедры «Электроснабжение» Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова.



Рис. 2.11. Экспериментальная установка для исследования физических процессов в электрических сетях: 1- электроприемник; 2- магнитные пускатели; 3- реле; 4 -счетчик трехфазный электронный; 5 -электронный датчик температуры; 6 термостат (физическая модель исследования); 7- ArduinoMega 2560; 8 -персональный компьютер.

2.4. Управление переключениями нагрузок с исследованием режимов несимметрии в электрических сетях.

Назначение: алгоритм переключений нагрузок с фиксированным интервалом времени и мгновенной обработкой данных с электронных термодатчиков, для исследования несимметрии в электрических сетях

Введение позволит исследовать несимметрию в электрических сетях.

Язык - C++; Тип ЭВМ - ПК; Объем программы - 36,2 КБ.

Дата создания: 2018 г.

Разработанная программа на ЭВМ для экспериментальной установки по исследованию влияния показателей качества электроэнергии на элементы электрической сети и алгоритм переключений нагрузок с обработкой данных и выводом информации через Com-port. Программа позволяет задать алгоритм переключений нагрузок с фиксированным интервалом времени и мгновенной обработкой данных с электронных термо-датчиков, для исследования несимметрии в электрических сетях. Для исследования влияния несимметрии в электрических сетях, с возможностью выбора режимов (симметричный режим; несимметричный режим, при нагрузке по двум фазам; несимметричный режим, при нагрузке одной фазы (крайний режим несимметрии) электрических сетей. В образовательном процессе магистров для выполнения исследований.

Платформа выполнена таким образом, чтобы быть максимально совместимой со своими младшими собратьями и модулями расширения (shields). Левая часть платы по конфигурации контактов идентична Arduino Uno, как по расположению, так и по назначению. Это означает, что Arduino Mega 2560 может просто подменить Arduino Uno, если её возможностей перестало хватать. Исключение составляют 20-й и 21-й контакты, которые предназначены для коммуникации с другими устройствами по протоколу I²C. В базовой модели они совмещены с 4-м и 5-контактами.

Область применения: Для исследования влияния несимметрии в электрических сетях, с возможностью выбора режимов (симметричный режим; несимметричный режим, при нагрузке по двум фазам; несимметричный режим, при нагрузке одной фазы (крайний режим

несимметрии) электрических сетей. В образовательном процессе магистров для выполнения исследований.

Базовые функциональные возможности: Система управления позволяет осуществить: выбор режимов работы, просмотр и печать полученной информации, редактировать интервалы времени переключения нагрузок, а также в реальном времени снимать данные показания температуры с трех электронных термо-датчиков, с возможностью вывода на Com-port.

Системные требования:

Размер файла 36,2 КБ (37131 байт)

Плата mega2560

Микроконтроллер ATmega2560

Количество цифровых входов/выходов 54

из них PWM поддерживают 15

Количество аналоговых входов 16

Количество контактов для аппаратного прерывания 6

Объём Flash-памяти (кБ) 256

Объём SRAM-памяти (кБ) 8

Объём EEPROM-памяти (кБ) 4

Тактовая частота (МГц) 16

Количество аппаратных serial-портов 4

Выводы:

Проведенный анализ наиболее распространенных методов расчета потерь ЭЭ в низковольтных сетях показал, что

- рассмотренные детерминированные методы расчета отличаются достаточно высокими погрешностями (9–56%) вычислений потерь ЭЭ при недостатке достоверных данных о схемных и режимных параметрах и возможных принятых допущениях.

- целесообразность выбора метода расчета потерь должна быть обусловлена соответствием методических и информационных погрешностей.

1. Разработанный способ дает возможность измерить потери электроэнергии в электрических сетях с меньшей погрешностью по сравнению с существующими способами.

2. Основным элементом экспериментальной установки предложена разработанная конструкция термостата с размещенной внутри физической моделью элемента электрической сети.

3. Элементом сопряжения экспериментальной установки является Arduino, с помощью которого осуществляется автоматическое управление экспериментом.

Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИИ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ НАПРЯЖЕНИЙ

Одной из задач, решаемой в данном труде, является расчет потерь установление уровня роста потерь мощности при передаче ее в распределительных сетях с несимметричным характером нагрузки.

Несимметрично загруженные фазы в электрических сетях приводят к росту потерь электроэнергии, следствием чего является снижение ее качества. Исследования проведены в реально действующих сетях и на экспериментальной установке, созданной в лаборатории с использованием «Arduino». Arduino позволяет компьютеру моделировать электрическую нагрузку. Устройства с помощью Arduino получают информацию датчиков и управляют исполнительными устройствами. Платформа, с программным кодом, построена на простой плате с современной средой для написания программного обеспечения. Это современное устройство использована в разработанной экспериментальной установке на кафедре «Электроснабжение» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, для исследования физических процессов в электрических сетях. Исследования проводились на экспериментальной установке при различных режимах: симметричный режим; несимметричный режим, при нагрузке на две фазы; несимметричный режим, при нагрузке на одну фазу (крайний режим несимметрии). Исследования свидетельствуют о влиянии несимметрии на рост потерь электроэнергии в электрических сетях.

Несимметрия трехфазной системы напряжений обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети.

Показателями КЭ, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} [1].

Для указанных показателей КЭ как выше упоминали установлены следующие нормы:

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} 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_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4% в течение 100% времени интервала в одну неделю.

Снижение потерь электроэнергии до уровня, устанавливаемого регулирующим органом можно добиться за счет повышения качества электрической энергии в сетях общего назначения.

Несимметрия напряжения приводит к увеличению потерь мощности и электроэнергии во всех элементах электрической сети, что обусловлено

протеканием токов обратной и нулевой последовательностей. Например, при $K_{2и} = 2\%$ добавочные потери в обмотках асинхронных двигателей $\Delta P_{доб.}$ составляют 8% основных потерь прямой последовательности $\Delta P_{осн.}$, а при $K_{2и} = 5\%$ $\Delta P_{доб.}$ равны половине $\Delta P_{осн.}$ [1].

Таким образом, для оценки эффективности передачи и распределения электроэнергии при ухудшенном КЭ необходимо учитывать и ее дополнительные потери.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к несимметрии напряжений в трехфазных системах, установленное в ГОСТ Р 54149-2010, должны быть проведены измерения по ГОСТ Р 51317.4.30, подраздел 5.7, класс А.

Согласно этого ГОСТа при измерении трехфазного переменного напряжения, за исключением требований к значениям коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям, которые должны быть в пределах от $1\% U_1$ до $5\% U_1$, инструментальная составляющая неопределенности измерений коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям не должна превышать $\pm 0,15\%$. Например, показания средств измерения, подключенного к трехфазной системе напряжений с коэффициентом несимметрии по обратной последовательности $1,0\%$, должны быть в пределах от $0,85\%$ до $1,15\%$ (Рис. 1) [2].



Рис.3. 1. Пример неопределенности измерений несимметрии напряжений

Конфигурация электрических сетей 0,4 кВ сложная и сильно разветвлена из-за множества ответвлений. Определение потерь по участкам требует громадных вычислений. На практике эти сети заменяются обобщенными параметрами, так как учесть все влияющие факторы практически невозможно. Это облегчает инженерные расчеты и позволяет оценить уровень технических потерь с наименьшей погрешностью. Основной задачей экспериментальных исследований является определение этих параметров.

3.1. Исследование и результаты

Нами проведены исследования в реальных сетях на отходящих фидерах двух подстанций 10/0,4 кВ, расположенных в сельской местности, питающих потребителей (Аламединский РЭС, Воронцовский участок ОАО «Северэлектро»). А также исследования проведены на установке в лабораторных условиях с помощью электронного конструктора «Arduino». Замеры, выполнялись при существующем положении в сети в течение

недели. При измерениях использовались лабораторные токоизмерители и вольтметры, а также счетчики.

В качестве контролируемых показателей были приняты: пофазное почасовое измерение токов, напряжений в начале и в конце линий (Рис. 5); пофазное и суммарное потребление активной энергии потребителями, подключенными к исследуемой отходящей от трансформаторной подстанции (ТП) воздушной линии, а также суммарный отпуск активной энергии с шин подстанции 10/0,4 кВ; коэффициент увеличения потерь мощности вследствие неравномерности нагрузки фаз.

На Рис. 2 представлена зависимость токов и падений напряжения по фазам во времени в течении суток, а на Рис. 3.3 – изменение коэффициента несимметрии во времени, рассчитанного по выражению (3.1).

$$K_H = \frac{I_o}{I_{cp}} , \quad (3.1)$$

$$\text{где } I_{cp} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c); \cdot I_o = (I_a - 0,5(I_b + I_c) + \frac{\sqrt{3}}{2}(I_b - I_c))$$

Потери мощности в симметричном и несимметричном режимах определены по выражениям:

$$\begin{aligned} \Delta P_{нес} &= (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + (3I_o)^2) \cdot R ; \\ \Delta P_c &= \frac{1}{3} I_{cp}^2 \cdot R . \end{aligned} \quad (3.2)$$

Из выражений (1) и (2) получим

$$\frac{\Delta P_{нес}}{\Delta P_c} = 1 + K_H^2 \left(2 + 3 \frac{R_o}{R_{cp}} \right) , \quad (3.3)$$

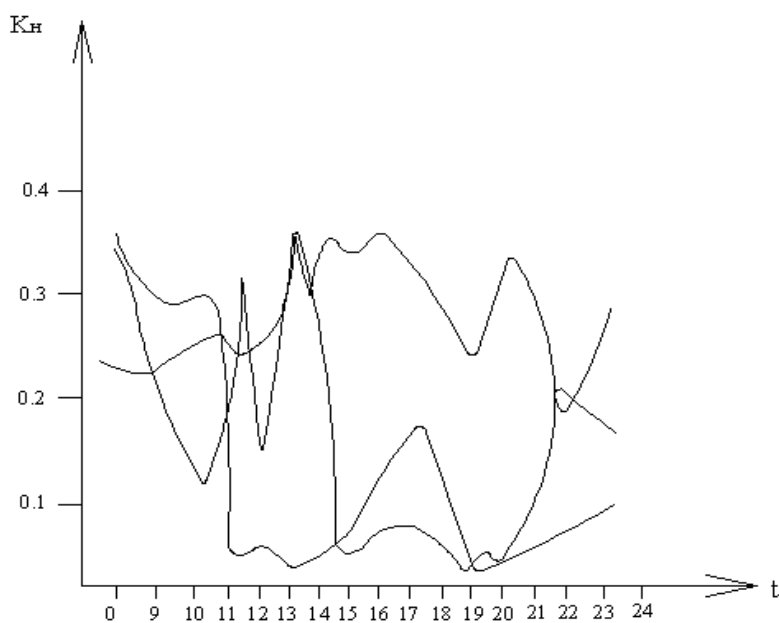


Рис.3. 2. Зависимость токов и падений напряжения по фазам во времени в течении суток

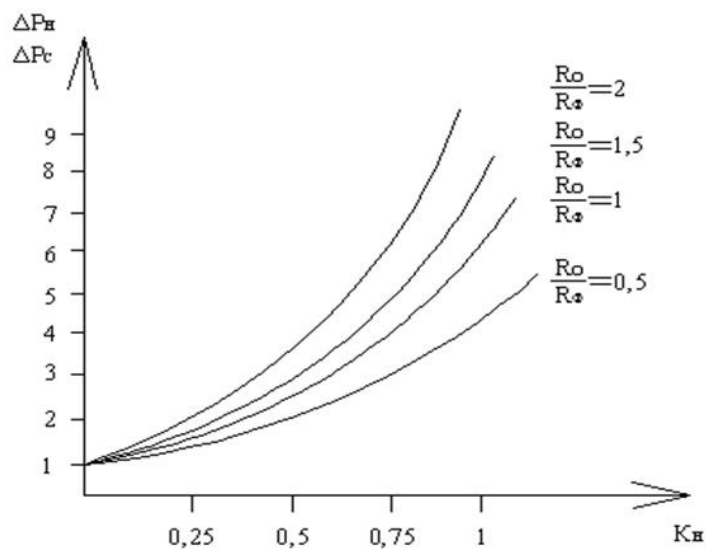


Рис. 3.3. Изменение коэффициента несимметрии во времени, рассчитанного по выражению (3.1)

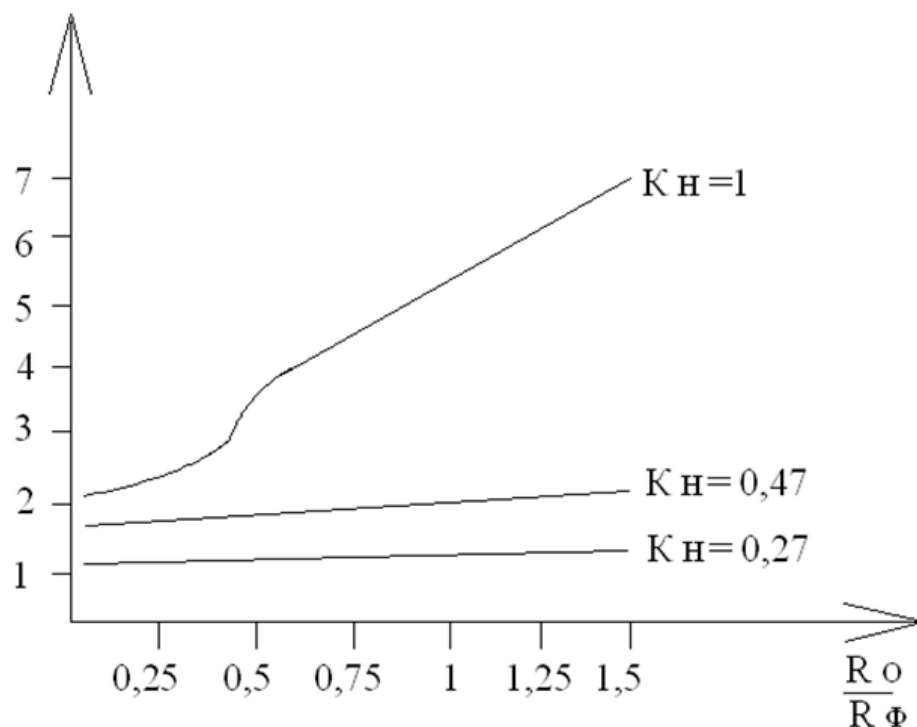


Рис. 3.4. Изменение K_n в зависимости от нагрузки

Несимметричная нагрузка вызывает дополнительные потери мощности, которые можно связать с коэффициентом несимметрии, определяемом по выражению (3), который теоретически может изменяться от 0 до 1. Заметим, что K_n изменяется (Рис. 3.3) с изменением нагрузки. Поэтому необходимо связать его с токовым суточным графиком и определить типовой коэффициент неравномерности.

Определены относительные технических потери по фидерам и в целом по ТП за исследуемый период как разница показаний головного счетчика и суммарные показания счетчиков всех абонентов по ТП. Она составила от 18,6% до 40,3%.

А разница, рассчитана по выражению (3.4):

$$W = K_{H/M} \cdot \Delta U_{\max} \% \cdot \tau \quad (3.4)$$

без учета и с учетом коэффициента неравномерности токов в фазах показали отличие в 1,8 раза.

Сравнение расчетных относительных потерь электроэнергии с экспериментальными данными показали, что без учета коэффициента несимметрии погрешность составляет до 51%, а с учетом до 6%, что приемлемо, если учитывать погрешности счетчиков.

Проведенный анализ наиболее распространенных методов расчета потерь ЭЭ в низковольтных сетях показал, что рассмотренные детерминированные методы расчета отличаются достаточно высокими погрешностями (9-56%) вычислений потерь ЭЭ при недостатке достоверных данных о схемных и режимных параметрах и возможных принятых допущениях.

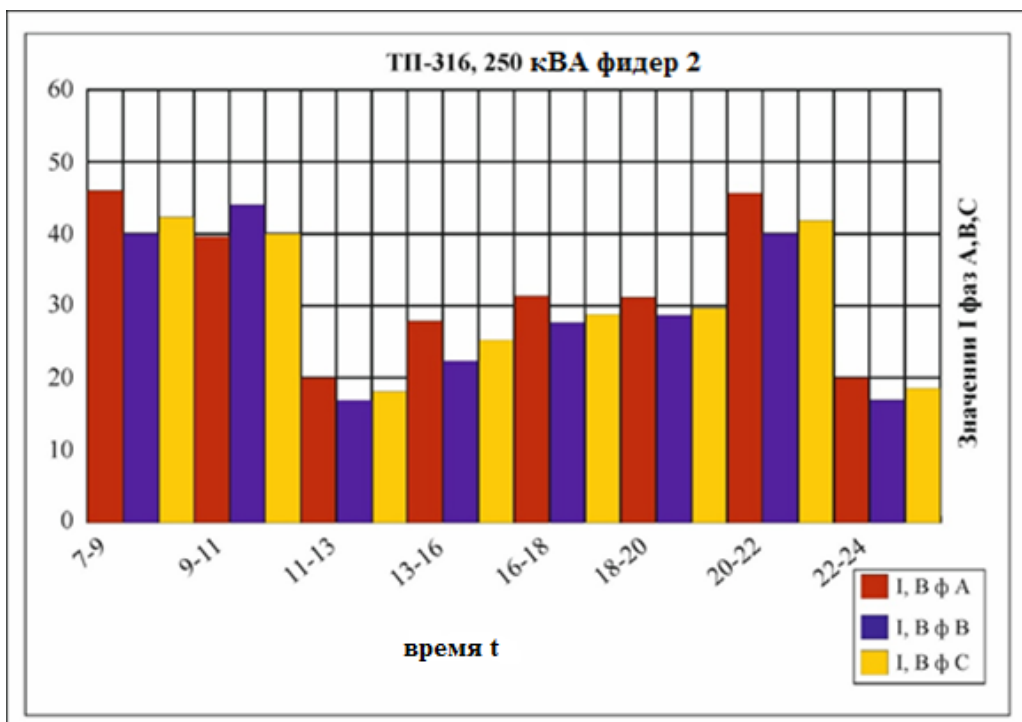
Кроме анализа дополнительных потерь из-за несимметрии, также рассмотрено влияние сопротивления нулевого провода на снижение расхода энергии. Поскольку при симметричной нагрузке фаз ($I_A = I_B = I_C$), то $K_H = 0$ при несимметричной же нагрузке фаз ($I_A \neq I_B \neq I_C$) и $0 < K_H < 1$. В случае включения всей нагрузки на одну фазу (предельный случай несимметрии) $K_H = 1$.

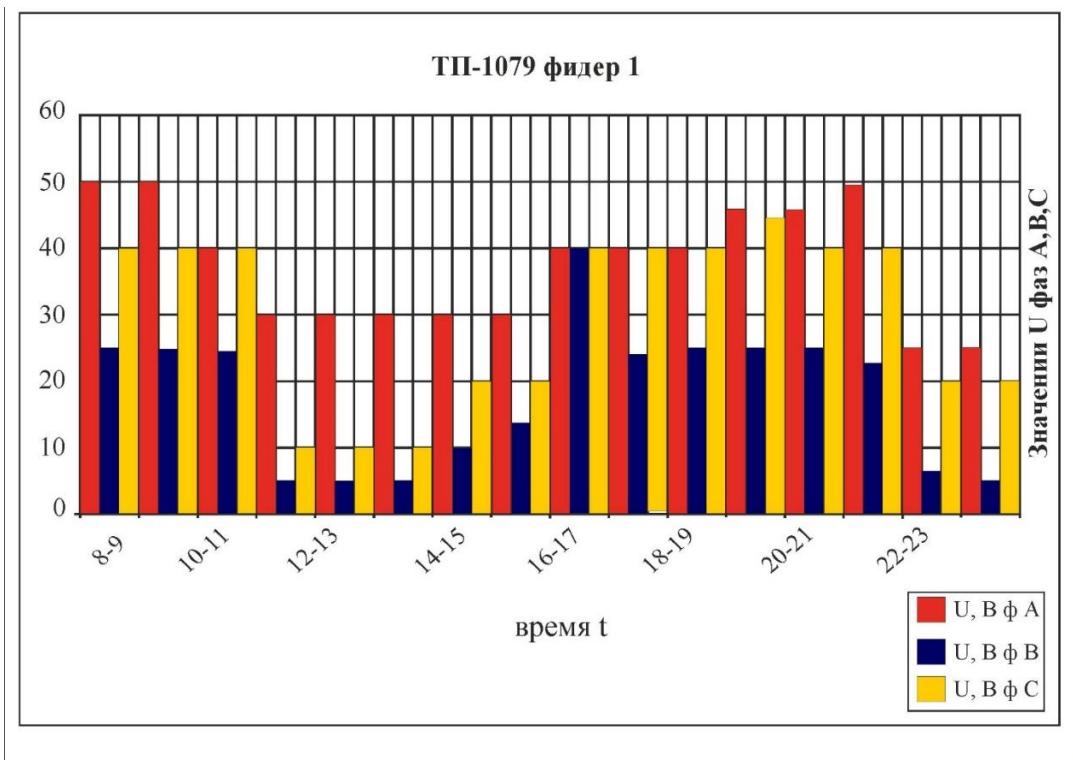
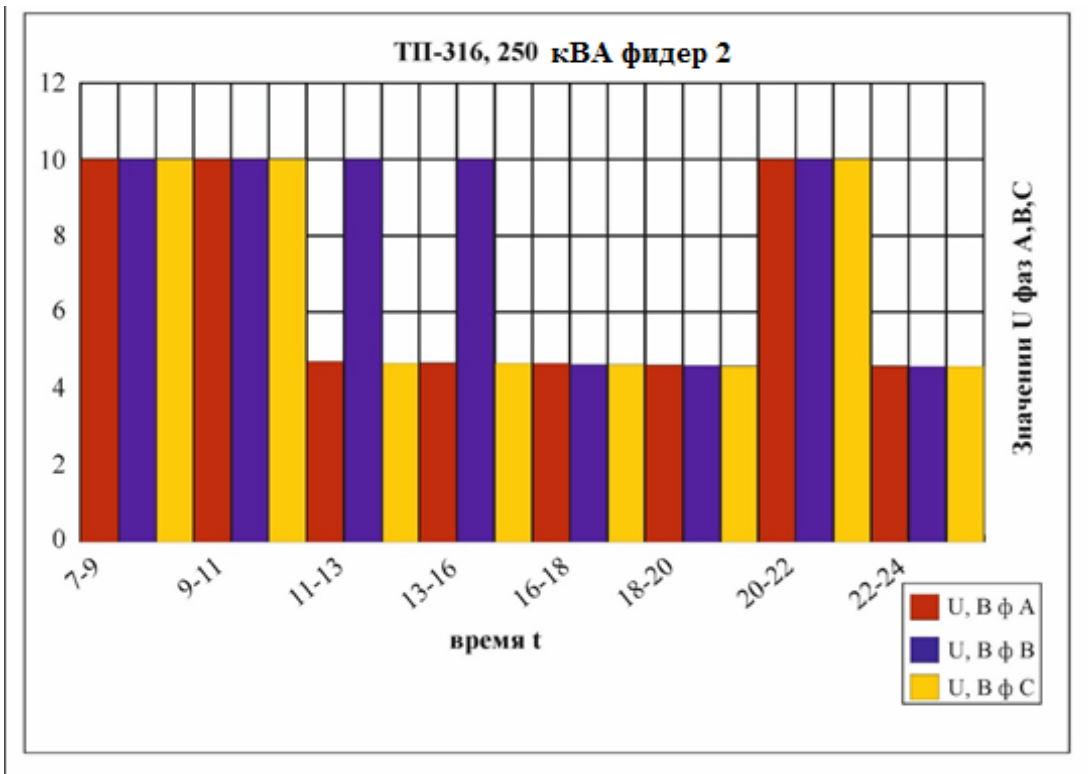
Исследуем, как влияет сечение нулевого провода ВЛ 0,4 кВ на величину потерь энергии в ней. Для этого воспользуемся выражением (3). Поскольку потери энергии в ВЛ 0,4 кВ пропорциональны отношению $\frac{R_0}{R_\phi}$,

то увеличение или уменьшение его значения равносильно увеличению или уменьшению потерь энергии в линии.

На *Рис.3. 4* приведено семейство характеристик $\frac{\Delta P_{нес}}{P_c}$ от $\frac{R_0}{R_\phi}$, где видно, что одним из целесообразных мероприятий по экономии электроэнергии в сельских сетях 0,4 кВ необходимо признать увеличение проводимости нулевых проводов до величины, равной или даже большей, чем у фазных проводов, что не противоречит требованиям ПУЭ.

Результаты замеров токов и напряжений ТП 316 и ТП 1079 представлены на *Рис. 3.5*.





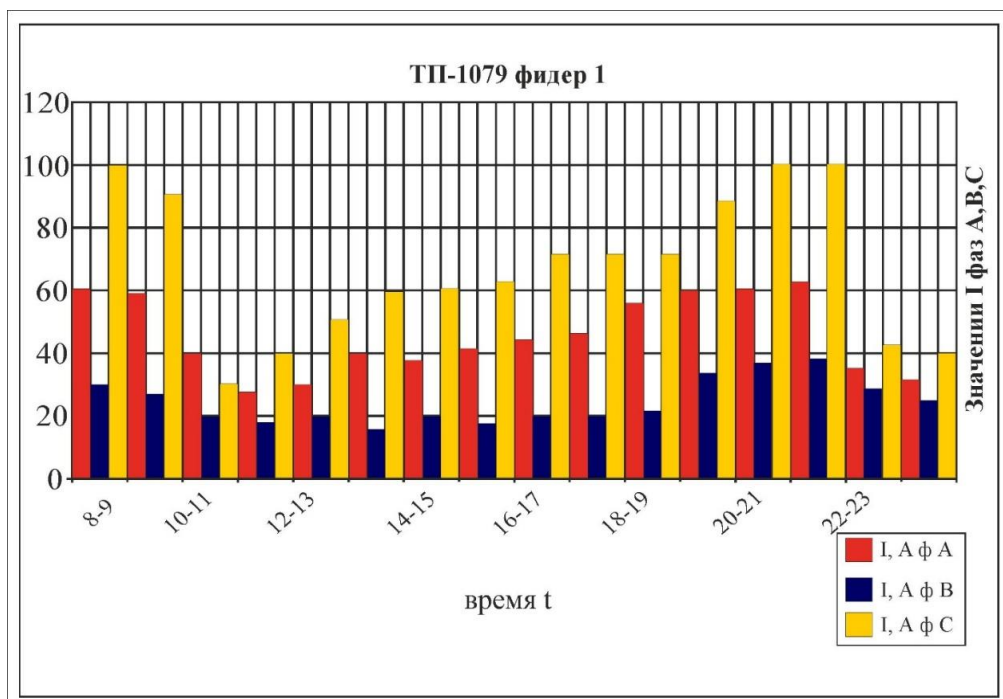


Рис. 3.5. Результаты замеров токов и напряжений ТП 316 и ТП 1079

Исследование влияния несимметрии на потери электрической энергии проводились также на экспериментальной установке (Рис. 3.6) в лабораторных условиях, с применением электронного конструктора «Arduino».

«Arduino — это электронный конструктор и удобная платформа быстрой разработки электронных устройств. Платформа пользуется огромной популярностью во всем мире благодаря удобству и простоте языка программирования, а также открытой архитектуре и программному коду. Устройство программируется через USB без использования программаторов» [9].

«Язык программирования устройств Ардуино основан на C/C++. Он прост в освоении, и на данный момент Arduino — самый удобный способ программирования устройств на микроконтроллерах.

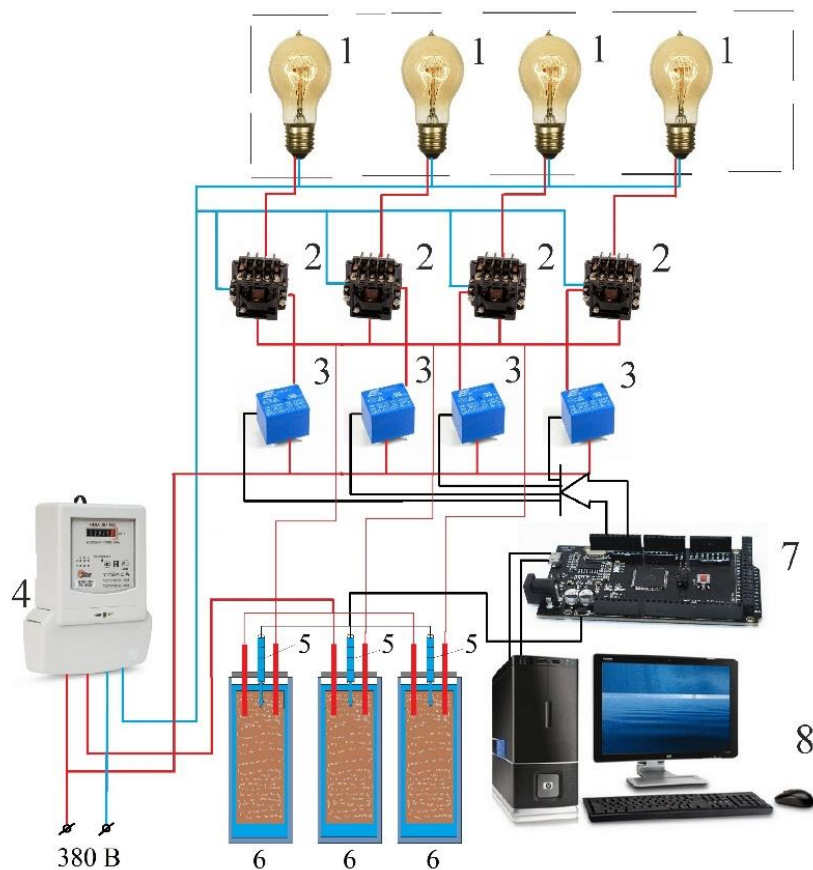
Базовые и полезные знания, необходимые для успешного программирования под платформу Arduino.

Разбиение на сегменты кода функциями позволяет создавать части кода, которые выполняют определенные задания. После выполнения происходит возврат в место, откуда была вызвана функция. Причиной создания функции является необходимость выполнять одинаковое действие несколько раз.

Для программистов, работающих с BASIC, функции в Arduino позволяют использовать подпрограммы (GOSUB в BASIC)» [10].

Выпускаются различные модели Arduino, предназначены для решения множества поставленных задач.

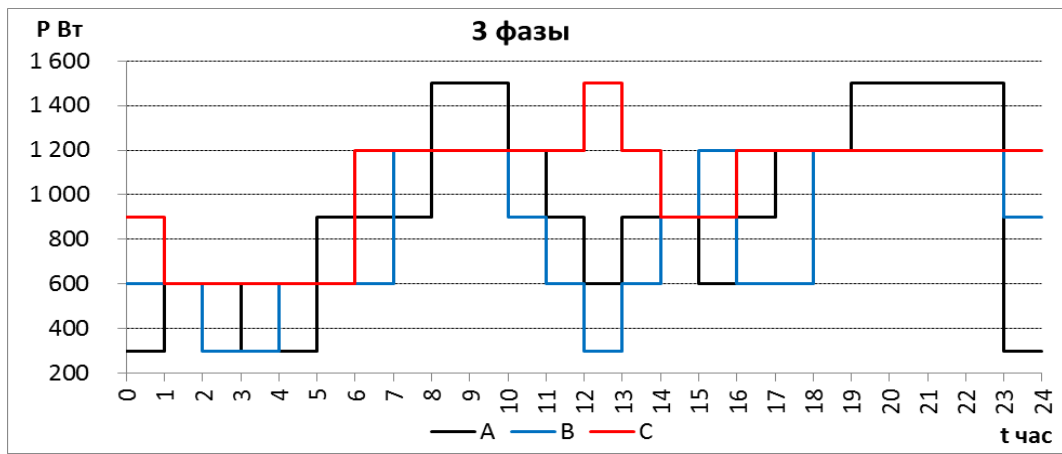
Далее приведены результаты исследования зависимости температуры нагрева элементов электрической сети от влияния несимметрии при разных режимах загрузки фаз (*Рис. 3.7*) находящихся в физических моделях (в виде термостатов) на экспериментальной установке. Экспериментальная установка показана на *Рис. 3.6*.



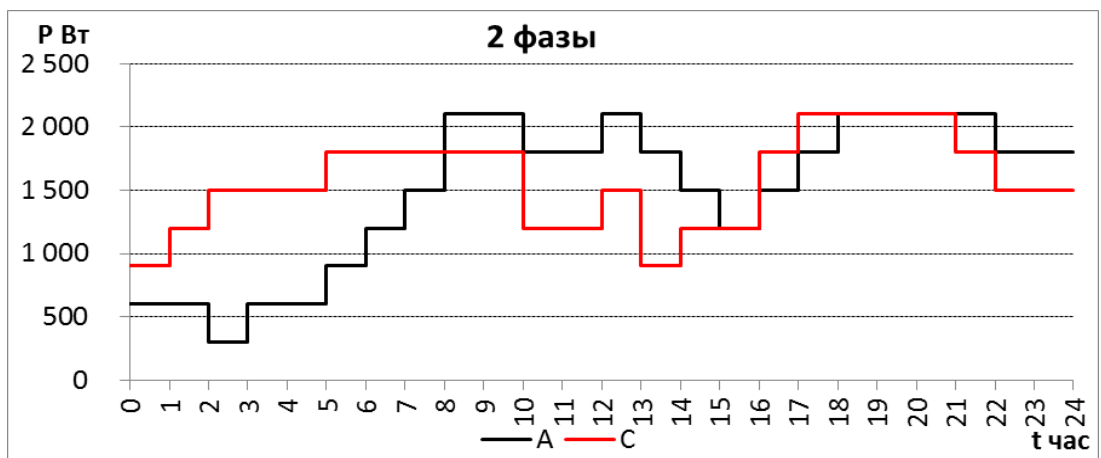
Цвета проводов	Функциональное назначение
Красный ■	силовой
Синий ■	нулевой
Черный ■	управляющий

Рис. 3.6. Экспериментальная установка для исследования влияния показателей качества электроэнергии на элементы электрической сети:

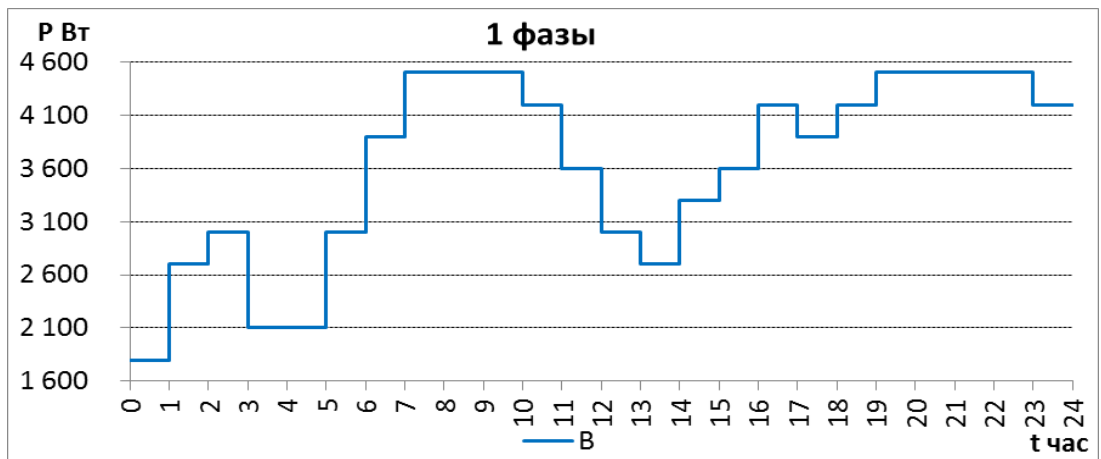
1- электроприемник; 2- магнитные пускатели; 3- реле; 4- счетчик трехфазный электронный; 5- электронный датчик температуры; 6- термостат (физическая модель исследования); 7- Arduino Mega 2560; 8- персональный компьютер.



a)



б)

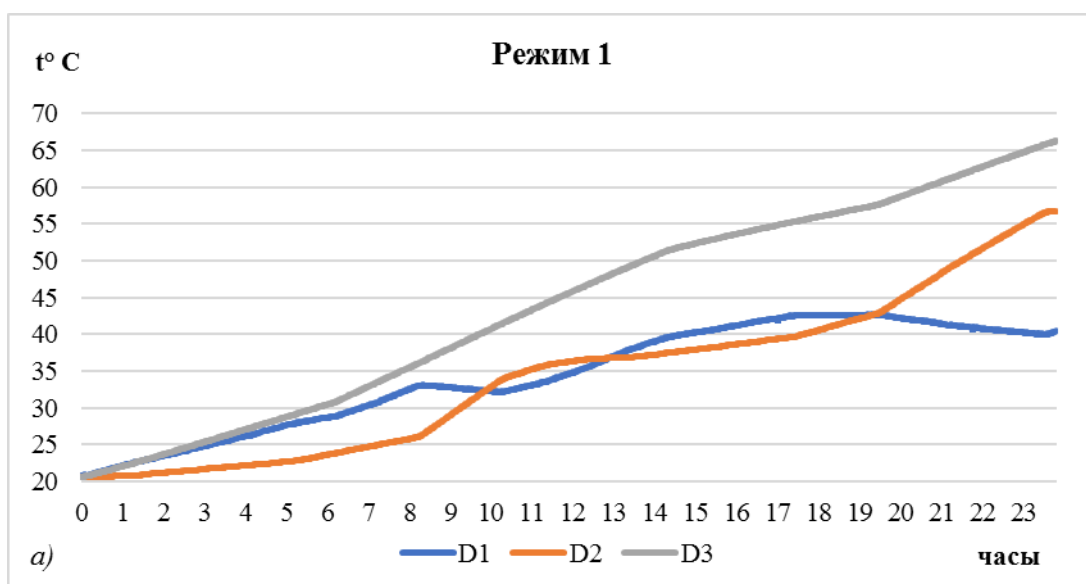


в)

Рис.3. 7. Суточный график электрической нагрузки при разных режимах:

а) симметричный режим; б) несимметричный режим, при нагрузке на две фазы; в) несимметричный режим, при нагрузке на одну фазу (крайний режим несимметрии).

На Рис. 3.8 показаны зависимости температуры нагрева элемента в течении суток, где а) симметричный режим; б) несимметричный режим, при нагрузке на две фазы; в) несимметричный режим, при нагрузке на одну фазу (крайний режим несимметрии).



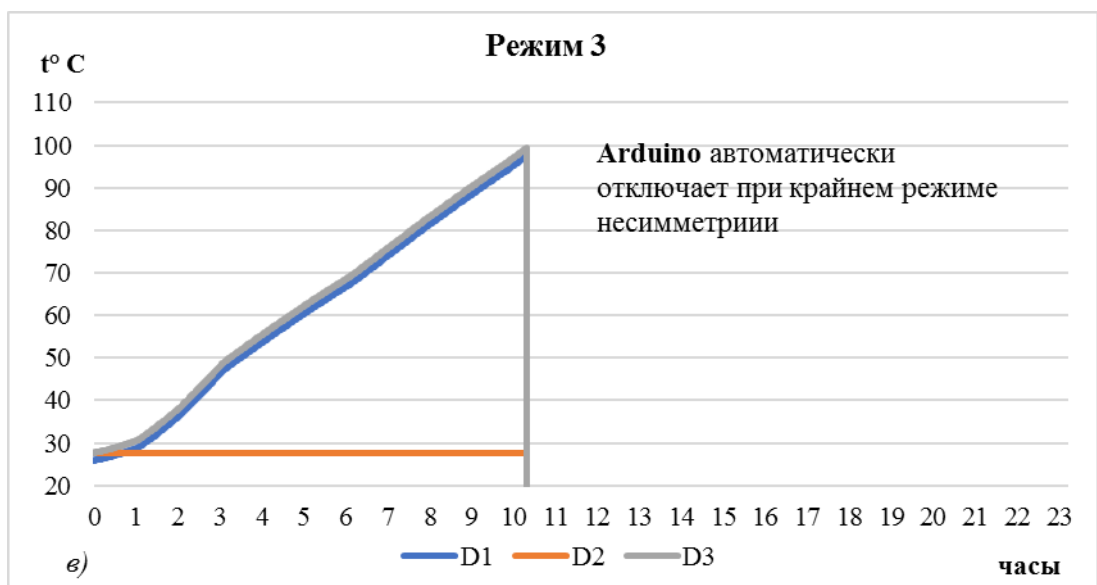
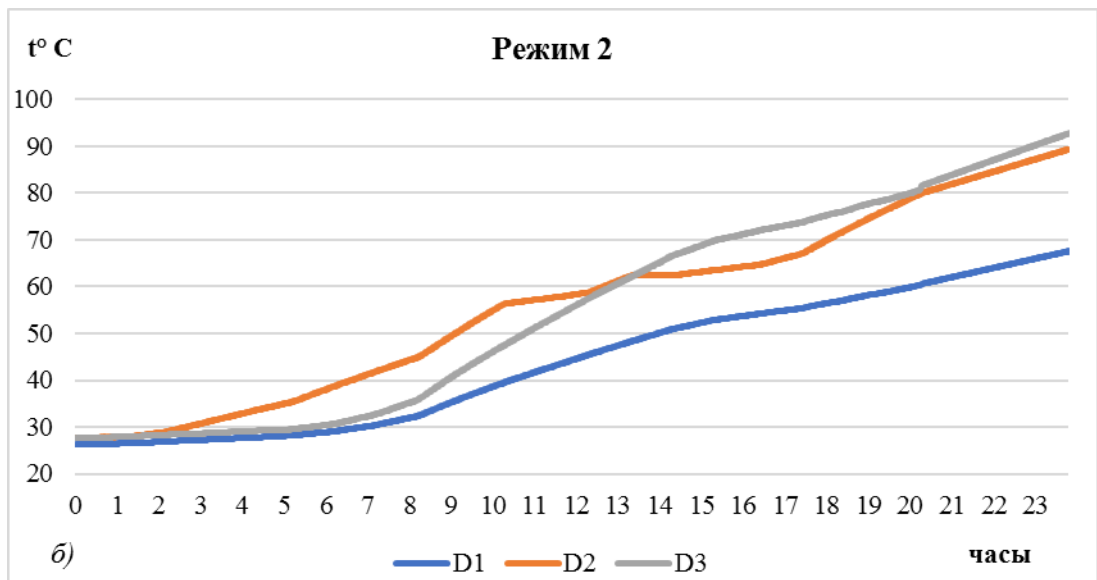


Рис. 3.8. Зависимость температуры нагрева элемента в течении суток:

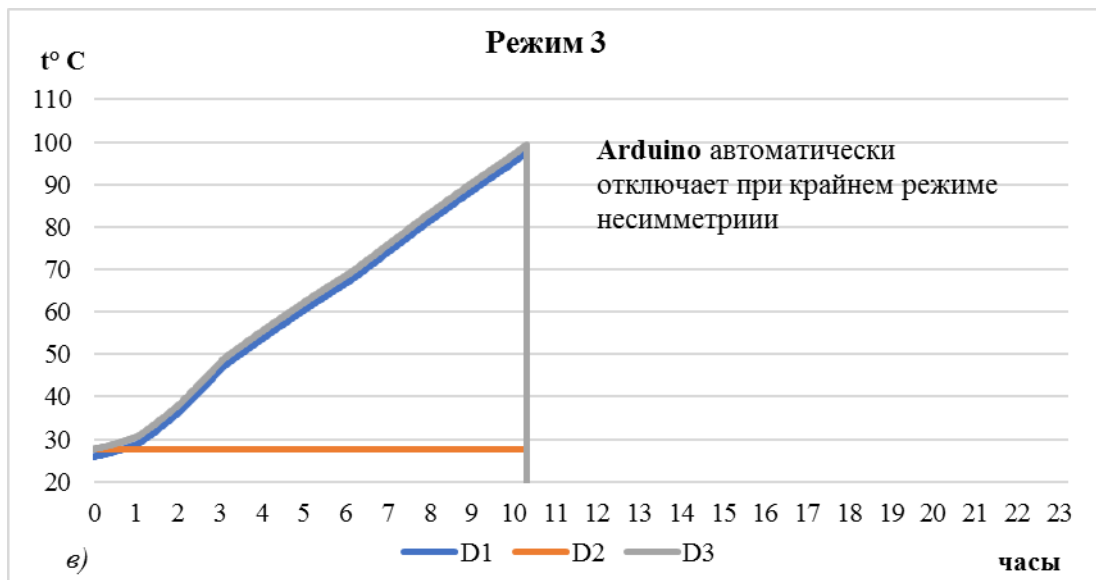


Рис.3.9. Зависимость температуры нагрева элемента в течении суток:
 а) симметричный режим; б) несимметричный режим, при нагрузке на две фазы; в) несимметричный режим, при нагрузке на одну фазу (крайний режим несимметрии).

На основании проведенного экспериментального исследования влияния несимметрии на потери электроэнергии в электрических сетях 0,4 кВ, расчета и анализа результатов необходимо сделать следующие выводы:

1. В сетях 0,4 кВ с коммунально-бытовыми потребителями коэффициент неравномерности фаз изменяется от 0 до 0,47, что увеличивает потери электроэнергии до 2,1 раза, а в предельном случае, когда $K_{нес} = 1$, до 6 раз.
2. Необходимо определить экспериментально по сезонам года коэффициент несимметрии и типовой суточный график для характерных потребителей.
3. Одной из мер по снижению потерь электроэнергии и повышению ее качества в электрических сетях 0,4 кВ признать увеличение

сечения нулевого провода до величины, равной или даже большей, чем сечение фазного провода.

4. Исследования свидетельствуют о влиянии несимметрии на рост потерь электроэнергии в электрических сетях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нормализация качества и уменьшение потерь электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке могут быть достигнуты применением различных способов и технических средств, позволяющих уменьшить ток нулевой последовательности сети.

Для взаимной увязки нормативов потерь, мероприятий по их снижению и стимулирования снижения потерь до нормативного уровня (или их поддержания на этом уровне) должны быть разработаны, утверждены и введены в действие методики расчёта фактических потерь электроэнергии в магистральных и распределительных сетях, а также методики расчёта фактической эффективности мероприятий по снижению потерь. При отсутствии таких методик имеется множество возможностей подгонки фактических потерь к заданному нормативу.

Новый способ измерения потерь электроэнергии в сельских электрических сетях, который дает возможность измерить потери электроэнергии в электрических сетях с меньшей погрешностью по сравнению с существующими способами до 6%.

Проведенный анализ наиболее распространенных методов расчета потерь ЭЭ в низковольтных сетях показал, что - рассмотренные детерминированные методы расчета отличаются достаточно высокими погрешностями (9-56%) вычислений потерь ЭЭ при недостатке достоверных данных о схемных и режимных параметрах и возможных принятых допущениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указания о расчёте расхода энергии на транзитные и межсистемные перетоки [Текст]. - М: СПО Союзтехэнерго, 1979.- 16 с.
2. Казанцев, В. Н. Инструкция по оптимальному управлению потоками реактивной мощности [Текст] / В. Н. Казанцев, Г. З. Кушнир, В. Н. Слодарж. - М: СПО Союзтех- энерго, 1982. - 28 с.
3. Инструкция по расчёту технико-экономической эффективности и планированию мероприятий по снижению расхода электроэнергии на ее транспорт в электрических сетях энергосистем [Текст]. - М: СПО Союзтехэнерго, 1980.-94 с.
4. Клебанов, Л. Д. Вопросы методики определения и снижения потерь электрической энергии в сетях [Текст] / Л. Д. Клебанов. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1973. - 72 с.
5. Поспелов, Г. Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях [Текст] / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч. - М.: Энергоиздат, 1981. - 26 с.
6. Щербина, Ю. В. Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях [Текст] / Ю. В. Щербина, Н. Д. Бойко, А. Н. Бутенко. - Киев: Техника, 1981. - 104 с.
7. Воротницкий, В. Э. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем [Текст] / В. Э. Воротницкий, Ю. С. Железко, В. Н. Казанцев, В. Г. Пекелис, Д. Л. Фай- бисович; под ред. В. Н. Казанцева. - М.: Энергоиздат, 1983.-368 с.

8. Инструкция по расчету и анализу технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений [Текст]: И 34-70-030-87. - М.: СПО Союзтехэнерго, 1987. - 38 с.
9. Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работ по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям (с изменениями и дополнениями). Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326 [Электронный ресурс].-(База.дагапі.ги/195516/).
10. Воротницкий, В. Э. Направления совершенствования нормирования потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст] / В. Э. Воротницкий, В. В. Михайлов // Энергоэксперт. - 2013. - № 3. - С. 46 - 50.
11. Воротницкий, В. Э. Программно-технический комплекс автоматизированной системы энергоэффективного управления эксплуатацией и развитием распределительных сетей [Текст] / В. Э. Воротницкий, М. А. Калинкина, И. А. Паринов, А. В. Севостьянов, Н. А. Батраков // Энергоэксперт. - 2012. -№ 2. - С. 24 - 31.
12. Воротницкий, Э. В. Автоматизированная система оперативного мониторинга потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст] / В. Э. Воротницкий, С. В. Заслонов, М. А. Калинкина, А. В. Севостьянов // Энергоэксперт. - 2017.-№ 5-6.-С. 29-35.

13. Методика определения нормативов потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям. - Зарегистрирована в Минюсте России от 17.09.2014 № 34075.
14. Воротницкий, В. Э. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в электрических сетях. Справочно-методическое пособие [Текст] / В. Э. Воротницкий. - М.: Теплоэнергетика, 2017. - 330 с.
15. Методика проведения технической экспертизы расчета технических потерь, расчета нормативных характеристик электрических сетей по потерям (НХПЭ) и нормативов потерь электроэнергии в электрических сетях энергопередающих компаний регионального и местного уровней [Текст]: разработчик ТОО “Фирма Казэнергонадка”, МЭиМР Республика Казахстан, 2005 г. - 22 с.
16. Косоухов, Ф.Д. Зависимость потерь мощности от несимметрии токов в силовых трансформаторах от их сопротивления нулевой последовательности /
17. Ф.Д. Косоухов, Н.В. Васильев, Н.Ю. Криштопа // Известия СПбГАУ. – 2014. – №35. – С. 319-325.
18. Косоухов, Ф.Д. Методика расчета потерь электроэнергии в сельских сетях 0,38 кВ при распределенной несимметричной нагрузке / Ф.Д. Косоухов, А.Г. Гущинский, М.В. Коломыцев // Известия СПбГАУ. – 2012. – №27. – С. 312-320.

19. Косоухов, Ф.Д. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях: монография / Ф.Д. Косоухов, И.В. Наумов. – Иркутск, 2003. – 257 с.
20. Косоухов, Ф.Д. Расчет потерь электроэнергии и показателей несимметрии токов и напряжений в сельской сети 0,38 кВ с помощью программы для ЭВМ / Ф.Д. Косоухов, А.О. Филиппов, М.В. Коломыцев // Известия СПбГАУ. – 2013. – №32. – С. 242-247.
21. Косоухов, Ф.Д. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками / Ф.Д. Косоухов, Н.В. Васильев, А.О. Филиппов // Электротехника. – 2014. – №6. – С. 8-12.
22. Бибко, И.А. Снижение потерь электрической энергии в сельском хозяйстве / И.А. Бибко, С.Я. Меженных, В.Г. Стафийчук, В.Ю. Юрчук. – Киев: Урожай, 1981. – 120 с.
23. Бородин, И.Ф. Мероприятия по управлению качеством электроэнергии в системах электроснабжения сельского хозяйства / И.Ф. Бородин, А.В. Виноградов, А.В. Шпаков // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. междунард. науч.-практ. конф. – М.: ВИЭСХ, 2008. – Т. 1. – С. 200-205.
24. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.Н. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 560 с.
25. Будзко, И.А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов / И.А. Будзко, В.Ю. Гессен, М.С. Левин. – М.: Колос, 1975. – 287 с.

26. Валянский, А.В. Оценка надежности электроснабжения с учетом качества электроэнергии / А.В. Валянский, И.И. Карташев, Ю.В. Шаров // Электротехника. – 2014. – №5. – С. 16-21.
27. Вентцель, Е.С. Прикладные задачи теории вероятности / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.:Радио и связь, 1983. – 446 с.
28. Висящев, А.Н. Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость в электрических системах: учебное пособие / А.Н. Висящев. – Иркутск, 1997. – 187 с.
29. Воротницкий, В.Э. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др.; под ред. В.Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.
30. Дед, А.В. Дополнительные потери мощности при несимметрии напряжения в электрических машинах / А.В. Дед, А.В. Паршукова // Роль технических наук в развитии общества. – 2014. – С. 10–13
31. Дед, А.В. Способы расчета потерь активной мощности в силовых трансформаторах при несимметрии токов и напряжений / А.В. Дед, А.В. Паршукова // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург. – 2014. № 10-2 (29). – С. 16-17. 114.
32. Дед, А.В. Дополнительные потери активной мощности в силовых трансформаторах при несимметричных режимах / А.В. Дед, А.В. Паршукова // Современное состояние и перспективы развития. – 2014. – С. 13–16. 115

33. . Дед, А.В. Дополнительные потери мощности в электрических сетях при несимметричной нагрузке / А.В. Дед, В.Ю. Зайцев, Е.С. Сухов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2012. – № 1. – С. 123–126. 116.
34. Дед, А.В. Потери активной мощности в линиях электропередач при протекании несимметричных токов / А.В. Дед, А.В. Паршукова // Современное состояние и перспективы развития. – 2014. – С. 16–18
35. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
<https://docs.cntd.ru/doc%D0%B3%D0%BE%D1%81%D1%82%20%D0%BA%D1%8D/>
36. Баланс электрической энергии энергосистемы Кыргызстана за Август 2021 г.. <https://esep.energo.kg/?cat=138>
37. Исполнение лимита потребления электрической энергии и мощности по энергосистеме КР за 20 октября 2021 года
<https://esep.energo.kg/?p=3772>
38. Деятельность предприятий электроэнергетики республики в 2020,
<http://www.stat.kg/ru/news/deyatelnost-predpriyatij-elektroenergetiki-respubliki-v-2020-godu-harakterizovalas-rostom-osnovnyh-pokazatelej/>
39. Национальная программа развития Кыргызской Республики до 2026 года,
<http://www.energo-es.kg/ru/press-center/news/natsionalnaya-programma-razvitiya-kyrgyzskoy-respubliki-do-2026-goda/>

40. Пресс – релиз по подготовке к ОЗП, <http://www.gkpen.kg/kyr/index.php/press/news/397-2020-09-29-05-15-27>
41. Методика расчета нормативов потерь электрической энергии Утверждена Приказом Государственного комитета промышленности, энергетики и недропользования Кыргызской Республики от «18» сентября 2020 г. № 01-7/334, <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/200531?cl=ru-ru>
42. Правила устройства электроустановок [Текст] / Минэнерго СССР -6-е изд. -М: Энергоатомиздат, 1985. -640 с.
43. Нормы технологического проектирования электрических сетей сельскохозяйственного назначения (НПС-0.38-10) [Текст] / Минэнерго Республики Беларусь приказ № 36 от 05.07.94 -36с.
44. Наумов, И.В. Качество электрической энергии и снижение дополнительных потерь мощности в электрических сетях [Текст] / И.В. Наумов, С.В. Подъячих, Д.А. Иванов // Вестник ИрГСХА. -2009. - №37. -С. 83-88.
45. Наумов, И.В. Организационно - технические мероприятия в сельских распределительных сетях напряжением 0,38 кВ [Текст] / И.В. Наумов, Г.В. Лукина, С.В. Сукьясов, С.В. Подъячих// Электротехника.-2002. - № 3. -С. 56-57.
46. Наумов, И.В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств [Текст]: дис. докт. техн. наук: 05.20.02 / Наумов Игорь Владимирович. -Иркутск, 2002. -387 с.