

На правах рукописи

ПУДКОВА Тамара Валерьевна



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЧЕТА ПОТРЕБЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСАХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИ НАЛИЧИИ
ИСКАЖЕНИЙ**

**Специальность 05.09.03 –
Электротехнические комплексы и системы**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

Доктор технических наук, доцент

Шклярский Ярослав Элиевич

Официальные оппоненты:

Артюхов Иван Иванович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», институт энергетики и транспортных систем, кафедра «Электроэнергетика и электротехника», профессор.

Нос Олег Викторович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Проектирование технологических машин», профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

Защита диссертации состоится 29 декабря 2020 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Функционирование современных электротехнических комплексов и систем невозможно без применения приборов, регистрирующих необходимые данные о различных состояниях процессов в электрических сетях. К таким устройствам относятся счётчики - приборы учета электроэнергии, по которым определяются значения активной, реактивной и полной мощностей.

Поскольку счётчики электроэнергии применяют для двух видов учёта (коммерческого и технического), то неточность показаний таких приборов ведет к проблемам как минимум в двух направлениях: техническом и экономическом. С технической стороны это может приводить к некорректной настройке других приборов и оборудования, работающих на основании снятых показаний. С экономической стороны это ведет к переплате/недоплате за электроэнергию.

Согласно такому федеральному документу, как «Прогноз развития энергетики мира и России до 2040», опубликованном Институтом энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН), «Энергетической стратегии России до 2030 года», опубликованной на сайте Министерства энергетики РФ, концепции «Энерджинет», которая является одной из девяти дорожных карт Национальной технологической инициативы, а также современных общемировых тенденций в сторону «Индустрии 4.0» спрос на электроэнергию и её «умное» потребление будет расти. Это значит, что вопросы учета и распределения энергии будут актуальны как в течение переходного периода, так и в установившемся процессе после перехода. Принимая во внимание тенденцию к интеграции систем энергоснабжения, в которой разрозненные в управлении системы электро-, тепло-, холодо- и газоснабжения образуют «систему систем», требования к энергетике меняются.

Таким образом, решение вопроса корректности учета потребляемой электроэнергии встает особенно остро. Сейчас это касается в большей степени крупных предприятий электротехнического комплекса, но, согласно вышеуказанным

прогнозам и планам, в определенный момент времени коснется и обычного потребителя, который также станет активным участником рынка. Интерес любого участника рынка, чтобы оплата за электроэнергию проводилась максимально компетентно, учитывая рост нелинейной нагрузки среди потребителей социального сектора.

Резюмируя вышеизложенное, решение задач по совершенствованию учета электроэнергии измерительными приборами в условиях несинусоидальности является необходимым и актуальным, как в настоящее время, так и в будущем, как для действующих участников рынка – предприятий, так и потенциальных – активных потребителей.

Степень разработанности темы исследования

Принцип расчета полной мощности и её компонентов в электрических сетях при синусоидальном режиме не является дискуссионной задачей. В случае несинусоидального режима (симметричного и несимметричного) выявление расчетных формул для отдельных компонентов полной мощности, как и самих компонентов, является нетривиальной задачей.

Существует множество подходов к учету электроэнергии при несинусоидальном режиме и оживленные дискуссии ведутся до сих пор. Первыми авторами, кто отметил необходимость уточнения расчета мощности стали С.Р. Steinmetz (1900) и М. Pliovic (1925). Затем свой значительный вклад в развитие теории внесли С.І. Budeanu (1927) и S. Fryze (1932). Далее, наиболее широкое распространение получили теории авторов, которые совершенствовали эти две базовые теории: P.S. Filipski (1980,1984,1994); A.E. Emanuel (1974-2012); W. Shepherd и P. Zakikhani (1972); D. Sharon (1973); W.J.M. Moore и N.L. Kusters (1980); С.Н. Page (1980); Н. Akagi и др. (1984); M. Depenbrock, D.A. Marshal и J.D. van Wyk (1993); E. W. Kimbark (1995); F.D. Yildirim и W. Fuchs (1999); L.S. Czarnecki (1987-2018), P. Tenti (2003). Из российских учёных вклад внесли Железко Ю.С., Жемеров Г.Г., Жежеленко И.В., Розанов Ю.К., Смирнов С.С. На данный момент в действующем стандарте качества электроэнергии ГОСТ 32144-2013 (IEEE. Standard 1459-2010. IEEE Power and Energy Society) учитываются наработки А.Е. Emanuel.

Однако ни в ГОСТах, ни в работах перечисленных авторов не рассмотрено влияние параметров электрической сети в части соотношения линейной (ЛН) к нелинейной нагрузке (НН) и влияния сопротивления системы на выбор методики, применяемой для учета электроэнергии в электрических сетях с искажениями.

Соответствие паспорту специальности

Тема и содержание диссертации соответствуют научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» по следующим пунктам областей исследований: п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Объект исследования – электротехнические комплексы предприятий, имеющие в своем составе нелинейную нагрузку.

Предмет исследований – системы учета потребления электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий в сети среднего напряжения.

Идея работы – учет потребления электроэнергии зависит от наличия искажений в сети электротехнического комплекса предприятий, при этом полную мощность необходимо разделять на активную и неактивную, учитывающую другие виды мощности, возникающие при наличии искажений. В свою очередь, несинусоидальность напряжений и токов в сети необходимо оценивать по характеристикам сети и взаимному влиянию линейной/нелинейной нагрузок при условии быстрого определения степени несинусоидальности.

Цель работы – совершенствование учета потребления электроэнергии для электротехнических комплексов предприятий за

счёт введения дополнительных факторов, повышающих корректность учета активной и реактивной мощности.

Задачи работы

1. Анализ параметров СЭС среднего напряжения на предмет изменяющихся параметров, связанных с несинусоидальным режимом работы сети, и определение диапазона их изменения.

2. Анализ нормативных документов с целью выявления вводимых ограничений, непосредственно влияющих на учет потребления электроэнергии.

3. Анализ принципов измерения потребления электроэнергии в условиях несинусоидальности при эксплуатации сертифицированных счетчиков.

4. Выявление показателей, определяющих влияние параметров распределительной сети на учет потребления электроэнергии.

5. Разработка компьютерной модели электротехнического комплекса для анализа влияния искажений на учет потребления электроэнергии.

6. Анализ влияния скорости выявления спектра высших гармоник на изменение потребления электроэнергии.

7. Разработка алгоритма учета электроэнергии в сети в электротехнических комплексах предприятий при наличии искажений.

Научная новизна

1. Введен новый показатель $k_Z^{(h)} = R_S / X_S^{(h)}$, влияющий на ограничения по току на высших гармониках (ВГ) и доказана зависимость THD_U от его величины с учетом изменения модуля полного сопротивления системы питающей электросети.

2. Выявлена взаимосвязь показателя $k_Z^{(h)}$ и выбора типа сертифицированных счетчиков реактивной «энергии», определяющих ее величину по разным формулам, заложенным их производителями.

3. Доказано, что влияние нелинейной нагрузки на линейную, с точки зрения образования составляющих несинусоидального тока в линейной нагрузке, всегда незначительно и не может влиять на значение THD_U в любом узле сети.

4. Доказана неправомерность использования применяемых электронных счетчиков реактивной мощности, некорректно учитывающих искажения в токе и напряжении электрической сети.

5. Разработан новый алгоритм учета электроэнергии в сети, содержащей искажения в токе и напряжении, основанный на применении вновь введенного интегрального показателя тока.

6. Разработан метод определения спектра высших гармоник на интервале в один период основной частоты, отличающийся временем выявления состава спектра напряжения/тока.

Теоретическая и практическая значимость исследования

1. Разработана модель объекта исследования с описанием алгоритма, учитывающего параметры сети, влияющие на учет потребления электроэнергии в условиях несинусоидальности.

2. Разработан новый подход к учету потребления электроэнергии, повышающий корректность оценки показателей качества электроэнергии и самого учета.

3. Результаты исследования рекомендованы к внедрению в учебный процесс Горного университета при реализации специальных программ, также результаты работы приняты к внедрению в электротехнической лаборатории ООО «АСТЕРО», что подтверждается соответствующими актом и справкой о внедрении.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач применены методы имитационного моделирования, системного и сравнительного анализа, теоретических основ электротехники, методы анализа и моделирования нелинейных цепей. Проведена систематизация изученных подходов к учету потребления электроэнергии.

При проведении компьютерного моделирования и для обработки данных, полученных в процессе лабораторных исследований, использовался лицензионный программный пакет MATLAB и среда разработки Simulink.

Положения, выносимые на защиту

1. Учет потребления электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий следует проводить при ограничениях по несинусоидальному току и напряжению, учитывающих соотношение активной и реактивной составляющих полного

сопротивления питающей электрической сети и его модуль, что влияет на выбор соответствующих формул расчета потребления реактивной мощности, измеряемой сертифицированными счетчиками электроэнергии.

2. Алгоритм учета потребления электроэнергии предприятием при наличии искажений, в основу которого положены измерения активной энергии и разности действующих значений полного тока и его активной составляющей, включая режимы коррекции спектрального состава гармоник устройствами с быстрой предиктивной его оценкой, что повышает эффективность оценки влияния реактивной мощности на режимы передачи электроэнергии в СЭС.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается тем, что: измерения параметров качества электрической энергии, представленных в работе, проводились с использованием сертифицированной и поверенной измерительной аппаратуры; имитационное моделирование проводилось с использованием лицензионного программного обеспечения; статистические данные получены из открытых официальных источников, таких как Росстат; теория построена на основе доказанных зависимостей и согласуется с опубликованными результатами по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК; полученные результаты прошли сравнение с полученными ранее результатами зарубежных и отечественных ученых; идея работы основана на анализе существующих решений в данной области; использованы современные методы сбора и обработки данных с применением вычислительной техники.

Апробация результатов

Основные результаты работы и положения докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: международная конференция «Scientific reports on resource issues 2016» - 2016, Фрайберг, Германия; «Прогноз развития ТЭК 2018» - 2018, Москва; «Неделя науки- 2018» - 2018, Санкт-Петербург; IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus) – 2019, Санкт-Петербург; международный семинар «Инновации и перспективы развития горного

машиностроения и электромеханики IPDME» -2019, Санкт-Петербург, ISEPC-2019, Санкт-Петербург.

Личный вклад автора

Проведены все этапы исследования, сбор, классификация исходных данных, вывод новых аналитических зависимостей, разработка имитационной модели, планирование и проведение имитационного моделирования, подготовка публикаций, заявок на патенты, научных докладов и рукописи диссертации.

Публикации по работе

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 11 печатных работах, в том числе в 5 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье - в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получено 2 свидетельства о госрегистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав и заключения, списка литературы, включающего 105 наименований и 7 приложений. Диссертация изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены результаты анализа различных систем электроснабжения (СЭС) электротехнических комплексов предприятий для выявления диапазона изменения полного сопротивления $Z_S^{(1)}$ системы и его составляющих (активной $R_S^{(1)}$ и реактивной $X_S^{(1)}$), определяемых расчетным путем. Анализу подвергались централизованные и автономные сети среднего напряжения. Установлено, что модуль полного сопротивления $Z_S^{(1)}$ может изменяться в пределах от 0,1 до 2,0 Ом, а соотношение его

компонентов $R_S^{(1)}$ к $X_S^{(1)}$ в пределах от 0,2 до 5,0. Для учета данного соотношения введен коэффициент отношения составляющих полного сопротивления системы $k_Z^{(h)}$ (1)

$$k_Z^{(h)} = \frac{R_S}{X_S^{(h)}}. \quad (1)$$

С этой точки зрения установлено, что все действующие стандарты не учитывают указанное соотношение, что влияет на ограничения, введенные по гармоническим составляющим тока.

Дополнительно в ходе анализа установлено, соотношение линейных и нелинейных нагрузок изменяется как в составе одного предприятия, так и относительно точки общего присоединения (ТОП). Предварительные исследования показали зависимость коэффициента искажения от данного соотношения, что необходимо учитывать при учёте потребления электроэнергии.

Представлен анализ и выявлены основные недостатки стандартов в области качества электроэнергии и учёта потребления электроэнергии. К ключевым недостаткам относятся: отсутствие учёта соотношения активного и реактивного сопротивлений полного сопротивления системы; соотношения линейных и нелинейных нагрузок. Представлен анализ влияния несинусоидальности напряжения на погрешность измерения различных видов электроэнергии.

Сформулированы выводы по главе, поставлена цель и основные задачи исследования.

Во второй главе проведен анализ влияния параметров электротехнического комплекса предприятия на уровень несинусоидальности в сети. С этой целью разработана модель системы с требуемыми характеристиками в среде MatLab Simulink. Результаты исследования представлены в виде графиков зависимости суммарного коэффициента искажения по напряжению THD_U от следующих параметров:

1) от активной составляющей R_S полного сопротивления системы. Пример зависимости представлен на рисунке 1. Из графика следует обратная зависимость THD_U от R_S , то есть при увеличении

активного характера полного сопротивления системы несинусоидальность уменьшается.

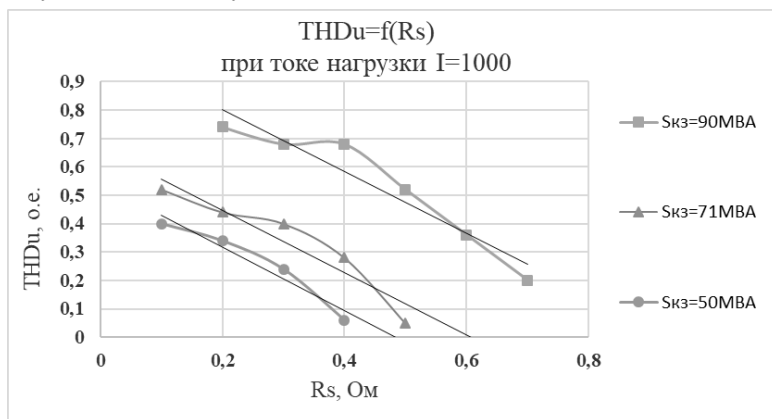


Рисунок 1 – Характер изменения THD_U при изменении активной составляющей сопротивления системы

В то же время, порядок значений определяется уровнем мощности короткого замыкания (КЗ): чем выше уровень мощности, тем выше значение суммарного коэффициента искажения по напряжению. А поскольку мощность КЗ S_{K3} напрямую связана с модулем полного сопротивления системы Z_s , это говорит о необходимости учета не только соотношения его составляющих, но и самого модуля сопротивления. Например, при $R_s=0,4$ Ом при двух разных уровнях мощности КЗ, отличающихся почти в 2 раза, разница в значениях THD_U достигает порядка 7 раз. При изменении тока нагрузки характер зависимости не меняется (близка к линейной), что подтверждается дополнительным экспериментом, включающим зависимость THD_U от мощности КЗ. Таким образом, величина тока КЗ, также как и его мощности, влияет на порядок значений THD_U .

2) от введенного коэффициента отношения составляющих полного сопротивления $k_z^{(h)}$ (рисунок 2).

Из графиков (рисунок 2) выявлен диапазон изменения отношения составляющих полного сопротивления системы, в котором необходимо учитывать их отношение: от 0 до 5,5. А как показал анализ существующих схем в 1 главе, отношение

составляющих полного сопротивления системы лежит в указанном диапазоне.

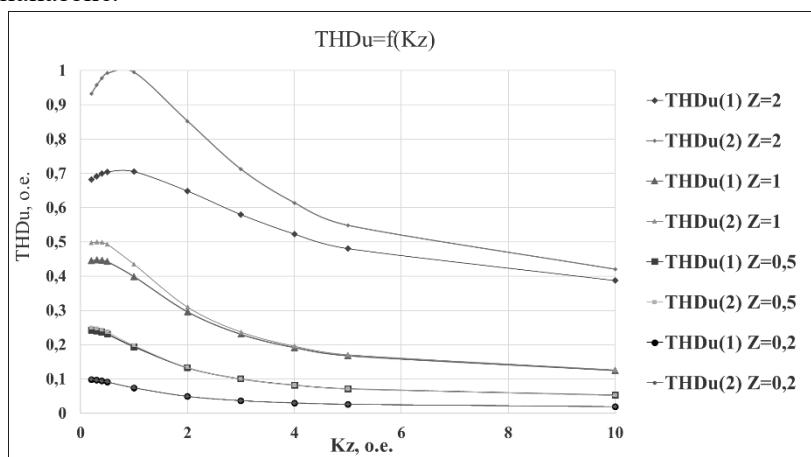


Рисунок 2 – Значения THD_U при различном соотношении активной и реактивной составляющих полного сопротивления системы

Таким образом, при оценке суммарного коэффициента искажения по напряжению необходимо учитывать не только модуль полного сопротивления системы, но и соотношение его компонентов – активного и реактивного сопротивлений.

Действующие стандарты не принимают во внимание данный аспект, что является их недостатком.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования по измерению электроэнергии типовыми счетчиками. В ходе эксперимента выявлено, что учет реактивной мощности (РМ) ведется либо по формуле (2) либо по формуле (3):

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} U^{(h)} I^{(h)} \sin(\varphi^{(h)} - \gamma^{(h)}), \quad (2)$$

где $U^{(h)}$, $I^{(h)}$ – среднеквадратичные напряжение и ток каждой гармоники; $\varphi^{(h)}$, $\gamma^{(h)}$ – начальные фазы на гармониках у напряжения и тока;

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (3)$$

где P – активная мощность, S – полная мощность.

Но согласно действующему стандарту IEEE 1459-2010, полную мощность предлагается разделять на активную P и неактивную (4)

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (4)$$

где N – неактивная мощность, включающая в себя реактивную мощность, мощность искажения и другие виды мощности, согласно различным подходам к учету компонентов полной мощности.

Для изучения разницы в подходах к определению полной мощности разработана модель в MatLab Simulink и получены графики зависимости различных видов мощности от соотношения линейной и нелинейной нагрузки. В качестве примера представлен вариант расчета по стандарту, как наиболее полно отражающий различные варианты компонентов полной мощности (рисунок 3).

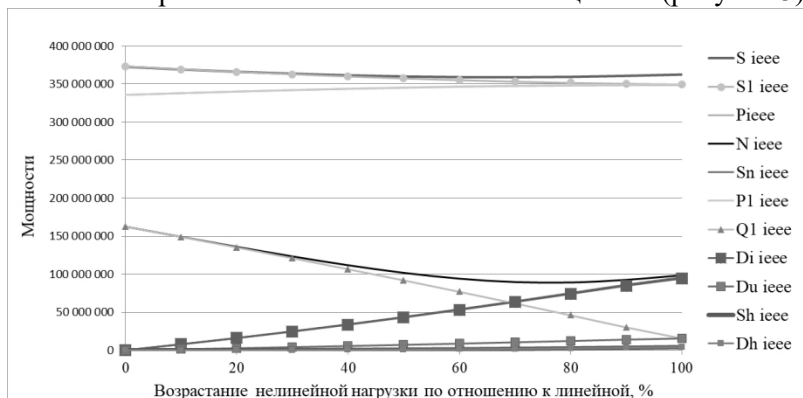


Рисунок 3 – Компоненты полной мощности по стандарту

Очевидно, что $N=Q$ только в случае чисто синусоидального сигнала.

Из вышесказанного следует, что вести учет реактивной мощности при наличии искажений по формулам, заложенным в счетчики, необходимо с учетом ранее выявленных зависимостей THD_U от $k_Z^{(h)}$ и модуля полного сопротивления системы:

1) при модуле полного сопротивления до 0,5 и $k_Z^{(h)}$ больше 5 можно применять счетчики, где заложена формула (3), поскольку THD_U при таком соотношении минимален и не превышает ограниченного стандартом значения в 5%; при значении $k_Z^{(h)}$ меньше

5 учет следует вести по формуле (2). При этом чем меньше соотношение в показателе $k_Z^{(h)}$, тем строже рекомендация по применению счетчиков с указанной формулой расчета РМ;

2) при модуле полного сопротивления от 0,5 до 2,0 происходит выравнивание значения THD_U к минимальному значению при $k_Z^{(h)}$ больше 5, но тем не менее применять формулу (3) уже нельзя, поскольку THD_U в разы превышает нормированный уровень в 5%. В этом случае целесообразным становится применение лишь формулы (2), учитывающей вклад гармоник.

Таким образом, выявлено, что при классическом подходе разложения полной мощности на активную и реактивную происходит переплата за потребление реактивной энергии, поскольку в неё входит, как минимум, мощность искажений. В качестве первого шага по совершенствованию учета потребления реактивной мощности на данном этапе предлагается применение выявленных зависимостей THD_U от модуля полного сопротивления системы Z_S и показателя $k_Z^{(h)}$, отражающего соотношение его активной и реактивной составляющих.

Недостаток рассмотренных подходов к учету электроэнергии заключается в затруднении применения данных подходов в качестве основы для работы современных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), наличие которых является обязательным в сетях среднего напряжения с нелинейной нагрузкой. Поскольку в исследуемых системах требуется низкая инерционность и минимальное запаздывание в измерении активной мгновенной мощности, то следующим этапом исследования является задача быстрого определения спектрального состава высших гармоник.

В четвертой главе представлены решения по совершенствованию учета потребления электроэнергии в отношении оплаты электроэнергии и повышению ее качества.

На основе результатов, полученных моделированием (рисунок 5) выявлено, что любая НН оказывает незначительное влияние на любую ЛН в плане увеличения токов высших гармоник, что подтверждается графиками, представленными на рисунках 6 и 7. На этом основании сделан вывод о целесообразности измерения

активной мощности в узлах СЭС, учитывающей все высшие гармоники.

Несмотря на возможность расчета реактивной мощности по формулам (3) и (4) с учетом влияния модуля полного сопротивления и отношения его активной и реактивной составляющей, данный подход не позволяет говорить о высокой корректности учета реактивной энергии. Для совершенствования учета реактивной мощности предлагается применять интегральный показатель тока, определяемый на выбор по формулам (5) и (6)

$$V_1 = \int_0^t \sqrt{I^2 - I_a^{(1)2}} dt, \quad (5)$$

$$V_2 = \int_0^t (I^2 - I_a^{(1)2}) dt, \quad (6)$$

где $I_a^{(1)}$ – активная составляющая полного тока на основной частоте.

Очевидно, что данные показатели будут учитывать активную составляющую мощности на высших гармониках и реактивную ее составляющую на всех гармониках, включая основную. Данные показатели применимы при оплате электроэнергии.

Устоялся подход к оплате за потребление активной мощности, чего нельзя сказать в отношении реактивной мощности. В России закреплена нормативно оплата за реактивную мощность в приказе № 219-э/6 от 31.08.2010, при этом в мировой практике предприятия дополнительно оплачивают электроэнергию в случае $\text{tg}\varphi \neq 0,4$.

В предлагаемом подходе учет реактивной мощности в виде вновь введенного показателя отражает суть оценки ее влияния на режимы передачи электроэнергии СЭС. Таким образом, предлагается оплату за реактивную энергию вести по интегральному показателю тока, эффективность чего демонстрируется графиками, представленными на рисунке 4.

Учет электроэнергии будет осуществляться тем корректнее, чем ниже уровень искажений в сети, на что направлено применение ФКУ. С этой точки зрения предлагается усовершенствовать работу ФКУ, в системе управления которых закладывается математический аппарат для определения спектрального состава напряжений и токов. При этом ФКУ должны обладать низкой инерционностью, то есть запаздывание должно стремиться к нулю.

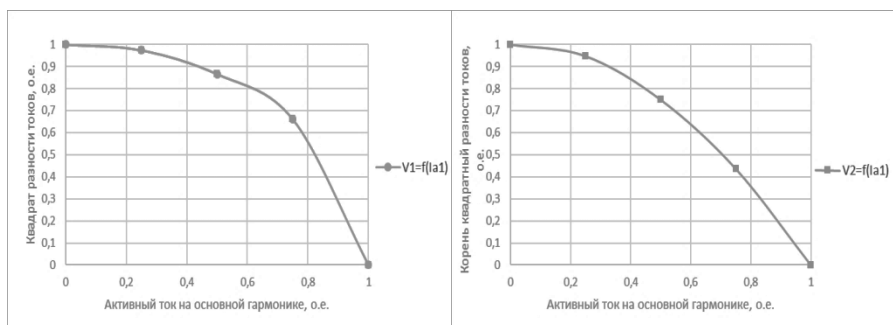


Рисунок 4 – Зависимость доли затрат на реактивную энергию от активного тока на основной гармонике

С этой целью разработан метод быстрого определения изменяющегося спектра ВГ, основанный на применении быстрого преобразования Фурье. Разработанный метод позволяет определять спектр на интервале меньше одного периода основной частоты.

Результаты и выводы, представленные выше, позволили разработать алгоритм учета электроэнергии, который пошагово заключается в следующем:

- 1) учет активной мощности ведется по всем гармоникам, с учетом знака активной мощности;
- 2) учет реактивной энергии разными подходами:
 - 2.1) ведется по интегральному показателю тока;
 - 2.2.1. определяется модуль полного сопротивления системы и соотношение его активной и реактивной составляющих;
 - 2.2.2. согласно полученному соотношению, выбирается счетчик реактивной мощности, работа которого в данных условиях будет проводиться более корректно;
- 3) в систему управления ФКУ вводится математический аппарат с быстрым преобразованием Фурье для повышения быстродействия работы фильтров и повышения качества электроэнергии.

Наглядное отображение алгоритма, учитывающие результаты проведенных исследований, представлено на рисунке 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – совершенствование учета

электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий при наличии высших гармоник.

По результатам диссертационной работы сделаны следующие выводы и представлены следующие рекомендации:

1. Выполненный анализ параметров СЭС среднего напряжения позволил выявить диапазон изменения полного сопротивления системы для сетей централизованного и автономного питания в пределах от 0,1 до 2 Ом по модулю при изменении его активной и реактивной составляющих в отношении от 0,1 до 5;

2. Выявлено, что нормативные документы, определяющие ограничения величин токов короткого высших гармоник в сетях среднего напряжения учитывают лишь модуль сопротивления системы, принимая его значение в качестве индуктивного сопротивления на первой гармонике. Установлено, что неучет отношения активной к реактивной составляющей полного сопротивления системы через введенный в работе показатель $k_Z^{(h)} = R_S / X_S^{(h)}$ может привести к ошибке в определении THD_U в любой точке СЭС, оцениваемой относительной ошибкой в 300%;

3. Установлено, что применение для учета электроэнергии сертифицированных счетчиков по активной энергии дают показания, соответствующие физике процесса ее потребления, а счетчики реактивной «энергии», которые определяют ее по разным формулам (2) и (3), дают некорректные показания, которые невозможно сравнить с эталоном по причине отсутствия понятия «реактивной мощности при наличии высших гармоник»;

4. Разработан алгоритм, согласно которому следует осуществлять выбор тех или иных счетчиков реактивной «энергии» в зависимости от введенного вновь показателя $k_Z^{(h)}$ и модуля полного сопротивления системы, характеризующимся либо относительным значением тока короткого замыкания или мощностью короткого замыкания;

5. Выявлено, что при модуле полного сопротивления от 0,5 до 2 происходит выравнивание значения THD_U к минимальному значению при $k_Z^{(h)}$ больше 5, но тем не менее применять формулу (3) уже нельзя, поскольку THD_U в разы превышает нормированный уровень в 5%. В этом случае целесообразным становится

применение лишь формулы (2), учитывающей вклад гармоник. При модуле полного сопротивления до 0,5 выбор в пользу формул (2) и (3) определяется значением модуля полного сопротивления системы;

6. Разработан новый алгоритм учета электроэнергии в сети, содержащей высшие гармоники. Основой алгоритма является применение вновь введенного интегрального показателя тока, по которому предлагается оценивать реактивную мощность. Доказано, что введенный показатель адекватно отражает суть увеличения тока в линии при наличии искажений;

7. Разработан метод определения спектра высших гармоник на интервале меньше одного периода основной частоты на основе быстрого преобразования Фурье (получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617533). На основе данного программного комплекса представляется возможным проведение промежуточного анализа спектрального состава сети, который позволяет увеличить быстродействие работы ФКУ, что влияет на качество электроэнергии и, как следствие, ее потребление;

8. Разработана компьютерная программа, позволяющая исследовать трехфазные электрические и магнитные цепи (получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614230). С помощью данного программного комплекса также можно проводить исследования параметров цепи, необходимых для расширения области дальнейшего исследования;

9. Разработана имитационная модель, отображающая полученные аналитические результаты исследований и подтверждающая корректность полученных выражений и результатов;

10. Получен акт о внедрении результатов исследования в образовательный процесс Горного университета и справка о внедрении результатов в производственную деятельность ООО «АСТЕРО».

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Крыльцов, С.Б. Применение свойств пространственного вектора при анализе качества напряжения распределительной сети 6-10 кВ [текст] / С.Б. Крыльцов, Т.В. Пудкова // «Известия Тульского государственного университета. Технические науки», 2017. – № 12 (Том 2), –с. 457-471.

2. Крыльцов, С.Б. Быстрое определение спектра несинусоидальных напряжений в распределительной сети 6-10 кВ [текст] / С.Б. Крыльцов, Т.В. Пудкова // «Известия Тульского государственного университета. Технические науки», 2017. – № 12 (Том 2), –с. 497-506.

3. Пудкова, Т.В. Применение принципов учета электроэнергии согласно теории мощности при наличии искажений [текст] / Т.В. Пудкова, А.И. Барданов, В.С. Добуш // «Известия Тульского государственного университета. Технические науки», 2019. – № 9 (Том 2), –с. 589-597.

4. Шклярский, Я.Э. К вопросу оплаты предприятиями потребляемой электроэнергии при наличии искажений [текст] / Я.Э. Шклярский, Т.В. Пудкова, Е.О. Замятин // «Известия Тульского государственного университета. Технические науки», 2019. – № 9 (Том 2), –с. 611-617.

5. Яковлева, Э.В. Анализ перспектив регионального развития интеллектуальных энергетических систем [текст] / Э.В. Яковлева, Е.В. Сизякова, П.В. Иванов, Ю.Л. Жуковский, Т.В. Пудкова // «Российский экономический интернет-журнал», 2018 – №2 – <http://www.e-rej.ru/Articles/2018/Iakovleva.pdf>.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

6. Bardanov, A.I. Control of D-STATCOM for Asymmetric Voltage Dips Compensation [текст] / A.I. Bardanov, T.V. Pudkova // IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 28-30 Jan. 2019, – pp. 430-433

В прочих изданиях

7. Пудкова, Т.В. Impact of the network topology on the power quality indicators [текст] / T.V. Pudkova // «Scientific reports on resource issues», 2016 – №6, – pp.494-500.

8. Пудкова, Т.В. Методы выделения высших гармонических составляющих из сигналов токов и напряжений трёхфазной сети [текст] / Т.В. Пудкова // «Современная наука и практика», 2016 – №5 (10), – с.19-23.

9. Крыльцов, С.Б. Перспективы использования сетевых инверторов напряжения в составе силовых установок для повышения показателей качества напряжения распределительной сети [текст] / С.Б. Крыльцов, Т.В. Пудкова // «Вестник научных конференций», Тамбов 2017, – с.97-98.

10. Добуш, В.С. Определение влияния угла сдвига фаз на высших гармониках на режим работы устройств поперечной компенсации [текст] / В.С. Добуш, Т.В. Пудкова // Материалы международной научно-практической конференции, 19-24 ноября 2018 г. Институт энергетики и транспортных систем. Ч.2. – СПб, ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019, – с. 87-89.

11. Пудкова, Т.В. Сравнительный анализ различных подходов к определению составляющих полной мощности при наличии в сети высших гармоник [текст] / Т.В. Пудкова, А.А. Пастухова, Д.И. Левчук // Сборник международного семинара «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME – 2019», 2019, – с. 460-465.

Патенты

12. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2017617533. Российская Федерация. Программа быстрого определения спектрального состава симметричной трёхфазной системы несинусоидальных напряжений / С.Б. Крыльцов, Т.В. Пудкова; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2017614475; заявл. 17.05.17; зарегистр. 06.07.2017; опублик. 06.07.2017 – 1 с.

13. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2019614230. Российская Федерация. Программный лабораторный комплекс для исследования трехфазных электрических и магнитных цепей / Д.И. Иванченко, В.Ю. Коптев, Т.В. Пудкова; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2019614230; заявл. 19.03.2019; зарегистр. 01.04.2019; опублик. 01.04.2019 – 1 с.

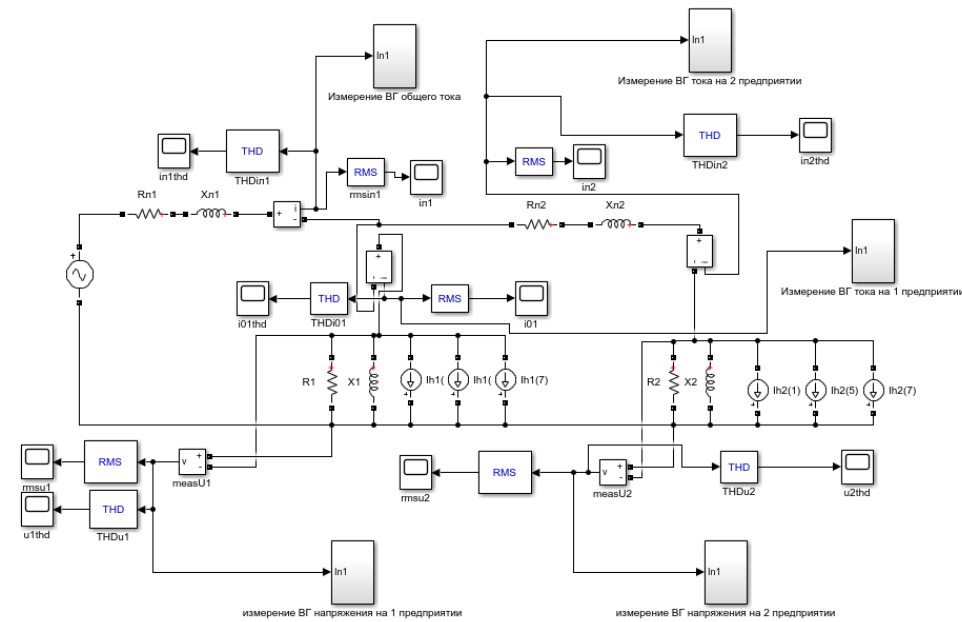


Рисунок 5 – Исследование взаимного влияния линейных и нелинейных нагрузок на модели схемы в среде MatLab Simulink

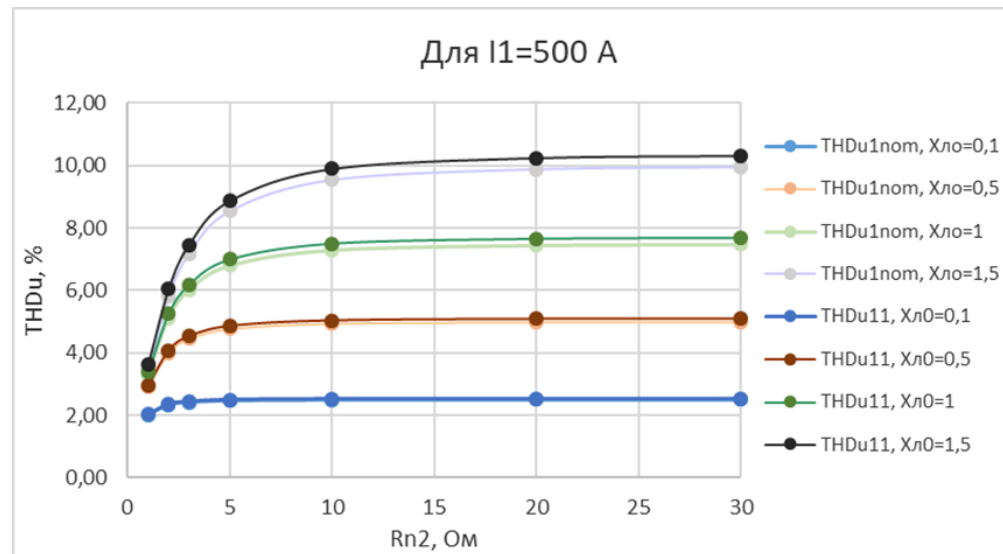


Рисунок 6 – Пример выявленной зависимости коэффициента искажения от активного компонента линейной нагрузки

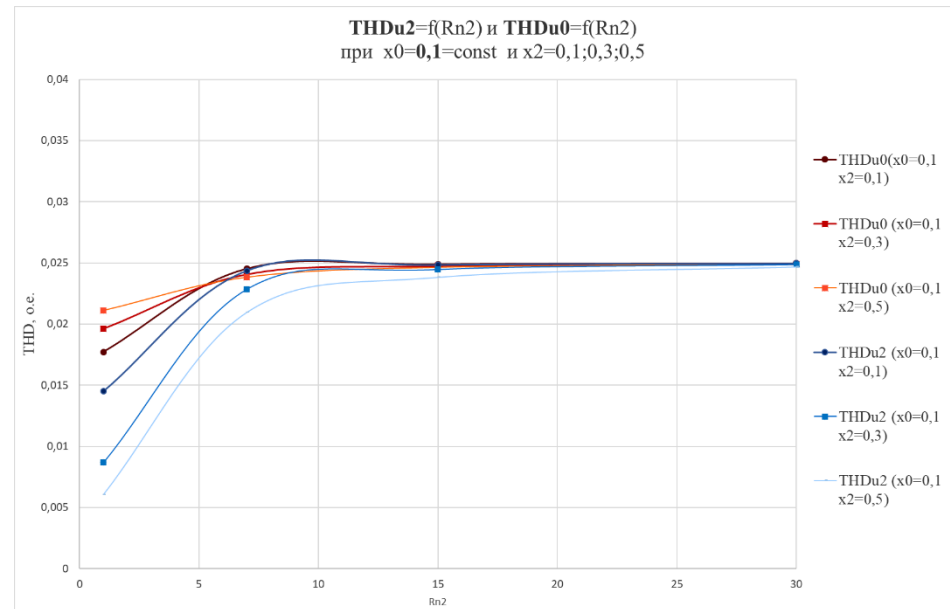


Рисунок 7 – Зависимость $THDu$ от изменения сопротивления линии у линейной нагрузки

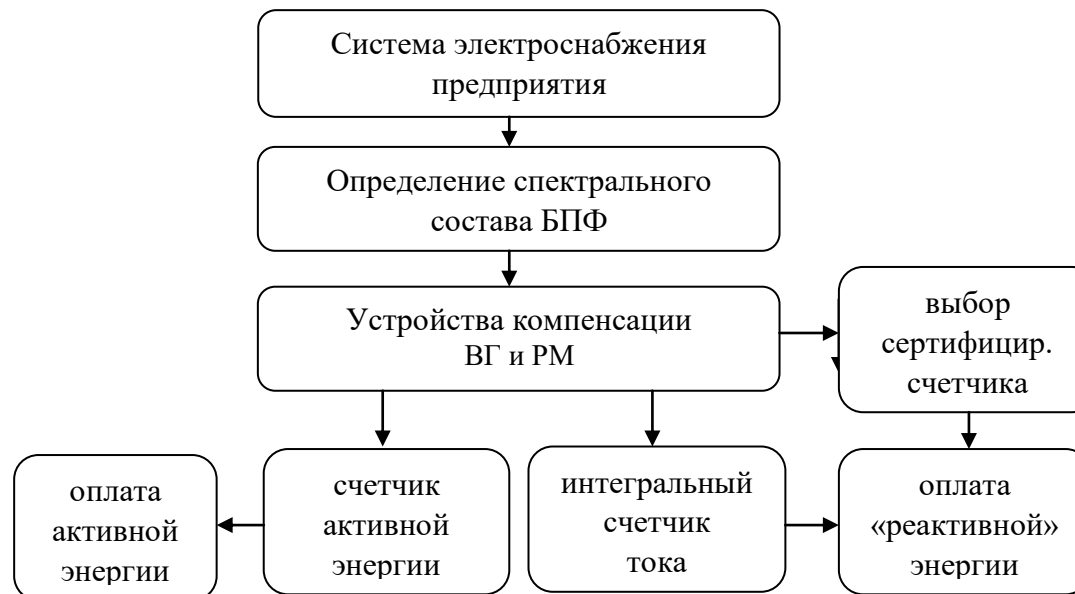


Рисунок 8 – Алгоритм учета электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий при наличии искажений