

На правах рукописи

Добуш Юлия Владимировна



**ВЫЯВЛЕНИЕ ВКЛАДОВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
В ИСКАЖЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ
В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

*Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и
системы*

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

Санкт-Петербург – 2022

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Шклярский Ярослав Элиевич

Официальные оппоненты:

Нос Олег Викторович

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

Насыров Ринат Ришатович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра электроэнергетических систем, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 23 июня 2022 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

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

Автореферат разослан 22 апреля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время увеличивается соотношение нелинейной нагрузки к линейной среди всех потребителей электрической энергии и в частности, среди промышленных потребителей. Кроме того, прослеживается тенденция все более широкого использования технологий, позволяющих повышать энергоэффективность и автоматизацию технологических процессов. Однако, данные меры предусматривают внедрение полупроводниковых преобразователей частоты, выпрямителей и инверторов, а также нелинейных нагрузок иного рода, что безусловно приводит к ухудшению качества электроэнергии.

Широко известны отрицательные воздействия высших гармоник электрического тока и напряжения в сетях электроснабжения, заключающиеся, например, в резком возрастании напряжения на емкостных сопротивлениях конденсаторных батарей, что приводит к выходу из строя данных устройств. Также высшие гармоники тока вызывают затруднения при расчете реактивной мощности, так как нет единой теории, позволяющей достоверно определить данное значение при таких условиях. Кроме того, несинусоидальный ток уменьшает пропускную способность кабельных линий, приводит к дополнительным тепловым потерям во всех элементах энергосистемы предприятия, снижает точность работы систем автоматики. В совокупности, данные негативные воздействия приводят к снижению срока службы оборудования, к переплатам за электроэнергию, к ухудшению качества выходной продукции.

На сегодняшний день качество электроэнергии нормирует ГОСТ 32144-2013, регламентирующий ряд показателей, в том числе суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, вызванный искажением формы напряжения из-за нелинейных потребителей. При этом не существует метода, позволяющего определить источник искажений напряжений и токов. Другими словами, невозможно достоверно в процентном соотношении рассчитать долю вклада потребителя в ухудшение качества электроэнергии в точке общего присоединения (ТОП) в связанных распределительных системах промышленных предприятий, тем самым отделив искажения

потребителя от искажений со стороны системы электроснабжения (СЭС).

Однако, существует необходимость разработки такого способа, так как точная оценка вклада потребителя в общие искажения обеспечит возможность применения мер к потребителям, которые генерируют наибольшие искажения, тем самым ухудшают качество электроэнергии не только на своем предприятии, но и на предприятиях, подключенных к той же системе электроснабжения. В дополнение, анализ, проведенный на основе метода выявления источников высших гармоник, возможно использовать в качестве обоснования выбора места подключения устройств компенсации искажений.

Таким образом, разработка способа выявления источника высших гармоник в связанных сетях промышленных предприятий является актуальной, особенно в вопросе оценки вклада таких источников в ухудшение качества электроэнергии в точке общего подключения.

Степень разработанности темы исследования

Проблемой компенсации высших гармоник тока занимались как российские ученые (Абрамович Б.Н., Шклярский Я.Э., Розанов Ю.К., Мещеряков В.М., Хабибуллин М.М.), так и зарубежные (Akagi H., Tenti P., Litran S.P., Popescu M.). Предложены конфигурации пассивных, активных, гибридных фильтров высших гармоник, однако, не учитывались вклады потребителей в искажения тока.

Над разработкой методов выявления источника высших гармоник работали многие российские ученые, в частности, Гамзин С.И. и Петрович В.А., Майер В.Я., Смирнов С.С., Саенко Ю.Л., Тульский В.Н., Карташев И.И., Сысун В.И. Одним из наиболее освещенных методов является метод активных двухполюсников. Однако, имеются существенные недостатки, не позволяющие применять его на практике, а именно, необходимость знать параметры эквивалентных сопротивлений, что значительно усложняет процесс его реализации.

Также был разработан ряд методов, суть которых заключается в расчете мощностей высших гармоник и определении их знаков. Это может быть активная мощность (Akagi H., Swart P.H., Case M.J., Wyk Van, Cristaldi L., Ferrero A.), реактивная мощность (Wilsun Xu, Chun

Li), неактивная мощность (Barbaro P.V.), мощность искажений (Stevanović D., Petković P.). Такие методы не дают достоверной информации о вкладе потребителей в процентном соотношении.

Далее, существуют методы, основанные на анализе векторов токов и напряжений в ТОП. Такие методы предлагались как российскими учеными (Зиновьев Г.С., Баглейбтер О.И, Геворкян В.М., Висящев А.Н., Зельвянский А.Я.), так и зарубежными (Malekian K., Fernandez F.M., Chandramohan Nair P.S.). Некоторые из этих методов могут давать результат о вкладе потребителей и СЭС в процентном соотношении, но часть из них требуют определения сопротивления СЭС и потребителя, что может быть затруднительно, а часть из них основаны на спорных математических выкладках.

Ни один из перечисленных методов не удовлетворяет совокупности требований: обоснованность – неоспоримое математическое доказательство сущности метода; точность – достоверные данные о вкладе сторон ухудшение качества электроэнергии в ТОП в процентном соотношении; техническая реализуемость – простота получения исходных данных для проведения вычислений. Только метод, обладающий всеми перечисленными качествами, может быть использован в качестве официального утвержденного метода определения источника искажений.

Таким образом, подтверждается необходимость разработки нового метода и способа определения источников высших гармоник для официального регулирования ответственности сторон в области качества электроэнергии с точки зрения генерации искажений и их компенсации.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности по 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.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 – искажения тока и напряжения, вызванные потребителями и системой электроснабжения в точке общего присоединения.

Научная задача – выявление вклада потребителей и системы электроснабжения в искажения тока и напряжения в точке общего присоединения.

Таким образом, основной **целью работы** является развитие общей теории связанных распределительных систем среднего напряжения с точки зрения выявления вкладов потребителей в искажения с дальнейшим распределением ответственности за генерирование искажений тока и напряжения между потребителями и системой электроснабжения.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Обзор существующих методов выявления источников высших гармоник тока и напряжения в связанных энергосистемах промышленных предприятий.

2. Создание математической модели двух предприятий, питающихся от общей системы электроснабжения и содержащих нелинейную нагрузку для выработки подхода по оценке величины, указывающей на доли вклада отдельных потребителей в искажения напряжения и тока в ТОП, для различных типов потребителей и режимов их работы, при различных внешних воздействиях, вызванных искажениями со стороны СЭС.

3. Разработка способа определения источников высших гармоник и оценки их вкладов в несинусоидальность напряжения и тока в ТОП.

4. Подтверждение теоретических результатов на основе проведения экспериментов на лабораторном стенде, включающем различную линейную и нелинейную нагрузки электротехнических комплексов промышленных предприятий.

5. Разработка иммитационной модели части СЭС предприятия для оценки эффективности применения предлагаемого способа.

Идея работы – выявление вклада потребителей в искажения тока и напряжения в точке общего присоединения в связанных распределительных системах промышленных предприятий на основа-

нии определения проекций токов высших гармоник потребителей на ток СЭС и проекций токов высших гармоник потребителей и токов СЭС на ток фильтра.

Научная новизна работы:

1. Предложено использование коэффициента вклада $K_D^{(h)}$, рассчитываемого как проекция вектора тока высшей гармоники потребителя на вектор тока высшей гармоники в ТОП по отношению к модулю вектора тока высшей гармоники в ТОП, что позволит определить вклад рассматриваемого потребителя в ухудшение качества тока и напряжения в ТОП.

2. Предложено использование коэффициента вклада $K_{D/\Phi}^{(h)}$, рассчитываемого как проекция вектора тока СЭС или потребителя на вектор тока фильтра высших гармоник на резонансной частоте по отношению к модулю вектора тока фильтра высших гармоник на резонансной частоте, что позволит определить вклад внешней СЭС или потребителя в ухудшение качества тока и напряжения в ТОП.

3. Разработан алгоритм распределения ответственности за генерацию искажений между потребителями и СЭС, отличающийся тем, что вначале определяется вклад СЭС на основании коэффициента вклада $K_D^{(h)}$, а затем рассчитываются вклады потребителей, подключенных к ТОП, на основании коэффициента $K_D^{(h)}$.

4. Выявлены зависимости коэффициентов вкладов, характерные для типичных видов нагрузок промышленных предприятий.

5. Установлено, что при коэффициенте вклада СЭС $K_{D\text{ СЭС}/\Phi}^{(h)}$ превышающем 44,3%, коэффициенты вкладов $K_D^{(h)}$ могут не коррелироваться с реальными вкладами потребителей.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан алгоритм, позволяющий поэтапно определить вклад СЭС в ухудшение качества электроэнергии в ТОП, а затем распределить ответственность за генерацию токов высших гармоник между потребителями.

2. Выявлено, что величина коэффициента вклада $K_{D\text{ СЭС}/\Phi}^{(h)}$ напрямую связана с эффективностью компенсации искажения тока и напряжения с точки зрения коэффициента нелинейных искажений

тока (THDi), коэффициента нелинейных искажений напряжения (THDu), коэффициента мощности на первой гармонике ($\cos\varphi(1)$) и действующего значения тока 5ой гармоники в ТОП. Чем ближе значение $K_{D\text{ СЭС}/\Phi}^{(h)}$ к нулю – тем выше эффективность компенсации.

3. Результаты исследования в соответствии с актом от 21.02.2022 внедрены в учебный процесс Горного университета при реализации специальных программ, также результаты работы приняты к внедрению в электротехнической лаборатории ООО «АСТЕРО», что подтверждается соответствующей справкой о внедрении от 15.02.2022.

4. Обоснована необходимость изменения нормативно-правовой базы в области регулирования качества электроэнергии.

Методология и методы исследования. В работе использовалось математическое и компьютерное моделирование в программной среде Matlab Simulink на основании теории электрических цепей и теории систем электроснабжения, а также метод лабораторного эксперимента.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Точность и достоверность оценки вкладов потребителей и системы электроснабжения в искажения тока и напряжения в точке общего присоединения при отсутствии внешних искажений и при их наличии может быть достигнута применением вновь введенных коэффициентов вкладов, соответствующих проекциям векторов токов высших гармоник потребителей на векторы тока системы электроснабжения и соответствующих проекциям векторов токов высших гармоник потребителей и системы электроснабжения на векторы тока фильтра.

2. Применение разработанного алгоритма выявления вкладов в искажения тока и напряжения позволит определить точки присоединения компенсирующих устройств в связанной системе электроснабжения предприятия на основании коэффициента вклада системы электроснабжения относительно фильтра, который указывает на эффективность использования компенсирующего устройства с точки зрения синусоидальности тока и напряжения в рассматриваемом узле.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования; проведением лабораторных экспериментов на стенде, включающем в себя типичную для промышленных предприятий линейную нагрузку, нелинейную нагрузку, компенсатор реактивной мощности и фильтр высших гармоник; результатами внедрения в электротехнической лаборатории ООО «АСТЕРО», а также апробацией результатов исследования на международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

Апробация результатов. Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на выступлениях на следующих международных научных конференциях: «59-ая научная конференция по горному делу», Краковская горно-металлургическая академия, (2018); IV Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», (2018); «IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)» (2019); Международный семинар «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2019» (2019); XVII Всероссийская конференции-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (2019); XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (2019); 14ый Фрайберг - Санкт-Петербургский коллоквиум молодых ученых (2019); постерная сессия «Инновационные исследования в горном деле» в рамках III Российско-Британского сырьевого диалога (2019); Young Researchers Day of the 12th German-Russian Raw Materials Conference (2019); Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020» (2020); XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (2020); Международный научно-технический семинар «Новые подходы к повышению качества электрической энергии» (2020); XVI International Forum-Contest of Students and Young Researchers “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources”

(2020); XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (2021); Международный научно-технический семинар «New concepts for improving power quality - 2021», (2021); XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources” (2021); Международная научная Электро-энергетическая конференция ISEPC (2021); I Международная междисциплинарная научно-практическая конференция «Человек в Арктике» (2021).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, проведении лабораторных экспериментов с последующей обработкой первичных данных, проведении компьютерного моделирования и получении искомым зависимостей.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 18 печатных работах, в том числе в 2 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 4 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 112 наименований и 3 приложений. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 44 рисунка и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проанализированы существующие методы определения источников искажений, рассмотрены их преимущества и недостатки.

Показано, что ни один из рассмотренных методов не соответствует совокупности таких требований, как обоснованность подхода, точность получаемого результата и техническая реализуемость. Кроме того, ни один из существующих методов официально не утвержден государственным или международным стандартом.

Сделан акцент на том, что отсутствует нормирование эмиссий гармонических составляющих тока в ГОСТ 32144-2013. Это говорит о необходимости обновления нормативно-правовой базы с точки зрения искажений форм токов и определения источника этих искажений.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Вторая глава посвящена математическому моделированию связанных распределительных сетей, на основе результатов которого проведены теоретические исследования по определению вкладов потребителей и СЭС в искажения тока и напряжения в ТОП.

Представлены схемы замещения СЭС с двумя разнохарактерными потребителями. На основе анализа результатов моделирования было предложено введение коэффициента вклада $K_D^{(h)}$, который представлен в виде соотношения проекции вектора тока высшей гармоники потребителя на суммарный вектор СЭС к суммарному модулю вектора тока для каждой гармоники отдельно. Для j -ого потребителя коэффициент $K_D^{(h)}$ принимает вид $K_{Dj}^{(h)}$ согласно формуле (1):

$$K_{Dj}^{(h)} = \frac{I_j^{(h)} \cos(\psi_{Ij}^{(h)} - \psi_{I0}^{(h)})}{I_0^{(h)}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $I_j^{(h)}$ – ток гармоники h j -ого потребителя, $\psi_{Ij}^{(h)}$ – фаза тока $I_j^{(h)}$, $I_0^{(h)}$ – ток гармоники h СЭС, $\psi_{I0}^{(h)}$ – фаза тока $I_0^{(h)}$.

Проведена оценка влияния выбранных факторов (потребители смешанной структуры; сопротивление линий, соединяющих ТОП с потребителями; емкостная нагрузка; внешние искажения со стороны СЭС) на результаты вычислений предложенного коэффициента вклада.

Выявлено, что потребители смешанной структуры, включающие как линейную, так и нелинейную нагрузку, влияют на коэф-

коэффициенты вкладов друг друга не более, чем на 5% для жестких СЭС, что было определено на основании введенных коэффициентов пропорциональности A (2), B (3), C (4).

$$A = \frac{n_1^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}, \quad (2)$$

$$B = \frac{n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}, \quad (3)$$

$$C = \frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}, \quad (4)$$

где $n_1^{(h)}$ и $n_2^{(h)}$ – коэффициенты пропорциональности, показывающие соотношения комплексных сопротивлений предприятий $Z_1^{(h)}$ и $Z_2^{(h)}$ к сопротивлению СЭС $Z_0^{(h)}$, рассчитываемые по выражениям (5) и (6) соответственно:

$$n_1^{(h)} = \frac{Z_1^{(h)}}{Z_0^{(h)}}; \quad (5)$$

$$n_2^{(h)} = \frac{Z_2^{(h)}}{Z_0^{(h)}}. \quad (6)$$

Выявлено, что сопротивление линий, соединяющих Топ с потребителями, не влияет на результаты расчета, что было определено на основании введенных коэффициентов пропорциональности C_1 (7), C_2 (8):

$$C_1 = -\frac{n_1^{(h)} \cdot n_{20}^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) - 1}; \quad (7)$$

$$C_2 = -\frac{n_2^{(h)} \cdot n_{10}^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) - 1}, \quad (8)$$

где $n_{10}^{(h)}$ и $n_{20}^{(h)}$ – коэффициенты пропорциональности, показывающие соотношения комплексных сопротивлений линий $Z_{10}^{(h)}$ и $Z_{20}^{(h)}$ к сопротивлению СЭС $Z_0^{(h)}$ рассчитываемые по выражениям (9) и (10) соответственно:

$$n_{10}^{(h)} = \frac{Z_{10}^{(h)}}{Z_0^{(h)}}; \quad (9)$$

$$n_{20}^{(h)} = \frac{Z_{20}^{(h)}}{Z_0^{(h)}}. \quad (10)$$

Представлены схемы замещения СЭС с линейным и нелинейным потребителями и емкостной нагрузкой в виде компенсатора реактивной мощности или фильтра высших гармоник.

Выявлено, что емкостная нагрузка не может быть ошибочно идентифицирована как нелинейная, так как фильтры высших гармоник на нерезонансных частотах имеют индуктивный характер, а большинство компенсаторов реактивной мощности содержат индуктивность $L_{\text{КРМ}}^{(h)}$, которая также обеспечивает индуктивный характер нагрузки на нерезонансных частотах.

Выявлено, что внешние искажения со стороны СЭС могут в значительной мере повлиять на результаты расчетов, что должно быть учтено в алгоритме метода определения вкладов потребителей и СЭС в искажения напряжения и токов в ТОП.

Предложено для оценки искажений со стороны СЭС использовать фильтр высших гармоник, рассчитывая коэффициент вклада относительно фильтра $K_{D/\Phi}^{(h)}$, определяемый как соотношение проекции вектора тока в точке общего присоединения на вектор тока фильтра высших гармоник на резонансной частоте к модулю вектора тока фильтра высших гармоник на резонансной частоте (11).

$$K_{D/\Phi}^{(h)} = \frac{I^{(h)} \cdot \cos(\psi_I^{(h)} - \psi_{I\Phi}^{(h)})}{I_{\Phi}^{(h)}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где $I^{(h)}$ – либо ток СЭС $I_0^{(h)}$, либо ток нагрузки $-I_{\text{нл}}^{(h)}$, $\psi_I^{(h)}$ – либо фаза тока $I_0^{(h)}$, либо фаза тока $I_{\text{нл}}^{(h)}$.

На основании проведенных теоретических исследований разработан метод и соответствующий ему алгоритм определения вклада потребителей и СЭС в искажения напряжения и тока в ТОП, состоящий из двух этапов:

1. Определение вклада СЭС в искажения тока и напряжения в ТОП при помощи коэффициента вклада относительно фильтра $K_{D/\Phi}^{(h)}$. Если СЭС является доминантным источником (вклад более 50%), тогда меры по компенсации высших гармоник должны производиться в первую очередь со стороны СЭС, так как применение мер со стороны потребителей не приведет к желаемому результату. Если искажения со стороны СЭС ниже 50%, то возможно перейти к следующему этапу.

2. Распределение ответственности за генерирование токов высших гармоник между потребителями при помощи коэффициента вклада $K_D^{(h)}$.

В конце второй главы сформулированы выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

В третьей главе приведены результаты лабораторных экспериментов.

Для апробации предложенного способа определения коэффициентов вкладов потребителей в ухудшение качества тока и напряжения в ТОО K_D и $K_{D/\Phi}$ был реализован экспериментальный стенд, принципиальная схема которого представлена на рисунке 1. Лабораторный стенд содержит трехфазный источник напряжения \dot{U}_0 , три катушки L_S переменной индуктивности, три резистора $R_S=2,2$ Ом, асинхронный двигатель (M), тиристорный выпрямитель (TB), трехфазный тиристорный регулятор мощности (TRM), воздушные тепло-электронагреватели ($TЭН_1$ и $TЭН_2$), фильтр 5ой гармоники (Φ); компенсатор реактивной мощности (KPM) с частотой расстройки 134 Гц.

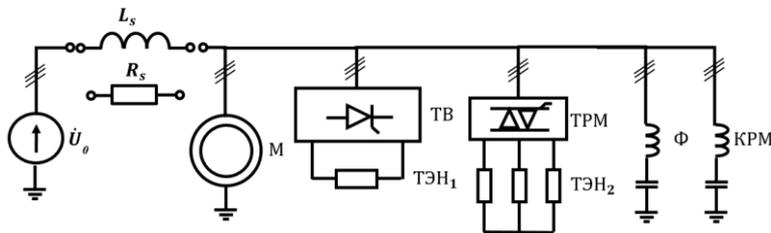


Рисунок 1 – Принципиальная схема лабораторного стенда

В рамках каждого эксперимента проводились измерения токов высших гармоник СЭС и потребителей, рассчитывались коэффициенты вкладов $K_D^{(h)}$ и/или коэффициенты вкладов $K_{D/\Phi}^{(h)}$.

В результате обработки первичных данных экспериментов были получены значения коэффициентов вкладов, на основании которых были сделаны следующие выводы:

1. Вне зависимости от внешних условий вклад линейной нагрузки, такой как M , отрицательный и малый по амплитуде по сравнению с другими потребителями, такими как нелинейные потребители в виде TB и TRM , а также по сравнению с KPM и Φ .

2. Нелинейная нагрузка характеризуется положительным коэффициентом вклада, который может превышать 100% и который напрямую зависит от высших гармоник тока, генерируемых непосредственно потребителем, что видно по рисунку 2.

3. Фильтр высших гармоник на резонансной частоте (рисунок 3а) характеризуется отрицательным коэффициентом вклада с амплитудой значительно большей, чем амплитуда коэффициента вклада линейной нагрузки; что показывает корреляцию между коэффициентом $K_{D/\Phi}^{(h)}$ и компенсацией токов высших гармоник фильтром.

4. Фильтр высших гармоник на нерезонансной частоте (рисунок 3б), также, как и компенсатор реактивной мощности с частотой расстройки (рисунок 2), характеризуется отрицательными вкладами малых амплитуд.

На рисунке 2 $K_{D\text{ ТВ}}^{(h)}$ – коэффициент вклада тиристорного выпрямителя, $K_{D\text{ КРМ}}^{(h)}$ – коэффициент вклада компенсатора реактивной мощности, $K_{D\text{ ТВ}}^{(h)}$ – коэффициент вклада асинхронного двигателя, U_d – напряжение стороны постоянного тока тиристорного выпрямителя в процентном соотношении от максимального.

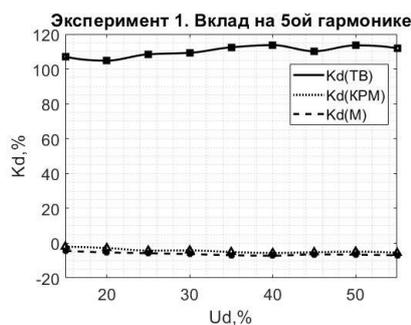


Рисунок 2 – Результаты эксперимента с компенсатором реактивной мощности

На рисунке 3 $K_{D\Phi}^{(h)}$ – коэффициент вклада фильтра высших гармоник.

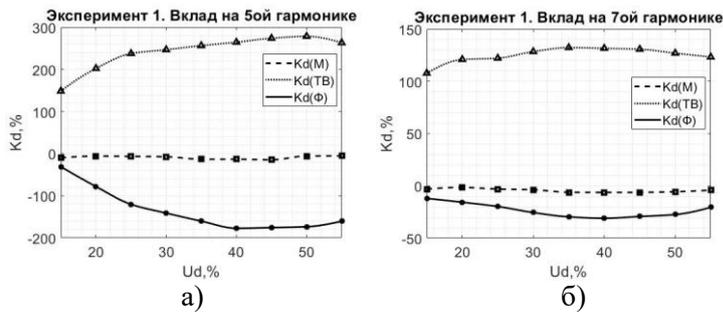


Рисунок 3 – Результаты эксперимента: а) для резонансной частоты фильтра; б) для нерезонансной частоты фильтра

Выявлено, что при искажениях со стороны СЭС, превышающих определенную величину, коэффициенты вкладов потребителей могут принимать значения, никаким образом не коррелирующиеся с их реальными вкладами. В связи с этим, перед определением вкладов потребителей в искажения тока и напряжения в ТОП необходимо оценить вклад внешних источников в ухудшение качества электроэнергии в ТОП.

В конце 3 главы была поставлена задача определения значения коэффициента вклада СЭС относительно фильтра $K_D^{(h)}$ СЭС/Ф, при котором значения коэффициентов вкладов $K_D^{(h)}$ при отключенном фильтре не репрезентативны. Решение задачи приводится в четвертой главе.

В четвертой главе приведены результаты компьютерного моделирования.

Рассмотрена схема СЭС промышленного предприятия, рассчитаны параметры ее схемы замещения для имитационной модели в Matlab Simulink.

Определено, что при условии увеличения нагрузки нелинейного потребителя или потребителя смешанного характера, наблюдается увеличение коэффициента вклада этого потребителя. При том же условии, коэффициенты вкладов остальных нелинейных потребителей и потребителей смешанной структуры снижаются. Зависимость коэффициентов вкладов линейных нагрузок от режимов работы любых потребителей, подключенных к ТОП, не обнаружена.

Выявлено, что при отсутствии искажений со стороны СЭС наиболее эффективным с точки зрения THDi , THDu , $\cos\varphi(1)$ и действующего значения тока 5ой гармоники в ТОП является подключение фильтра к ТОП. Определено, что, чем ближе $K_{D \text{ СЭС}/\Phi}^{(h)}$ к 0, тем выше эффективность компенсации эффективным с точки зрения THDi , THDu , $\cos\varphi(1)$ и действующего значения тока 5ой гармоники в ТОП.

Определено, что при искажениях со стороны СЭС, превышающих $K_{D \text{ СЭС}/\Phi}^{(h)} = 44,3\%$, коэффициенты вкладов потребителей относительно ТОП $K_{D/\text{ТОП}}^{(h)}$ могут принимать значения, не коррелирующие с их реальными вкладами. На основании этого сделан вывод о том, что перед определением коэффициентов вкладов потребителей в искажения тока и напряжения в ТОП $K_{D/\text{ТОП}}^{(h)}$ необходимо обязательно проводить оценку вклада внешних источников в ухудшение качества электроэнергии в ТОП.

В конце 4 главы сделан вывод о том, что предложенный подход позволяет определить относительный вклад СЭС и потребителей в несинусоидальность напряжения и тока в ТОП, а также обоснованно определить места подключения фильтр-компенсирующих устройств, позволяющие наиболее эффективно обеспечить заданный уровень показателей качества электроэнергии на промышленном предприятии с точки зрения THDi , THDu , $\cos\varphi(1)$ и действующего значения тока 5ой гармоники в ТОП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – развитие общей теории связанных распределительных систем среднего напряжения, содержащих нелинейную нагрузку.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа методов определения источников искажений выявлено, что их применение не позволяет достоверно рассчитать величину вкладов потребителя и СЭС в процентном соотношении.

2. На основании математического моделирования СЭС с наличием нелинейной нагрузки введены коэффициенты вкладов $K_D^{(h)}$ и $K_{D/\Phi}^{(h)}$, характеризующие вклады потребителей и СЭС в искажения тока и напряжения в ТОП. Коэффициент $K_D^{(h)}$ характеризует вклады потребителей относительно тока СЭС, а коэффициент $K_{D/\Phi}^{(h)}$ характеризует вклады потребителей и СЭС относительно тока фильтра.

3. Сформулирован алгоритм реализации метода, согласно которому вначале оценивается влияние внешних искажений на качество электроэнергии в ТОП при помощи расчета коэффициентов вкладов $K_{D\text{ СЭС}/\Phi}^{(h)}$ относительно тока фильтра высших гармоник на каждой гармонике отдельно.

4. На основании лабораторных экспериментов были получены зависимости вкладов, характерные для различных видов нагрузок промышленных предприятий. Коэффициенты вкладов асинхронных двигателей отрицательны и малы по амплитуде по сравнению с другими потребителями вне зависимости от внешних условий; нелинейная нагрузка характеризуется положительным коэффициентом вклада, который может превышать 100%; фильтр высших гармоник на резонансной частоте характеризуется отрицательным коэффициентом вклада с амплитудой значительно большей, чем амплитуда коэффициента вклада линейной нагрузки; фильтр высших гармоник на нерезонансной частоте, также, как и компенсатор реактивной

мощности с частотой расстройки, характеризуется отрицательными вкладами малых амплитуд.

5. На основании компьютерного моделирования СЭС промышленного предприятия выявлено, что при искажениях со стороны СЭС, превышающих $K_{D\text{СЭС}/\Phi}^{(h)} = 44,3\%$, коэффициенты вкладов потребителей $K_{D/\text{ТОП}}^{(h)}$ могут принимать значения, не коррелирующие с их реальными вкладами. Также подтверждена прямая зависимость коэффициентов вклада потребителя от потребляемой мощности для нелинейных нагрузок нелинейных нагрузок и потребителей смешанной структуры. Подтверждена независимость коэффициентов вкладов линейных потребителей от режима работы любых потребителей, подключенных к ТОП. При отсутствии искажений со стороны СЭС наиболее эффективным с точки зрения THDi , THDu , $\cos\varphi(1)$ и действующего значения тока 5ой гармоники в ТОП является подключение фильтра к ТОП.

6. Предложенный подход к оценке вкладов позволяет определить относительный вклад СЭС в несинусоидальность напряжения и тока в ТОП, а также обоснованно определить места подключения фильтр-компенсирующих устройств, позволяющие наиболее эффективно обеспечить заданный уровень показателей качества электроэнергии на промышленном предприятии.

7. Результаты проведенных исследований были внедрены в учебный процесс кафедры общей электротехники Санкт-Петербургского горного университета, а также в производственную деятельность ООО «Астери».

8. Исследования по теме диссертации могут в дальнейшем проводиться по следующим направлениям:

8.1. влияние иных, кроме рассмотренных, факторов и нагрузок на результаты расчета введенных коэффициентов вкладов (несимметрия питающего напряжения, несимметрия нагрузки и т.д.);

8.2. подтверждение применимости введенных коэффициентов для компенсаторов реактивной мощности без частоты расстройки;

8.3. определение схем замещения нелинейных нагрузок на высших гармониках.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Шклярский Я.Э. Оценка вклада потребителей в ухудшение показателей качества электроэнергии / Я.Э. Шклярский, **Ю.В. Растворова**, И.С. Петров // Вопросы электротехнологии. – 2019. – Т. 1. – № 22. – С. 56-63.

2. Скамын, А.Н. Влияние напряжения на параметры электропотребления при наличии высших гармоник / А.Н. Скамын, В.С. Добуш, **Ю.В. Растворова** // Вопросы электротехнологии. – 2020. – Т. 1. – № 26. – С. 61-69.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. Experimental determination of parameters of nonlinear electrical load / A. Skamyin, Y. Shklyarskiy, V. Dobush, **I. Dobush** // Energies. – 2021. – Vol. 14. – P. 7762.

4. Method for evaluation of the utility's and consumers' contribution to the current and voltage distortions at the PCC / Y. Shklyarskiy, **I. Dobush**, M.J. Carrizosa [et al.] // Energies. – 2021. – Vol. 14. – P. 8416.

5. Skamyin A.N. Method for determining the source of power quality deterioration / A.N. Skamyin, V.S. Dobush, I.V. Rastvorova // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. – 2019. – P. 1077-1079.

6. Skamyin A.N. Consumed power regulation algorithm in the presence of high harmonics / A.N. Skamyin, **I.V. Rastvorova** // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1753. – P. 012042.

Патенты:

7. Патент № 2752765 С1, МПК G01R 23/20 (2006.01). Способ оценки вклада нелинейных потребителей в искажение напряжения в точке общего присоединения : №2020140768 : заявл. 10.12.2020 : опубл. 03.08.2021 / Я.Э. Шклярский, А.Н. Скамын, **Ю.В. Добуш**, В.А. Шпенст; заявитель СПбГУ. 19 с. : ил. – Текст : непосредственный.