

*На правах рукописи*

**Скамьин Александр Николаевич**



**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И  
НОРМАЛИЗАЦИИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКА И  
НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ПРЕДПРИЯТИЙ С УЧЕТОМ ДОЛЕВЫХ ВКЛАДОВ  
ИСТОЧНИКОВ ИСКАЖЕНИЙ**

*Специальность 2.4.2. Электротехнические  
комплексы и системы*

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

Санкт-Петербург – 2026

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

**Научный консультант:**

доктор технических наук, профессор

***Шклярский Ярослав Элиевич***

**Официальные оппоненты:**

***Грачева Елена Ивановна***

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», профессор;

***Осипов Дмитрий Сергеевич***

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Югорский государственный университет», Политехническая школа, профессор;

***Харитонов Сергей Александрович***

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра электроники и электротехники, заведующий кафедрой.

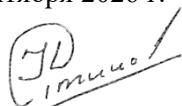
**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится **17 декабря 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, д. 2, **аудитория № 1171**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 17 сентября 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



УСТИНОВ  
Денис Анатольевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время проблема повышения качества электроэнергии (КЭ) приобретает все более острый характер, так как на любом предприятии с целью повышения производительности труда, эффективности управления технологическим процессом, экономии электроэнергии внедряется оборудование, функционирование которого основано на применении преобразовательной техники. Полупроводниковые преобразователи являются одним из основных источников высших гармоник (ВГ). Рост мощности таких устройств превышает темпы внедрения мероприятий по ограничению создаваемых ими помех. Это приводит к ухудшению показателей КЭ, нарушению технологического процесса производства, снижению сроков службы и выходу из строя электрооборудования, увеличению потерь электроэнергии, некорректной работе устройств автоматики и релейной защиты. Ущерб от низкого КЭ обходится российской экономике, по минимальной оценке, в 25 млрд долл. в год, для 25-ти стран Евросоюза - в 150 млрд евро в год, а в США достигает 190 млрд долл. в год. Такое положение дел свидетельствует о наличии нерешенных задач в области повышения КЭ как в России, так и в зарубежных странах. По результатам опроса экспертов в области электромагнитной совместимости и КЭ специалистами рабочей группы CIGRE о сравнительной важности и первоочередности учета различных явлений было выявлено, что ВГ являются одной из наиболее важных составляющих этой проблемы. Ущерб от негативных явлений, вызванных наличием ВГ, например, во Франции, Германии, Канаде оценивается в 650 млн долл. в год.

В современных электротехнических комплексах (ЭТК) предприятий полупроводниковые преобразователи интенсивно внедряются как со стороны нагрузки, так и со стороны источников электроэнергии. Всестороннее подключение преобразователей приводит к взаимному и разнонаправленному изменению ВГ тока и напряжения. В таких условиях применение и выбор параметров фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) в значительной степени зависит от долевого вклада (ДВ) распределенных источников искажений. Так, например, избыточным и несправедливым является применение ФКУ у потребителя, на вводе которого напряжение искажено в ре-

зультате работы нелинейной нагрузки (НН) сторонних энергообъектов. В рамках разветвленной сети отдельного потребителя при наличии распределенных источников искажений также необходимо решать вопрос об определении ДВ различных НН, так как компенсацию их влияния необходимо осуществлять в тех узлах, где это приводит к наибольшему техническому и экономическому эффекту.

Таким образом, в современных условиях широкого распространения распределенных НН значительно усложняется оценка и расчет несинусоидальных режимов систем электроснабжения (СЭС) предприятий, а также выбор параметров и мест подключения ФКУ. Необходимо совершенствовать существующие подходы, методы оценки и нормализации несинусоидальности тока и напряжения, которые включают комплекс методик и алгоритмов, позволяющих проводить раздельную оценку влияния распределенных источников искажений, корректный выбор и обоснование параметров и мест подключения ФКУ с учетом взаимосвязанных ДВ по току и напряжению.

**Степень разработанности темы исследования.** Большой вклад в исследование проблематики повышения КЭ, включающей снижение ВГ тока и напряжения, расчет и моделирование несинусоидальных режимов СЭС, оценку ДВ и влияния ВГ на электрооборудование, выбор параметров ФКУ, внесли Б.Н. Абрамович, Г.Я. Вагин, А.Н. Висящев, В.Э. Воротницкий, С.И. Гамазин, Е.И. Грачева, Л.Н. Добрусин, В.П. Довгун, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, И.И. Карташев, Л.А. Кучумов, О.В. Нос, Ю.К. Розанов, С.С. Смирнов, Е.Н. Соснина, С.А. Харитонов, Ю.В. Шевырев, А.К. Шидловский, Я.Э. Шклярский, Н. Akagi, J. Arrilaga, A. Emanuel, J. Meyer, S. Hanzelka и др. Однако в связи с широким распространением источников ВГ на разных уровнях напряжений и точках присоединения к сети, а также их взаимным влиянием друг на друга, существующие подходы и методы оценки и нормализации несинусоидальности тока и напряжения необходимо корректировать и совершенствовать с учетом ДВ источников искажений.

В решение вопросов, связанных с расчетом несинусоидальных режимов СЭС предприятий, а также со снижением уровня ВГ и выбором параметров ФКУ, внесли большой вклад Б.Н. Абрамович, Г.Я. Вагин, В.П. Довгун, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, И.И. Карташев, О.В. Нос, Д.С. Осипов, Ю.А. Сычев, С.А. Харитонов,

С.Н. Чижма, Я.Э. Шклярский, Н. Akagi, S. Hanzelka и др. Эти исследования были направлены на совершенствование конструкций ФКУ, методик выбора их параметров и мест подключения, алгоритмов их систем управления, а также методов расчета и анализа несинусоидальных режимов. Также предлагались структуры гибридных ФКУ, способных снижать уровень ВГ тока и напряжения, создаваемых НН и внешней сетью. Однако глубоко не рассматривались вопросы анализа и оценки несинусоидальных режимов с учетом ДВ распределенных источников искажений, которые оказывают значительное взаимосвязанное влияние на ВГ тока и напряжения в СЭС предприятий. Также влияние ДВ таких источников детально не рассматривалось при выборе параметров и мест подключения ФКУ, что влияет на их перегрузочную способность и эффективность функционирования.

Проблеме выявления ДВ источников искажений, расчета их допустимых значений и влияния на потребителей посвящено большое количество как зарубежной, так и отечественной литературы. Значительный вклад в исследования в этом направлении внесли ученые ОАО «НТЦ электроэнергетики» - ВНИИЭ под руководством В.Э. Воротницкого и Ю.С. Железко, школы Национального исследовательского университета «МЭИ» под руководством И.И. Карташева, В.Н. Тульского, С.А. Цырука, С.А. Янченко, школы «Иркутского национального исследовательского технического университета» под руководством А.Н. Висящева, С.Г. Тигунцева, Д.С. Федосова, школы ИСЭМ СО РАН под руководством Н.И. Воропая, С.С. Смирнова, Л.И. Коверниковой, школы Краковской горно-металлургической академии под руководством S. Hanzelka и S. Pirog, школы Дрезденского технического университета под руководством J. Meyer и P. Schegner и др. Эти исследования были направлены на определение допустимых и фактических ДВ источников искажений в несинусоидальность напряжения, в том числе на основе определения гармонических сопротивлений сети и потребителей, а также определения потоков мощности на частотах ВГ. Совершенствовались устройства и алгоритмы их управления для определения параметров сети и нагрузки, предлагались новые критерии, позволяющие определять автономное напряжение искажения отдельных потребителей. Однако глубоко не рассматривались вопросы определения ДВ

источников искажений с целью выбора параметров, мест подключения ФКУ и оценки остаточных значений ВГ тока и напряжения при их компенсации. Также недостаточно глубоко проработаны вопросы оценки ДВ в условиях подключения ФКУ и их эксплуатации, что необходимо проводить при изменении состава НН и режимов их работы, не отражены теоретические аспекты, учитывающие взаимосвязь и влияние друг на друга ДВ по току и по напряжению, необходимые при выборе параметров ФКУ.

**Связь темы диссертации с государственными научными программами.** Работа выполнялась в соответствии со следующими государственными программами и грантами за последние 10 лет:

- грант Президента РФ № МК-980.2018.8 «Комплексная система идентификации источников нарушения качества электрической энергии и выбора рациональных экономически обоснованных способов его повышения», 2018 - 2019 гг., руководитель проекта к.т.н. Скамьин А.Н.;

- соглашение с Российским научным фондом № 18-79-00127 «Комплексная система учета и регулирования потоков мощности при наличии гармонических искажений в напряжении и токе», 2018 - 2020 гг., руководитель проекта к.т.н. Скамьин А.Н.;

- соглашение с Российским научным фондом № 21-79-10027 «Методы и средства повышения качества электрической энергии на основе выявления долевого вклада источников искажений и компенсации их влияния на потребителей», 2021 - 2024 гг., руководитель проекта к.т.н. Скамьин А.Н.

**Объект исследования** – ЭТК предприятий с распределенными НН и ФКУ, подключаемыми к сетям напряжением 0,4-10 кВ.

**Предмет исследования** – закономерности и параметры несинусоидальных режимов работы СЭС предприятия с учетом ДВ источников искажений.

**Цель работы** – повышение КЭ и энергоэффективности ЭТК предприятий с распределенными НН путем нормализации несинусоидальности тока и напряжения с учетом ДВ источников искажений.

**Идея работы:** повышение КЭ и энергоэффективности ЭТК предприятий достигается путем снижения уровней ВГ и потерь активной мощности на основе разработки методологии раздельной оценки влияния распределенных источников искажений, выявления

ДВ НН и взаимосвязанного выбора параметров и мест подключения ФКУ.

**Задачи исследования:**

1. Анализ научно-технических проблем обеспечения КЭ и нормализации несинусоидальности тока и напряжения в СЭС предприятий с распределенными источниками искажений.

2. Разработка метода оценки несинусоидальности тока и напряжения в сетях 0,4-10 кВ при наличии распределенных источников искажений путем определения остаточных значений ВГ тока и напряжения в узле нагрузки.

3. Разработка метода определения ДВ источников искажений на основе измерения векторов гармонических составляющих тока и напряжения, позволяющего проводить оценку взаимосвязанных уровней снижения ВГ тока и напряжения при подключении ФКУ и на этапе их эксплуатации.

4. Систематизация способов и методов компенсации ВГ и разработка метода выбора их параметров и мест подключения с учетом взаимосвязанных ДВ источников искажений по току и напряжению.

5. Разработка методологии оценки и нормализации несинусоидальности тока и напряжения, включающей упорядоченную совокупность методов, позволяющих проводить оценку остаточных значений ВГ тока и напряжения в узле нагрузки, определение ДВ источников искажений по току и напряжению, а также взаимосвязанный выбор параметров ФКУ, подключаемых к сетям напряжением 0,4-10 кВ.

**Научная новизна работы**

1. Выявлены аналитические зависимости ВГ тока источника искажений от мощности короткого замыкания сети, коэффициента загрузки питающего трансформатора линейной нагрузкой и порядка генерируемых ВГ, позволяющие определять мощность устройства для определения гармонического сопротивления сети на основе генерации нехарактерных гармоник.

2. Разработан метод оценки несинусоидальности тока и напряжения в сетях 0,4-10 кВ при наличии распределенных НН путем определения остаточных значений ВГ в узле нагрузки, учитывающий граничные значения соотношений мощности короткого замыкания системы к мощности питающего узел нагрузки трансформатора для

определения гармонического сопротивления сети и к мощности НН для определения влияния внешних источников искажений.

3. Разработан обобщенный метод определения ДВ источников искажений, основанный на измерении векторов гармонических составляющих тока и напряжения, позволяющий проводить выбор узла нагрузки с наибольшим алгебраическим ДВ и оценку взаимосвязанных уровней снижения ВГ тока и напряжения по геометрическим ДВ.

4. Разработан метод определения ДВ на основе применения пассивных и активных ФКУ, который позволяет рассчитывать ДВ внутренних и внешних источников искажений при скомпенсированных значениях ВГ токов и напряжений в узле нагрузки на этапе эксплуатации ФКУ.

5. Выявлены аналитические зависимости ВГ тока пассивного фильтра шунтирующего типа от ДВ внешних источников искажений, мощности короткого замыкания и параметров ФКУ, позволяющие учесть гармонические составляющие тока внешних источников искажений при расчете перегрузки ФКУ и выборе их параметров.

6. Установлены зависимости остаточных значений ВГ тока и напряжения потребителя от параметров питающей сети и ДВ источников искажений, позволяющие проводить выбор параметров параллельного активного фильтра при компенсации ВГ тока и напряжения.

7. Разработан метод выбора средств снижения уровня ВГ, учитывающий алгебраические ДВ источников искажений для выбора мест подключения и геометрические ДВ для выбора параметров ФКУ, включающий последовательное применение разработанных способов и методов, в том числе варьирование параметров питающей сети и подключение реакторов, установку пассивных ФКУ шунтирующего типа, а также активных ФКУ параллельного типа с возможностью компенсации ВГ тока и напряжения.

8. Разработана методология оценки и нормализации несинусоидальности тока и напряжения, которая основана на комплексном применении методов оценки ВГ тока и напряжения при наличии распределенных источников искажений, выявления взаимосвязанных ДВ источников искажений по току и напряжению, а также компенсации влияния источников искажений с помощью пассивных и активных ФКУ с учетом алгебраических и геометрических ДВ.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы по пунктам: п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электро-механические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования»; п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления»; п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов».

**Теоретическая значимость.** Разработаны теоретические аспекты нормализации несинусоидальности тока и напряжения, учитывающие взаимосвязь и влияние друг на друга источников искажений по току и по напряжению, позволяющие проводить выбор места подключения ФКУ на основе алгебраических ДВ и выбор параметров ФКУ на основе геометрических ДВ, а также проводить оценку остаточных значений ВГ токов и напряжений в узле нагрузки. Результаты работы являются развитием теории и методов оценки и анализа несинусоидальных режимов работы СЭС предприятий, создают методическую основу для совершенствования методов выбора параметров ФКУ и нормализации уровней ВГ при наличии распределенных источников искажений.

#### **Практическая значимость работы**

1. Разработан способ оценки гармонического сопротивления сети на основе генерации четных ВГ, основанный на применении тиристорного регулятора мощности, требуемая мощность которого определяется на основе выявленного выражения, учитывающего мощность короткого замыкания, мощность линейной нагрузки, порядок генерируемых гармоник и параметры измерительных устройств.

2. Разработаны способы определения ДВ источников искажений на основе применения пассивного фильтра шунтирующего типа

(ПФ) и активного фильтра параллельного типа (ПАФ), которые позволяют проводить оценку ДВ при скомпенсированных значениях ВГ тока и напряжения.

3. Разработан способ оценки параметров внутренней эквивалентной НН потребителя на основе применения ПФ, позволяющий определять действующее значение ВГ тока эквивалентной НН независимо от наличия внешних источников искажений.

4. Усовершенствована методика выбора параметров пассивного фильтра гармоник, позволяющая оценивать перегрузку фильтра по току с учетом ДВ внешних НН.

5. Усовершенствована методика выбора параметров ПАФ в зависимости от ДВ источников искажений, которая позволяет проводить расчет действующего тока активного фильтра, требуемого для компенсации гармоник тока и напряжения.

6. Предложены практические рекомендации по выбору параметров ФКУ в зависимости от ДВ источников искажений, а также мест их подключения в СЭС нефтегазоконденсатного месторождения в требуемых узлах нагрузки, что позволило нормализовать уровни ВГ тока и напряжения при наличии распределенных НН.

Полученные в диссертации результаты применяются на действующих предприятиях, о чем имеются соответствующие акты внедрения. Результаты работы используются в ПАО «Газпром» (акт о внедрении результатов от 09.04.2026 г. № б/н) при оценке и анализе измеренных показателей КЭ, выявлении узлов и присоединений с наибольшим ДВ, выборе параметров и мест подключения ФКУ; в АО «Газпром промгаз» (акт о внедрении результатов от 09.04.2026 г. № б/н) при разработке проектов по обеспечению электромагнитной совместимости работы оборудования производственных объектов, имеющих в своем составе частотные электроприводы; в ООО «Инженерный центр «Автоматизация ресурсосберегающих технологий» (акт о внедрении результатов от 23.03.2026 г. № б/н) при моделировании и расчетах параметров схемы замещения с целью выбора параметров устройств для повышения КЭ; в ООО «Галосто-3000» (акт о внедрении результатов от 17.03.2026 г. № б/н) при определении ДВ внешних источников искажений и выборе параметров ФКУ. Решением Министерства энергетики Российской Федерации, обозначен-

ным в Протоколе заочного совещания у заместителя Министра энергетики Российской Федерации Е.П. Грабчака о рассмотрении актов внедрения результатов исследования от 09.07.2026 г. № ЕГ-216пр, результаты исследования автора по субъектам внедрения ПАО «Газпром» и АО «Газпром промгаз» признаны актуальными для развития ТЭК и решения задач по повышению качества ЭЭ и энергоэффективности производственных процессов, стоящих перед газовой отраслью, а также рекомендованы к использованию в рамках компетенции в текущей деятельности.

**Методология и методы исследований.** Поставленные задачи решались с применением численных и аналитических методов решения дифференциальных уравнений, методов теории и расчета электрических цепей и систем электроснабжения, теории вероятностей и математической статистики, теории комплексных чисел, математического и компьютерного имитационного моделирования несинусоидальных режимов работы, методов экспериментальных лабораторных и производственных исследований на физических объектах.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанный метод оценки несинусоидальности тока и напряжения в сетях 0,4-10 кВ позволяет проводить отдельную оценку влияния распределенных источников искажений путем определения остаточных значений ВГ с учетом граничных значений соотношений мощности короткого замыкания системы к мощности питающего узла нагрузки трансформатора для определения гармонического сопротивления сети и к мощности нелинейной нагрузки для определения влияния внешних источников искажений.

2. Разработанный метод определения ДВ источников искажений на основе измерения векторов гармонических составляющих тока и напряжения позволяет ранжировать присоединения по уровню алгебраических ДВ при выборе мест подключения ФКУ, проводить оценку прогнозируемых остаточных уровней ВГ тока и напряжения по геометрическим ДВ, а также осуществлять контроль ДВ при скомпенсированных уровнях ВГ тока и напряжения.

3. Разработанный метод выбора средств снижения уровня ВГ в узле нагрузки, учитывающий алгебраические ДВ для выбора места подключения ФКУ и геометрические ДВ для выбора степени компенсации гармоник и номинального тока ФКУ, позволяет нормализовать

несинусоидальность тока и напряжения, определяемую как внешними, так и внутренними источниками искажений, без перегрузок ФКУ и с минимальными капитальными затратами.

4. Методологический подход, включающий взаимосвязанную совокупность разработанных алгоритмов и методов оценки несинусоидальности тока и напряжения в сетях 0,4-10 кВ на основе выявления остаточных значений ВГ тока и напряжения, методов определения ДВ источников искажений с целью выявления мест подключения ФКУ и выбора их параметров с учетом раздельной оценки влияния НН, позволяет нормализовать уровни ВГ и повысить энергоэффективность ЭТК предприятий с распределенными источниками искажений.

**Степень достоверности результатов исследования** основывается на корректном использовании общепризнанных теорий, методов и подходов, адекватных математических моделей рассматриваемых элементов ЭТК. Основные положения работы подтверждены результатами теоретических, лабораторных и промышленных исследований, сходимостью выводов и результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными с использованием сертифицированного и поверенного оборудования, соответствующего требованиям международных стандартов, приборов по измерению показателей КЭ.

**Апробация результатов диссертации** проведена на 10 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 10 международных: Международной конференции «Системные исследования в энергетике-2025 и X Мелентьевские чтения» (08-12 сентября 2025 года, г. Иркутск); IV Международной конференции «Системные исследования в энергетике» (11-15 сентябрь 2023 года, г. Иркутск); VI Международном молодежном научно-практическом форуме «Нефтяная столица» (22-23 марта 2023 года, г. Нижневартовск); XLIV Международной научно-технической конференции «Кибернетика энергетических систем» (08-10 ноября 2022 года, г. Новочеркасск); VIII Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021» (22-23 апреля 2021 года, г. Санкт-Петербург); IV Международной научно-практической кон-

ференции «Управление качеством электрической энергии» (25 декабря 2020 года, г. Москва); VII Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020» (23-24 апреля 2020 года, г. Санкт-Петербург); Международной конференции «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE)» (19-20 November 2019, Saint Petersburg); Международной конференции «International Conference Electric Power Quality and Supply Reliability and Symposium of Electrical Engineering and Mechatronics (PQ and SEEM)» (12-14 June 2019, Tallin); Международной конференции «2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)» (28-30 January 2019, Saint Petersburg).

**Личный вклад автора.** Разработан алгоритм определения гармонического сопротивления сети, включающий методику выбора мощности генератора нехарактерных ВГ (ГНГ). Разработан метод оценки несинусоидальных режимов в сетях 0,4-10 кВ на основе измеренных ВГ в узле нагрузки, который позволяет проводить раздельную оценку влияния внешних и внутренних НН. Разработан обобщенный метод определения ДВ источников искажений, основанный на измерении векторов гармонических составляющих тока и напряжения, позволяющий проводить выбор присоединения с наибольшим алгебраическим ДВ и оценку взаимосвязанных уровней снижения ВГ тока и напряжения по геометрическим ДВ. Разработан метод определения ДВ на основе применения ФКУ. Разработан метод выбора средств снижения уровня ВГ, учитывающий алгебраические ДВ для выбора мест подключения и геометрические ДВ для выбора параметров ФКУ, включающий последовательное применение разработанных способов и методов компенсации ВГ. Разработана методология оценки и нормализации несинусоидальности тока и напряжения с учетом ДВ источников искажений. Проведены аналитические исследования, исследования на основе имитационного моделирования и экспериментальные исследования в лабораторных и промышленных условиях.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 25 печатных работ, в том числе в 6 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 16 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 5 патентов на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка литературы, включающего 292 наименования, и 11 приложений. Диссертация изложена на 315 страницах машинописного текста, содержит 119 рисунков и 54 таблицы.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность научному консультанту - заведующему кафедрой общей электротехники Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II д.т.н., профессору Шклярскому Ярославу Элиевичу за постоянное внимание, всестороннюю поддержку и помощь при выполнении работы. Автор искренне признателен друзьям и коллегам кафедры электроэнергетики и электромеханики, общей электротехники Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за поддержку на всех этапах подготовки диссертации.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость, изложены основные защищаемые положения.

**В первой главе** приведена характеристика научно-технической проблемы обеспечения КЭ и нормализации уровней ВГ в СЭС с распределенными НН. Приведены результаты экспериментальных измерений ВГ на предприятиях разных отраслей промышленности. Проанализированы, систематизированы и классифицированы существующие методы оценки сопротивления системы, ДВ источников искажений и снижения уровня ВГ. Определены и поставлены задачи повышения КЭ на основе выявления ДВ распределенных источников искажений и компенсации их влияния на потребителей.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы оценки уровней ВГ при наличии распределенных НН. Выявлены зависимости ВГ тока источника искажений от мощности короткого замыкания сети, загрузки питающего трансформатора линейной нагрузкой и порядка

ВГ, позволяющие определять мощность устройства для определения гармонического сопротивления сети на основе генерации нехарактерных ВГ. Приведены результаты экспериментальных измерений гармонического сопротивления сети с использованием разработанного способа. Разработан метод оценки несинусоидальности тока и напряжения в сетях 0,4-10 кВ, позволяющий проводить раздельную оценку влияния распределенных НН.

**В третьей главе** разработан обобщенный метод определения ДВ, основанный на измерении векторов ВГ тока и напряжения, позволяющий проводить оценку снижения уровней ВГ при их компенсации. Разработан метод определения ДВ на основе применения ФКУ, который позволяет рассчитывать ДВ НН при скомпенсированных ВГ тока и напряжения. Разработан алгоритм выбора методов оценки ДВ, который содержит последовательный выбор методов в зависимости от алгебраических ДВ источников искажений, оценку остаточных значений ВГ тока и напряжения по геометрическим ДВ и учитывает непрерывную оценку ДВ на этапе эксплуатации ФКУ.

**В четвертой главе** рассматриваются вопросы влияния ДВ источников искажений на функционирование средств снижения ВГ. Усовершенствована методика выбора параметров ПФ, позволяющая оценивать перегрузку фильтра по току с учетом ДВ внешнего источника искажений. Установлены зависимости ВГ тока и напряжения потребителя от параметров питающей сети и ДВ источников искажений, позволяющие проводить выбор параметров ПАФ. Усовершенствована методика выбора параметров ПАФ в зависимости от ДВ источников искажений, которая позволяет проводить расчет действующего тока ПАФ, требуемого для компенсации ВГ тока и напряжения. Разработан метод выбора средств снижения ВГ, учитывающий алгебраические ДВ для выбора мест подключения и геометрические ДВ для выбора параметров ФКУ, включающий последовательное применение разработанных способов и методов.

**В пятой главе** разработана методология оценки и нормализации несинусоидальности тока и напряжения, которая основана на комплексном применении методов оценки ВГ тока и напряжения при наличии внешних НН, методов выявления ДВ распределенных источников искажений и компенсации их влияния на потребителей.

**В заключении** отражены обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решаемыми задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Разработанный метод оценки несинусоидальности тока и напряжения в сетях 0,4-10 кВ позволяет проводить отдельную оценку влияния распределенных источников искажений путем определения остаточных значений ВГ с учетом граничных значений соотношений мощности короткого замыкания системы к мощности питающего узла нагрузки трансформатора для определения гармонического сопротивления сети и к мощности нелинейной нагрузки для определения влияния внешних источников искажений.**

В современных ЭТК полупроводниковые преобразователи распространены как со стороны нагрузки потребителей, так и со стороны источников электроэнергии. Распределенные источники искажений, подключенные в различных точках сети во внутренней СЭС предприятия, могут также рассматриваться как внешние по отношению друг к другу (рисунок 1). Следует определить некоторые термины, часто применяющиеся в дальнейшем: внутренняя линейная/нелинейная нагрузка потребителя (ЛН1/НН1, ЛН0/НН0) – линейная/нелинейная нагрузка, подключаемая во внутренней СЭС предприятия в рассматриваемом узле нагрузки; внешняя НН потребителя (НН1) – НН, подключаемая во внешнем узле нагрузки потребителя; узел нагрузки - точка СЭС, в которой подключается рассматриваемая электроустановка (точка с индексом «0» на схеме); внешний узел нагрузки - точка СЭС, электрически ближайшая к рассматриваемой электроустановке, к которой присоединены другие нагрузки, и расположенная «выше по течению» от рассматриваемой электроустановки (точка с индексом «1» на схеме); внешняя НН сторонних потребителей (НН2) - НН, подключаемая во внешней СЭС предприятия.

Наличие распределенных НН в СЭС предприятия представляет сложности при оценке уровней ВГ. При этом важно осуществить следующие этапы: оценить сопротивление энергосистемы на частотах ВГ; оценить влияние внешней НН на ВГ напряжения в узле нагрузки; провести измерения ВГ напряжения и тока вводного присоединения узла нагрузки; на основе измеренных данных определить

параметры внешней НН, оказывающей влияние на уровень ВГ в узле нагрузки; на основе измеренных данных провести первичную оценку снижения уровней ВГ напряжения и тока с учетом наличия внешних источников искажений при внедрении ФКУ.

Одним из основных параметров, влияющих на показатели КЭ, является сопротивление энергосистемы. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) источников электроэнергии на базе возобновляемых источников зависят от параметров преобразователей, типа их системы управления, а также параметров выходных фильтров. Определение их сопротивления на частотах ВГ в настоящее время затруднено. С точки зрения ЭТК потребителя, параметры внешней НН сторонних потребителей вообще могут быть недоступны и неизвестны. В таких условиях параметры схемы замещения для отдельной оценки уровней ВГ необходимо определять с применением измеренных данных. На основе сравнительного анализа были определены преимущества и недостатки существующих методов определения гармонического сопротивления системы. Было выявлено, что наилучшим по точности является метод, основанный на применении ГНГ. Были выявлены основные факторы, влияющие на оценку гармонического сопротивления сети таким методом: ВГ напряжения питающей сети, параметры ЛН и НН потребителя, мощность ГНГ.

ВГ напряжения питающей сети на нехарактерных для нее частотах являются небольшими по величине, и их можно учесть в расчетах путем применения метода активных двухполосников для двух последовательных измерений ВГ. Для исключения влияния параметров внутренней НН предложен перенос измерительных цепей трансформаторов тока на вводное присоединение узла нагрузки. Вследствие этого необходимо учесть влияние параметров внутренней ЛН, так как ток ГНГ через вводное присоединение снижается вследствие переноса измерительных цепей. Известно, что асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АД) составляют основную часть ЛН на предприятиях. На основе экспериментальных исследований в лабораторных условиях было выявлено, что параметры АД на частотах ВГ определяются исходя из параметров цепи короткого замыкания, а сопротивление АД на ВГ не зависит от загрузки на валу.

Рассмотрим упрощенную однолинейную схему (рисунок 2а) и схему замещения (рисунок 2б), позволяющую оценить требуемую

мощность ГНГ для определения гармонического сопротивления сети. Были приняты следующие допущения: не учитываются активные сопротивления АД и сети; НН представляется идеальным источником тока; ЛН представлена АД. Было выявлено выражение (1), позволяющее оценивать минимальную мощность (ток) ГНГ (по условию минимального диапазона измерения ВГ напряжения и погрешности измерительного прибора) для определения гармонического сопротивления системы в зависимости от мощности короткого замыкания сети  $S_{КЗ}$  (ВА) и загрузки  $\beta$  трансформатора Т линейной нагрузкой ( $\beta = S_{АД}/S_T$ ):

$$I_{ГНГh\min} = k_{изм} \cdot \frac{k_{П} \cdot \beta \cdot S_T + S_{КЗ}}{h \cdot U_{ном}},$$

$$S_{ГНГ\min} = k_{изм} \cdot (k_{П} \cdot \beta \cdot S_T + S_{КЗ}) \cdot \sqrt{3 \cdot \sum_{i=2}^n \left(\frac{1}{h_i}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $k_{П}$  – пусковой коэффициент АД по току;  $U_{ном}$  – номинальное напряжение сети, В;  $h$  – порядок нехарактерной гармоники;  $k_{изм}$  – коэффициент, учитывающий погрешность прибора на ВГ;  $S_T$  – мощность трансформатора, ВА;  $n$  – количество нехарактерных гармоник.

Был разработан способ, реализующий рассматриваемый метод, который основан на подключении к сети тиристорного регулятора мощности (ТРМ) без нулевого провода, создающего четные и нечетные ВГ тока. Для проверки способа был проведен эксперимент на лабораторном стенде, ТРМ работал в фазовом режиме управления (загрузка изменялась от 0 до 70 %). Измеренные значения ВГ представлены на рисунке 3. В качестве сопротивления системы были смонтированы катушки индуктивности с воздушным сердечником, сопротивление которых на частоте 5-й гармоники определялось с помощью поверенного программируемого источника напряжения АКПП-1202/3. Была проведена оценка статистических показателей измеренных величин и подтверждена эффективность предложенного выражения (1). Также по результатам измерений было выявлено, что сопротивление сети на частотах ВГ определяется с полной погрешностью не более 10 % при соотношении  $S_{КЗ}/S_{ТРМ} \leq 150$ .

В результате был разработан алгоритм определения гармонического сопротивления сети, включающий выбор мощности ГНГ, точечное подключение измерительных токовых цепей и варьирование

мощности ГНГ с целью контроля влияния внешних НН. Для проверки работоспособности предложенного алгоритма был проведен ряд натурных экспериментов (в учебном корпусе и на предприятии, где источником была автономная и централизованная энергосистема). Были получены значения сопротивления системы на частотах ВГ, которые совпали с расчетными с погрешностью не более 10 %, что свидетельствует об эффективности предложенных решений.

Разработанный алгоритм учитывает расчетное определение сопротивления сети на частотах ВГ при соотношении сопротивления системы к сопротивлению питающего трансформатора менее 10 %, чему соответствует значение  $K_{КЗ} = S_{КЗ0}/S_T$  более 9 и 18 для трансформаторов 110/10 кВ и 10/0,4 кВ соответственно. Данные значения получены аналитическим путем на основе составления схемы замещения на частотах ВГ (рисунок 4), исходя из условия не превышения 10 % погрешности определения ВГ напряжения в узле нагрузки потребителя (с учетом допущений, указанных выше). Также аналитически было определено граничное значение соотношения мощности короткого замыкания системы к мощности внешней НН ( $K_{НН1} = S_{КЗ1}/S_{НН1}$ ), при превышении которого внешняя НН не оказывает влияния на рассматриваемую электроустановку. При этом справедливым представляется условие не превышения 10 % от нормативного значения  $K_{Ун}$  в узле нагрузки при отключенной НН рассматриваемой электроустановки (так как при ее подключении такое значение будет ниже вследствие шунтирующего эффекта ЛН и взаимной частичной компенсации ВГ от внешней и внутренней НН). Таким образом, было выявлено, что для сетей напряжением 10 кВ при  $K_{НН1} \geq 350$ , а для сетей напряжением 0,4 кВ при  $K_{НН1} \geq 250$ , внешняя НН не оказывает влияния на рассматриваемую электроустановку.

С учетом полученных результатов был разработан метод оценки уровней ВГ в сетях 0,4-10 кВ. Блок-схема алгоритма применения разработанного метода представлена на рисунке 5. На основании измеренных данных на частотах ВГ, значения которых превышают нормативные пределы, необходимо на каждой из таких частот составить обобщенную схему замещения (рисунок 5). По выражениям, представленным в блоке расчета, можно определить:

- комплексное сопротивление системы на частотах ВГ ( $Z_{Sh}$ ),
- комплексное сопротивление потребителя на частотах ВГ ( $Z_{Пн}$ ) для

оценки резонансных явлений по АЧХ сети и АЧХ системы, также для определения ВГ напряжения внешних НН ( $U_{Sh}$ );

- $U_{Sh}$  для оценки перегрузки ПФ, ДВ и параметров ПАФ;
- ВГ напряжения и тока в узле нагрузки ( $U_{0h}$ ,  $I_{0h}$ ) для оценки

ВГ напряжения внешней НН и остаточных значений ВГ тока и напряжения. Под остаточными ВГ тока и напряжения подразумеваются такие значения ВГ тока и напряжения, которые остаются нескомпенсированными при потенциальном исключении влияния НН или подключения ФКУ в узле нагрузки, что важно при наличии внешних НН.

Для пояснения принципа определения остаточных значений ВГ тока и напряжения в узле нагрузки с целью упрощения анализа используются допущения: НН представляется идеальным источником тока; ПАФ и активный фильтр последовательного типа (ПСАФ) представляются, соответственно, идеальным источником тока и источником напряжения с компенсируемыми параметрами, равными значениям ВГ тока и напряжения внутренних и внешних НН; конденсаторные батареи (КБ) рассматриваются при наличии защитных антигармонических дросселей. При определении остаточных значений ВГ тока и напряжения рассматриваются следующие ФКУ: ПАФ с компенсацией ВГ тока, ПАФ с компенсацией ВГ напряжения, ПСАФ, ПФ. Рассмотрим схему, представленную на рисунке 5 с учетом установки ПАФ с компенсацией ВГ тока ( $I_{ПАФh}$ ). Остаточные значения ВГ тока ( $I_{0h\_ост}$ ) и напряжения ( $U_{0h\_ост}$ ) определяются по выражению (2):

$$U_{0h\_ост} = U_{Sh} \cdot Z_{Пh} / (Z_{Пh} + Z_{Sh}), I_{0h\_ост} = U_{Sh} / (Z_{Пh} + Z_{Sh}), I_{ПАФh} = -I_h. \quad (2)$$

Целесообразно рассматривать случаи, при которых остаточные значения ВГ тока и напряжения принимают наихудшие значения (3), что характерно для минимальных мощностей ЛН. Тогда (3):

$$U_{0h\_ост} \approx U_{Sh}, I_{0h\_ост} \approx U_{Sh} / Z_{Пh}. \quad (3)$$

В рассмотренном случае при компенсации ВГ тока с помощью ПАФ остаются нескомпенсированными ВГ напряжения внешней НН, а также ВГ тока, которые определяются параметрами внешней и внутренней нагрузки. При этом ВГ тока принимают небольшие значения, а при отсутствии ЛН равны нулю.

Аналогично можно определить остаточные ВГ тока и напряжения для других ФКУ. При установке ПАФ с компенсацией ВГ напряжения в узле нагрузки остаются нескомпенсированными ВГ тока, которые определяются параметрами внешней НН и сети. При

установке ПСАФ в узле нагрузки остаются некомпенсированными ВГ тока, которые определяются параметрами внутренней НН. При установке ПФ остаются некомпенсированными ВГ тока, которые определяются параметрами внешней НН и сети.

Таким образом, был разработан метод оценки несинусоидальности тока и напряжения в сетях 0,4-10 кВ, который позволяет проводить раздельную оценку влияния распределенных НН путем определения остаточных значений ВГ тока и напряжения в зависимости от типа ФКУ с учетом граничных значений соотношения мощности короткого замыкания системы к мощности питающего узла нагрузки трансформатора для определения гармонического сопротивления сети и соотношения мощности короткого замыкания системы к мощности НН, подключенной к внешнему узлу нагрузки.

**2. Разработанный метод определения ДВ источников искажений на основе измерения векторов гармонических составляющих тока и напряжения позволяет ранжировать присоединения по уровню алгебраических ДВ при выборе мест подключения ФКУ, проводить оценку прогнозируемых остаточных уровней ВГ тока и напряжения по геометрическим ДВ, а также осуществлять контроль ДВ при скомпенсированных уровнях ВГ тока и напряжения.**

При наличии распределённых источников искажений необходимо проводить оценку их ДВ по току и напряжению, причем не только с точки зрения выявления виновника нарушений и начисления штрафов, но и с точки зрения выбора параметров ФКУ. Были определены основные существующие методы оценки ДВ: метод, основанный на ГОСТ 61000-3-6–2020 (IEC); метод активных двухполюсников с применением источников тока (HVM); метод, основанный на измерении векторов ВГ тока (НСМ); метод, основанный на измерении активной мощности ВГ (АРМ). Для их сравнения был проведен эксперимент в лабораторных условиях. Схема стенда представлена на рисунке 6, где отключен неуправляемый выпрямитель (НВ). Параметры оборудования стенда представлены в таблице 1.

Для различных режимов работы стенда и подключаемых нагрузок (при отсутствии внешних искажений - режим 1 (ПФ и КБ отключены), режим 2 (ПФ отключен), режим 3 (вся нагрузка вклю-

чена); при наличии внешних искажений - режим 4 (ПФ и КБ отключены), режим 5 (ПФ отключен), режим 6 (вся нагрузка включена)) были определены ДВ всех присоединений и проведено сравнение относительно расчетного метода, при котором параметры стенда и нагрузки были определены на частоте 5-й гармоники с помощью поверенного программируемого источника напряжения АКПП-1202/3. Для наглядности были приняты границы для абсолютных погрешностей. Например, если модуль абсолютной погрешности ДВ находится в пределах от 0 до 10 %, то значение погрешности на графике отображается как 10 % (рисунок 7).

На основе сравнительного анализа были определены положительные и отрицательные стороны существующих методов определения ДВ. Было выявлено, что метод ИЕС имеет большие погрешности при простоте расчета (при известном сопротивлении системы точность повышается); метод НСМ не позволяет оценить ДВ внешнего источника, имеет большие погрешности при небольших ВГ тока вводного присоединения; метод АРМ не позволяет оценить ДВ внешних НН и потребителя в процентном соотношении, а при наличии внешних искажений выявлены положительные значения активной мощности ВГ для НН; метод НВМ для режимов с ФКУ (режимы 3 и 6) показал, что даже в случае компенсации ВГ внутреннего источника ДВ распределяются в пропорции 55 и 45 %, что при выборе параметров ФКУ не является информативным показателем. То же самое относится и к мероприятию по снижению ВГ за счет увеличения мощности ЛН. Суммируя положительные особенности каждого метода, был разработан обобщенный метод векторов ВГ тока и напряжения, принцип которого поясняется на рисунке 8.

Исходя из второго закона Кирхгофа, можно записать (4):

$$\underline{U}_{0h} = \underline{U}_{Sh} + \underline{I}_{1Пh} \cdot \underline{Z}_{Sh} + \underline{I}_{2Пh} \cdot \underline{Z}_{Sh}, \quad \underline{I}_{0h} = \underline{I}_{1Пh} + \underline{I}_{2Пh}, \quad (4)$$

где  $\underline{I}_{iПh}$  – ВГ тока  $i$ -го потребителя, А.

Данное уравнение является основой для определения ДВ, в котором  $\underline{U}_{Sh}$  определяет ДВ внешних НН, а  $\underline{I}_{0h} \cdot \underline{Z}_{Sh}$  – ДВ внутренних НН. Также можно сделать вывод о том, что при наличии ФКУ у второго потребителя его вклад значительно снижается, что справедливо и при увеличении мощности ЛН у второго потребителя. Следует отметить, что при компенсации влияния первого и второго потребителя, например, с помощью ПАФ ( $\underline{I}_{0h} = 0$ ) остается только влияние

внешних НН  $\underline{U}_{Sh}$ . Аналогично при компенсации влияния внешних НН ( $\underline{U}_{Sh} = 0$ ) остается только влияние внутренних НН  $\underline{I}_{0h} \cdot Z_{Sh} = \Delta \underline{U}_{0h}$ .

ДВ источников искажений определяются по выражению (5):

$$\begin{aligned} D_{U_{Sh}} &= 1 - I_{0h} \cdot Z_{Sh} \cdot \cos(\psi_{U_{0h}} - \psi_{\Delta U_{0h}}), \\ D_{I_{iPh}} &= I_{iPh} / I_{0h} \cdot \cos(\psi_{I_{0h}} - \psi_{I_{iPh}}), \\ D_{U_{iPh}} &= D_{I_{iPh}} \cdot \cos(\psi_{U_{0h}} - \psi_{\Delta U_{0h}}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $D_{U_{Sh}}$  – ДВ системы в ВГ напряжения в узле нагрузки;  $D_{U_{iPh}}$  – ДВ  $i$ -го потребителя в ВГ напряжения в узле нагрузки;  $D_{I_{iPh}}$  – ДВ  $i$ -го потребителя в ВГ тока в узле нагрузки.

Анализируя векторную диаграмму ВГ тока и напряжения (рисунок 8), можно отметить наличие ДВ, которые следует разграничивать между собой. Это ДВ, основанный на проекциях ВГ токов и напряжений (алгебраический ДВ), и ДВ, основанный на векторах ВГ токов и напряжений (геометрический ДВ). Причем алгебраический ДВ позволяет выявить место подключения ФКУ для компенсации влияния потребителя с наибольшим вкладом в суммарный ток и напряжение на частоте ВГ. Такой подход учитывает компенсирующее воздействие потребителей, которые могут снижать уровень ВГ в узле нагрузки, а также отсутствие влияния потребителей на суммарные показатели (ДВ равен нулю при ненулевой длине вектора). Геометрический ДВ необходим для выбора параметров ФКУ (номинальный ток, степень компенсации), так как через их цепи при подключении могут протекать токи со значениями ВГ, равными амплитуде векторов на диаграмме. На основе геометрического ДВ также определяются остаточные значения ВГ при исключении влияния нагрузки одного из присоединений. Такой анализ может проводиться для случаев, которые можно охарактеризовать диаграммами на рисунке 9: наличие только внутренних НН (рисунок 9а); комбинированное возникновение искажений (рисунок 9б); наличие только внешних НН (рисунок 9в).

Рассмотрим случай на рисунке 9а. При этом ВГ напряжения в узле нагрузки определяются ВГ тока вводного присоединения узла нагрузки (ДВ по напряжению и току пропорциональны). При исключении влияния третьего присоединения ВГ вводного тока снизятся, при этом алгебраический ДВ  $D_{I_{3Ph}}$  не отражает степень снижения ВГ вводного тока (рисунок 9г), что определяется по выражению (6) с использованием геометрического ДВ  $I_{3Ph}$ :

$$\underline{I}_{0h} = \underline{I}_{0h} - \underline{I}_{3Пн}. \quad (6)$$

В рассматриваемом случае одновременно со снижением длины вектора  $\underline{I}_{0h}$  снижается и длина вектора  $\underline{U}_{0h}$ , что приводит к снижению векторов ВГ тока ЛН. Чтобы учесть данный момент, был введен коэффициент  $K_{\delta I}$ , который определяется по выражению (7). Так как в рассматриваемом случае пропорционально снижению ВГ тока снижаются ВГ напряжения в узле нагрузки, то (7):

$$K_{\delta I} = K_{\delta U} = \underline{I}'_{0h} / \underline{I}_{0h}. \quad (7)$$

Тогда уточненное значение ВГ тока вводного присоединения определяется по выражению (8):

$$\underline{I}''_{0h} = \underline{I}_{1Пн} \cdot K_{\delta I} + \underline{I}_{2Пн}. \quad (8)$$

Так как значения токов и их фаз отходящих присоединений могут быть измерены, то можно оценить остаточные значения ВГ при исключении влияния НН третьего присоединения. Аналогичный подход применяется и при наличии внешних НН. На основе имитационного моделирования СЭС предприятия с внешними НН была определена погрешность оценки ВГ в узле нагрузки при отключении одного из присоединений с НН, которая составила около 7 %, что свидетельствует об эффективности данного подхода.

Сравнение различных методов оценки ДВ НН также показало, что погрешность всех методов значительно увеличивается при наличии подключенных ФКУ, так как значения ВГ в узле нагрузки при этом значительно снижаются. При наличии подключенных ФКУ также может иметь место увеличение ДВ источников ВГ при модернизации, реконструкции и изменении режимов работы ЭТК. Поэтому необходима оценка ДВ при эксплуатации ФКУ. С этой целью был разработан метод оценки ДВ на основе применения ФКУ. Суть данного метода заключается в том, что через цепи пассивных и активных ФКУ протекают эквивалентные токи НН, которые совместно с измеренными ВГ тока присоединений позволяют проводить оценку ДВ.

Был разработан способ на основе применения ПФ, реализующий указанный метод. Принцип его работы можно проиллюстрировать на схеме, представленной на рисунке 8а. Рассмотрим случай отсутствия  $U_{sh}$ . Исходя из метода активных двухполосников, для второго потребителя справедливо выражение (9):

$$\underline{U}_{2h} / \underline{U}_{0h} = 1 / (1 + \underline{I}_{1h} / \underline{I}_{2h}) = \underline{I}_{2h} / (\underline{I}_{1h} + \underline{I}_{2h}) = \underline{I}_{2h} / \underline{I}_{0h}. \quad (9)$$

Аналогично определяется соотношение для первого потребителя. Учитывая, что при подключении в узле нагрузки ПФ ВГ токов всех НН будут протекать по цепи ПФ с  $Z_{ФКУh}$  и цепи с  $Z_{sh}$ , можно записать (10):

$$\begin{aligned} D_{1Пh} &= I_{1h}/|I_{1h} + I_{2h}| = I_{1Пh}/|I_{0h} + I_{ФКУh}|, \\ D_{2Пh} &= I_{2h}/|I_{1h} + I_{2h}| = I_{2Пh}/|I_{0h} + I_{ФКУh}|, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $D_{iПh}$  – геометрический ДВ  $i$ -го потребителя в ВГ тока/напряжения в узле нагрузки;  $I_{ФКУh}$  – ВГ тока ФКУ на фильтруемой частоте.

При наличии  $U_{sh}$  в схеме на рисунке 8а ВГ тока внешней НН будет проходить по цепи с  $Z_{sh}$  и цепи с ПФ в одном направлении. При определении результирующих значений ВГ эти составляющие будут взаимоисключаться и не будут оказывать влияния на определение ДВ внутренних НН. При определении значений ВГ эквивалентного тока НН с помощью ПФ имеет место некоторая погрешность, связанная с сопротивлением параллельных нагрузок. В лабораторных условиях были проведены эксперименты по оценке погрешности определения ВГ эквивалентного тока на 5 и 7-й гармонике при различных сопротивлениях питающей сети и ПФ, которые показали, что погрешность не превышает 5 % при условии  $Z_{\SigmaПh}/Z_{ФКУh} \geq 20$  на частоте фильтруемой ВГ.

Также был разработан способ на основе подключения ПАФ. ПАФ может работать в режиме компенсации гармоник тока (КГТ), когда он компенсирует ВГ тока параллельно подключенной НН, так и в режиме компенсации гармоник напряжения (КГН), когда ПАФ создает такие ВГ тока, которые компенсируют ВГ напряжения внешней НН.

При КГТ с помощью ПАФ в узле нагрузки остается ВГ напряжения питающей сети ( $U_{0h\_КГТ}$ ), геометрический ДВ по напряжению определяется по выражению (11):

$$D_{Sh} = U_{0h\_КГТ}/U_{0h}. \quad (11)$$

При КГН с помощью ПАФ в узле нагрузки остаются ВГ тока, равные сумме ВГ токов НН потребителей, тогда геометрический ДВ по току определяется по выражению (12):

$$\begin{aligned} D_{1Пh} &= I_{1Пh}/I_{\Sigma h\_КГН}, \quad D_{2Пh} = I_{2Пh}/I_{\Sigma h\_КГН}, \\ I_{\Sigma h\_КГН} &= I_{0h} - I_{ПАФh\_КГН}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $I_{ПАФh}$  – ВГ тока ПАФ, А;  $I_{\Sigma h\_КГН}$  – ВГ тока внутренних НН при КГН, А.

Алгебраический ДВ определяется с учетом углов сдвига фаз между векторами ВГ тока и напряжения. Подтверждение работоспособности способа определения ДВ проводилось в лабораторных условиях с применением ПАФ с КГТ и КГН. Суммируя представленные результаты, был разработан алгоритм выбора и применения методов оценки ДВ, блок-схема которого представлена на рисунке 10. Разработанный алгоритм учитывает предварительную оценку влияния внешней НН по критерию  $K_{НН1}$ . Для сетей напряжением 0,4 кВ  $K_{НН1\min} = 250$ , для сетей напряжением 10 кВ  $K_{НН1\min} = 350$ . Алгоритм содержит последовательный выбор методов в зависимости от алгебраических ДВ распределенных источников искажений, оценку остаточных значений ВГ тока и напряжения по геометрическим ДВ и учитывает непрерывную оценку ДВ на этапе эксплуатации ФКУ.

**3. Разработанный метод выбора средств снижения уровня ВГ в узле нагрузки, учитывающий алгебраические ДВ для выбора места подключения ФКУ и геометрические ДВ для выбора степени компенсации гармоник и номинального тока ФКУ, позволяет нормализовать несинусоидальность тока и напряжения, определяемую как внешними, так и внутренними источниками искажений, без перегрузок ФКУ и с минимальными капитальными затратами.**

В связи с широким распространением распределенных НН задачу по снижению уровня ВГ до допустимых значений по току и напряжению необходимо решать с учетом ДВ, а существующие подходы необходимо совершенствовать. В настоящее время существуют способы и устройства снижения ВГ, в том числе пассивные, активные и гибридные ФКУ. Однако при наличии распределенных НН затруднен их выбор и оценка параметров без определения ДВ. Так, при наличии внешних искажений установка ПАФ малоэффективна и даже приводит к ухудшению показателей КЭ. Разделение на внешние и внутренние искажения необходимо при варьировании сопротивления питающей сети. При внутренних искажениях установка ПСАФ не снизит ВГ тока в сети.

Рассмотрим способ, основанный на варьировании параметров питающей сети. На основе имитационного моделирования были построены зависимости ВГ напряжения на зажимах КБ потребителя в

зависимости от ДВ источников искажений (рисунок 11). КБ рассматривалась в комплекте с антигармоническим реактором, так как при наличии ВГ их работа без реактора затруднена. Из графика следует, что при доминирующем влиянии внешней НН (алгебраический ДВ более 95 %) необходимо увеличивать сопротивление питающей сети, а при доминирующем влиянии внутренних НН – уменьшать. При промежуточных значениях ДВ оценка степени изменения ВГ напряжения питающей сети затруднена.

ДВ внешних НН влияет на работоспособность и дополнительную нагрузку ПФ. Для оценки такого параметра рассмотрим упрощенную схему замещения (рисунок 12), где  $X_{дв}$ ,  $X_{тн}$ ,  $X_{пфн}$  – индуктивное сопротивление двигателя, трансформатора, ПФ на частоте ВГ, Ом;  $I_{sh}$ ,  $I_{пфн}$  – ВГ тока внешней НН и ПФ на фильтруемой частоте, А. Были приняты следующие допущения: не учитываются параметры нагрузки на ВГ, подключенной параллельно ПФ (на частоте настройки); сопротивление системы и трансформатора приняты индуктивными; не учитывается активное сопротивление ПФ.

Было определено, что на дополнительную нагрузку ПФ влияют мощность внешней НН, мощность короткого замыкания в заданной точке, параметры ПФ. В результате были получены аналитические выражения, позволяющие проводить оценку дополнительной нагрузки ПФ с учетом составляющей ВГ тока внешних НН. По выражению (13) можно вычислять дополнительную нагрузку, если известны ВГ тока внешнего источника  $I_{sh}$  (например, в сети собственного предприятия):

$$I_{пфн} = \frac{I_{sh}}{k_{кз} + \frac{a \cdot S_{кз1}}{h^2 \cdot Q_{пф}}}, a = \left( \frac{1}{f_r^2} - 1 \right), k_{кз} = \frac{S_{кз1}}{S_{кз0}}, \quad (13)$$

где  $f_r$  – расстройка ПФ (например, при 5 % расстройке  $f_r = 0,95$ );  $S_{кз}$  – мощность короткого замыкания в заданной точке, кВА;  $Q_{пф}$  – реактивная мощность ПФ на основной частоте, вар.

По выражению (14) можно вычислять дополнительную нагрузку при наличии данных о геометрическом ДВ, который определяется напряжением внешних НН  $U_{sh}$ :

$$I_{пфн} = \frac{h \cdot U_{sh}}{U_{ном}^2 \cdot \left( \frac{h^2}{S_{кз0}} + \frac{a}{Q_{пф}} \right)}. \quad (14)$$

Верификация выражения (14) проводилась путем сравнения расчетных значений с результатами моделирования. Погрешность оценки дополнительной загрузки ПФ с учетом ВГ тока внешних НН относительно полученных ВГ тока модели не превышает 5 %. Таким образом, существующие методики по выбору параметров ПФ могут быть усовершенствованы с учетом предложенных выражений.

При применении ПАФ также важно проводить оценку ДВ в несинусоидальность тока и напряжения с целью корректного выбора параметров ФКУ. Рассмотрим упрощенную схему замещения в виде активных двухполюсников, представленную на рисунке 13, где  $Z_h$  – комплексное сопротивление ЛН;  $I_{Zh}$  – ВГ тока ЛН.

На основе представленной схемы замещения были получены зависимости ВГ тока и напряжения от геометрического ДВ внешних НН, позволяющие проводить оценку параметров ПАФ в случае КГН и КГТ (рисунок 14). Было выявлено, что при наличии внешних искажений ПАФ с КГТ не может скомпенсировать ВГ напряжения, что подтверждают значения красной пунктирной линии. ПАФ с КГН в этом режиме позволяет снизить ВГ напряжения, однако возрастают ВГ тока в питающем присоединении, что подтверждают значения черной пунктирной линии. При наличии лишь внутренних искажений КГТ и КГН показывают схожие результаты.

Выбор параметров ПАФ в зависимости от геометрических ДВ НН осуществляется на основе оценки остаточных ВГ тока и напряжения в узле нагрузки. Были получены аналитические выражения (15), позволяющие проводить оценку остаточных ВГ тока при реализации функции КГН и соответствующих ВГ тока ПАФ:

$$I_{\text{ПАФ\_КГН}} = \sqrt{\sum_{h=2}^n \left( I_{\text{НН}h} + \frac{U_{Sh}}{Z_{Sh}} \right)^2}, I_{0h\_ост} = \frac{U_{Sh}}{Z_{Sh}}. \quad (15)$$

Также были получены аналитические выражения (16), позволяющие проводить оценку остаточных ВГ напряжения при реализации функции КГТ и соответствующих ВГ тока ПАФ:

$$I_{\text{ПАФ\_КГТ}} = \sqrt{\sum_{h=2}^n I_{\text{НН}h}^2}, U_{0h\_ост} = U_{Sh}. \quad (16)$$

В результате был разработан метод выбора средств снижения ВГ (рисунок 15), который включает последовательное применение способов и средств снижения ВГ в зависимости от алгебраических

ДВ источников искажений: варьирование параметров питающей сети и подключение реакторов, установку ПФ, установку ПАФ с КГТ и КГН, установку ПСАФ. Исходя из алгебраических ДВ в узле нагрузки намечаются несколько направлений дальнейших действий.

При доминирующем вкладе внутренних НН ( $D_{\text{пв}} \geq 95\%$ ) последовательность выбора средств снижения ВГ следующая: применение способов снижения сопротивления системы; применение ПФ с учетом существующего уровня компенсации реактивной мощности; применение ПАФ с КГТ. Компенсацию ВГ тока необходимо проводить в первую очередь на присоединении с наибольшим алгебраическим ДВ по току. В данном случае можно применять метод векторов тока, так как внешние НН отсутствуют. Номинальный ток и степень компенсации ФКУ выбираются на основе выявленного подхода с учетом геометрических ДВ и остаточных значений ВГ тока и напряжения. В случае неудовлетворительных результатов следует осуществлять компенсацию ВГ тока на следующем присоединении с учетом значений алгебраических ДВ либо осуществлять групповую компенсацию ВГ тока для нормализации уровней ВГ в узле нагрузки.

При доминирующем вкладе внешней НН ( $D_{\text{ш}} \geq 95\%$ ) последовательность выбора средств снижения ВГ следующая: применение способов увеличения сопротивления системы; применение ПФ с учетом уровня ВГ внешних НН; применение ПАФ с КГН. В данном случае нормализацию уровней ВГ следует проводить на вводном присоединении узла нагрузки (так как отсутствуют внутренние НН) либо в узле нагрузки с подключенным чувствительным оборудованием к сниженному КЭ. При установке ПФ в рассматриваемом узле нагрузки снижаются ВГ напряжения на настроенной частоте фильтра, параметры ПФ определяются геометрическим ДВ внешних НН. Такой ДВ будет определять ток, проходящий через фильтр, и его компенсирующую способность на основной частоте. При установке ПФ необходимо проводить оценку остаточного ВГ тока вводного присоединения, значение которого будет определяться геометрическим ДВ внешних НН и может превышать установленные ГОСТ пределы. При неудовлетворительных результатах применения ПФ следует применять ПАФ с КГН, параметры которого определяются исходя из геометрического ДВ внешних НН с учетом варьируемого сопротивления питающей сети.

При промежуточных значениях алгебраических ДВ по напряжению в узле нагрузки необходимо определить предварительные остаточные значения ВГ тока и напряжения при подключении ФКУ. Если при компенсации ВГ тока остаточное значение ВГ напряжения в узле нагрузки не превышает допустимые значения, то необходимо применять устройства, снижающие ВГ тока. При этом присоединение с наибольшим алгебраическим ДВ необходимо определять по обобщенному методу векторов тока и напряжения на частотах ВГ и далее следовать алгоритму, направленному на снижение ВГ тока. Если при компенсации ВГ тока остаточное значение ВГ напряжения в узле нагрузки превышает допустимые значения, то необходимо провести оценку остаточных значений ВГ тока в узле нагрузки при компенсации ВГ напряжения. Если такое значение тока не превышает допустимые значения, то применятся устройства снижения ВГ напряжения. В противном случае необходимо применять комбинацию из ПАФ с КГТ, ПФ и при необходимости ПСАФ, параметры которых можно определить исходя из остаточных значений ВГ тока и напряжения с учетом геометрических ДВ.

**4. Методологический подход, включающий взаимосвязанную совокупность разработанных алгоритмов и методов оценки несинусоидальности тока и напряжения в сетях 0,4-10 кВ на основе выявления остаточных значений ВГ тока и напряжения, методов определения ДВ источников искажений с целью выявления мест подключения ФКУ и выбора их параметров с учетом раздельной оценки влияния НН, позволяет нормализовать уровни ВГ и повысить энергоэффективность ЭТК предприятий с распределенными источниками искажений.**

Методология оценки и нормализации несинусоидальности тока и напряжения в сетях 0,4-10 кВ основана на комплексном применении методов оценки ВГ тока и напряжения при наличии внешних НН, методов выявления ДВ распределенных источников искажений и компенсации их влияния на потребителей. Структурная схема, объединяющая указанные элементы методологии, представлена на рисунке 16. Блок-схема, отражающая последовательность применения систематизированной совокупности методов, способов, алгоритмов и методик, представлена на рисунке 17. Применение методоло-

гии осуществляется на примере СЭС нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) с ограниченной мощностью источников электроэнергии. На рассматриваемом объекте уровень ВГ по многим подстанциям газовых промыслов выходит за нормативные пределы как в низковольтных сетях, так и в сетях среднего напряжения. При этом каждая из подстанций является внешней по отношению к другой.

Укрупненная однолинейная схема НГКМ представлена на рисунке 18. СЭС НГКМ автономная с установленной мощностью генераторов 85 МВт. Основной НН являются преобразователи частоты аппаратов воздушного охлаждения газа. На основании однолинейной схемы была разработана имитационная модель в Simulink MatLab, адекватность которой проверялась по реальным измеренным данным показателей КЭ на газовых промыслах. Рассмотрим этапы применения методологии.

Этап 1. Применение метода оценки несинусоидальности тока и напряжения при наличии распределенных НН. Так как на электростанции собственных нужд отсутствуют внешние НН, то можно применить метод векторов тока для определения присоединения с наибольшим алгебраическим ДВ. Было выявлено, что алгебраический ДВ присоединения ПС2 в несинусоидальность тока и напряжения составляет 61,2 % на частоте 5-й ВГ, что позволяет сделать вывод о первичном месте подключения ФКУ для нормализации уровней ВГ.

При решении задачи снижения ВГ тока и напряжения на ПС2 необходимо определить ВГ напряжения внешней НН и гармоническое сопротивление системы относительно шин ПС2. Было определено, что соотношение  $S_{K30}/S_T \leq 9$ , поэтому такая задача в данной работе решается с помощью подключения ТРМ в узле нагрузки ПС2. Определено, что внешняя НН влияет на режим работы потребителей на ПС2, так как даже значение мощности НН, равное 300 кВА, приводит к невыполнению условия по граничному значению  $S_{K31}/S_{НН1}$ . С помощью ТРМ в имитационной модели были определены сопротивления системы на четных ВГ. На нечетных ВГ оценка дополнительно осуществляется на основе метода активных двухполюсников. В результате были определены параметры схемы замещения для дальнейшего этапа (таблица 2).

По рассчитанным данным были определены ВГ напряжения внешней НН. Амплитудное значение ВГ напряжения ( $h=5$ ) внешней

НН составило  $U_{sh} = 379$  В, то есть то максимальное значение, которое останется в узле нагрузки при компенсации влияния внутренних НН на ПС2, например, с помощью ПАФ (составляет около 4,8 %, что превышает требования ГОСТ 32144-2013). При компенсации влияния внутренних НН с помощью ПФ гармоники тока вводного присоединения определяются геометрическим ДВ внешней НН, параметрами сети и ПФ. Значение ВГ тока можно оценить по выражению (14), которое равно 48 А (около 11 %, что превышает требования ГОСТ 72176). Таким образом, было выявлено, что внешняя НН значительно влияет на ВГ в узле нагрузки, а нормализацию уровней ВГ необходимо осуществлять с применением способов и средств, снижающих ВГ тока и напряжения.

Этап 2. Определение ДВ на ПС2. При наличии внешних НН необходимо применять обобщенный метод векторов тока и напряжения. Были рассчитаны алгебраические ДВ присоединений на ПС2, а также ДВ внешнего источника искажений при  $h = 5$ . Алгебраический ДВ по току для Т22 составил 66,7 % и является наибольшим среди присоединений, где необходимо в первую очередь устанавливать ФКУ. При этом ДВ по напряжению не равен ДВ по току, так как присутствуют ВГ напряжения от внешней НН. По геометрическим ДВ можно сделать вывод об остаточных значениях ВГ тока и напряжения на ПС2. По расчетным данным, при исключении влияния Т22 остаточное значение ВГ напряжения в узле нагрузки составит 71,7 %, а остаточное значение ВГ тока вводного присоединения - 49,5 %. Для сравнения по результатам моделирования получились следующие значения соответственно 74 % и 50,7 %. Далее необходимо проводить выбор параметров ФКУ с учетом ДВ НН.

Этап 3. Выбор мест подключения и параметров ФКУ на ПС2. Основной задачей является снижение ВГ тока и напряжения до требуемых нормативных значений. Были рассмотрены ВГ 5 и 7-го порядка, по остальным ВГ подход аналогичный. На основе оценки остаточных ВГ тока и напряжения был сделан вывод о том, что компенсация влияния только присоединения Т22 не приводит к требуемому результату. Поэтому необходима групповая компенсация ВГ на ПС2. При этом возможны два варианта: установка ПФ на 5-ю гармонику

(ПФ выбирается по условию минимальной компенсирующей способности) и ПАФ на 7-ю гармонику; установка существующих КБ с защитными дросселями и ПАФ на 5 и 7-ю гармонику (рисунок 19).

На основе разработанной методики оценки дополнительной загрузки ПФ было выявлено, что ВГ тока ( $h=5$ ) вводного присоединения значительно возрастает. Поэтому рассматривается второй вариант. При компенсации влияния присоединений Т21 и Т22 на основе данных о ДВ была проведена оценка остаточных значений ВГ тока и напряжения на ПС2. При этом значение ВГ тока 5-го порядка снизилось до требуемых нормативных уровней, а значение ВГ напряжения, равное 4,6 %, превышает требуемое ГОСТ значение 4 %. На основе разработанной методики выбора параметров ПАФ с КГТ было определено, что требуемый ток ПАФ равен 106 А. Дополнительное снижение ВГ напряжения 5-го порядка достигается путем КГН за счет увеличения тока ПАФ и компенсации ВГ напряжения внешних НН. При этом ток ПАФ увеличивается до 123 А и выполняются требования ГОСТ по ВГ тока и напряжения. Имитационное моделирование СЭС НГКМ при компенсации ВГ тока и напряжения с помощью ПАФ подтвердило эффективность разработанного метода снижения ВГ на основе определения ДВ.

При компенсации влияния НН на ПС2 на основе моделирования выявлено, что на ПС1 и ПС3 значения ВГ тока и напряжения 5 и 7-го порядка выходят за нормативные пределы. В соответствии с рассчитанными ДВ газовый промысел ПС1 вносит наибольшие искажения после ПС2. Установка ПФ 5-й гармоники на ПС1, параметры которого выбраны с учетом ДВ внешних НН, приводит к требуемому результату как по току, так и по напряжению, что подтверждает техническую эффективность предложенных решений.

Экономическая эффективность определяется за счет снижения электромагнитной и технологической составляющих ущерба. Кратность снижения сроков службы трансформаторов на ПС Т11 составила 11,7, на ПС Т21 – 5,8, на ПС Т22 – 7,2 и на ПС Т31 – 3, снижение издержек на потерях электроэнергии составило 1,9 млн руб. в год, дисконтированный срок окупаемости составил около 2,5 лет с учетом электромагнитной составляющей ущерба. Снижение технологической составляющей ущерба от ограничения электроснабжения составило 9 млн руб. в год, а суммарный экономический эффект -

25,2 млн руб. в год. Традиционным решением на данном предприятии является установка ПАФ на подстанциях, питающих АВО газа. При этом капитальные затраты на их установку в 1,8 раза выше по сравнению с затратами на оборудование, выбранное с помощью предложенной методологии.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации на основании выполненных исследований решена крупная научная проблема, связанная с повышением КЭ и энергоэффективности ЭТК предприятий с распределенными источниками искажений путем нормализации уровней ВГ с учетом ДВ в напряжении и токе, что имеет важное хозяйственное значение для развития страны.

Результаты работы:

1. На основе системного анализа проблематики повышения КЭ в СЭС предприятий были выявлены основные факторы, учет которых необходимо осуществлять при наличии распределенных НН, подключенных на разных уровнях напряжений и точках сети, включающие определение параметров схемы замещения на основе измеренных данных с определением гармонического сопротивления системы и уровней ВГ внешних НН, оценку взаимосвязанных ДВ источников искажений по току и по напряжению, которые необходимо применять для выявления уровня снижения искажений и выбора параметров ФКУ.

2. Разработан алгоритм оценки гармонического сопротивления системы с применением ГНГ, параметры которого и места подключения измерительных цепей выбираются на основании выявленных зависимостей тока устройства от мощности короткого замыкания сети, мощности ЛН и порядка генерируемых ВГ, позволяющий проводить расчет сопротивления системы на частотах ВГ при наличии внешних НН.

3. Разработан метод оценки несинусоидальности тока и напряжения в сетях 0,4-10 кВ на основе измеренных ВГ в узле нагрузки, который позволяет проводить отдельную оценку влияния внешних и внутренних НН путем определения остаточных значений ВГ тока и напряжения в зависимости от типа ФКУ с учетом граничных значений соотношения мощности короткого замыкания системы

к мощности питающего узла нагрузки трансформатора для определения гармонического сопротивления сети и соотношения мощности короткого замыкания системы к мощности НН, подключенной к внешнему узлу нагрузки.

4. Разработан обобщенный метод определения ДВ, основанный на измерении векторов гармонических составляющих тока и напряжения, позволяющий проводить выбор узла нагрузки с наибольшим алгебраическим ДВ и оценку взаимосвязанных уровней снижения ВГ тока и напряжения при подключении ФКУ на основе геометрических ДВ.

5. Разработан метод определения ДВ источников искажений на основе применения пассивных и активных ФКУ, который позволяет рассчитывать ДВ внутренних и внешних НН при скомпенсированных значениях гармоник токов и напряжений на этапе эксплуатации ФКУ.

6. Разработан алгоритм выбора и применения методов оценки ДВ источников искажений, который содержит последовательный выбор методов в зависимости от алгебраических ДВ распределенных НН, оценку остаточных уровней ВГ по геометрическим ДВ и учитывает непрерывную оценку ДВ на этапе эксплуатации ФКУ.

7. Выявлены аналитические зависимости ВГ тока ПФ от ДВ внешних НН, мощности короткого замыкания и параметров ФКУ, позволяющие рассчитать перегрузку фильтра с учетом ВГ тока от внешних источников искажений при выборе их параметров.

8. Установлены зависимости остаточных ВГ токов и напряжений потребителя от параметров питающей сети и геометрических ДВ источников искажений, позволяющие проводить выбор параметров ПАФ при компенсации ВГ тока и напряжения.

9. Разработан метод выбора средств снижения уровня ВГ и их параметров в зависимости от ДВ источников искажений, который учитывает алгебраические ДВ для выбора места подключения ФКУ и геометрические ДВ для выбора степени компенсации ВГ и номинального тока ФКУ, что позволяет нормализовать несинусоидальность тока и напряжения, определяемую как внешними, так и внутренними источниками искажений без перегрузок ФКУ и с минимальными затратами.

10. Разработана методология оценки и нормализации несинусоидальности тока и напряжения в сетях 0,4-10 кВ с учетом алгебраических и геометрических ДВ источников искажений, которая позволяет нормализовать уровни ВГ тока и напряжения и повысить энергоэффективность ЭТК предприятий с распределенными источниками искажений.

11. Выполнена оценка эффективности применения разработанной методологии с учетом ДВ источников искажений на примере СЭС НГКМ с распределенными НН. На основе определения остаточных уровней ВГ тока и напряжения с учетом ДВ источников искажений были выбраны параметры ФКУ и места их подключения в требуемых узлах нагрузки, что позволило нормализовать уровни ВГ тока и напряжения. При этом капитальные затраты на установку ФКУ в 1,8 раза ниже по сравнению с традиционным решением. Суммарный экономический эффект составил 25,2 млн руб. в год, что выражается в снижении издержек на потерях электроэнергии (1,9 млн руб.), снижении затрат на замену силовых трансформаторов (14,3 млн руб.) и снижении технологической составляющей ущерба от ограничения электроснабжения (9 млн руб.), что подтверждает экономическую эффективность разработанных решений.

12. Перспективным направлением дальнейшего развития темы исследования повышения КЭ в сетях с распределенными НН является распространение и масштабирование разработанной методологии оценки и нормализации несинусоидальности тока и напряжения с учетом ДВ на другие показатели КЭ, связанные отклонением, несимметрией, колебаниями и провалами напряжения в сетях различного класса напряжения. На основе разработанных принципов по определению ДВ в показатели КЭ, позволяющих проводить ранжирование мест подключения и параметров ФКУ с учетом технических и экономических показателей, целесообразна разработка подхода для определения виновников ухудшения КЭ и распределения ответственности между потребителями и энергоснабжающими организациями с учетом затрат на внедрение и эксплуатацию ФКУ.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Шклярский, Я.Э. Снижение уровня высших гармоник в сетях промышленного предприятия / Я.Э. Шклярский, **А.Н. Скамын** // Промышленная энергетика. – 2012. – № 8. – С. 44-47.

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. – № 1(26). – С. 61-68.

3. Шклярский, Я.Э. Экспериментальные исследования влияния гибридного инвертора на качество электроэнергии / Я.Э. Шклярский, **А.Н. Скамын**, О.С. Васильков // Известия МГТУ МАМИ. – 2021. – Т. 15, № 3. – С. 2–9. DOI 10.31992/2074-0530-2021-49-3-2-9.

4. Назарычев, А.Н. Оценка надежности потребителей с учетом влияния показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения / А.Н. Назарычев, **А.Н. Скамын**, Ю.В. Добуш, А. Педро, А.А. Пугачев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2022. – № 5(74). – С. 74-79.

5. **Скамын, А.Н.** Оценка долевых вкладов в электрических сетях с фильтрокомпенсирующими устройствами / **А.Н. Скамын** // Интеллектуальная электротехника. – 2026. – № 1. – С. 103-116.

6. **Скамын, А.Н.** Метод оценки несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения с учетом долевых вкладов источников искажений / **А.Н. Скамын** // Электричество. – 2026. – № 4. – С. 50-60.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

7. Shklyarskiy, Y.E. High harmonic minimization in electric circuits of industrial enterprises / Y.E. Shklyarskiy, **A.N. Skamyin** // World Applied Sciences Journal. – 2014. – Vol. 30, No. 12. – P. 1767-1771. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.12.14257

8. Belsky, A.A. Configuration of a standalone hybrid wind-diesel photoelectric unit for guaranteed power supply for mineral resource industry facilities / A.A. Belsky, **A.N. Skamyin**, E.V. Iakovleva // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol. 11, No. 1. – P. 233-238.

9. Piróg, S. Non-linear electrical load location identification / S. Piróg, Ya.E. Shklyarskiy, **A.N. Skamyin** // Journal of Mining Institute. – 2019. – Vol. 237. – P. 317-321. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.317
10. Shklyarskiy, Y. Distortion Load Identification Based on the Application of Compensating Devices / Y. Shklyarskiy, **A. Skamyin**, I. Vladimirov, F. Gazizov // Energies. – 2020. – Vol. 13, No.6. – P. 1430. DOI: 10.3390/en13061430.
11. Shklyarskiy, Y. Experimental Study of Harmonic Influence on Electrical Energy Metering / Y. Shklyarskiy, Z. Hanzelka, **A. Skamyin** // Energies. – 2020. – Vol. 13, No.21. – P. 5536. DOI: 10.3390/en13215536.
12. **Skamyin, A.** Experimental Determination of Parameters of Nonlinear Electrical Load / **A. Skamyin**, Y. Shklyarskiy, V. Dobush, I. Dobush // Energies. – 2021. – Vol. 14, No.22. – P. 7762. DOI: 10.3390/en14227762.
13. Shklyarskiy, Y. Method for Evaluation of the Utility's and Consumers' Contribution to the Current and Voltage Distortions at the PCC / Y. Shklyarskiy, I. Dobush, V. Dobush, M.J. Carrizosa, **A. Skamyin** // Energies. – 2021. – Vol. 14, No.24. – P. 8416. DOI: 10.3390/en14248416.
14. **Skamyin, A.** Computation of Nonlinear Load Harmonic Currents in the Presence of External Distortions / **A. Skamyin**, A. Belsky, V. Dobush, I. Gurevich // Computation. – 2022. – Vol. 10, No.3. – P. 41. DOI: 10.3390/computation10030041.
15. **Skamyin, A.** An assessment of the share contributions of distortion sources for various load parameters / **A. Skamyin**, Y. Shklyarskiy, I. Dobush, V. Dobush, T. Sutikno, M.H. Jopri // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2022. – Vol. 13, No.2. – P. 950-959. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp950-959.
16. Jopri, M.H. Identification of harmonic source location in power distribution network / M.H. Jopri, M. Manap, **A. Skamyin**, T. Sutikno, M.R.M. Shariff, A. Belskiy // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2022. – Vol. 13, No. 2. – P. 938-949. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp938-949.
17. **Скамьин, А.Н.** Определение сопротивления электрической сети при расчете режимов с искажениями в напряжении / **А.Н. Скамьин**, В.С. Добуш, М.Х. Жопри // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 443-454. DOI: 10.31897/PMI.2023.25

18. **Skamyin, A.** Influence of Background Voltage Distortion on Operation of Passive Harmonic Compensation Devices / **A. Skamyin**, Y. Shklyarskiy, I. Gurevich // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No.6. – P. 1342. DOI: 10.3390/en17061342.

19. **Skamyin, A.** Impedance analysis of squirrel-cage induction motor at high harmonics condition / **A. Skamyin**, Ya. Shklyarskiy, K. Lobko, V. Dobush, T. Sutikno, M.H. Jopri // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. – 2024. – Vol. 33, No.1. – P. 31-41. DOI: 10.11591/ijeecs.v33.i1.pp31-41.

20. **Skamyin, A.** Method for determining the harmonic contribution of consumer installations based on the application of passive filters / **A. Skamyin** // *IET Generation Transmission and Distribution*. – 2024. – Vol. 18, No. 14. – pp. 2464-2479. DOI: 10.1049/gtd2.13209.

21. **Скамьин, А.Н.** Параметры энергосистемы в электротехнических комплексах с нелинейными электрическими нагрузками / **А.Н. Скамьин**, В.С. Добуш, Я.Э. Шклярский, О.С. Васильков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 6. – С. 88–104. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_6\_0\_88.

22. **Skamyin, A.N.** Impact of external distortion sources on harmonic voltage profiles of consumers / **A.N. Skamyin**, A.A. Sverbey, S.V. Solovlev // *Energy Systems Research*. – 2026. – Vol. 9, No.1. – P. 48-58. DOI: 10.25729/esr.2026.01.0004

*Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:*

23. Патент № 2416853 Российская Федерация, МПК H02J 3/01 (2006.01). Способ снижения уровня высших гармоник. Заявка № 2009144307/07: заявл. 30.11.2009: опубл. 20.04.2011 / **А.Н. Скамьин**, Я.Э. Шклярский, А.В. Круглов; заявитель/патентообладатель государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (технический университет)". – 6 с.

24. Патент № 2543075 Российская Федерация, МПК H02J 3/01 (2006.01). Способ снижения влияния высших гармоник на электрооборудование. Заявка № 2013113097/07: заявл. 22.03.2013: опубл. 27.02.2015 / Я.Э. Шклярский, **А.Н. Скамьин**, Ю.Е. Бунтеев; заяви-

тель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный минерально-сырьевой университет "Горный". – 7 с.

25. Патент № 2573706 Российская Федерация, МПК G01R 21/00 (2006.01). Способ выявления источника высших гармоник. Заявка № 2014109521/28: заявл. 12.03.2014: опубл. 27.01.2016 / Я.Э. Шклярский, Ю.Е. Бунтеев, **А.Н. Скамын**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный минерально-сырьевой университет "Горный". – 8 с.

26. Патент № 2752765 Российская Федерация, МПК G01R 23/20 (2006.01). Способ оценки вклада нелинейных потребителей в искажение напряжения в точке общего присоединения. Заявка № 2020140768: заявл. 10.12.2020: опубл. 03.08.2021 / Я.Э. Шклярский, **А.Н. Скамын**, Ю.В. Добуш, В.А. Шпенст; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 19 с.

27. Патент на изобретение № 2782157 Российская Федерация, МПК G01R 23/20 (2006.01). Способ оценки долевого вклада источников искажений в напряжение питающей сети. Заявка № 2022101623: заявл. 25.01.2022: опубл. 21.10.2022 / **А.Н. Скамын**, Я.Э. Шклярский, В.С. Добуш, Д.С. Галкин; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет". – 13 с.

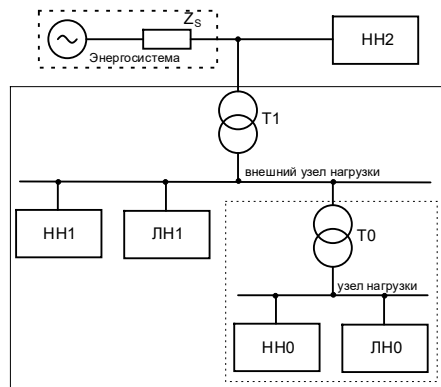


Рисунок 1 – Структура СЭС с распределенными НН (индекс «0» относится к рассматриваемому узлу нагрузки, индекс «1» - к внешнему узлу нагрузки)

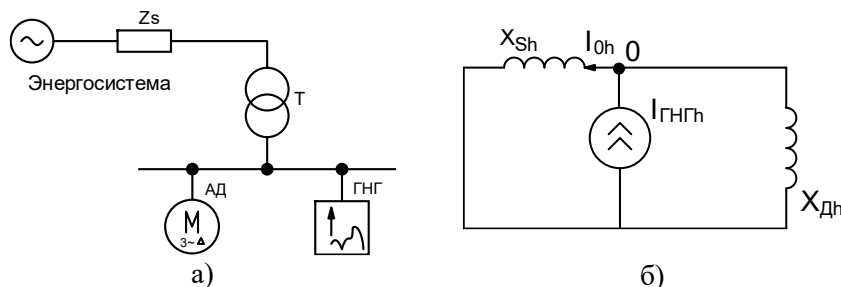


Рисунок 2 – Упрощенная однолинейная схема с ГНГ (а) и ее схема замещения (б), где  $X_{Dh}$ ,  $X_{Sh}$  – индуктивное сопротивление двигателя, системы на частоте ВГ;  $I_{0h}$  – ВГ вводного тока узла нагрузки

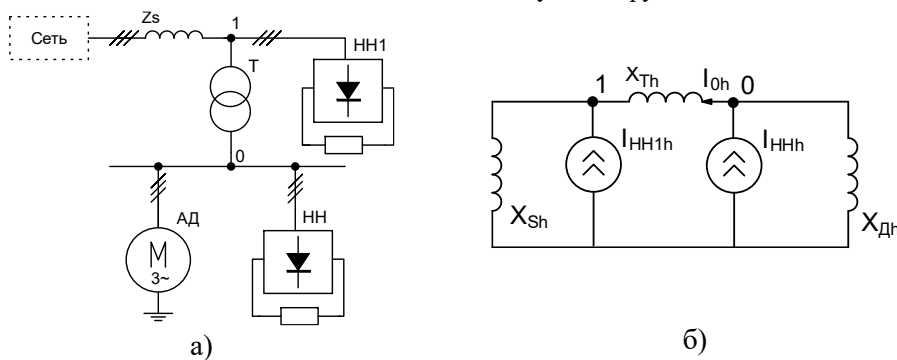


Рисунок 4 – Упрощенная однолинейная схема сети с внешней и внутренней НН (а) и ее схема замещения (б)

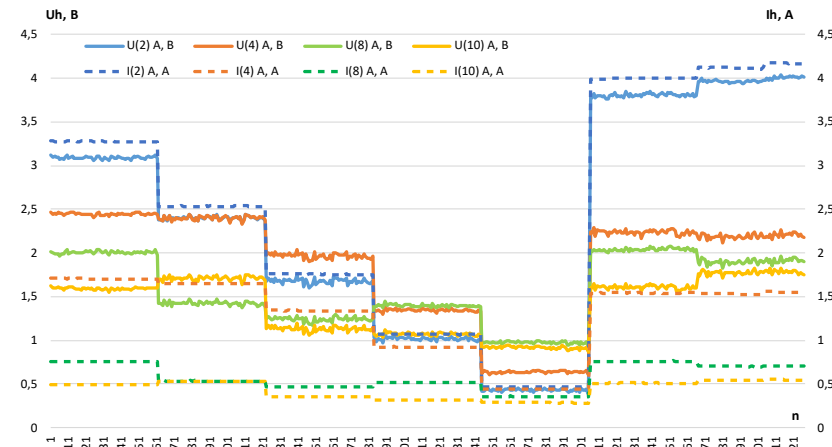


Рисунок 3 – Измеренные действующие значения ВГ тока и напряжения на частотах 2, 4, 8, 10 гармоник

Таблица 1 – Характеристики оборудования стенда

| Элемент схемы           | Параметры и значения                                                                 |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Питающая сеть           | $U_0 = 0,4 \text{ кВ}$ , $L_1 = 11,6 \text{ мГн}$                                    |
| Катушка индуктивности   | $L_0 = 1,0 \text{ мГн}$                                                              |
| Асинхронный двигатель   | $P_{AD} = 1,5 \text{ кВт}$ , $\cos\phi = 0,84$ , $\eta = 78,5 \%$                    |
| Тиристорный выпрямитель | $P_{ТВ} = 0 \div 8,0 \text{ кВт}$ , $U_{DC} = 0 \div 460 \text{ В}$                  |
| Тиристорный регулятор   | $P_{ТРМ} = 0 \div 4,5 \text{ кВт}$                                                   |
| Конденсаторная батарея  | $Q_{KB} = 0,5 \text{ квар}$ , $C = 9 \text{ мкФ}$ , звезда                           |
| Пассивный фильтр        | $R_\phi = 0,5 \text{ Ом}$ , $L_\phi = 16,48 \text{ мГн}$ , $C_\phi = 37 \text{ мкФ}$ |

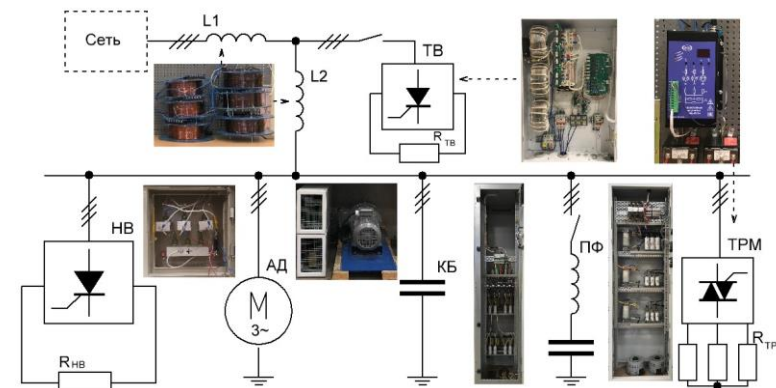


Рисунок 6 – Схема и параметры стенда в лабораторных условиях

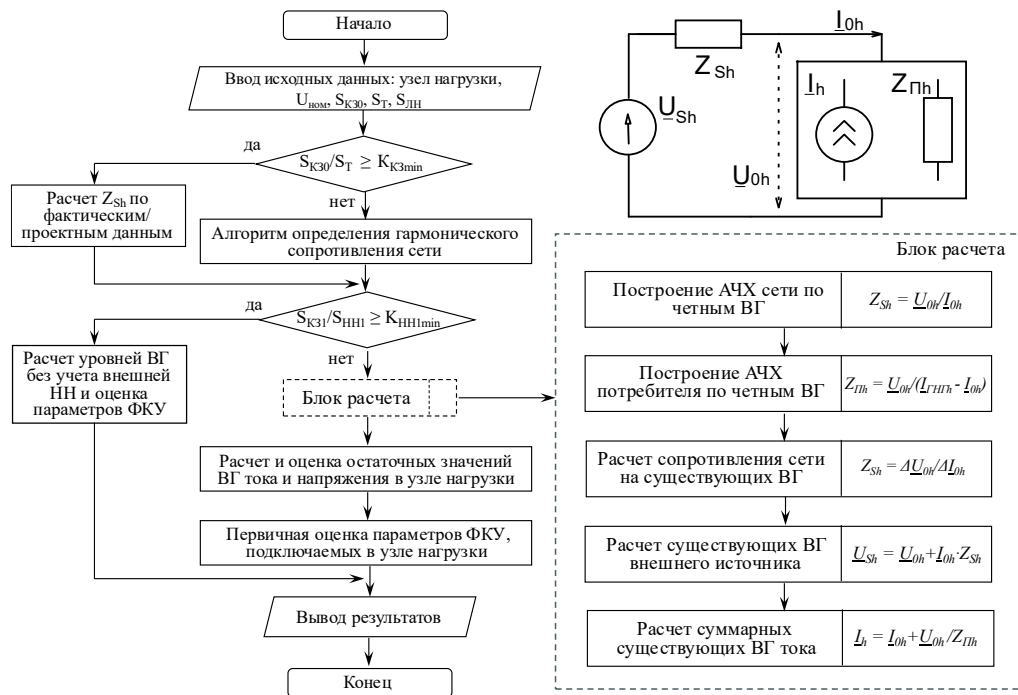


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма применения метода оценки уровней ВГ при наличии внешних и внутренних НН

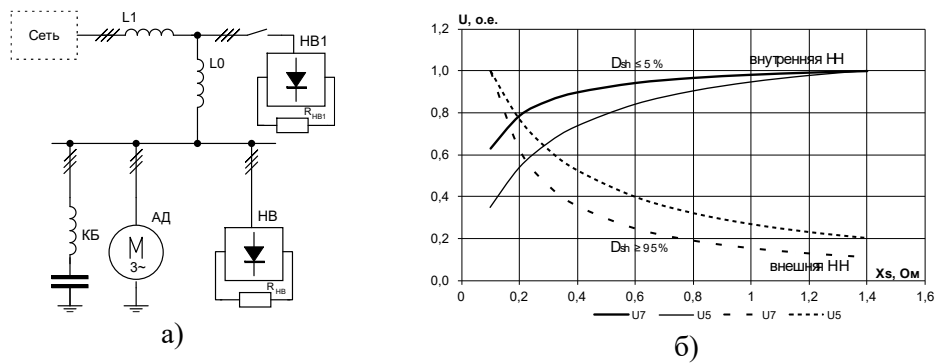


Рисунок 11 – Упрощенная однолинейная схема сети (а) и зависимость ВГ напряжения от сопротивления питающей сети (б)

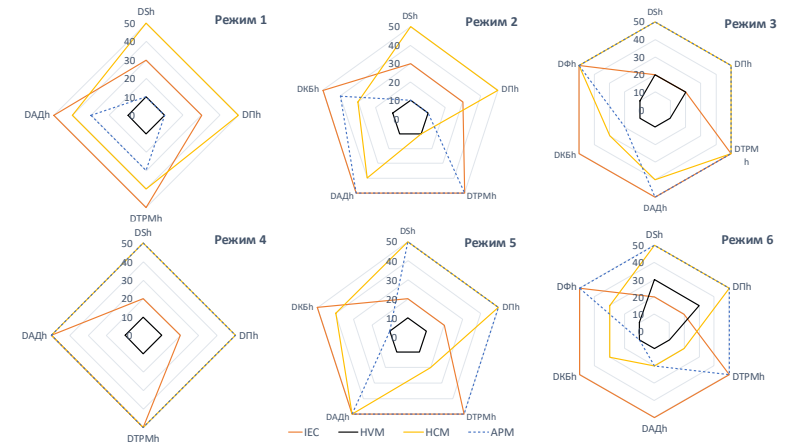


Рисунок 7 – Диаграммы погрешностей оценки ДВ

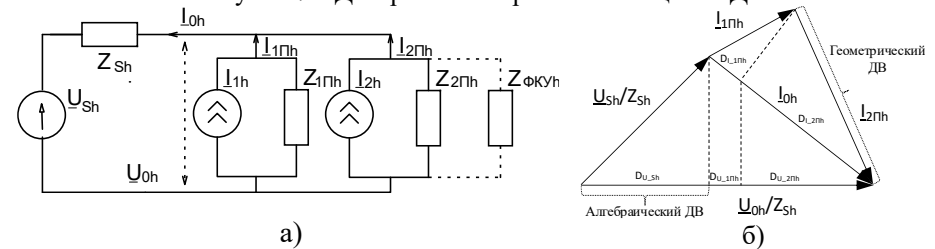


Рисунок 8 – Схема замещения сети на частотах ВГ (а) и векторная диаграмма ВГ тока и напряжения (б)

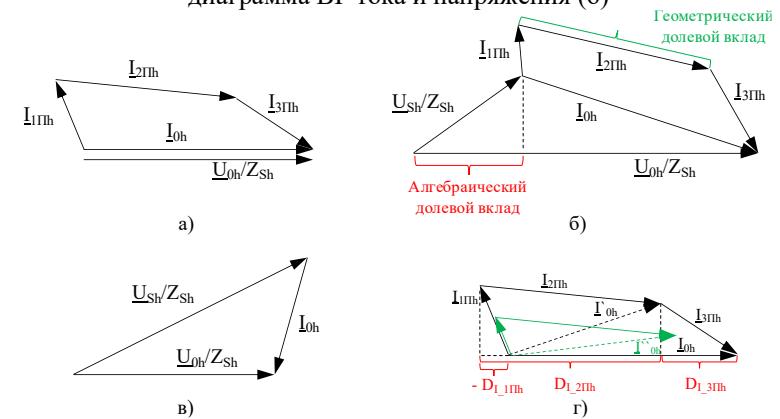


Рисунок 9 – Векторные диаграммы ВГ тока и напряжения

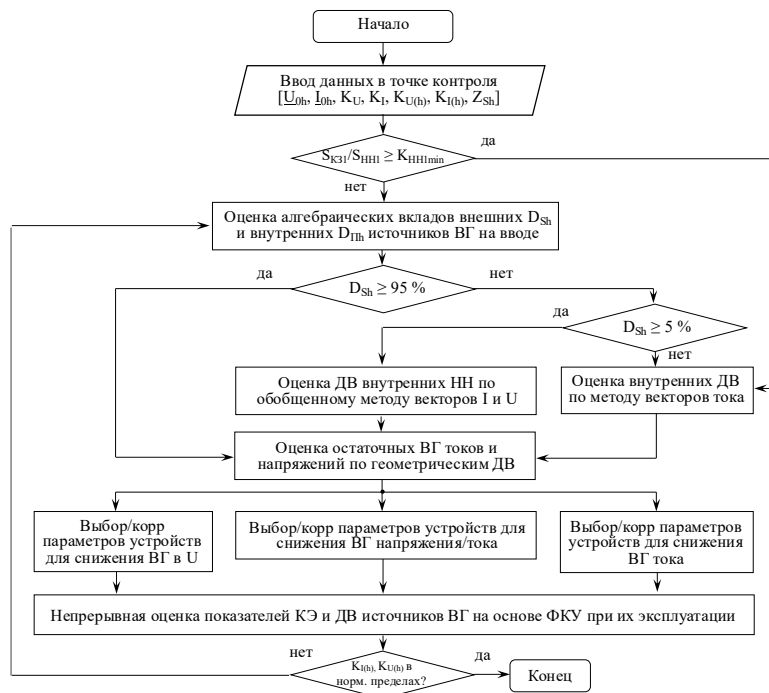


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма выбора и применения методов оценки ДВ источников искажений

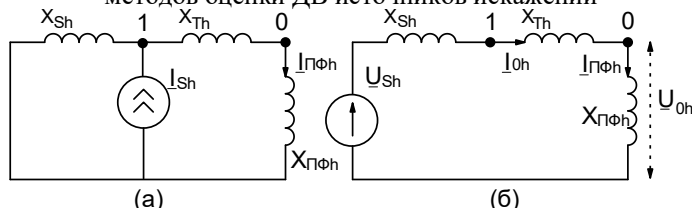


Рисунок 12 – Упрощенная схема замещения сети с эквивалентным источником тока (а) и эквивалентным источником напряжения (б)

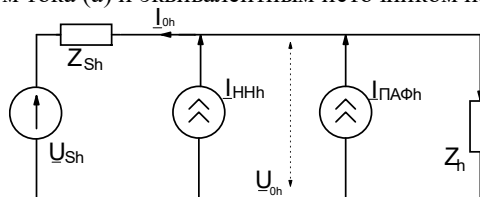


Рисунок 13 – Упрощенная схема замещения сети с эквивалентным источником тока и напряжения

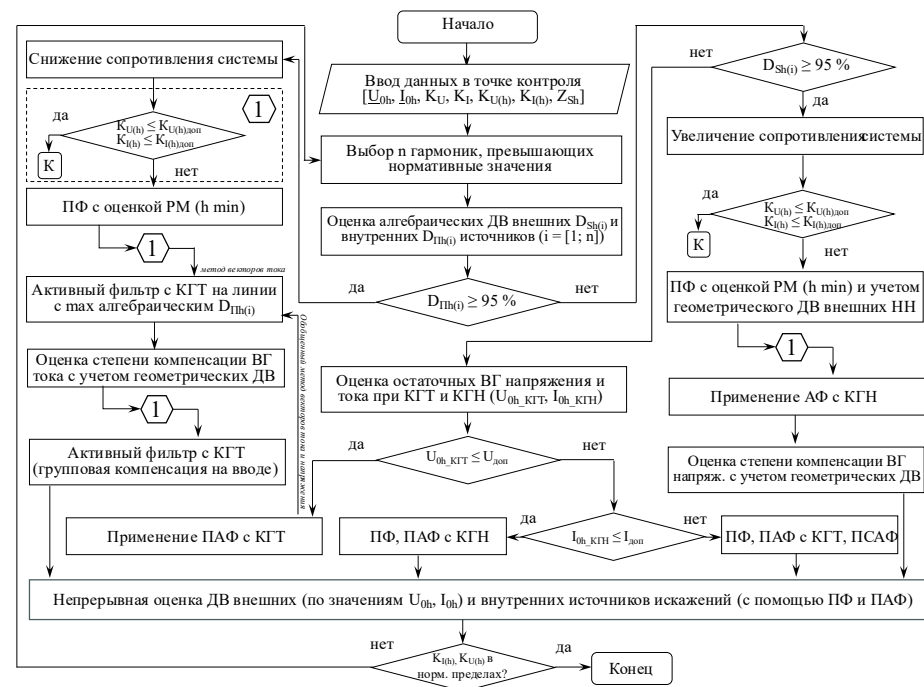


Рисунок 15 – Блок-схема алгоритма применения метода выбора средств снижения ВГ с учетом ДВ источников искажений

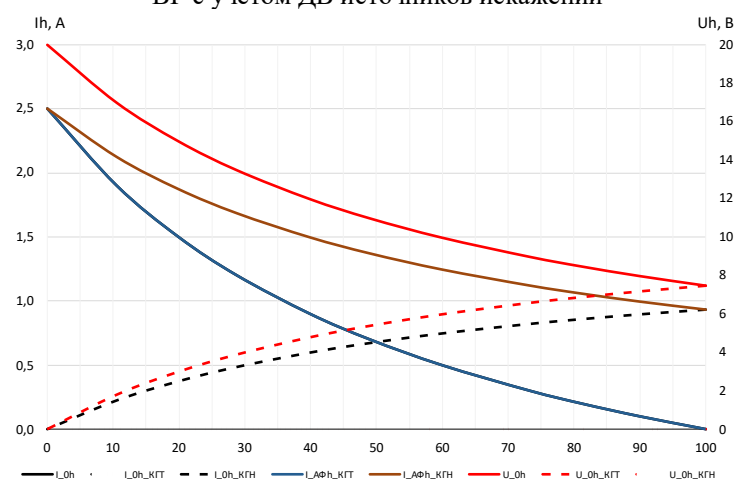


Рисунок 14 – Зависимости ВГ тока и напряжения от ДВ внешнего источника искажений

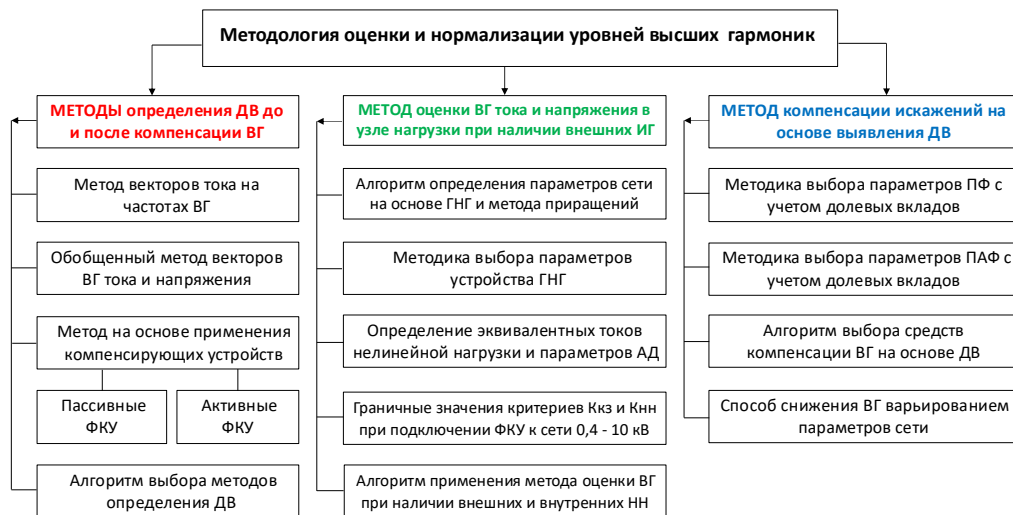


Рисунок 16 – Структурная схема методологии оценки и нормализации уровней ВГ

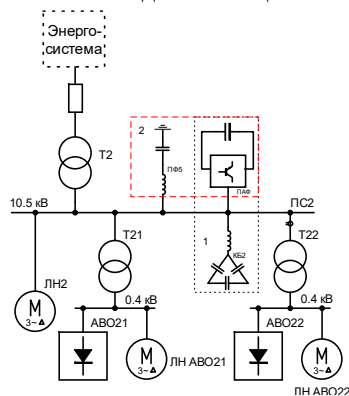


Рисунок 19 – Однолинейная схема ПС2 на НГКМ

Таблица 2 – Сопротивление системы на частотах ВГ на ПС2

| h         | $Z_{Sh}, \text{OM}$ | $Z_{\Sigma Bh}, \text{OM}$ | $U_{0h}, \text{В}$ | $I_{0h}, \text{А}$ | $I_{TPMh}, \text{А}$ |
|-----------|---------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| 2         | 2,9                 | 1,6                        | 11,7               | 4,1                | 7,5                  |
| 4         | 5,5                 | 3,5                        | 10,5               | 1,9                | 3,1                  |
| 8         | 10,7                | 6,6                        | 13,9               | 1,3                | 2,1                  |
| $5_i$     | 6,6                 | -                          | 744,8              | 57,5               | 1,4                  |
| $5_{i+1}$ |                     | -                          | 741,5              | 57,0               | 4,7                  |
| $7_i$     | 9,1                 | -                          | 322,9              | 18,8               | 2,5                  |
| $7_{i+1}$ |                     | -                          | 323,9              | 18,5               | 7,5                  |

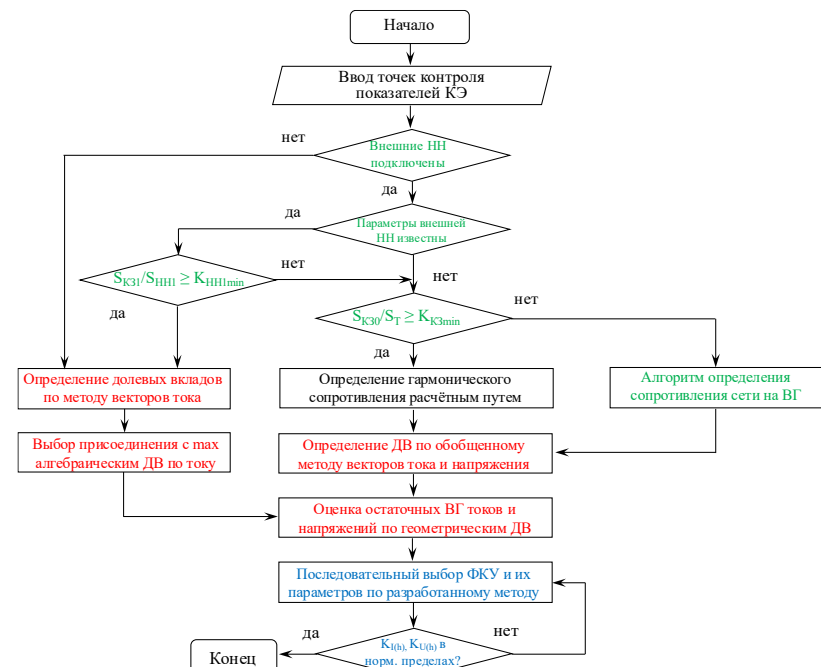


Рисунок 17 – Блок-схема алгоритма применения методологии

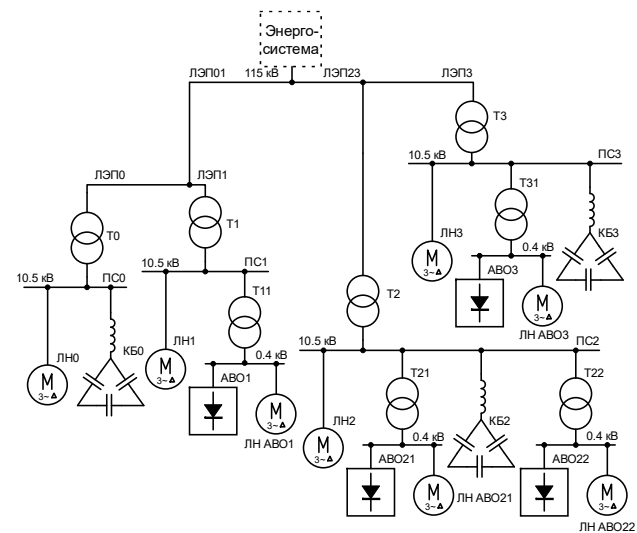


Рисунок 18 – Укрупненная однолинейная схема НГКМ