

На правах рукописи



ЖИЛИН ЕВГЕНИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ

**МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО
ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Красноярск 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель

Доктор технических наук, доцент
Авербух Михаил Александрович

Официальные оппоненты:

Федоров Владимир Кузьмич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», кафедра электроснабжения промышленных предприятий, профессор

Боярская Наталья Петровна, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», кафедра теоретических основ электротехники, доцент

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится 20 июня 2018 года в 17-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 666049, г. Красноярск, ул. Ленина, д. 70, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2018 года

Учёный секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В соответствии с федеральной целевой программой «Жилище» 2015 – 2020 годы (Постановление Правительства РФ от 17 декабря 2010 г. № 1050) намечено широкое развитие индивидуального жилищного строительства (ИЖС). Повышение доли ИЖС в общем объёме строительства приводит к увеличению роста потребления электроэнергии. Основными потребителями электроэнергии ИЖС являются коммунально-бытовые однофазные электроприёмники (ОЭП), большинство из которых имеют нелинейные вольтамперные характеристики: газоразрядные лампы (энергосберегающие лампы); установки дуговой сварки; импульсные источники питания (персональные компьютеры, телевизоры, аудиосистемы); преобразователи частоты (СВЧ печи); двигатели с регулируемой скоростью вращения (дрели, стиральные машины, пылесосы); установки бесперебойного питания. Все они являются источниками высших гармоник (ВГ) тока и напряжения, генерируемых в систему электроснабжения ИЖС. Кроме того, все перечисленные ОЭП являются электроприёмниками, питающимися от трехфазной четырёхпроводной сети, что приводит к несимметрии токов и напряжений и протеканию тока небаланса в нулевом проводе. Увеличение доли ОЭП с нелинейными вольтамперными характеристиками вызывает искажение формы и, как следствие, генерирование ВГ токов и напряжений в систему электроснабжения ИЖС, что снижает показатели качества электроэнергии и приводит к увеличению потерь электроэнергии. Компенсация ВГ, составляющих и симметрирование токов и напряжений, достигается использованием технических средств: симметрирующих и фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ).

Полученные автором результаты диссертации использовались при выполнении гранта № А-5/17 «Разработка системы обеспечения электромагнитной совместимости электроприёмников с сетью и повышения качества электроэнергии в электроэнергетических сетях напряжением 0,4 кВ» в рамках реализации Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова № ОУ-2017-098 от 17.07.2017 г. (стратегический проект «Центр превосходства национального уровня «Нанотехнологии, конструкционные и функциональные материалы строительного и специального назначения»).

Степень разработанности. В решение проблемы несинусоидальных и несимметричных режимов работы в системах электроснабжения большой вклад внесли ученые Агунов А.В., Арриллага Дж., Бартоломей П.И., Вагин Г.Я., Довгун В.П., Дрехеллер Р., Дьяков А.Ф., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Карташёв И.И., Косоухова Ф.Д., Наумов И.В., Розанов Ю.К., Хабигер Э., Шидловский А.К. и др.

Диссертации Боярской Н.П., Егорова Д.Э., Колмакова В.О., Кронгауза Д.Э., Лютаревича А.Г., Матиняна А.М., Сташкова И.А., Темербаева С.А.

посвящены построению пассивных, активных и гибридных ФКУ. В этих трудах рассматриваются причины возникновения ВГ и токов несимметрии в системах электроснабжения и технические средства их компенсации, но не делается акцент на минимизации потерь электроэнергии в элементах систем электроснабжения ИЖС.

Таким образом, задача минимизации потерь электроэнергии при несинусоидальных и несимметричных режимах работы систем электроснабжения ИЖС актуальна.

Цель работы – развитие и совершенствование методов минимизации потерь электроэнергии при несинусоидальных и несимметричных режимах работы систем электроснабжения индивидуального жилищного строительства.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проведен анализ существующих способов и методов снижения потерь электроэнергии при несинусоидальных и несимметричных режимах работы в системах электроснабжения ИЖС. Выполнены экспериментальные исследования основных параметров сети, показателей электромагнитной совместимости (ЭМС) и проведена оценка потерь электроэнергии при несинусоидальных и несимметричных режимах работы, действующей системы электроснабжения ИЖС.

2. Разработан метод статистической оценки и прогнозирования коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию питающего напряжения в системах электроснабжения ИЖС.

3. Разработана имитационная модель системы электроснабжения ИЖС, позволяющая производить исследования режимов работы с использованием различных вариантов технических средств компенсации ВГ и токов небаланса, с учётом несинусоидальных и несимметричных режимов работы.

4. Сформулирована и решена задача оптимизации потерь электроэнергии при несинусоидальных и несимметричных режимах работы систем электроснабжения ИЖС и обоснован выбор технических средств по минимизации потерь энергии в системах электроснабжения ИЖС.

Научная новизна:

1. Впервые доказана необходимость принятия специальных мер для минимизации потерь электроэнергии именно от несинусоидальных и несимметричных режимов в системах электроснабжения ИЖС в виде пассивных и активного фильтров гармоник, устанавливаемых на конечных опорах линии электропередач и на шинах низкого напряжения трансформаторной подстанции.

2. Впервые для прогнозирования коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию токов и напряжений, применены методы статистической оценки изменения спроса мощности электроприёмников как случайных процессов в системах электроснабжения ИЖС, при

этом установлено три характерных периода изменения спроса мощности в течение суток, недели и года.

3. Впервые сформулирована двухкритериальная задача оптимального размещения фильтрокомпенсирующих устройств и выбора их типа и мощности в системах электроснабжения ИЖС, для решения которой применены методы нелинейного программирования, неопределённых множителей Лагранжа и сопряжённых градиентов.

Методология и методы исследования. Методология исследования основана на использовании основных положений теоретической электротехники, методов расчёта и построения систем электроснабжения, теории вероятности и математической статистики, решения задач оптимизации. Анализ потерь электроэнергии проводился на основе экспериментальных измерений и компьютерного моделирования при помощи сертифицированных приборов и программного обеспечения MATLAB&Simulink.

Достоверность результатов диссертационной работы и выводов обоснована корректностью математической постановки задачи, корректным применением фундаментальных законов электротехники, теории вероятности и математической статистики, исключением систематических и случайных погрешностей на основании методики обработки результатов измерений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований основных показателей ЭМС и параметров несинусоидальных и несимметричных режимов работы, а также потерь электроэнергии в системе электроснабжения ИЖС без использования и при использовании ФКУ.

2. Метод статистической оценки и прогнозирования коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию тока и питающего напряжения при несинусоидальных и несимметричных режимах работы систем электроснабжения ИЖС.

3. Результаты решения задач минимизации потерь электроэнергии и выбора типов и мощностей фильтрокомпенсирующих устройств при несинусоидальных и несимметричных режимах в системах электроснабжения ИЖС, полученные на основании оптимизаций целевых функций и имитационного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что на базе проведённых расчётных и экспериментальных исследований получены значения показателей ЭМС и оценены потери электроэнергии в системе электроснабжения ИЖС. Решена задача минимизации потерь электроэнергии в системах электроснабжения ИЖС при несинусоидальных и несимметричных режимах работы. Результаты работы использовались при выполнении гранта № А-5/17 «Разработка системы обеспечения электромагнитной совместимости электроприемников с сетью и по-

вышения качества электроэнергии в электроэнергетических сетях напряжением 0,4 кВ».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на VII Международном молодёжном форуме «Образование. Наука. Производство», г. Белгород, 2015 г.; Международной научно-практической конференции «Научные открытия в эпоху глобализации», г. Казань, 2015 г.; Международной научно-практической конференции «Новая наука: от идеи к результату», г. Стерлитамак, 2015 г.; IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодежь и научно-технический прогресс», г. Губкин, 2016 г.; Международной научно-практической конференции «Интеграция современных научных исследований в развитие общества», г. Кемерово, 2016 г.; X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодежь и научно-технический прогресс», г. Губкин, 2017 г.; Международной научно-технической конференции молодых учёных БГТУ им. В.Г. Шухова. г. Белгород, 2017 г.; II Международной научно-технической конференции; г. Белгород, 2017 г.; Всероссийской научно-технической конференции, посвящённой 100-летию юбилею первого ректора Политехнического института В.Н. Борисова, г. Красноярск, 2017 г.; II Международной научно-технической конференции. «Энергетические системы», г. Белгород 2017 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе четыре статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований, и одна статья, индексируемая в Scopus.

Личный вклад автора состоит в анализе источников литературы с целью получения сведений о существующих методах снижения потерь электроэнергии при несинусоидальных и несимметричных режимах работы; в разработке имитационной модели системы электроснабжения ИЖС; в анализе экспериментальных данных и сопоставлении их с результатами имитационного моделирования; выполнении статистического анализа, прогнозирования коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию, а так же постановке и решении задачи оптимизации потерь электроэнергии. Личный вклад соискателя в работах с соавторами составляет от 35 до 75 % результатов.

Структура и объём работы. Диссертация включает введение, четыре главы основного текста, заключение, библиографический список из 92 наименований и приложения. Общий объём диссертации 141 страница, в тексте содержится 59 рисунков и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, а также определены методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе рассмотрены особенности построения систем электроснабжения ИЖС. Выполнен анализ влияния ОЭП с нелинейными вольтамперными характеристиками на показатели ЭМС в системах электроснабжения ИЖС. Рассмотрены возможные способы снижения потерь электроэнергии за счет компенсации токов ВГ и несимметрии.

Особенностями систем электроснабжения ИЖС является их непрерывное развитие, обусловленное ростом электропотребления, появлением нового оборудования за счёт увеличения разнообразия и доступности бытовых электроприёмников. Одной из основных особенностей системы электроснабжения ИЖС является необходимость подводить электроэнергию к большому числу ОЭП, генерирующих в сеть ВГ тока и напряжения, рассредоточенных на значительной территории. В результате сети электроснабжения ИЖС характеризуются большой протяжённостью и малой плотностью нагрузок.

Значительная часть ОЭП генерирует в сеть ВГ, ухудшающие качество электроэнергии. Поэтому в условиях насыщения систем электроснабжения ИЖС нелинейными ОЭП одним из доминирующих факторов ухудшения качества электроэнергии является несинусоидальность токов и напряжений. Основными источниками ВГ в системах электроснабжения ИЖС являются потребители электроэнергии, имеющие в своём составе источники вторичного электропитания, в которых используются мостовые выпрямители с ёмкостными сглаживающими фильтрами. Такие однофазные выпрямительные нагрузки из-за своей массовости генерируют в систему электроснабжения ИЖС третьи и кратные ей гармоники тока и напряжения. При этом суммарный коэффициент гармонических составляющих тока одного ОЭП может достигать 120–150 %.

Кроме того, в нейтральном проводе трехфазной четырёхпроводной системы электроснабжения возникает ток небаланса из-за несимметричной работы ОЭП и наличия ВГ тока, кратных трём. Несинусоидальные и несимметричные режимы работы систем электроснабжения ИЖС приводят к различным отрицательным последствиям, в том числе появлению дополнительных потерь электроэнергии.

Для повышения показателей ЭМС и снижения потерь электроэнергии в системе электроснабжения ИЖС при несинусоидальных и несимметричных режимах работы можно использовать различные методы и технические устройства. Выбор конкретного или комплекса технических

устройств возможен только на основании анализа конкретных графиков электрических нагрузок, значения токов искажения и несимметрии и стоимости капитальных вложений, издержек и срока окупаемости.

Во второй главе дана оценка уровня ВГ и несимметрии токов и напряжений в системе электроснабжения ИЖС экспериментальным путём, при помощи имитационного моделирования в пакете Matlab&Simulink и аналитических расчетов.

Целью проведения экспериментов является измерение значений показателей ЭМС, потерь электроэнергии и основных параметров режимов работы системы электроснабжения ИЖС.

Эксперименты проводились в три этапа: первый – измерения спектра ВГ, генерируемых отдельными ОЭП; второй – электроприёмниками отдельных коттеджей; третий – для всей системы электроснабжения ИЖС.

Большое разнообразие бытовых электроприёмников не позволяет простым обобщением определить уровень гармоник сети, потому были произведены измерения для наиболее распространённых ОЭП. Для объективной оценки влияния ОЭП на систему электроснабжения ИЖС также были произведены экспериментальные исследования на вводе электропитания отдельного коттеджа. На рисунке 1 представлены спектры ВГ тока, потребляемые из сети жидкокристаллическим телевизором и одним коттеджем.

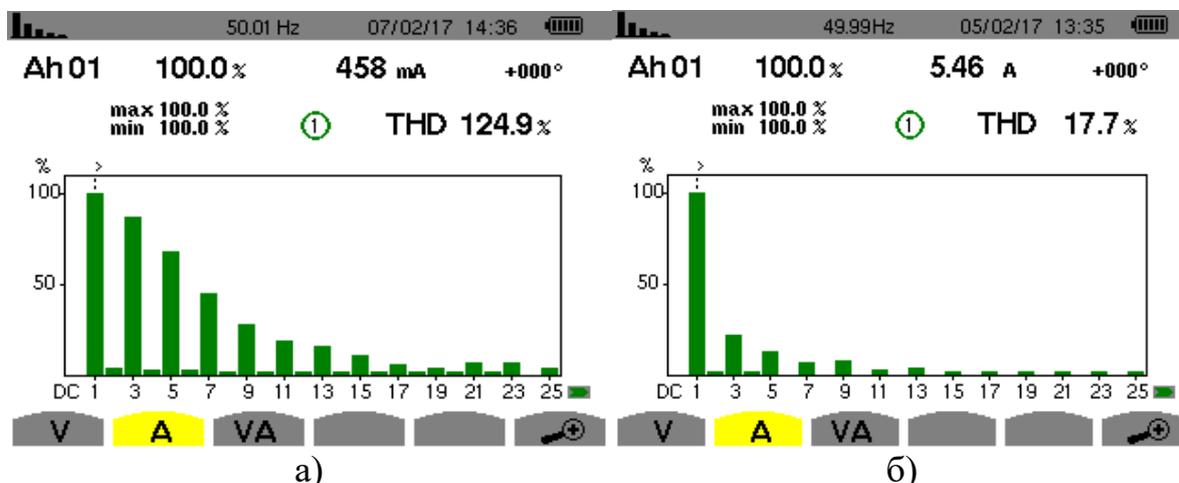


Рисунок 1. Спектр ВГ токов: а - жидкокристаллического телевизора; б - ОЭП одного коттеджа

Проведённый эксперимент по оценке гармонического спектра токов ОЭП одного коттеджа показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих тока составляет $K_I = 17,7 \%$.

Измерения для всей системы электроснабжения ИЖС проводились на низкой стороне комплектной трансформаторной подстанции (КТП) непрерывно в течение семи суток с временем усреднения 1 мин с помощью сертифицированных приборов «Энергомонитор – 3.3Т1» и «ChavinArnoux CA

8335» (рисунок 2), в соответствии с требованиями стандартов. Результаты измерений оформлены в виде протоколов, содержащих таблицы и графики.

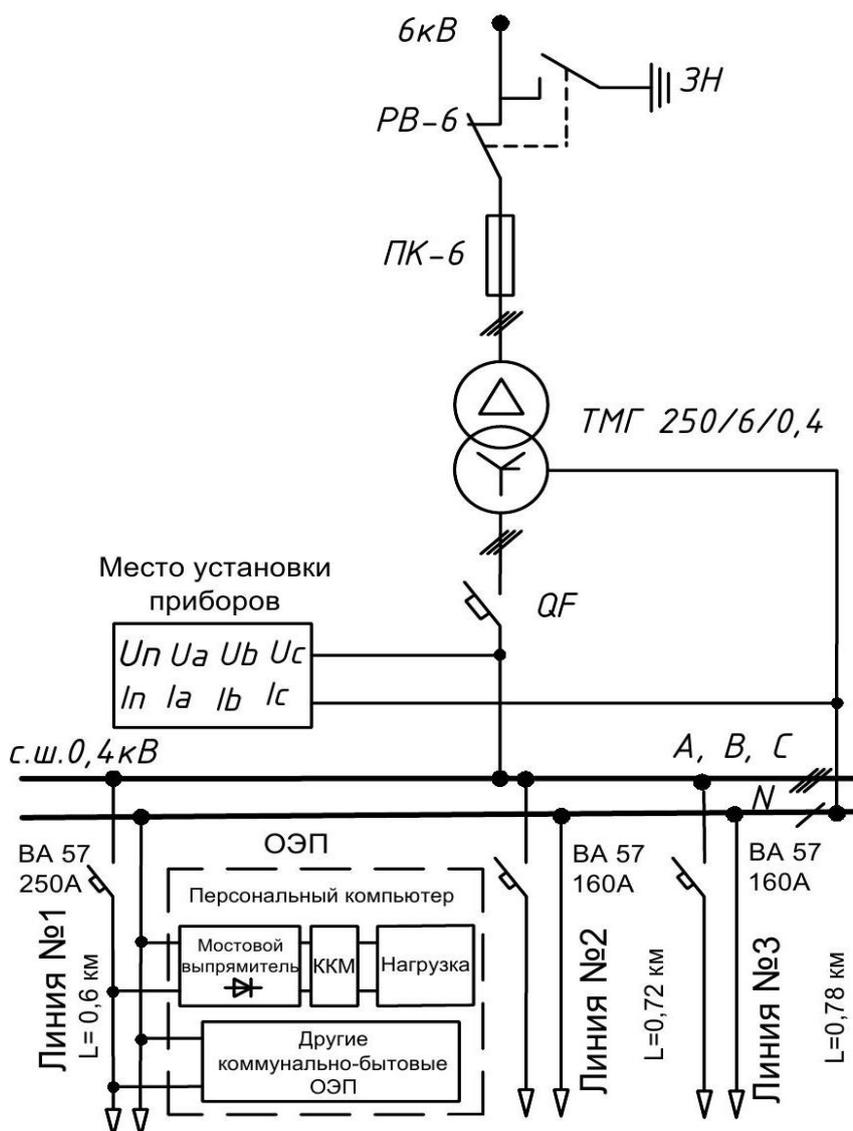


Рисунок 2. Однолинейная схема системы электроснабжения ИЖС с указанием места установки измерительных приборов

По результатам эксперимента значение тока в нулевом проводе достигает 30 % фазных токов, а коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности составляют $K_{2U} = 4,8 \%$, $K_{0U} = 6 \%$. Усреднённые спектры гармонических составляющих тока и напряжения, полученные при измерении за семь дней, представлены на рисунке 3, где K_{IA}, K_{IB}, K_{IC} – суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока по фазам; K_{UA}, K_{UB}, K_{UC} – суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения по фазам.

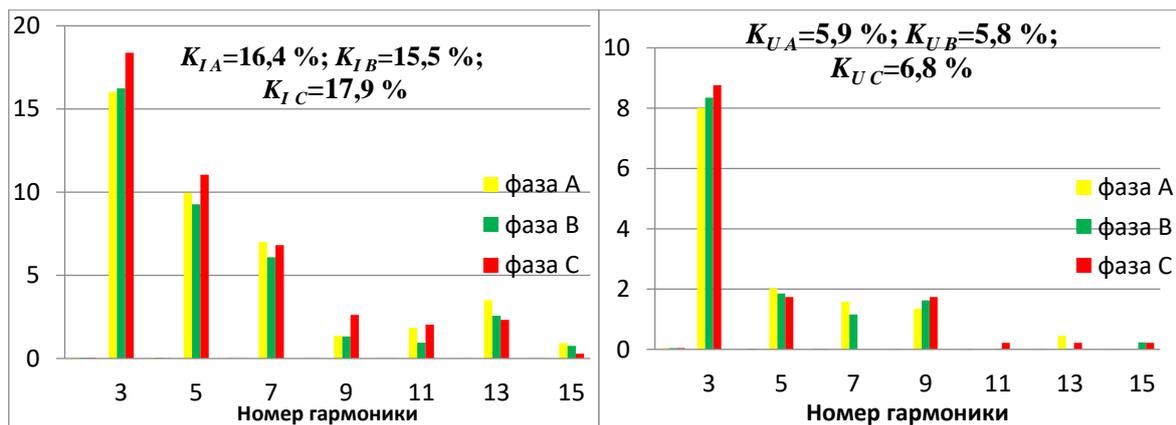


Рисунок 3. Спектры ВГ тока и напряжения

Достоверность результатов измерений оценена на примере суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I , исключением систематической случайной погрешности в соответствии с ГОСТ Р 8.736 – 2011 при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Проведение экспериментальных исследований на реальных объектах системы электроснабжения ИЖС представляет собой достаточно трудоёмкую и дорогостоящую задачу. При этом следуют учесть, что измерения проводятся в определённый промежуток конкретного времени года, при действующих в данный момент нагрузках и без учета изменяющихся обстоятельств. Поэтому дополнительно к экспериментальным исследованиям применяется имитационное моделирование на основании реальной схемы системы электроснабжения ИЖС.

Результаты моделирования системы электроснабжения ИЖС в виде спектра гармонических составляющих тока представлены на рисунке 4.

Моделирование ОЭП представляется обобщенной схемой источника вторичного электропитания, параметры в которой определяются в зависимости от мощности ОЭП.

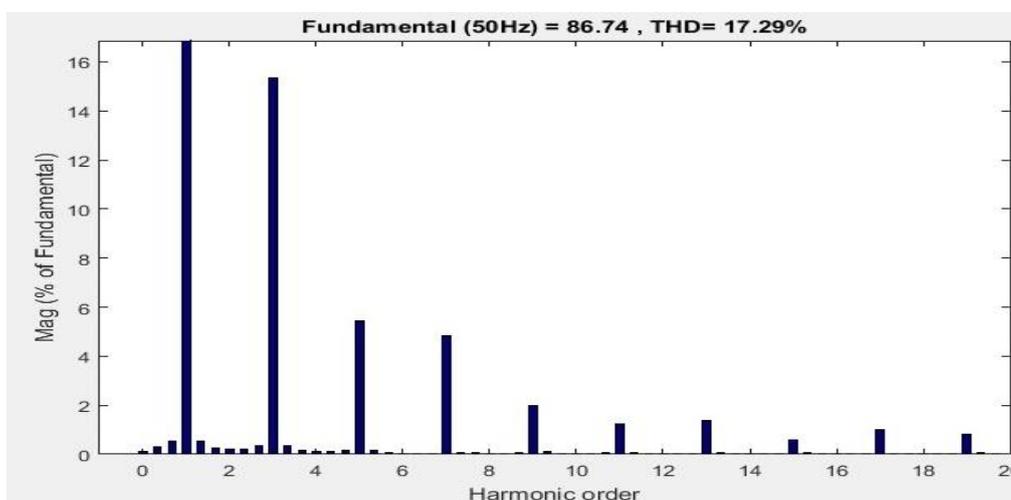


Рисунок 4. Спектр ВГ тока на вводе системы электроснабжения ИЖС

Аналитический расчёт коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности в трехфазной сети произведён методом симметричных составляющих. Значения напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности, а также величина коэффициентов несимметрии напряжения обратной и нулевой последовательности по результатам аналитического расчёта составили: $\underline{U}_{A(1)} = 224,57 + j8,489 \text{ В}$; $\underline{U}_{A(2)} = -11,209 - j1,434 \text{ В}$; $\underline{U}_{A(0)} = 9,639 + j8,855 \text{ В}$; $K_{2U} = 4,2 \%$; $K_{0U} = 6,4 \%$.

Значения показателей ЭМС, параметры режима работы, полученные экспериментально, имитационным моделированием и расчётным путем, подтвердили наличие ВГ токов и напряжений и токов небаланса в системе электроснабжения ИЖС. При этом уровни токов ВГ и небаланса могут достигать значений, составляющих от 10 до 30% величины фазного тока. Последнее обстоятельство указывает на актуальность решения задачи по снижению уровней токов от несинусоидальности и несимметрии для минимизации потерь электроэнергии в системах электроснабжения ИЖС.

В третьей главе разработан метод статистической оценки и прогнозирования коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию тока и напряжения на основании случайных процессов. Выполнена оценка потерь электроэнергии в элементах системы электроснабжения ИЖС, вызванных наличием ВГ и токов несимметрии. Решена задача минимизации потерь электроэнергии в системах электроснабжения ИЖС при несинусоидальных и несимметричных режимах работы за счёт выбора типа и месторасположения ФКУ.

Изменения показателей ЭМС систем электроснабжения ИЖС в течение суток, недели и года соответствуют стационарным случайным процессам. Это связано с характером потребления в зависимости от времени суток, дней недели и сезона и подтверждается тесной корреляционной зависимостью отдельными временными сечениями случайного процесса. При этом отклонения от тренда изменения показателей ЭМС во времени производятся путем интерполяции и экстраполяции в соответствии с выражением:

$$m_{Ki}(t) = \alpha_0 + \sum_{k=1}^p \left(\alpha_k \cdot \cos \frac{2\pi kt}{n+1} + \beta_k \cdot \sin \frac{2\pi kt}{n+1} \right) + \mu \cdot \omega_1(t),$$

где p – число характерных периодов за сутки; α_0 , α_k , β_k , μ , $\omega_1(t)$ – коэффициенты, определяющиеся по формулам:

$$\alpha_0 = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n K_{Ii}, \quad \alpha_k = \frac{2}{n+1} \sum_{i=0}^n K_{Ii} \cdot \cos \frac{2\pi kt}{n+1},$$

$$\beta_0 = \frac{2}{n+1} \sum_{i=0}^n K_{Ii} \cdot \sin \frac{2\pi kt}{n+1}, \quad \mu = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Ii} \cdot \omega_1(t)}{\sum_{i=0}^n \omega_1^2(t)},$$

$$\omega_1(t) = t - \frac{n}{2} + \sum_{k=1}^p \cos \frac{2\pi kt}{n+1} - \frac{2}{n-1} \sum_{k=1}^p \left(\sum_{i=0}^n \sin \frac{2\pi kt}{n+1} \right) \sin \frac{2\pi kt}{n+1}.$$

Аналитические выражения трендов, характеризующих изменение показателей ЭМС в течение трех характерных суток, согласно выше представленным формулам, при $p = 3$ принимают вид:

для суммарного коэффициента гармонических составляющих тока (K_I):

$$m_{K_I}(t) = 13,12 + 0,000085t - 0,0153 \cos \frac{2\pi t}{73} - 0,665 \cos \frac{4\pi t}{73} - 1,627 \cos \frac{6\pi t}{73} + 0,064 \sin \frac{2\pi t}{73} + 0,528 \sin \frac{4\pi t}{73} - 0,881 \sin \frac{6\pi t}{73};$$

для суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U):

$$m_{K_U}(t) = 3,323 + 0,0098t - 0,0707 \cos \frac{2\pi t}{73} - 0,1005 \cos \frac{4\pi t}{73} + 0,0899 \cos \frac{6\pi t}{73} - 0,1308 \sin \frac{2\pi t}{73} - 0,078 \sin \frac{4\pi t}{73} - 0,667 \sin \frac{6\pi t}{73};$$

для коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности (K_{2U}):

$$m_{K_{2U}}(t) = 0,554 - 0,0026t - 0,036 \cos \frac{2\pi t}{73} - 0,025 \cos \frac{4\pi t}{73} + 0,0183 \cos \frac{6\pi t}{73} + 0,045 \sin \frac{2\pi t}{73} + 0,0397 \sin \frac{4\pi t}{73} + 0,0833 \sin \frac{6\pi t}{73};$$

для коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности (K_{0U}):

$$m_{K_{0U}}(t) = 1,329 + 0,0024t - 0,0175 \cos \frac{2\pi t}{73} + 0,188 \cos \frac{4\pi t}{73} + 0,519 \cos \frac{6\pi t}{73} + 0,0069 \sin \frac{2\pi t}{73} + 0,0588 \sin \frac{4\pi t}{73} - 0,333 \sin \frac{6\pi t}{73}.$$

Экспериментальные значения и аналитические приближения трендов показателей ЭМС представлены на рисунке 5.

Проверка тренда на статистическую значимость показала его 5%-й уровень. Аналогично прогнозируются показатели ЭМС системы электропитания ИЖС на последующие годы с глубиной прогнозирования два года. В результате выполненных расчётов основные коэффициенты, характеризующие ЭМС до 2020 г., составили: $K_I = 15,75$ %; $K_U = 4,16$ %; $K_{0U} = 2,1$ %; $K_{2U} = 0,7$ %.

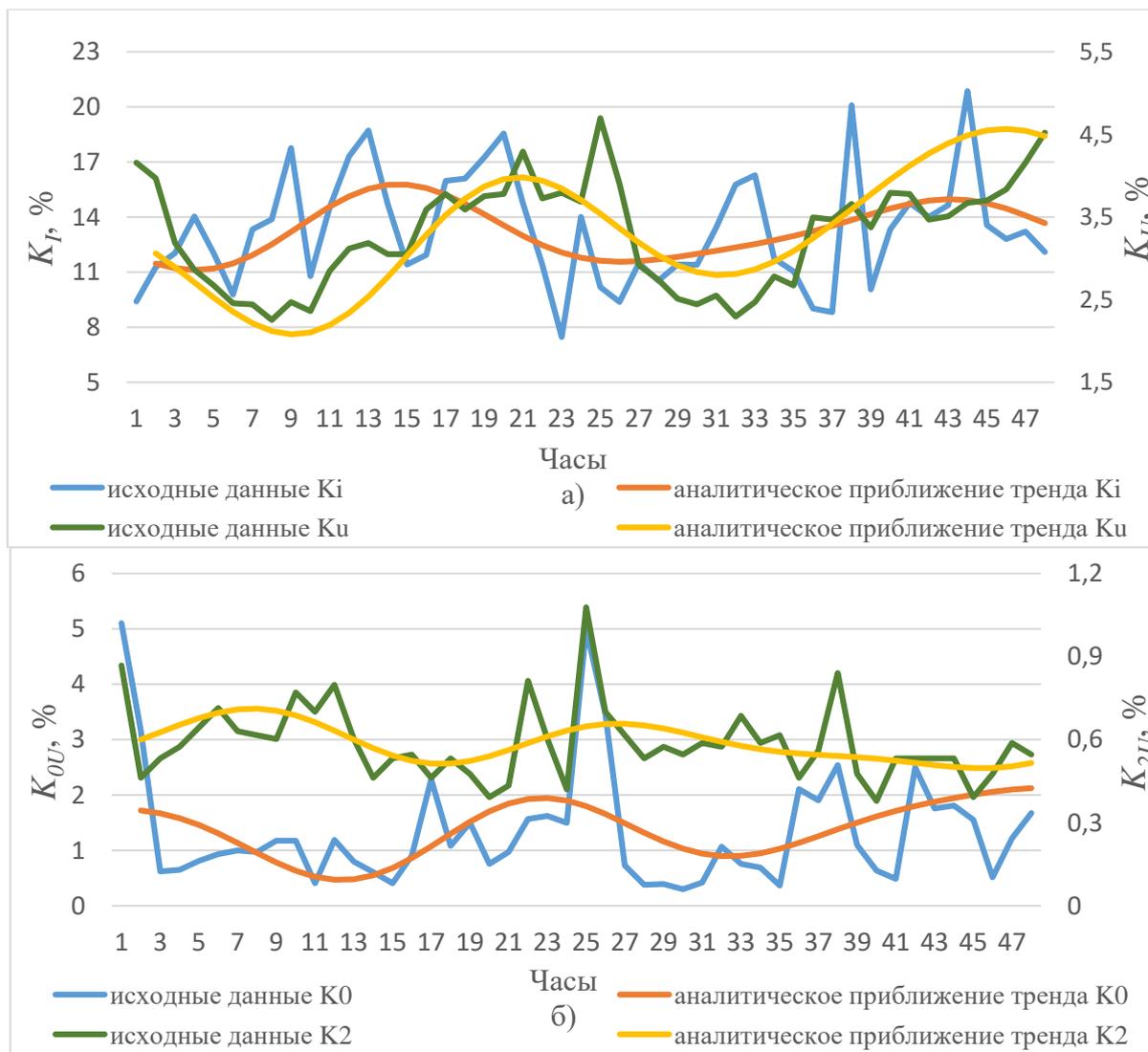


Рисунок 5. Тренды показателей ЭМС:

а – суммарных коэффициентов, гармонических составляющих тока и напряжения; б – несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности

Оценка потерь электроэнергии в различных элементах системы электроснабжения ИЖС от несинусоидальности и несимметрии тока и напряжения рассчитывалась по следующим выражениям:

– линия электропередач (ЛЭП):

$$\Delta W_{\Sigma \text{ЛЭП}} = \Delta W_{\text{ЛЭП} \text{Несимм}} + \Delta W_{\text{ЛЭП} \nu},$$

где $\Delta W_{\text{ЛЭП} \text{Несимм}}$ – потери электроэнергии в ЛЭП, вызванные несимметричным режимом работы, $\Delta W_{\text{ЛЭП} \text{Несимм}} = (3I_{0(1)}^2 R_{0\Sigma} + 3I_{2(1)}^2 R_{2\Sigma})\tau$; $\Delta W_{\text{ЛЭП} \nu}$ – потери электроэнергии в ЛЭП, вызванные несинусоидальным режимом работы,

$\Delta W_{\text{ЛЭП} \nu} = 3\tau \sum_{\nu=2}^{40} I_{\nu}^2 \cdot R_{\Sigma} \cdot k_{r\nu}$; $R_{0\Sigma}$, $R_{2\Sigma}$ – суммарные активные сопротивления нулевой и обратной последовательности ЛЭП; R_{Σ} – суммарное активное сопротивление ЛЭП на основной частоте; ν – номер гармоники; I_{ν} – ток ν -й

гармоники; $I_{0(1)}$, $I_{2(1)}$ – токи нулевой и обратной последовательности на основной частоте; τ – рассматриваемый период времени (24 ч); k_{rv} – коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта, равный $k_{rv} = 0,47\sqrt{v}$;

– в трансформаторе:

$$\Delta W_{\Sigma TP} = \Delta W_{TP\text{несимм}} + \Delta W_{TPv},$$

где $\Delta W_{TP\text{несимм}}$ – потери электроэнергии в трансформаторе вызванные несимметричными режимами работы, $\Delta W_{TP\text{несимм}} = K_{2U}^2 \tau \left(\Delta P_{x.x.} + \frac{\Delta P_{k.з.}}{u_{k.з.}^2} \right)$;

– потери электроэнергии в трансформаторе, вызванные несинусоидальными режимами работы,

$$\Delta W_{TPv} = \Delta P_{xx} \cdot \tau \sum_{v=2}^{40} K_{Uv}^2 + 0,607 \frac{\Delta P_{k3}}{u_{k3}^2} \cdot \tau \sum_{v=2}^{40} \frac{1 + 0,05 \cdot v^2}{v \cdot \sqrt{v}} K_{Uv}^2; \quad K_{2U} \text{ – коэффициент}$$

несимметрии напряжения обратной последовательности; K_{Uv} – коэффициент v -й гармонической составляющей напряжения.

Суммарные потери электроэнергии за сутки, вызванные несинусоидальными и несимметричными режимами работы, в линии № 1 представлены на рисунке 6. Доля этих потерь по отношению к потребляемой электроэнергии составляет 6,8 %.

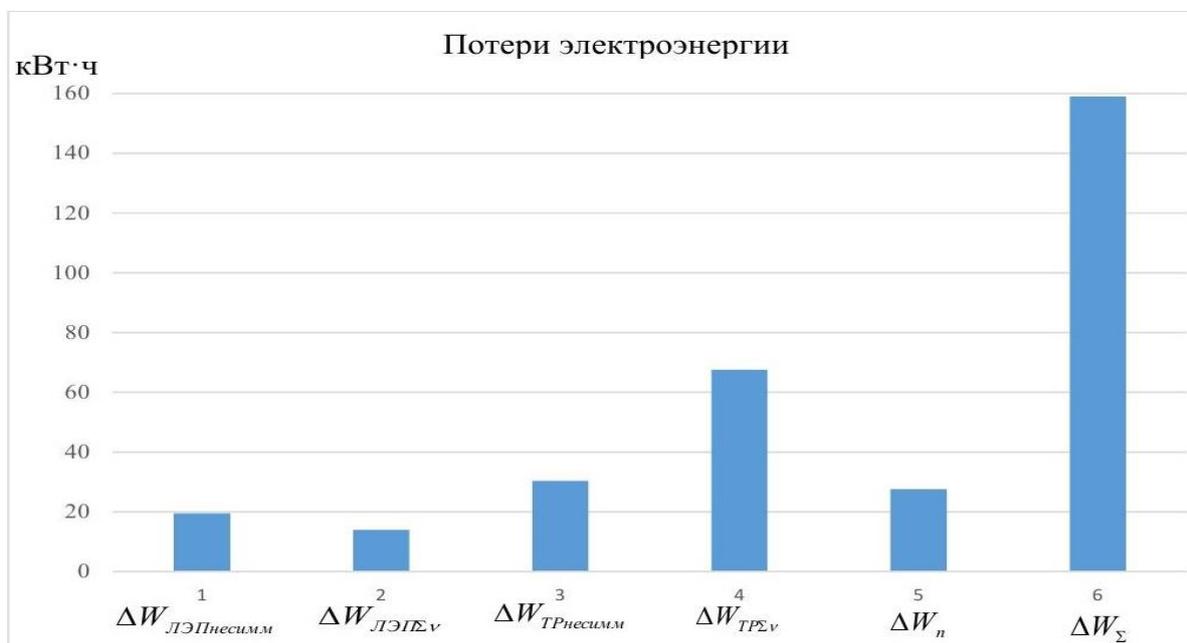


Рисунок 6. Гистограмма потерь электроэнергии в элементах системы электроснабжения ИЖС

Минимизация потерь электроэнергии от несинусоидальных и несимметричных режимов работы может быть достигнута за счёт выбора мощности и места установки ФКУ. С этой целью решается задача оптимизации

ции, включающая в себя два этапа: минимум потерь активной мощности в системе электроснабжения ИЖС, минимум приведённых затрат на размещение и структуру построения пассивных фильтров гармоник (ПФГ).

Для выполнения первого этапа сформулирована целевая функция, подлежащая минимизации, которая имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta P = & R'_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n I_{(\nu)i} - \sum_{i=1}^n I_{\kappa(\nu)i} \right)^2 + R'_2 \cdot \left(\sum_{i=2}^n I_{(\nu)i} - \sum_{i=2}^n I_{\kappa(\nu)i} \right)^2 + \\ & + R'_i \cdot \left(\sum_i^n I_{(\nu)i} - \sum_i^n I_{\kappa(\nu)i} \right)^2 + \dots + R'_n \cdot (I_{(\nu)n} - I_{\kappa(\nu)n})^2 \rightarrow \min, \end{aligned}$$

где R'_i – активное сопротивление i -го участка ЛЭП системы электроснабжения ИЖС, $R'_i = R_i \cdot \sqrt{\nu}$; $I_{(\nu)i}$ – величина тока искажения на i -м участке ЛЭП; $I_{\kappa(\nu)i}$ – требуемая величина тока компенсации на i -м участке ЛЭП.

Область ограничений целевой функции определяется следующими условиями:

$$\left\{ \begin{array}{l} |U_1(I_{\kappa(\nu)})| \leq U_{(1) \text{ доп}} \\ K_U(I_{\kappa(\nu)}) \leq K_{U \text{ доп}}; \\ K_{2U}(I_{\kappa(\nu)}) \leq K_{2U \text{ доп}}; \\ K_{0U}(I_{\kappa(\nu)}) \leq K_{0U \text{ доп}}; \\ \sum_{i=1}^n I_{\kappa(\nu)i} - I_{\kappa(\nu)} \approx 0; \\ I_{\kappa(\nu)} \geq 0, \end{array} \right.$$

где $U_{(1) \text{ доп}}$ – текущее (допустимое) напряжение прямой последовательности в узле сети; K_{2U} – текущее (допустимое) значение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности; K_{0U} – текущее (допустимое) значение коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности; K_U – текущее (допустимое) значение суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению.

Абсолютный экстремум целевой функции находится методом Лагранжа, в результате которого функция, подлежащая минимизации, принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} L = & R'_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n I_{(\nu)i} - \sum_{i=1}^n I_{\kappa(\nu)i} \right)^2 + R'_2 \cdot \left(\sum_{i=2}^n I_{(\nu)i} - \sum_{i=2}^n I_{\kappa(\nu)i} \right)^2 + \\ & + R'_i \cdot \left(\sum_i^n I_{(\nu)i} - \sum_i^n I_{\kappa(\nu)i} \right)^2 + \dots + R'_n \cdot (I_{(\nu)n} - I_{\kappa(\nu)n})^2 + \lambda \left(\sum_{i=1}^n I_{\kappa(\nu)i} - I_{\kappa(\nu)} \right) \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Ток искажения ν -й гармоники в системе электроснабжения ИЖС определяется на основании метода узловых потенциалов, по выражению, записанному в матрично-топологической форме для линии № 1:

$$\dot{I} = \underline{Y}_B \cdot \left(M_T \cdot \left((M \cdot \underline{Y}_B \cdot M_T)^{-1} \cdot (J - M \cdot \underline{Y}_B \cdot \dot{E}) \right) - \dot{E} \right),$$

где \underline{Y}_B – диагональная матрица комплексных проводимостей ветвей схемы замещения; M – первая матрица инцидентий; \underline{j} – вектор-столбец комплексных задающих токов в узлах схемы замещения; \underline{E} – вектор-столбец комплексных заданных ЭДС ветвей схемы замещения.

Задача минимизации потерь мощности решалась для 3-й и 5-й гармоники токов, так как в процентном отношении они составляют основную долю тока искажения.

Второй этап сводится к минимизации приведённых затрат на основании целевой функции:

$$Z = \sum_{i=1}^n C_i(I) \cdot I_i \rightarrow \min .$$

с областью ограничения:

$$i = \overline{1, \dots, n}; \quad n = 3; \quad C_i(I) = \begin{cases} a_1 \cdot I + b_1 & \left\{ \begin{array}{l} 0 < I_1 < I_k \\ 0 < I_2 < I_k \\ 0 < I_3 < I_k \end{array} \right. \\ a_2 \cdot I + b_2 \\ a_3 \cdot I + b_3 \end{cases}; \quad I_k = \sqrt{I_{k(3)}^2 + I_{k(5)}^2},$$

где $C_i(I)$ – приведённая стоимость i -го ФКУ в функции токов компенсации; I_i – ток i -й ВГ; I_k – технически реализуемые пределы компенсации тока i -го ФКУ; a_i и b_i – угловые и постоянные коэффициенты удельной стоимости с учётом издержек, эксплуатационных затрат и потерь электроэнергии в i -м ФКУ; $I_{k(3)}$ и $I_{k(5)}$ – ток компенсации 3-й и 5-й гармоники.

Реализация задачи минимизации потерь мощности и приведённых затрат выполнена на основании алгоритма, представленного на рисунке 7.

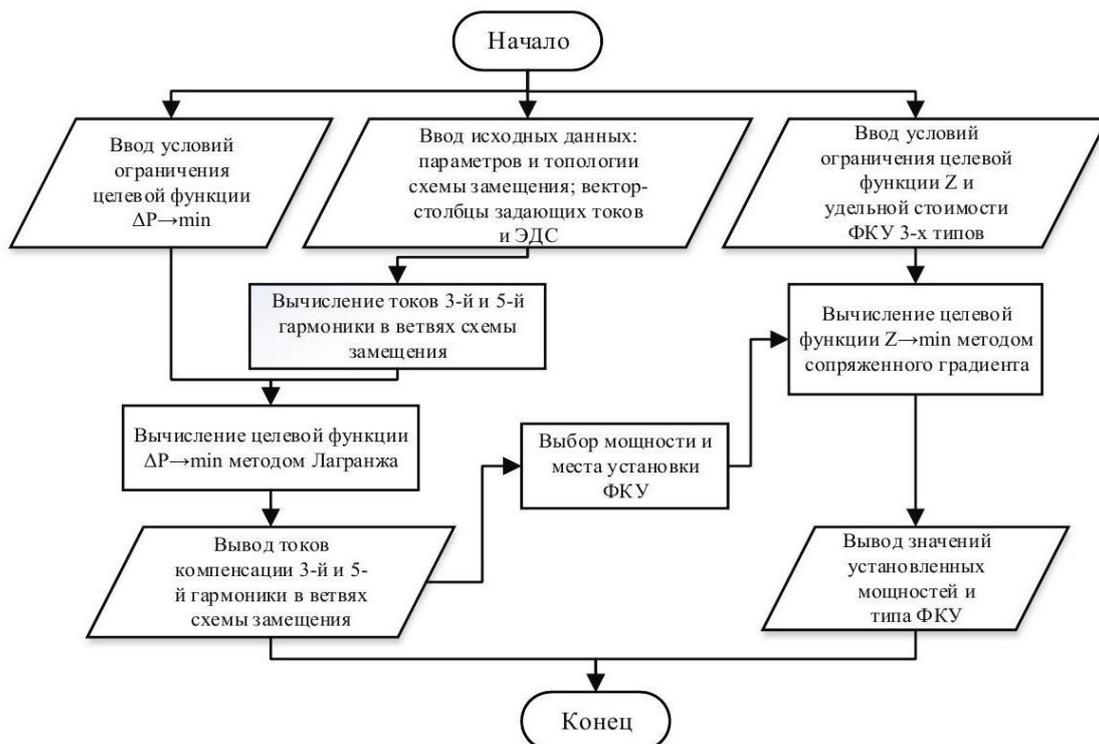


Рисунок 7. Алгоритм минимизации потерь электроэнергии в системе электроснабжения ИЖС

Решение оптимизационной задачи минимизации приведённых затрат реализовано методом сопряжённого градиента. В результате решения задачи оптимизации целесообразна установка на трех опорах, начиная с конечной, через каждые 100 м, узкополосного ПФГ с двумя параллельными секциями, добротностью 40 и суммарным током компенсации $I_k = 15,4$ А. При этом потери электроэнергии, вызванные несинусоидальными и несимметричными режимами работы в низковольтной ЛЭП системы электроснабжения ИЖС, снизились на 84 %.

В четвертой главе выполнено имитационное моделирование системы электроснабжения ИЖС с установленными ПФГ в конце каждой линии на конечных опорах и АФГ на низкой стороне КТП. Произведена оценка экономической эффективности от внедрения выбранных устройств по минимизации потерь электроэнергии в системах электроснабжения ИЖС при несинусоидальных и несимметричных режимах работы.

Схемы используемых ФКУ для снижения потерь электроэнергии в системе электроснабжения ИЖС представлены на рисунке 8.

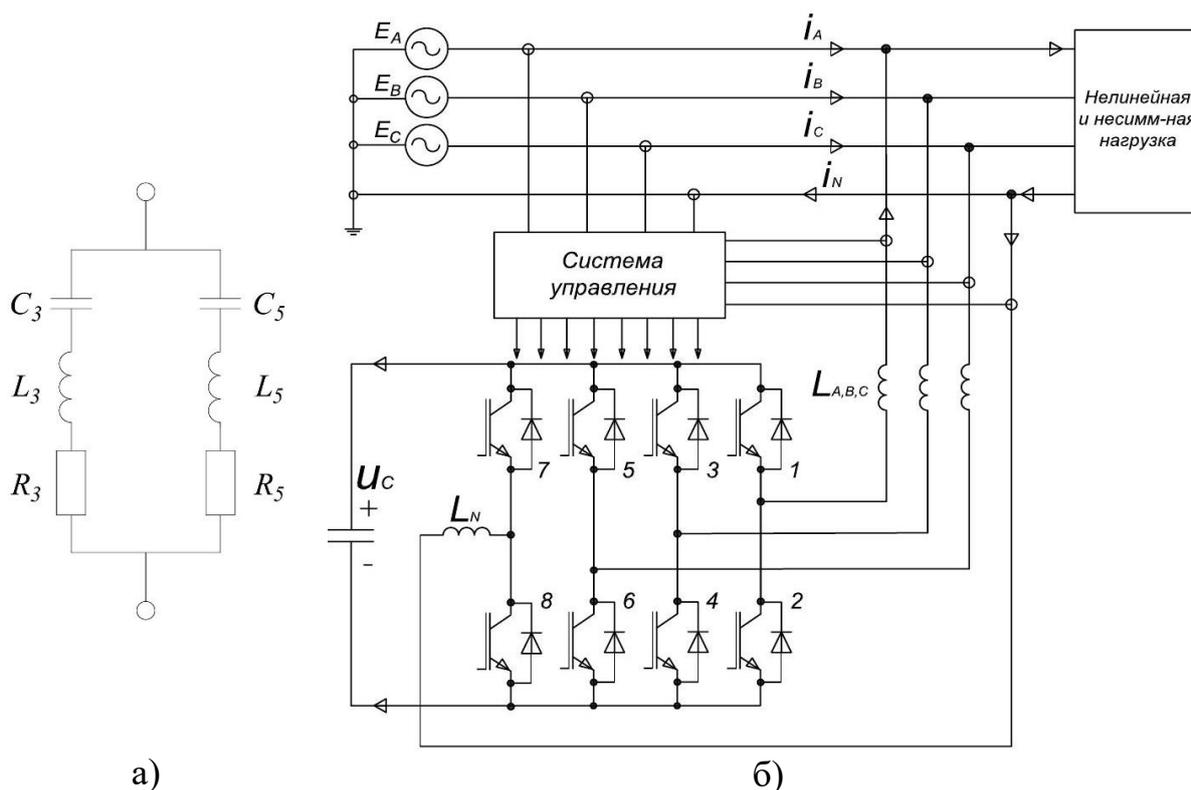


Рисунок 8. Схемы ФКУ: а - ПФГ, б - АФГ

Для уменьшения влияния токов ВГ и несимметрии генерируемыми ОЭП на понижающие трансформаторы КТП и высоковольтные линии связи КТП с энергосистемой принимаем к установке стандартный четырех плечевой АФГ мощностью 40 кВА и током нейтрали 120 А.

Для оценки снижения потерь электроэнергии в системе электроснабжения ИЖС с учётом высоковольтной сети и установкой ФКУ произведено имитационное моделирование в системе Matlab&Simulink (рисунке 9).

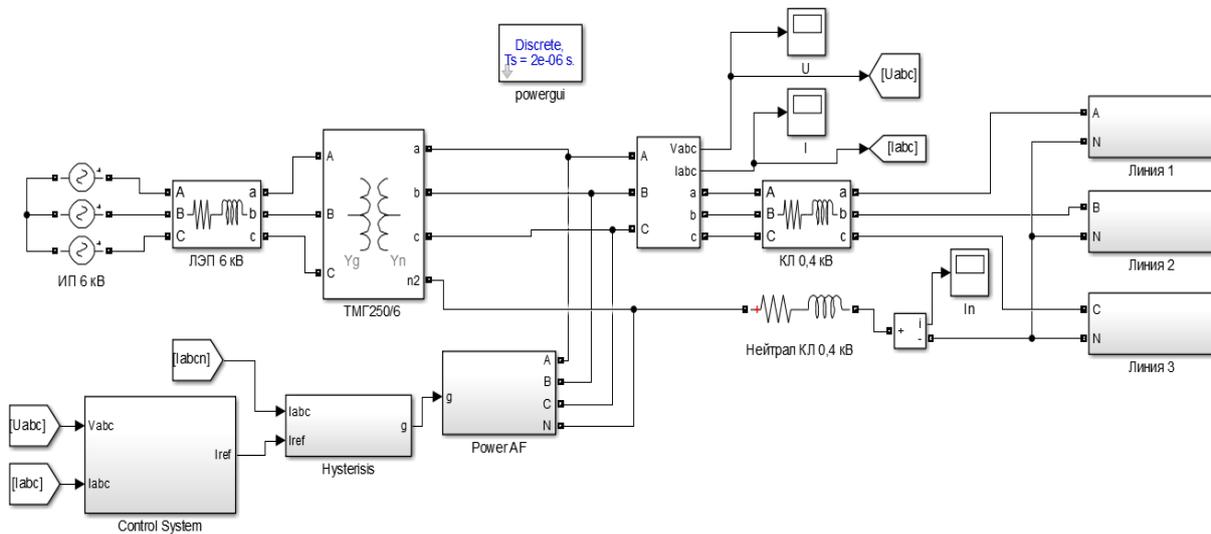


Рисунок 9. Имитационная модель системы электроснабжения ИЖС

На рисунках 10, 11 представлены спектры гармонических составляющих тока фазы А, из которого следует, что суммарные коэффициенты гармонических составляющих по току и напряжению на шинах КТП составили $K_I = 1,61 \%$, $K_U = 0,96 \%$. В ЛЭП значение коэффициентов составило $K_I = 5,5 \%$, $K_U = 2,2 \%$.

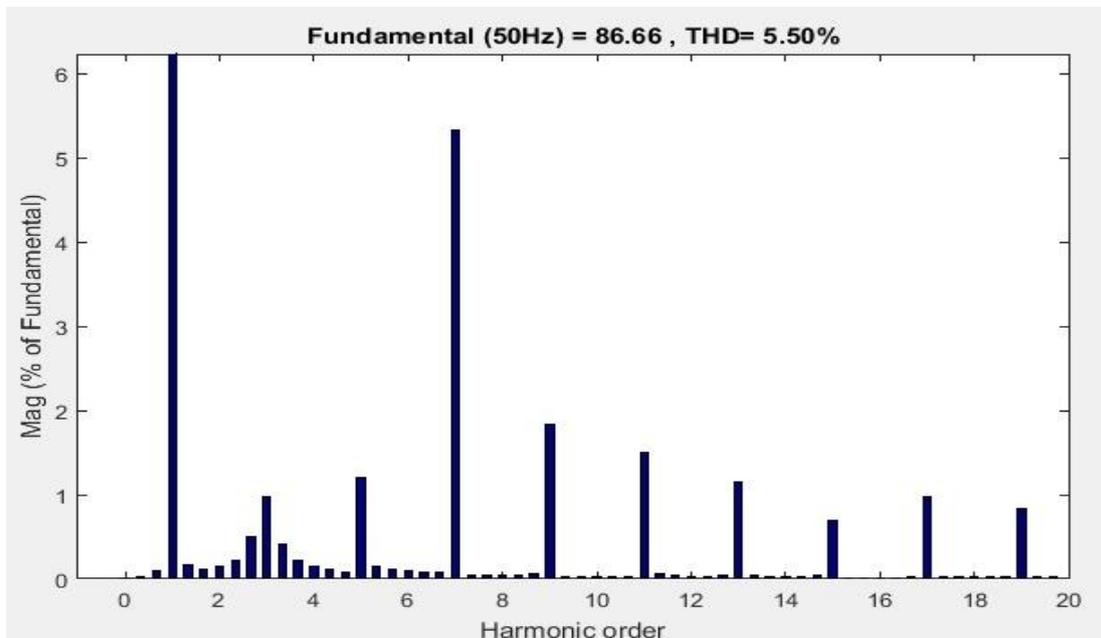


Рисунок 10. Спектры ВГ тока в ЛЭП

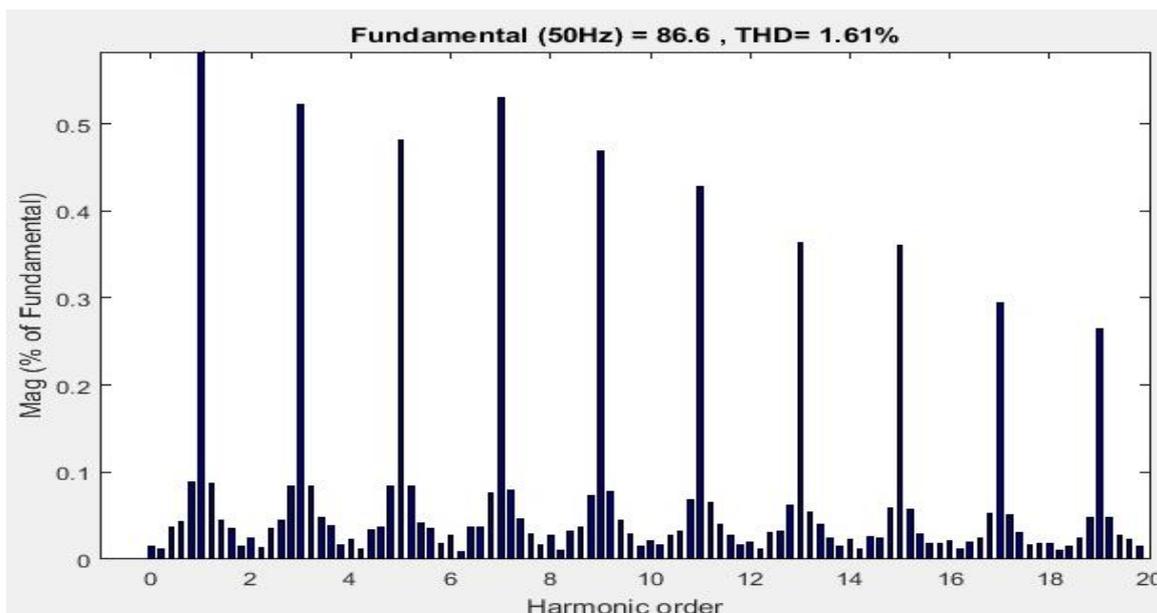


Рисунок 11. Спектры ВГ тока на шинах КТП

В результате уменьшения гармоник, кратных трем, симметрирования фазной нагрузки, снижения коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию, потери электроэнергии в системе электроснабжения ИЖС по результатам имитационного моделирования уменьшились на 84 %, и составили $\Delta W_{\Sigma} = 23$ кВт·ч за одни сутки, ток в нулевом проводе уменьшился до $I_N = 0,8$ А.

Для установки АФГ и трех узкополосных ПФГ требуется по ценам, действующим в настоящее время, 750 тыс. рублей, при этом расчётный срок окупаемости, с учётом издержек, составляет около 4,4 года.

В приложении представлены оригиналы протоколов и программы проведения измерений, свидетельство о поверки приборов и акт о внедрении результатов диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Рассмотрены особенности построения систем электроснабжения ИЖС. Выполнен анализ влияния ОЭП на увеличение потерь электроэнергии. Рассмотрены возможные способы снижения потерь электроэнергии от токов ВГ и несимметрии.

2. Экспериментально подтверждено наличие токов ВГ и несимметрии в системах электроснабжения ИЖС. Установлена основная особенность режима работы систем электроснабжения ИЖС, заключающаяся в том, что спектр ВГ тока и напряжения включает в себя все нечетные гармоники, с преобладанием третьей, при этом в нулевом проводе возникает ток небаланса за счёт тока несимметрии и ВГ токов, кратных трём.

3. Проведённый статистический анализ коэффициентов ЭМС позволил установить закономерность их изменения в течение суток, недели, месяца, года и подтвердил подверженность их изменений случайным процессам для трех характерных периодов. При этом получены аналитические выражения для определения наиболее вероятных значений показателей ЭМС с учётом ежегодного роста нагрузок в системах электроснабжения ИЖС на 5 %.

4. Разработана имитационная модель системы электроснабжения ИЖС в Matlab&Simulink, учитывающая несинусоидальные и несимметричные режимы работы, позволяющая оценивать значения параметров режимов и показателей качества электроэнергии на вводе и в любых узлах системы. При этом возможно оценить изменения спроса электрической энергии и выявить наиболее оптимальные узлы установки ФКУ. Результаты эксперимента и имитационного моделирования показали хорошую корреляцию между собой и расхождение результатов измерения и моделирования не превышает 12 %.

5. На основании экспериментальных и аналитических исследований установлено, что потери электроэнергии при несинусоидальных и несимметричных режимах работы в элементах системы ИЖС достигают 7 % от потребляемой энергии. Для минимизации потерь сформированы целевые функции и решены задачи оптимизации потерь электроэнергии, позволяющие выбрать места установки ФКУ при минимуме капитальных и эксплуатационных затрат. Предлагается использовать узкополосные пассивные фильтры с двумя параллельными секциями и активный фильтр гармоник на шинах 0,4 кВ КТП.

6. На примере системы электроснабжения ИЖС одного из районов Белгородской области доказано, что установка ПФГ на трёх опорах, начиная с конечной, через каждые 100 м и активного фильтра гармоник на шинах 0,4 кВ КТП, снижает потери электроэнергии в элементах сети от несинусоидальных и несимметричных режимов работы на 84 %. При этом коэффициенты, характеризующие ЭМС на шинах 0,4 кВ КТП, составили: $K_I = 1,6 \%$; $K_U = 0,96 \%$; $K_{2U} = 0,8 \%$; $K_{0U} = 1,1 \%$, а ток небаланса в нулевом проводе $I_N = 0,8 \text{ А}$.

7. Произведена технико-экономическая оценка эффективности проекта по компенсации токов небаланса и ВГ с учётом дисконтирования денежных потоков. Расчёты показали на примере одного из районов Белгородской области, что срок окупаемости проекта не превышает 4,4 года, при капитальных затратах по ценам, действующим в настоящее время 750 тыс. руб.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Авербух, М.А. Оценка качества электроэнергии в электрических сетях индивидуального жилищного строительства при нелинейных потребителях / М.А. Авербух, О.К. Бочаров, **Е.В. Жилин** // Научное обозрение. 2015. – № 2. – С. 147-150.
2. Авербух, М. А. О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства /М.А. Авербух, **Е.В. Жилин** // Энергетик. – 2016. – № 6. – С. 54-57.
3. Авербух, М.А. Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов / М.А. Авербух, **Е.В. Жилин** // Промышленная энергетика. – 2017. – № 12. – С. 40-45.
4. Авербух, М.А. Статистическая оценка коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию питающего напряжения в системах электроснабжения ИЖС / М.А. Авербух, **Е.В. Жилин**, Е.Ю. Сизганова // Техника и технологии: журнал Сибирского Федерального университета. – 2017. – Т. 10, № 8. – С. 1079 - 1087.

Статьи, опубликованные в зарубежных изданиях:

5. Averbukh, M.A. Experimental Analysis of Electrical Modes in a Residential Estate Electrical Power Supply System / M.A. Averbukh, **V. Z. Evgeniy**, P. V. Roschubkin // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – №12: p. 3446-3451.

Публикации в сборниках трудов конференций:

6. Жилин, Е.В. Экспериментальное определение параметров четырехпроводной системы электроснабжения учебного корпуса / Е.В. Жилин // Научные открытия в эпоху глобализации: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Казань, 2015. – С. 32-36.
7. Концепция интеллектуальных сетей «smartgrid» в электроэнергетике / В.Г. Сергиенко, А.Г. Мельников, И.В. Башкатов, Е.В. Жилин // Образование, наука, производство. – Белгород, 2015. – С. 3112-3117.
8. Авербух, М.А. Оценка качества электроэнергии в системе электроснабжения жилого микрорайона / М.А. Авербух М.А., Е.В. Жилин // Новая наука: от идеи к результату: материалы Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак, 2015. – С. 134-139.
9. Жилин, Е. В. Экспериментальные исследования основных энергетических параметров системы электроснабжения микрорайона / Е.В. Жилин, А.В. Абросимов // Образование, наука, производство. – Белгород, 2015. – С. 2875-2879.

10. Авербух, М.А. Оценка потери электроэнергии при несинусоидальных и несимметричных режимах работы на базе экспериментальных данных / М.А. Авербух, Е.В. Жилин // Молодежь и научно-технический прогресс: материалы IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Губкин, 2016. – С. 93-96.

11. Жилин, Е.В. Моделирование системы электроснабжения с нелинейной и несимметричной нагрузкой в программном комплексе MATLAB & Simulink / Е.В. Жилин // Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых. – Белгород, 2016. – С. 42-47.

12. Жилин, Е.В. Изменение показателей качества в системах электроснабжения ИЖС при несимметричной и нелинейной нагрузке как случайный процесс / Е.В. Жилин, М.А. Авербух // Интеграция современных научных исследований в развитие общества. – Кемерово, 2016. – С. 270-274.

13. Жилин, Е.В. Статистическая оценка показателей несинусоидальности и несимметрии в системах электроснабжения ИЖС / Е.В. Жилин // Энергетические, управляющие и информационные системы: материалы I Международной научно-технической конференции. – Белгород, 2016. – С. 195-200.

14. Жилин, Е.В. Анализ метода компенсации несимметрии и несинусоидальности в электрических сетях ИЖС [Электронный ресурс] / Е.В. Жилин // Научно-технические технологии и инновации: материалы Международной научно-практической конференции. – Белгород, 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

15. Жилин, Е.В. Активный силовой фильтр для трехфазной четырехпроводной сети [Электронный ресурс] / Е.В. Жилин // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

16. Жилин, Е. В. Экспериментальный анализ гармонических составляющих токов и напряжений бытовых нелинейных электроприемников / Е.В. Жилин // Молодежь и научно-технический прогресс: материалы IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Губкин, 2017. – С. 93-96.

17. Жилин, Е.В. Оптимизация коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию питающего напряжения в системах электроснабжения ИЖС / Е.В. Жилин // Энергетические системы: сб. трудов II Международной. научно-технической конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. – С. 195-200.

18. Жилин, Е.В. Способы компенсации высших гармоник и несимметрии токов в системах электроснабжения ИЖС / Е.В. Жилин // Борисовские чтения: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию юбилею первого ректора Политехнического института В.Н. Борисова. – Красноярск, 2017. – С. 129-133.