

На правах рукописи



Федосов Денис Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ
И НЕСИММЕТРИЮ НАПРЯЖЕНИЙ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Иркутский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Висящев Александр Никандрович

Официальные оппоненты: **Крюков Андрей Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
Иркутский государственный университет путей сообщения, профессор
кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта»

Долгов Александр Павлович
кандидат технических наук, доцент,
Филиал ОАО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» – СибНИИЭ, заведующий сектором управления режимами ЭЭС

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Иркутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Иркутск

Защита диссертации состоится «20» июня 2014 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте http://www.nstu.ru/science/cand_dis/fedosov.

Автореферат разослан «__» апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тимофеев Иван Петрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Качество электрической энергии (КЭЭ) как товара нормируется стандартами ГОСТ 13109-97 и заменившим его с 01.01.2013 г. ГОСТ Р 54149-2010 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Одними из основных показателей качества электроэнергии (ПКЭ) являются характеристики искажений напряжения: несинусоидальности и несимметрии. Несоответствие ПКЭ требованиям ГОСТ приводит к значительному материальному ущербу, связанному с уменьшением срока службы и выходом из строя электрооборудования, к снижению надёжности работы энергосистем, увеличению потерь электроэнергии, появлению брака продукции, неправильной работе или отказу устройств релейной защиты и др.

Специфика электрической энергии заключается в том, что её качество зависит не только от производителя и поставщика, но и от самих потребителей. Влияние участников системы электроснабжения (энергоснабжающей организации и потребителей) на КЭЭ осложняет процедуру определения роли потребителей в ухудшении качества напряжения и оценки их ущерба.

При наличии в точке общего присоединения (ТОП) электрической сети нескольких потребителей ПКЭ будут одинаковыми для всех потребителей, однако влияние электроприёмников каждого из них на искажение напряжения может быть различным. Если при этом КЭЭ не соответствует требованиям ГОСТ, то для решения задачи нормализации ПКЭ необходим метод, позволяющий корректно оценить влияние потребителей на КЭЭ и выявить их электроприёмники, недопустимо ухудшающие КЭЭ. Метод должен предусматривать однозначное разделение ответственности между участниками системы электроснабжения (СЭС) за влияние на КЭЭ.

Указанные задачи не теряют своей значимости на протяжении последних десятилетий, их решению посвящено множество работ в отечественной и зарубежной литературе. Значительный вклад в их изучение и решение внесли Жежеленко И. В., Железко Ю. С., Зыкин Ф. А., Майер В. Я., Шидловский А. К., Куренный Э. Г., Висящев А. Н., Карташев И. И., Никифорова В. Н., Смирнов С. С., J. Arrillaga, Wilsun Xu и др. учёные. На базе исследовательских работ приняты нормативно-правовые документы, устанавливающие порядок взаимоотношений между участниками СЭС в сфере КЭЭ, однако в настоящее время ни один из ранее принятых документов не действует.

Для оценки влияния потребителей на искажение напряжения необходимо решение задачи, связанной с определением параметров схемы замещения (СЗ) электрической сети для исследуемой гармоники или для токов обратной последовательности (ОП) на основной частоте. Задача может быть решена с использованием априорной информации или эмпирическими методами. Наибольшую практическую значимость представляет определение параметров СЗ нагрузок потребителей в действующей энергосистеме в режиме реального времени.

На базе метода оценки влияния потребителей на искажение напряжения возможно создание механизма регулирования взаимоотношений между энерго-

снабжающей организацией (ЭСО) и потребителями электроэнергии в области КЭЭ. Важность законодательного установления формы взаимоотношений потребителей и ЭСО в сфере КЭЭ отмечается в публикациях последних лет. Решение этого вопроса позволит стимулировать потребителей и ЭСО к нормализации ПКЭ, необходимой во многих энергосистемах России.

Таким образом, исследуемые в диссертационной работе вопросы оценки влияния потребителей на искажение напряжения, экспериментального определения параметров СЗ участников СЭС на высших гармониках (ВГ) и для токов ОП основной частоты являются актуальными.

Цель работы состоит в разработке метода оценки влияния потребителей на КЭЭ в электроэнергетических энергосистемах (ЭЭС).

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Разработка метода оценки влияния потребителей и ЭСО на уровень напряжений ВГ и ОП основной частоты. Верификация метода при различном сочетании параметров нагрузок потребителей и ЭЭС.
2. Разработка метода нормирования токов искажения нелинейных и несимметричных нагрузок с учётом их мощности.
3. Исследование погрешностей метода экспериментального определения параметров СЗ электроприёмников по двум измерениям параметров режима на ВГ и для токов ОП основной частоты.
4. Разработка алгоритмов обработки параметров режима для повышения точности экспериментального определения параметров СЗ.
5. Верификация алгоритмов при измерениях параметров режима на физической модели электрической сети и на объектах ЭЭС.

Методы исследований, использованные в работе, основаны на применении математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, теории фильтрации, теории комплексных чисел. Экспериментально-расчётные исследования выполнены с использованием языка программирования и пакета Simulink SimPowerSystems системы MATLAB, программы Mathcad.

Научную новизну диссертационной работы составляют:

1. Метод оценки влияния потребителей на искажение напряжения в ТОП с использованием понятий автономного напряжения искажения и коэффициента влияния.
2. Метод нормирования токов искажения электроприёмников с учётом их мощности, базирующийся на разработанном методе оценки влияния потребителей на искажение напряжения.
3. Результаты исследования погрешностей метода экспериментального определения параметров СЗ нагрузок на ВГ и для токов ОП на основной частоте, позволяющие оценить область применения метода.
4. Алгоритмы обработки напряжений и токов искажения, основанные на пропуске последовательных измерений параметров режима с изменениями, меньшими заданной величины.

5. Комбинированный алгоритм обработки параметров режима на базе фильтра Савицкого-Голея, повышающий точность определения параметров нагрузки на ВГ и для токов ОП основной частоты.

На защиту выносятся положения, составляющие научную новизну.

Практическая ценность результатов работы:

1. Получен метод оценки влияния искажающих, неискажающих и смешанных нагрузок потребителей на КЭЭ в ТОП.
2. Разработаны алгоритмы обработки параметров режима для экспериментального определения параметров СЗ электроприёмников на ВГ и для токов ОП на основной частоте.
3. Полученные в диссертационном исследовании результаты позволяют корректно и достоверно выявлять электроприёмники, недопустимо ухудшающие КЭЭ, количественно оценить их влияние на КЭЭ и в перспективе реализовать механизм взаимодействия между ЭСО и потребителями в сфере КЭЭ.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы в виде методики, исследовательских программ и практических рекомендаций переданы в ЗАО «КРОК Инкорпорейтед» (г. Москва) для их совместного использования при реализации системы мониторинга и управления КЭЭ на электросетевых предприятиях ОАО «ФСК ЕЭС». Результаты диссертационного исследования используются в Иркутском государственном техническом университете при выполнении научно-исследовательских работ по анализу КЭЭ на предприятиях ОАО «Иркутская электросетевая компания» и разработке мероприятий по улучшению ПКЭ (подтверждено актом об использовании результатов диссертации).

Материалы диссертации используются в учебном процессе в Иркутском государственном техническом университете при проведении лекций и лабораторных работ по курсам «Качество электроэнергии в электроэнергетических системах», «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике» для студентов, бакалавров и магистрантов (получен акт внедрения).

Личный вклад автора. Разработка метода оценки влияния потребителей на искажение напряжения, метода нормирования токов искажения, исследование погрешностей метода определения параметров СЗ, разработка усовершенствованного алгоритма определения параметров СЗ, создание моделей, программных компонентов и методик их применения выполнены лично автором.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались автором и обсуждались на заседании Молодежной программы «Инвестируя в будущее» в рамках 8-й ежегодной конференции и выставки Russia Power – 2010 «Электроэнергетика России» (г. Москва, ВВЦ, 2010 – диплом победителя), на региональном этапе конкурса научно-инновационных проектов Всероссийского фестиваля науки (г. Иркутск, ИрГТУ, 2011 – 2-е место), на V международной заочной научно-практической конференции «Энергетика в современном мире» (г. Чита, ЧитГУ, 2011), на Международной молодёжной научно-технической конференции «Энергосистема и активные адаптивные электрические сети: проектирование, эксплуатация, образование» (г. Самара,

СамГТУ, 2011), на 5-й Всероссийской научно-технической Интернет-конференции «Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике» (г. Пермь, ПНИПУ, 2011), на III Всероссийском конкурсе молодых ученых (г. Миасс, МСНТ, РАН, 2011), на Областном конкурсе молодежных инновационных проектов (г. Иркутск, Министерство по физической культуре, спорту и молодежной политике Иркутской области, 2011 – специальный приз конкурсной комиссии), на Международной конференции «The power grid of the future» – «Энергосистемы будущего» (г. Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2012 – доклад на английском языке), на Международной конференции аспирантов, приуроченной к официальному открытию проекта «Байкал» (г. Иркутск, ИрГТУ, 2012 – доклад на английском языке), на III Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодёжи» (г. Екатеринбург, УрФУ, 2012), на итоговом мероприятии по программе «УМНИК» – Межрегиональной научно-исследовательской конференции «Молодые инноваторы Байкальского региона», направление «Новые приборы и аппаратные комплексы» (г. Иркутск, ИрГТУ, 2013 – победитель программы), на II научной конференции в рамках проекта «Байкал» (г. Иркутск, ИрГТУ, 2013 – доклад на английском языке), на круглом столе «Презентации молодежных инновационных проектов в области энергоэффективности» в рамках XVI выставки технологий и оборудования для энергетике, электротехники, энергосберегающих технологий – «Энергосбережение» (г. Иркутск, ИрГТУ, 2013), на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» в течение 4 лет (г. Иркутск, ИрГТУ, 2010 г. – 2 доклада, 2011 г. – 4 доклада, 2012 г. – 4 доклада, 2013 г. – 4 доклада).

Диссертационная работа выполнена в рамках плана научных исследований по направлению «Интеллектуальные сети (Smart Grid) для эффективной энергетической системы будущего», проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования в соответствии с Постановлением Правительства РФ №220 от 09.04.2010 г. (договор № 11.G34.31.0044 от 27.10.2011 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, в том числе 2 в издании из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из четырёх глав, введения, заключения, библиографического списка из 106 наименований и 5 приложений. Объём работы – 195 страниц, включая 162 страницы основного текста, 55 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна, практическая значимость полученных результатов и другие основные характеристики диссертационной работы.

В первой главе проведён анализ методов оценки влияния потребителей на искажение напряжения в электрической сети. Рассмотрены методы, получившие наибольшее распространение, в т. ч. использовавшиеся в СССР и России в нормативных документах по анализу КЭЭ:

- метод оценки влияния потребителей на КЭЭ по мощности нагрузок потребителя;
- метод оценки влияния по направлению (знаку) активной мощности искажения нагрузки;
- метод расчёта долевых вкладов (ДВ);
- метод оценки влияния по изменению ПКЭ при включении или отключении электроприёмников;
- метод локализации источников искажения с использованием генератора эталонной помехи.

Метод, использующий соотношения между мощностью нагрузок потребителя и мощностью короткого замыкания в Топ в качестве критерия для оценки возможности влияния потребителя на искажение напряжения, даёт недостоверные результаты при резонансе во внешней относительно потребителя электрической сети. В этом случае искажающий потребитель малой мощности, работа которого приводит к появлению недопустимого уровня ВГ в Топ, не считается влияющим на КЭЭ.

Рассмотрен метод выявления искажающих и неискажающих электроприёмников по углу сдвига между напряжением искажения в Топ и током искажения на присоединении анализируемой нагрузки (по знаку активной мощности искажения). Приведены примеры реальных измерений, а также математические модели Топ, указывающие на несовершенство метода в случае наличия в Топ нескольких искажающих нагрузок с разными аргументами токов искажения.

Методы расчёта ДВ (в напряжение, в ток, в мощность искажения) базируются на возможности выделить в напряжении искажения составляющие, однозначно соответствующие каждому из электроприёмников в Топ. На примерах показано, что такая оценка влияния не является автономной, поскольку при расчёте ДВ нагрузки отдельного потребителя помимо его собственных параметров используются параметры СЗ прочих участников СЭС. При этом любое изменение параметров СЗ во внешней сети будет приводить к изменению ДВ нагрузок потребителя, которое воспринимается им как необоснованное. При использовании такого метода оценки влияния уменьшение потребителем эмиссии токов искажения нецелесообразно, т. к. улучшает не столько его статус, сколько статус остальных участников СЭС. Продемонстрировано, что в случае резонанса во внешней ЭЭС сколь угодно малый ток искажения нагрузок потребителя не делает ДВ допустимым. Рассмотрены сложности при расчёте штрафных санкций по комплексным ДВ.

Проведён анализ метода оценки ДВ по изменению ПКЭ при включении или отключении электроприёмников потребителя. Представлены примеры СЗ, в которых подключение неискажающей нагрузки приводит к ухудшению ПКЭ, а

подключение искажающей нагрузки улучшает КЭЭ в ТОП. Отмечено, что несовершенство метода вызвано неучётом векторного характера параметров СЗ.

Рассмотрен метод выявления искажающих электроприёмников с использованием генератора эталонной помехи. Для верификации метода в системе MATLAB составлена модель электрической сети, на которой проведён расчётный эксперимент. Достоверность метода локализации источника помехи подтверждена при наличии одного источника помехи в схеме; при двух и более источниках помехи метод работает недостоверно. Среди недостатков метода отмечена также необходимость проведения трудоёмких подготовительных работ, связанных с подключением генератора эталонной помехи к первичной сети и выполнением синхронизированных измерений напряжений искажения в узлах сети.

Для оценки влияния потребителей на искажение напряжения необходимо знать их параметры на ВГ и для токов ОП основной частоты. Для определения этих параметров существуют методы с использованием априорной информации и без её использования.

Первая группа методов отличается сравнительной простотой, однако обладает низкой достоверностью по причине неучёта случайного характера нагрузок и изменения конфигурации сети, а также из-за значительных методических погрешностей.

Вторая группа методов без использования априорной информации о сети обладает большей достоверностью. Для представления нагрузок потребителей и ЭСО в СЗ для ВГ и токов ОП основной частоты распространён метод активного двухполюсника (рисунок 1). Источник тока $\dot{I}_{иск.}$ характеризует искажающие нагрузки участника СЭС, проводимость $\underline{Y}_{иск.}$ соответствует его неискажающим нагрузкам на исследуемой ВГ или для ОП основной частоты.

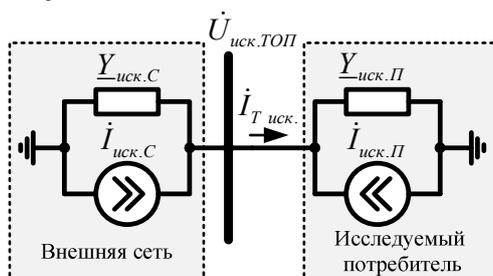


Рисунок 1 – Преобразованная схема замещения субъектов, подключенных к точке общего присоединения

Для определения параметров СЗ электроприёмников потребителя широкое применение получил метод, использующий данные двух измерений параметров режима в ТОП (см. рисунок 1) в разные моменты времени:

$$\dot{I}_{иск.экс.} = \frac{\dot{U}'_{иск.} \dot{I}''_{Т иск.} - \dot{U}''_{иск.} \dot{I}'_{Т иск.}}{\dot{U}''_{иск.} - \dot{U}'_{иск.}}; \underline{Y}_{иск.экс.} = \frac{\dot{I}''_{Т иск.} - \dot{I}'_{Т иск.}}{\dot{U}''_{иск.} - \dot{U}'_{иск.}}, \quad (1)$$

где $\dot{U}'_{иск.}$ и $\dot{I}'_{Т иск.}$ – напряжение искажения в ТОП и ток искажения, текущий от ТОП к исследуемому потребителю, при первом измерении; $\dot{U}''_{иск.}$ и $\dot{I}''_{Т иск.}$ – те же величины при втором измерении. Индекс $иск.$ в формулах (1) может обозначать

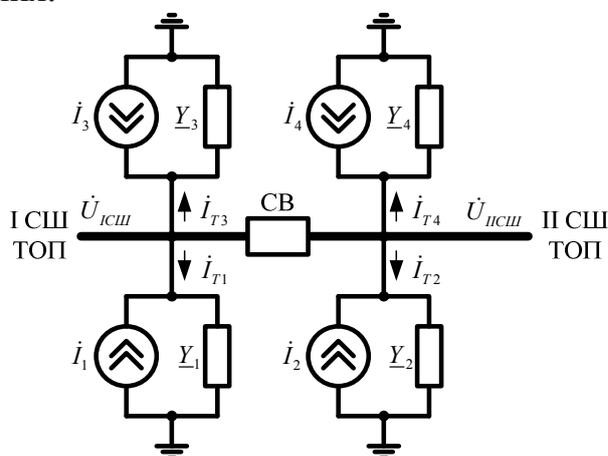
как анализируемую n -ю ВГ, так и ОП основной частоты, поскольку математические модели для анализа несимметрии и несинусоидальности напряжений одинаковы (см. рисунок 1). В зависимости от причин, вызвавших изменение параметров режима, возможно определение параметров СЗ нагрузок исследуемого потребителя ($\dot{I}_{иск.П}, \underline{Y}_{иск.П}$) или внешней относительно него электрической системы ($\dot{I}_{иск.С}, \underline{Y}_{иск.С}$).

В числе недостатков метода определения параметров СЗ по двум режимам отмечены низкая точность метода по причине малых изменений параметров режима, значительной погрешности измерения параметров режима на ВГ и для ОП и паразитных изменений считающихся постоянными параметров СЗ, а также неучёт возможности дополнительной электрической связи между ТОП и потребителем и отсутствие достоверной информации о причинах изменения параметров режима.

Таким образом, установлено, что задачи оценки влияния потребителей на искажение напряжения и определения параметров СЗ нагрузок потребителей не имеют корректного решения несмотря на многообразие предлагаемых подходов. Отмечены недостатки существующих методов, ограничивающие их использование.

Во второй главе предложен метод оценки влияния потребителей на несинусоидальность и несимметрию напряжений в электрической сети.

Распространённые методы оценки влияния по ДВ нагрузок потребителей в напряжение основаны на предположении об аддитивности напряжения искажения.



При включенном секционном выключателе (СВ):

$$\dot{U}_{ТОП} = \dot{U}_{исш} = \dot{U}_{исш} = \frac{\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_4}$$

При отключенном СВ:

$$\dot{U}_{исш} = \frac{\dot{I}_1 + \dot{I}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_3}; \quad \dot{U}_{исш} = \frac{\dot{I}_2 + \dot{I}_4}{\underline{Y}_2 + \underline{Y}_4}$$

$$\frac{\dot{I}_1 + \dot{I}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_3} + \frac{\dot{I}_2 + \dot{I}_4}{\underline{Y}_2 + \underline{Y}_4} \neq \frac{\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_4}$$

$$\dot{U}_{исш} + \dot{U}_{исш} \neq \dot{U}_{ТОП}$$

Рисунок 2 – Доказательство неаддитивности напряжения искажения в точке общего присоединения

На примере схемы на рисунке 2 показано, что напряжение искажения при совместной работе потребителей не является суммой напряжений искажения, создаваемых электроприёмниками потребителей при их отдельной работе, а следовательно, не может быть корректно распределено между нагрузками пропорционально их влиянию. Таким образом, использование понятия ДВ в напряжение искажения некорректно, т. к. это не соответствует реальным физическим процессам, происходящим в ЭЭС.

Здесь и далее в обозначениях индексы *иск.* опущены; подразумевается, что все параметры режима и параметры СЗ относятся к *n*-й ВГ или к ОП основной частоты.

При разработке метода оценки влияния необходимо учесть два фактора. С одной стороны, оценка влияния должна быть автономной в соответствии с принципами электромагнитной совместимости, т. е. каждый *k*-й потребитель должен нести ответственность только за собственные параметры СЗ \dot{I}_k и \underline{Y}_k . С другой стороны, влияние исследуемой нагрузки на уровень ВГ и несимметрии напряжений зависит не только от её собственных параметров, но и от параметров электроприёмников других потребителей в данной ТОП и параметров внешней электрической сети. Следовательно, необходим метод, который позволит учесть оба этих фактора и разделить ответственность между потребителями и ЭСО за влияние на КЭЭ.

Напряжение искажения в ТОП \dot{U} определяется по выражению:

$$\dot{U} = \frac{\sum_{k=1}^N \dot{I}_k}{\sum_{k=1}^N \underline{Y}_k}, \quad (2)$$

где \dot{I}_k и \underline{Y}_k – ток искажения и проводимость *k*-го участника СЭС соответственно; *N* – число участников СЭС, подключенных к ТОП. Введём понятия коэффициентов совпадения по фазе токов K_{CI} и проводимостей K_{CY} :

$$K_{CI} = \left| \frac{\sum_{k=1}^N \dot{I}_k}{\sum_{k=1}^N I_k} \right|; \quad K_{CY} = \left| \frac{\sum_{k=1}^N \underline{Y}_k}{\sum_{k=1}^N Y_k} \right|. \quad (3)$$

Коэффициенты K_{CI} и K_{CY} могут принимать значения в интервале [0, 1]. С учётом (3) выражение (2) для модуля напряжения искажения в ТОП:

$$U = \left(K_{CI} \sum_{k=1}^N I_k \right) / \left(K_{CY} \sum_{k=1}^N Y_k \right). \quad (4)$$

Отношение K_{CY} / K_{CI} является коэффициентом выгодности $K_{выг}$, характеризующим выгодность совместной работы нагрузок потребителей для компенсации искажений напряжения. Теоретически $K_{выг}$ может принимать значения от нуля включительно (выгодность совместной работы нагрузок нулевая, резонанс токов в ТОП) до $+\infty$ (условие полной компенсации нагрузками в ТОП токов искажения друг друга, $U = 0$). Таким образом, напряжение искажения в ТОП зависит не только от модулей параметров СЗ нагрузок потребителей и ЭСО, но и от их взаимного расположения на комплексной плоскости, что характеризуется коэффициентом $K_{выг}$.

Условие допустимости режима по напряжению искажения:

$$U \leq U_{дон.}, \quad (5)$$

где $U_{дон.}$ – допустимая по ГОСТ величина напряжения искажения, задаваемая коэффициентами $K_{U(n)}$ или K_{2U} . С учётом (4) и (5) можно записать:

$$\sum_{k=1}^N I_k / \left(K_{выг} \sum_{k=1}^N Y_k \right) \leq U_{дон.}. \quad (6)$$

Из (6) получаем, что:

$$\sum_{k=1}^N (K_{\text{выз}} U_{\text{доп.}} Y_k - I_k) \geq 0. \quad (7)$$

Необходимым условием допустимости режима по напряжению искажения является соблюдение неравенств (5) – (7). Достаточным условием соблюдения неравенства (7) является неотрицательность каждого из слагаемых в его левой части. Такое требование является обоснованным, поскольку обеспечивает всем участникам СЭС одинаковые условия для поддержания напряжения в ТОП U в допустимых пределах. Таким образом, для отдельно взятого k -го участника СЭС должно выполняться условие:

$$K_{\text{выз}} U_{\text{доп.}} Y_k - I_k \geq 0. \quad (8)$$

Обозначим $\frac{I_k}{Y_k} = U_k^{\text{авт.}}$, где $U_k^{\text{авт.}}$ – автономное напряжение искажения, создаваемое нагрузками k -го потребителя. Автономное напряжение искажения $U_k^{\text{авт.}}$ – это напряжение искажения, которое создавали бы нагрузки k -го потребителя на шинах ТОП в том случае, если бы потребитель мог работать отдельно от других участников СЭС. Тогда условие выполнения неравенства (5):

$$U_k^{\text{авт.}} \leq K_{\text{выз}} U_{\text{доп.}}. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет однозначно определить, является ли допустимым влияние нагрузок k -го участника СЭС на искажение напряжения в ТОП.

Для количественной оценки влияния нагрузок k -го участника СЭС на искажение напряжения в ТОП введено понятие коэффициента влияния:

$$K_{\text{вл.}k} = \frac{K_{\text{выз}} U_{\text{доп.}} - U_k^{\text{авт.}}}{K_{\text{выз}} U_{\text{доп.}}} = 1 - \frac{U_k^{\text{авт.}}}{K_{\text{выз}} U_{\text{доп.}}}. \quad (10)$$

Возможные значения $K_{\text{вл.}k}$ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Возможные значения параметров нагрузок k -го потребителя и соответствующие им автономные напряжения искажения и коэффициенты влияния

Тип нагрузки потребителя и её параметры	Автономное напряжение искажения $U_k^{\text{авт.}}$	Коэффициент влияния $K_{\text{вл.}k}$
Неискажающая ($I_k = 0, Y_k \neq 0$)	$U_k^{\text{авт.}} = 0$	$K_{\text{вл.}k} = 1$
Искажающая ($I_k \neq 0, Y_k = 0$)	стремится к $+\infty$	стремится к $-\infty$
Смешанная ($I_k \neq 0, Y_k \neq 0$)	$U_k^{\text{авт.}} < K_{\text{выз}} U_{\text{доп.}}$	$K_{\text{вл.}k} > 0$
	$U_k^{\text{авт.}} = K_{\text{выз}} U_{\text{доп.}}$	$K_{\text{вл.}k} = 0$
	$U_k^{\text{авт.}} > K_{\text{выз}} U_{\text{доп.}}$	$K_{\text{вл.}k} < 0$

Проведён анализ разработанного метода для различных типов нагрузок потребителей (таблица 1). Установлено, что:

1. Неискажающая нагрузка при любом характере нагрузок во внешней ЭЭС не может быть причиной недопустимых искажений напряжения и имеет $K_{\text{вл.}k} = 1$.

2. Искажающая нагрузка любой мощности признаётся недопустимо ухудшающей ПКЭ и имеет $K_{вл.k} \rightarrow -\infty$. При этом не имеет значения, как расположен вектор тока искажения нагрузки потребителя относительно эквивалентного тока искажения ЭЭС. Даже если эти токи компенсируют друг друга, и напряжение искажения в ТОП мало, то потребитель недопустимо ухудшает КЭЭ и должен принять меры по уменьшению собственного тока искажения.
3. Смешанная нагрузка может оказывать как допустимое, так и недопустимое влияние на ПКЭ в зависимости от величины автономного напряжения искажения U_k^{asm} . Последнее зависит только от модулей параметров нагрузки и не зависит от взаимного расположения векторов параметров СЗ нагрузок потребителя и ЭЭС.

Очевидно, что характеристика влияния нагрузок потребителя на КЭЭ и статус потребителя не должны зависеть от того, к какой электрической сети подключены его электроприёмники. Это условие соответствует значению $K_{блз} = 1$. В этом случае из условия (9) может быть получен абсолютный критерий допустимости влияния k -го участника СЭС на искажение напряжения:

$$U_k^{asm} \leq U_{дон}. \quad (11)$$

Показано, что если автономное напряжение нагрузок каждого потребителя не превышает допустимое напряжение ВГ или ОП основной частоты, то напряжение в ТОП также не превысит допустимой величины. Однако для этого необходимо соблюдение условия практически полного совпадения аргументов проводимостей нагрузок потребителя и ЭЭС ($K_{CY} \approx 1, K_{блз} \geq 1$). Ответственность за это требование предлагается закрепить за ЭСО. При подключении новых потребителей и в эксплуатации ЭСО должна выполнить расчёты ПКЭ для возможных режимов работы ЭЭС и потребителей и подтвердить, что подключение потребителя или выполнение переключений не вызовет недопустимого ухудшения КЭЭ. При этом значения $K_{блз}$ в ТОП больше 1 положительно сказываются на КЭЭ в узле электрической сети, приводя к частичной или полной компенсации тока искажения в эквивалентной СЗ. Значения $K_{блз} < 1$ нежелательны, поскольку приводят к дополнительному увеличению напряжения искажения.

Таким образом, предложено установить однозначное разделение ответственности между потребителями и ЭСО за поддержание требуемого КЭЭ. Каждый k -й потребитель несёт ответственность за величину автономного напряжения искажения U_k^{asm} в соответствии с (11). ЭСО, которой известен состав и характер нагрузок подключённых к ТОП потребителей, отвечает за величину коэффициента выгоды $K_{блз}$, характеризующего взаимное расположение на комплексной плоскости векторов параметров СЗ нагрузок потребителей и самой ЭСО.

Выполнена верификация разработанного метода на модели реальной ЭЭС с помощью программного комплекса «Качество», разработанного в Иркутском государственном техническом университете. Установлено, что метод позволяет корректно оценивать влияние искажающих, неискажающих и смешанных

нагрузок на уровень напряжений ВГ в узлах подключения потребителей. В качестве примера на рисунке 3 представлены результаты расчёта параметров $U_k^{asm.}$ и $K_{вл.k}$ по 11-й гармонике для присоединений одного из узлов ЭЭС.

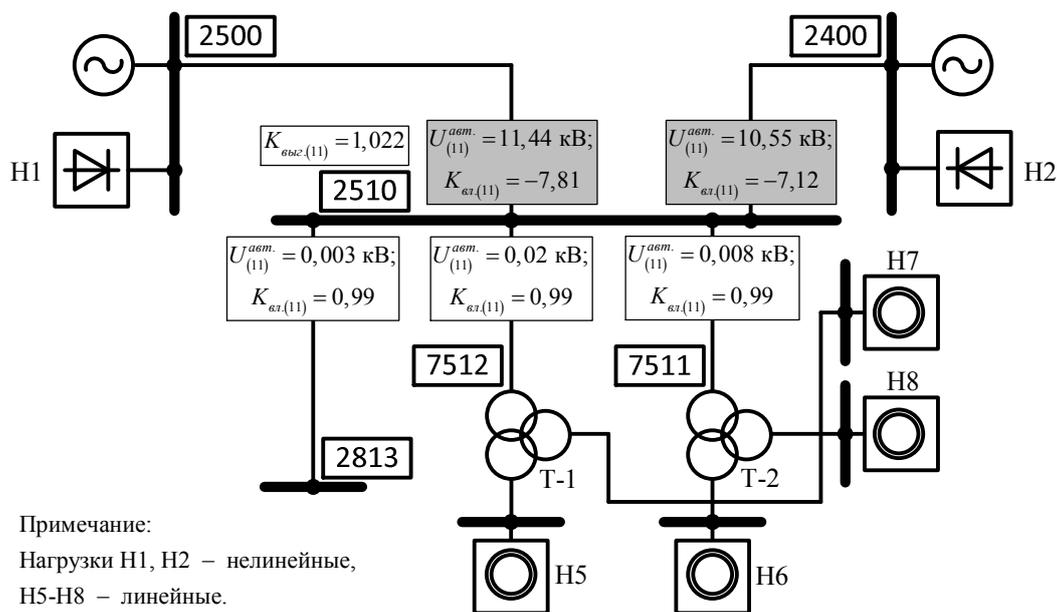


Рисунок 3 – Узел модели электроэнергетической системы с результатами расчёта автономных напряжений и коэффициентов влияния для 11-й гармоники

Предлагаемый метод оценки влияния потребителей на искажение напряжения устанавливает для каждого потребителя с искажающими нагрузками необходимость выполнять мероприятия по снижению эмиссии токов искажения в сеть. При этом обоснован подход по снижению тока искажения, генерируемого нелинейной или несимметричной нагрузкой во внешнюю сеть, не до нуля, а до установленного допустимого значения. Однако в действующих за рубежом и в России стандартах по ограничению эмиссии токов ВГ значение допустимого тока априори не учитывает возможное компенсирующее влияние проводимости неискажающей нагрузки потребителя. Кроме того, подходы к нормированию напряжения искажения и тока искажения не согласованы друг с другом.

На основе разработанного метода оценки влияния потребителей на искажение напряжения предлагается метод нормирования токов искажения, согласно которому допустимый ток искажения электроприёмников является функцией допустимого по ГОСТ напряжения искажения и параметров нагрузок данного потребителя и внешней сети. Такой подход делает возможным подключение к электрической сети искажающих нагрузок при условии наличия у них определённой проводимости на ВГ или для токов ОП основной частоты, например, за счёт установки фильтров ВГ, симметрирующих устройств или подключения мощной неискажающей нагрузки.

Получены необходимые и достаточные условия допустимости токов искажения, генерируемых нелинейными и несимметричными электроприёмниками (таблица 2).

Таблица 2 – Условия допустимости режима в форме неравенства напряжений искажения и токов искажения

Условия допустимости режима по искажению напряжения	Запись через напряжения	Запись через токи
Необходимое (для точки общего присоединения в целом)	$U \leq U_{доп.}$	$\sum_{k=1}^N I_k \leq K_{выг} U_{доп.} \sum_{k=1}^N Y_k$
Достаточное (для нагрузок k -го потребителя)	$U_k^{асм.} \leq K_{выг} U_{доп.}$	$I_k \leq K_{выг} K_{доп.} K_{Y_k} I_{k\text{ нагр.}}$

Коэффициент влияния нагрузок k -го участника СЭС на искажение напряжения (10) также может быть выражен через токи:

$$K_{вл.k} = \frac{K_{выг} K_{доп.} K_{Y_k} I_{k\text{ нагр.}} - I_k}{K_{выг} K_{доп.} K_{Y_k} I_{k\text{ нагр.}}} = 1 - \frac{I_k}{K_{выг} K_{доп.} K_{Y_k} I_{k\text{ нагр.}}}, \quad (12)$$

где $I_{k\text{ нагр.}}$ – ток неискажающей нагрузки прямой последовательности (ПП) на основной частоте; $K_{доп.} = U_{доп.} / U_{ном}$ – допустимый по ГОСТ коэффициент напряжения искажения; $K_{Y_k} = Y_k / Y_{k(50)1}$ – коэффициент пересчёта проводимости нагрузок k -го участника СЭС на исследуемой ВГ или ОП основной частоты Y_k при известной проводимости для токов ПП основной частоты $Y_{k(50)1}$.

Приведённые в таблице 2 неравенства показывают, что одновременное нормирование напряжений искажения и токов искажения нецелесообразно.

В третьей главе исследованы погрешности определения параметров СЗ нагрузок потребителей для оценки их влияния на КЭЭ и рассмотрены способы повышения точности определения параметров СЗ. Особый интерес представляет задача экспериментального определения параметров СЗ нагрузок на ВГ и для токов ОП основной частоты – тока искажения \dot{I} и проводимости \underline{Y} .

За основу при решении задачи взят метод, использующий измерения напряжения искажения в ТОП \dot{U} и тока искажения \dot{I}_T на присоединении исследуемого потребителя в двух режимах (см. рисунок 1). В зависимости от причин, вызвавших изменение режима, возможно определение параметров СЗ участников СЭС при помощи формулы (1) в соответствии с таблицей 3.

Поскольку в большинстве случаев, представляющих практический интерес, исследуемый потребитель имеет мощность и количество нагрузок много меньше, чем во внешней сети, то за время между двумя последовательными измерениями параметров режима более вероятно изменение нагрузок во внешней сети, а не у потребителя. В результате в соответствии с таблицей 3 с большой вероятностью могут быть получены параметры нагрузок исследуемого потребителя $\dot{I}_П$ и $\underline{Y}_П$.

Отличие предлагаемого в работе подхода к использованию метода двух измерений от других распространённых вариантов заключается в том, что для определения параметров СЗ не выполняется специальных коммутаций нагрузок у потребителя или во внешней сети. Для определения параметров СЗ предлагается использовать «естественные» изменения параметров режима, вызванные

технологическими переключениями или изменениями режима работы электроприёмников потребителей и ЭСО.

Таблица 3 – Результаты использования метода экспериментального определения параметров СЗ при различных причинах изменения режима

Событие	Результат определения параметров схемы замещения
Изменения параметров не происходило	Параметры схемы замещения получить невозможно
Изменились параметры нагрузок только во внешней сети	$\dot{I}_{\text{экс.}} = \dot{I}_{\Pi} ; \underline{Y}_{\text{экс.}} = \underline{Y}_{\Pi}$
Изменились параметры нагрузки только исследуемого потребителя	$\dot{I}_{\text{экс.}} = -\dot{I}_C ; \underline{Y}_{\text{экс.}} = -\underline{Y}_C$
Изменились параметры нагрузок во внешней сети и у исследуемого потребителя	Рассчитанные величины не несут полезной информации

Для исследования погрешностей метода и определения области его применения создана математическая модель Топ в системе MATLAB. Установлено, что при измерении параметров режима \dot{U} и \dot{I}_T без погрешностей точность определения параметров нагрузок исследуемого потребителя соответствует вычислительной точности системы MATLAB, т. е. на математической модели погрешность определения параметров СЗ отсутствует.

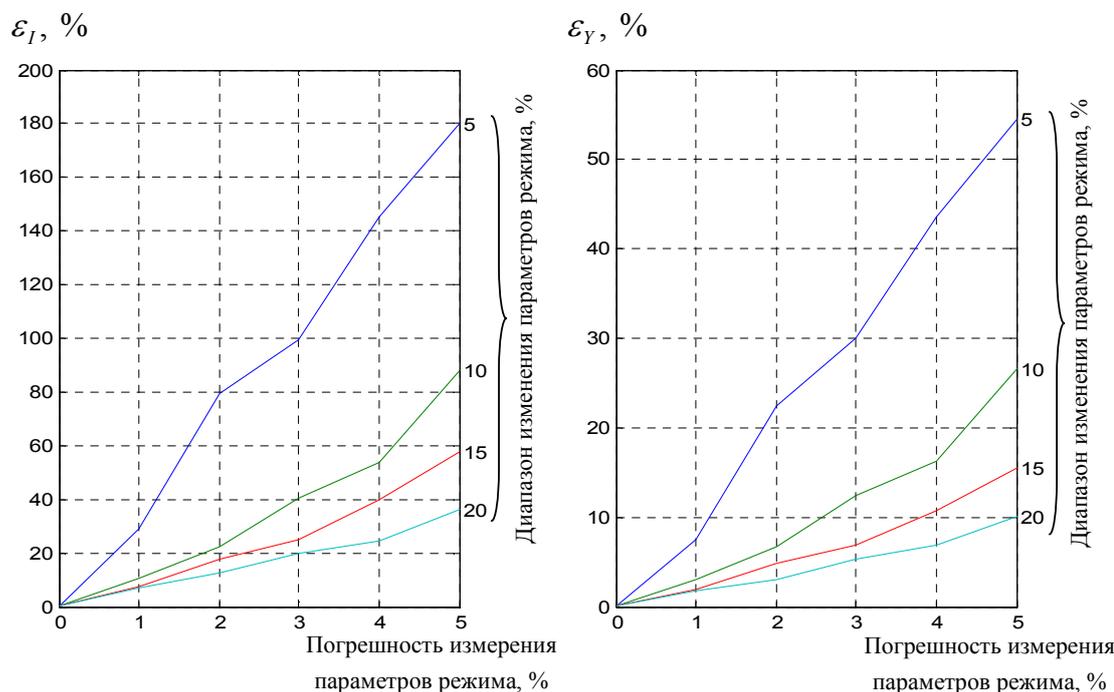


Рисунок 4 – Графики зависимости относительных погрешностей определения параметров нагрузок потребителя ε_I и ε_Y от погрешности измерения напряжения и тока искажения и от величины диапазона их изменения

При измерении параметров режима с погрешностью точность определения параметров нагрузок потребителя значительно снижается. При этом величины изменений напряжения искажения и тока искажения на присоединении

исследуемого потребителя также влияют на величину погрешности экспериментального определения параметров СЗ. Установлено, что определение параметров СЗ с погрешностью не более 5% возможно в случае, если погрешность измерения тока \dot{I}_T и напряжения \dot{U} составит менее 1%, а величина диапазона изменения этих параметров режима составит не менее 20% от их среднего значения за период измерений (рисунок 4). Такие требования к точности измерений параметров режима на ВГ и для токов ОП основной частоты практически невыполнимы в эксплуатации.

Проведён сравнительный анализ методов уменьшения погрешностей определения параметров СЗ. При помощи расчётного эксперимента на математической модели ТОП установлено, что наименьшая погрешность экспериментального определения параметров СЗ достигается при использовании методов сглаживания графиков напряжения и тока при помощи метода скользящего среднего и фильтра Савицкого-Голея, а также при применении метода, использующего пропуск последовательных измерений параметров режима с минимальными изменениями напряжения и тока искажения одновременно (таблица 4). Последний алгоритм (рисунок 5) впервые предложен в работе.

Таблица 4 – Минимальные погрешности определения параметров нагрузок исследуемого потребителя при использовании различных способов уменьшения погрешностей

Способ уменьшения погрешностей	$\varepsilon_I \text{ min, \%}$	$\varepsilon_U \text{ min, \%}$
Усреднение результатов определения параметров схемы замещения	56,9	23,4
Исключение из исходных данных пар измерений с минимальными и максимальными модулями изменения напряжения искажения	79,0	26,0
Исключение из исходных данных пар измерений с минимальными и максимальными модулями изменения напряжения и тока искажения	94,0	24,7
Пропуск последовательных измерений с малыми изменениями напряжения искажения (рисунок 5а)	13,1	3,0
Пропуск последовательных измерений с малыми изменениями напряжения и тока искажения (рисунок 5б)	5,9	2,8
Сглаживание графиков напряжения и тока методом скользящего среднего	0,4	0,1
Кусочно-линейная аппроксимация графиков напряжения и тока	130,2	59,1
Сглаживание графиков напряжения и тока при помощи фильтра Савицкого-Голея	0,2	0,1

Количественное соотношение между погрешностями методов в таблице 4 сохраняется при изменении исходных параметров СЗ математической модели ТОП.

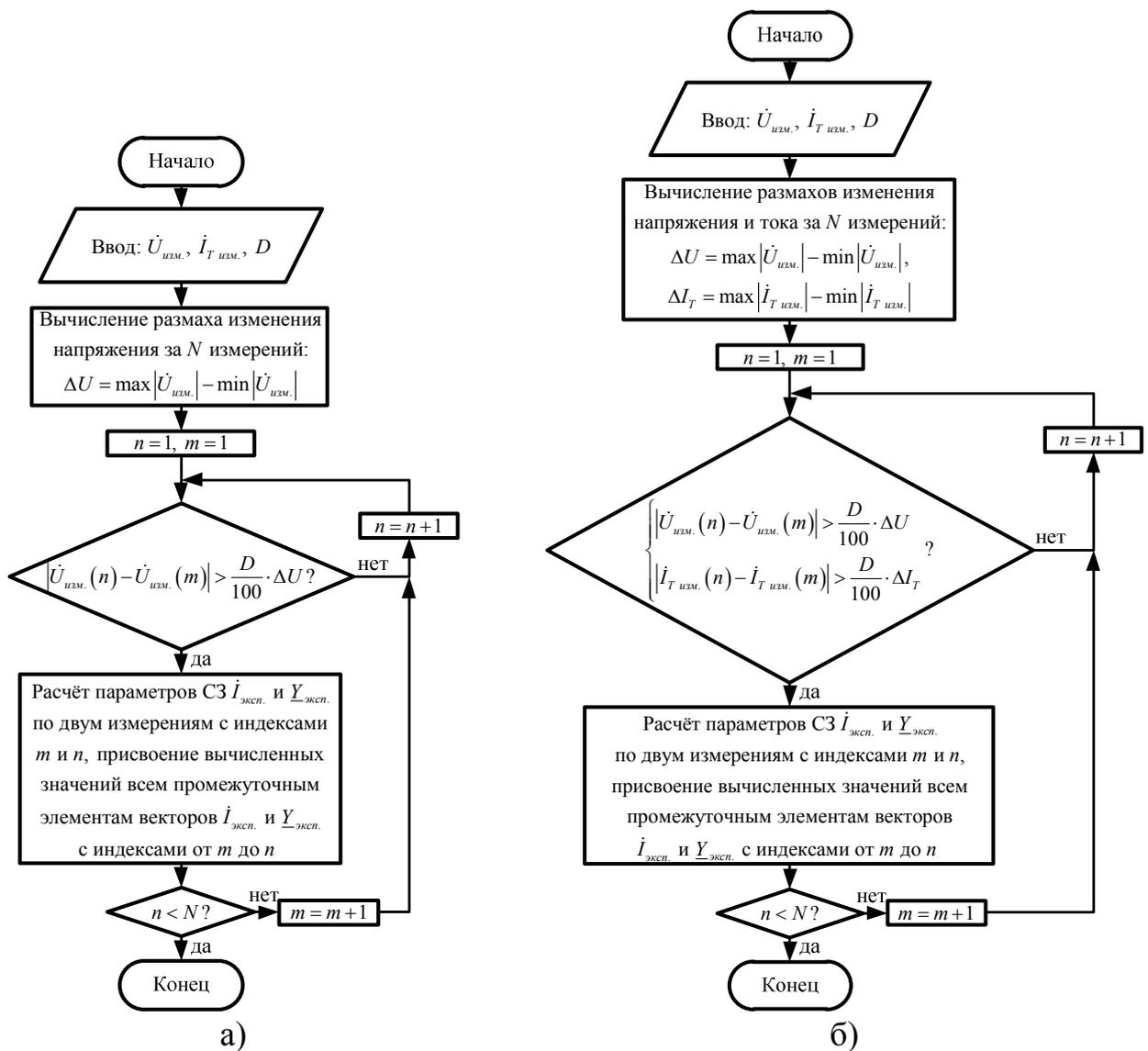


Рисунок 5 – Упрощенные блок-схемы алгоритмов пропуска последовательных измерений с изменениями напряжения искажения (а) и напряжения и тока искажения (б) меньше заданной величины

Для увеличения точности экспериментального определения параметров СЗ предложен комбинированный алгоритм (рисунок 6), сочетающий в себе фильтр Савицкого-Голея, применяемый к исходным массивам тока \dot{I}_T и напряжения \dot{U} , и алгоритм пропуска последовательных измерений с малыми изменениями параметров режима (рисунок 5б). Относительная погрешность экспериментального определения параметров СЗ при использовании комбинированного алгоритма на математической модели составила 0,05% при погрешностях измерения параметров режима, близких к реальным.

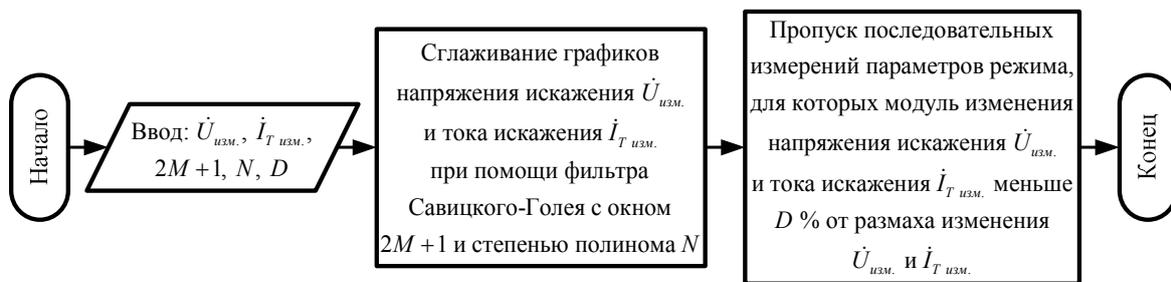


Рисунок 6 – Упрощенная блок-схема комбинированного алгоритма обработки параметров режима для повышения точности экспериментального определения параметров нагрузок потребителя

В четвёртой главе выполнена верификация предложенного комбинированного алгоритма при помощи натуральных экспериментов. Проведены измерения параметров режима на физической модели ЭЭС и на объектах действующей ЭЭС с помощью измерителя ПКЭ «Ресурс-UF2М» с интервалом усреднения 0,16 с. Для измерений выбраны неискажающие, искажающие и смешанные нагрузки, параметры которых могут быть определены косвенными методами, например, по закону Ома. Всего проведено 16 измерений на различных энергообъектах.

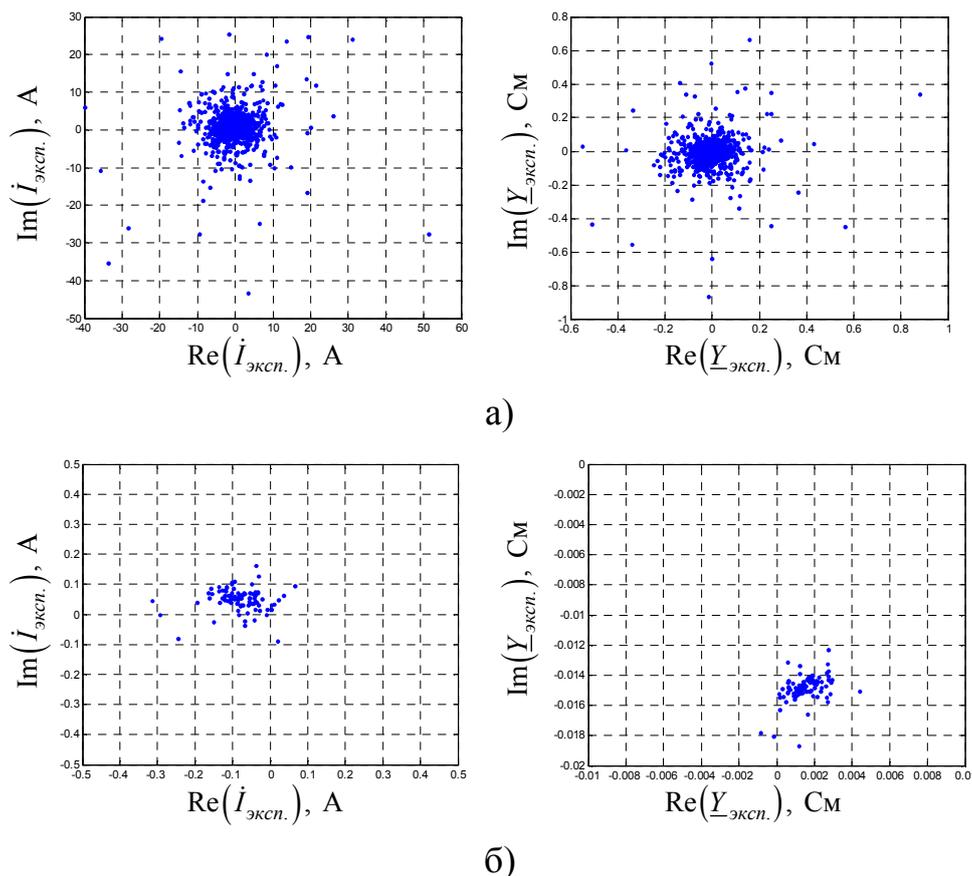


Рисунок 7 – Результаты определения параметров синхронного двигателя 6 кВ 2500 кВт на 5-й гармонике для токов обратной последовательности без обработки исходных данных (а) и с использованием комбинированного алгоритма обработки параметров режима (б)

На рисунке 7а представлены результаты экспериментального определения параметров СЗ без математической обработки. Пример подтверждает невозможность достоверного определения параметров СЗ без предварительной обработки параметров режима. Результат применения комбинированного алгоритма к исходным параметрам режима представлен на рисунке 7б.

Примеры экспериментального определения параметров СЗ с использованием комбинированного алгоритма для некоторых нагрузок физической модели электрической сети и на объектах ЭЭС представлены в таблице 5.

Согласно таблице 5, во всех случаях характеры проводимостей неискажающих участников СЭС соответствуют ожидаемым. Погрешность определения параметров СЗ при использовании комбинированного алгоритма не превышает 6,97% в сравнении с косвенными методами определения параметров СЗ. Представленный комбинированный алгоритм обработки параметров режима позволяет определить параметры СЗ смешанной нагрузки, выделяя в ней искажающую и неискажающую части.

Таблица 5 – Результаты экспериментального определения параметров нагрузок физической модели сети и на объектах энергосистемы с применением комбинированного алгоритма

Описание нагрузки на присоединении (анализируемая гармоника и её симметричная составляющая)	Параметры СЗ, экспериментально определённые при помощи комбинированного алгоритма	Параметры СЗ, определённые косвенными методами	Погрешность определения параметров СЗ, %	Автономное напряжение искажения $U_{\text{авт.}}$, В	Допустимое напряжение искажения $U_{\text{доп.}}$, В	Коэффициент влияния $K_{\text{вн.}}$, о. е.
Физическая модель сети						
Смешанная нагрузка (7, ПП)	$(-2,49 + j2,09) \cdot 10^{-4}$ А, $(2,64 + j0,02) \cdot 10^{-4}$ См	$3,42 \cdot 10^{-4}$ А, $(2,51 - j0,01) \cdot 10^{-4}$ См	5,05	1,23	10,97	0,888
Однофазная нагрузка (1, ОП)	$(-30,1 - j53,1) \cdot 10^{-3}$ А, $(8,6 - j6,9) \cdot 10^{-5}$ См	$(-30,2 - j52,9) \cdot 10^{-3}$ А	0,37	553,59	4,39	-125
Объекты энергосистемы						
Шунтирующий реактор 10 кВ (13, ПП)	$(-0,5 - j1,5) \cdot 10^{-3}$ А, $(1,20 - j5,11) \cdot 10^{-4}$ См	$(0,86 - j5,01) \cdot 10^{-4}$ См	6,97	3,01	115,47	0,974
ВЛ 220 кВ, питающая алюминиевый завод (11, ОП)	$-0,35 + j5,86$ А, $(-7,9 - j20,3) \cdot 10^{-5}$ См	$0,03 + j5,99$ А	6,70	26950	1270,2	-20,2
Двигатель постоянного тока 6 кВ 500 кВт, включенный через выпрямитель (5, ОП)	$2,3536 + j0,7352$ А, $0,0012 - j0,0004$ См	$2,3135 + j0,7976$ А	3,03	1949,4	138,56	-13,1
Гидрогенератор 1Г (11, ОП)	$0,09 + j0,23$ А, $0,014 - j0,117$ См	$0,014 - j0,111$ См	5,36	2,10	181,87	0,988

По результатам определения параметров СЗ рассчитаны характеристики $U^{act.}$ и $K_{вл.}$, по которым можно сделать вывод о допустимости или недопустимости влияния исследуемого электроприёмника на анализируемый ПКЭ в точке его подключения. Нагрузки, недопустимо ухудшающие ПКЭ, выделены жирным шрифтом в таблице 5.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод оценки влияния потребителей на искажение напряжения с использованием характеристик автономного напряжения искажения и коэффициента влияния.
2. На базе метода оценки влияния потребителей на искажение напряжения разработан метод нормирования токов искажения электроприёмников с учётом их мощности.
3. Исследованы зависимости погрешностей метода экспериментального определения параметров СЗ нагрузок потребителей по двум измерениям параметров режима от погрешностей измерения напряжений и токов искажения и от диапазона их изменения.
4. Исследованы способы уменьшения погрешностей метода экспериментального определения параметров СЗ по двум измерениям параметров режима. Разработаны алгоритмы повышения точности определения параметров нагрузки для ВГ и токов ОП основной частоты, основанные на пропуске последовательных измерений параметров режима с изменениями напряжения и тока искажения, меньшими заданной величины.
5. Разработан комбинированный алгоритм обработки параметров режима на базе фильтра Савицкого-Голея и метода, основанного на пропуске последовательных измерений напряжения и тока искажения с изменениями меньше заданной величины.
6. Выполнена верификация комбинированного алгоритма при измерениях на физической модели электрической сети и на объектах ЭЭС для потребителей с известными характерами нагрузок. Усовершенствованный метод определения параметров СЗ позволил выполнить оценку влияния нагрузок на исследуемые ПКЭ в узлах их подключения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. Федосов, Д. С. Оценка влияния потребителей и энергоснабжающей организации на искажение напряжения в точке общего присоединения / А. С. Афанасенко, Д. С. Федосов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 11(58). – С. 190-193.
2. Федосов, Д. С. Методы уменьшения погрешностей экспериментального определения параметров схем замещения потребителей на высших гар-

мониках / Д. С. Федосов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 10(81). – С. 254-261.

Статьи, опубликованные в российских изданиях; материалы международных и всероссийских конференций

3. Федосов, Д. С. Метод определения параметров схем замещения потребителей для оценки их влияния на искажение напряжения в электрической сети / А. Н. Висящев, Д. С. Федосов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Иркутск, 26-30 апреля 2011 г.). – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. – С. 321-325.
4. Fedosov, D. S. Research of multipulse rectification circuits for alternating current by the example of Taishet aluminum plant / D. S. Fedosov // Proceedings «Smart Grid for Efficient Energy Power System for the Future», Vol. I. – Magdeburg-Irkutsk: OvGU, 2012. – P.85-91.
5. Федосов, Д. С. Нормирование токов искажения участников системы электроснабжения с нелинейными и несимметричными нагрузками с учётом их мощности / Д. С. Федосов // Электроэнергетика глазами молодёжи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. Т. 2. – С. 434-438.
6. Федосов, Д. С. Оценка влияния потребителей на искажение синусоидальности и симметрии напряжений в точке общего присоединения / Д. С. Федосов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2012. – № 5 (5). – С. 123-125.
7. Fedosov, D. S. Assessment of the influence of power consumers on the distortion of the voltage at the PCC / D. S. Fedosov // Proceedings No.2 «The Power Grid of the Future» in the scope of the Russian Federation Decree No. 220 «Measures to Attract Leading Scientists to Russian Educational Institutions» (Grant NO. № 11.G34.31.0044.). – Magdeburg: OvGU, 2013. – Pp. 12-15.
8. Fedosov, D. S. Methods for error minimization by experimental identification of power consumer parameters for higher harmonics / D. S. Fedosov // Proceedings No.3 «The Power Grid of the Future» in the scope of the Russian Federation Decree No. 220 «Measures to Attract Leading Scientists to Russian Educational Institutions» (Grant NO. № 11.G34.31.0044.). – Magdeburg: OvGU, 2013. – Pp. 9-13.

Кроме этого, различные аспекты диссертационной работы рассмотрены в других 13 публикациях.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
тел./факс: (383) 346-08-57
Формат 60 X 84/16. Объём 1.5 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № 2119. Подписано в печать 16.04.2014 г.