

На правах рукописи



ЧИЖМА Сергей Николаевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ
КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И
СОСТАВЛЯЮЩИХ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

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

Омск – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения».

Научный консультант:

доктор технических наук, директор научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте (НИИЭ ОмГУПС)

Черемисин Василий Титович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор кафедры «Системы электроснабжения предприятий» ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»

Манусов Вадим Зиновьевич

доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электротехнические комплексы и системы» ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Пантелеев Василий Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические сети и электротехника» ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Хрущев Юрий Васильевич

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения»

Защита диссертации состоится 23 октября 2014 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.178.12 при Омском государственном техническом университете по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, 11, корп. 6, ауд. 340. Тел/факс: (8-3812)65-64-92, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте по ссылке: http://omgtu.ru/scientific_activities/dissertatsionnye_sovety/obyavleniya_o_zashchite_dissertatsiy_i_dokumenty_k_nim/chizhma_s_n/. Адрес библиотеки ОмГТУ: г. Омск, проспект Мира, 11.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, 11, диссертационный совет.

Автореферат разослан 07 июля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Д. С. Осипов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года на первое место выдвигает вопросы внедрения комплекса энергосберегающих мероприятий. Важнейшей составляющей этого комплекса являются мероприятия по снижению потерь электроэнергии и повышению ее качества.

В последнее время в передовых странах мира, в том числе в России развиваются технологии Smart Grid (интеллектуальные сети), которые рассматриваются как основа модернизации и инновационного развития электроэнергетики.

Новейшие технологии, применяемые в сетях, основанные на адаптации характеристик оборудования к режимам работы электроэнергетических систем, активное взаимодействие с генерацией и потребителями позволяют создавать эффективно функционирующую систему, в которую встраиваются современные информационно-диагностические системы, системы автоматизации управления всеми элементами, включенными в процессы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Важнейшей частью интеллектуальных сетей являются измерительные приборы и устройства, включающие, в первую очередь, smart-счетчики и smart-датчики, предназначенные для контроля параметров электроэнергии и диагностики состояния оборудования, основанных на измерениях, производимых в режиме реального времени.

Диссертационная работа посвящена исследованию и разработке методов и средств контроля качества электроэнергии и составляющих мощности, работающих в режиме реального времени, являющихся частью систем управления интеллектуальных сетей. Предложенные научные решения и практические разработки позволяют создавать на их основе современные информационные комплексы, осуществляющие высокоточное определение и синхронизированный сбор режимных параметров в узлах сети в реальном времени и интеграцию полученных данных в единое информационное пространство на базе общих информационных моделей.

Для разработки и внедрения мероприятий по снижению потерь требуется анализ структуры и причин появления составляющих потерь. Появление современных средств контроля параметров электроэнергии позволяет глубже исследовать причины низкого качества электроэнергии, в первую очередь несинусоидальности и несимметрии напряжений и токов, которые обусловлены наличием искажающих нагрузок на электрифицированном транспорте, металлургических и химических производствах.

Автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ), внедренные в последнее время на ряде предприятий, позволяют решить вопрос учета электроэнергии. Тем не менее, важным вопросом остается расширение функций анализа состояния электрических сетей, решаемых с помощью анализаторов качества электроэнергии и регистраторов событий в электрических сетях.

Современные счетчики электрической энергии решают вопросы определения реактивной энергии только для синусоидальных сигналов, однако в реальных условиях имеют место искажения формы сигналов напряжения и тока. При этом возникают потери электроэнергии, обусловленные наличием высших гармоник и несимметрией. Вопросы анализа составляющих мощности в таких режимах до сих пор не до конца изучены, в научном сообществе нет единого мнения об оценке процессов в электроэнергетических системах при наличии искажений. Одной из задач диссертационного исследования является обзор и анализ существующих теорий реактивной мощности и разработка метода ее контроля, на основе которого можно определять потери электроэнергии, обусловленные как обменными процессами, так и наличием высших гармоник напряжений и токов.

Значительный вклад в разработку и изучение методов контроля составляющих мощности и снижения потерь электроэнергии внесли Агунов А. В., Баков Ю. В., Бородулин Б. М., Герман Л. А., Демирчян К. С., Дрехслер Р., Жарков Ф. П., Жежеленко И. В., Железко Ю. С., Зиновьев Г. С., Карякин Р. Н., Крогерис А. Ф., Кучумов Л. А., Лурье Е. С., Манусов В. З., Мельников Н. А., Маевский О. А., Пантелеев В. И., Тимофеев Д. В., Хрущев Ю. В., Шидловский А. К., Akagi H., Budenau C., Czarnecki L., Fryze C., Barbaro P., Kusters N., Moore W., Page C., Sharon D.

В настоящее время в дополнение к техническим средствам АСКУЭ начинают внедряться приборы контроля качества электроэнергии, устанавливаемые в узлах коммерческого учета. На отечественном рынке предлагается ряд приборов, осуществляющих контроль параметров качества электроэнергии, однако они лишь частично решают этот вопрос.

Современная тенденция развития измерительной техники в электроэнергетических системах (ЭЭС) состоит в интеграции в одном устройстве большинства измерительных задач. Отсюда следует, что дальнейшим развитием систем контроля электроэнергии является создание многофункциональных измерительных комплексов для контроля параметров сигналов в электросетях (МИК). Указанные устройства должны иметь развитые подсистемы коммуникаций и должны быть включены в сеть передачи и обработки данных. Набор функций МИКа конкретного типа определяется теми задачами, для выполнения которых он предназначен. Использование известных

приборов контроля качества электроэнергии и регистраторов событий в электрических сетях затрудняется специфическими особенностями электроэнергетических систем с тяговой нагрузкой, которые накладывают на приборы контроля качества электроэнергии свои требования.

В этой связи важным вопросом остается расширение функций анализа состояния электрических сетей, решаемых с помощью анализаторов качества электроэнергии и регистраторов событий в электрических сетях. В диссертационной работе в качестве потребителя электроэнергии рассматривается система тягового электроснабжения.

Целью диссертационной работы является теоретическое обоснование и разработка новых методов, алгоритмов, аппаратных и программных средств контроля и управления качеством электрической энергии, основанных на измерениях её информативных параметров в сетях с нелинейной несимметричной нагрузкой в режиме реального времени.

Задачи исследования.

1. Исследовать и проанализировать электроэнергетические характеристики электропотребления тяговых систем с целью определения основных требований к средствам их контроля и мониторинга.

2. Разработать классификацию, обосновать метод определения составляющих мощности и разработать структуру устройства для его реализации.

3. Разработать метод и алгоритм синхронизации устройства контроля параметров электроэнергии, адаптивный к изменениям частоты в сети, резким скачкам уровня сигналов и искажениям.

4. Разработать метод и алгоритм работы устройства для контроля показателей несимметрии трехфазных сетей, в том числе составляющих, обусловленных наличием высших гармоник.

5. Выполнить анализ и разработать алгоритм определения частоты в электроэнергетических системах с нелинейными нагрузками.

6. Разработать метод и алгоритм определения гармонического состава сигналов напряжения и тока, включая канонические гармоники и интергармоники при значительном уровне шума и наличии искажения сигналов и отклонении частоты.

7. Предложить структуру технических средств, дающих возможность реализовать разработанные алгоритмы контроля показателей качества электроэнергии и составляющих мощности в режиме реального времени, работающих в составе интегрированной информационной системы и позволяющих определять режимы работы электроэнергетической системы с тяговой нагрузкой.

Методы исследования. Теоретические исследования проведены на основе положений математической статистики, теоретической электротехники, теории функций комплексного переменного, методов цифровой обработки сигналов, теории автоматического управления, моделирования на ЭВМ.

Достоверность научных положений и выводов диссертационной работы подтверждается результатами теоретических, лабораторных и производственных исследований, их проверкой в системах тягового электроснабжения и на физических и математических моделях, а также сходимостью выводов и результатов с экспериментальными данными.

Научная новизна работы:

1. Составлена классификация, выполнен синтез и анализ метода, разработана структура устройства для определения составляющих мощности, независимого от различных отклонений параметров сигналов – частоты, несимметрии, искажений, шумов, позволяющий устанавливать факторы, влияющие на потери мощности в электроэнергетических системах с нелинейными нагрузками и формировать управляющие воздействия для активных устройств с целью сокращения потерь.

2. Разработан метод и структура системы синхронизации, адаптивной к изменениям частоты в сети, резким скачкам уровня сигналов и искажениям при контроле параметров электроэнергии в режиме реального времени.

3. Разработан метод контроля величин прямой и обратной последовательностей основной и высших гармоник, позволяющий проводить измерения в несимметричных сетях при значительных уровнях искажений, шумов и отклонениях частоты, дающий возможность определять влияние высших гармоник на показатели несимметрии трехфазных электрических сетей с нелинейной нагрузкой.

4. Предложена модификация счетного метода определения частоты для сигналов с многократным пересечением сигналом нуля, позволяющая повысить помехоустойчивость и сократить объем вычислительных операций.

5. Разработан метод анализа гармонического состава сигналов, позволяющий дополнительно к параметрам канонических гармоник определять уровень интергармоник в условиях отклонения частоты, наличия значительных шумов и искажений сигнала, дающий возможность определять возникновение явлений резонанса в электроэнергетических системах с нелинейной нагрузкой.

6. На основании предложенных методов контроля параметров сигналов разработана структура измерительного комплекса для работы в составе интегрированной информационной системы, позволяющего определять режимы работы электроэнергетической системы с тяговой нагрузкой и дающая

возможность создавать многофункциональные приборы контроля сигналов на единой аппаратной платформе, включая контроль качества электроэнергии, учёт электроэнергии, регистрацию электрических событий.

Практическая ценность диссертации заключается в том, что предложенные принципы, методы и модели позволили создать многофункциональные измерительные комплексы для контроля параметров электроэнергетических систем, позволяющие

осуществлять контроль составляющих мощности, обусловленных обменными процессами, высшими гармониками и несимметрией;

выполнять операции контроля параметров сигналов и формирования управляющих воздействий в режиме реального времени для систем регулирования режимов электроэнергетических систем с нелинейными нагрузками;

определять параметры несимметрии трехфазных цепей, обусловленной как основной, так и высшими гармониками;

измерять частоту основной гармоники питающего напряжения в условиях значительных искажений сигналов и при наличии шумов;

определять амплитуду и фазу канонических гармоник и амплитуду суб- и интергармоник;

анализировать электрические режимы электроэнергетических систем с тяговыми нагрузками в оперативном режиме.

На защиту выносятся следующие основные положения.

1. Метод и структура устройства для определения составляющих мощности и коэффициентов, представляющих структуру потерь в трехфазных трехпроводных сетях.

2. Метод адаптивной синхронизации при контроле параметров электроэнергии в режиме реального времени при изменении частоты в сети и резких скачках уровня сигналов и искажений.

3. Адаптивный метод контроля величин прямой и обратной последовательностей основной и высших гармоник.

4. Модифицированный счетный метод определения частоты искаженных периодических сигналов, имеющих высокий уровень шумов.

5. Метод спектрального анализа для определения уровня канонических гармоник и интергармоник.

6. Аппаратная структура и программное обеспечение многофункционального измерительного комплекса.

7. Структура системы оперативного контроля режимов работы и параметров ЭЭС с тяговыми нагрузками.

Апробация работы. Основные положения и научные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

- III Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта» (Самара, 2006);
- Всероссийская научная конференция «Теоретические знания – в практические дела» (Омск, 2008);
- Научно-практическая конференция «Инновационные проекты и новые технологии на железнодорожном транспорте» (Омск, 2008);
- V Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы развития транспортного комплекса» (Самара, 2009);
- Научно-практическая конференция «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте» (Омск, 2009);
- Научно-практическая конференция «Ресурсосберегающие технологии на Западно-Сибирской железной дороге» (Омск, 2010);
- Научно-практическая конференция «Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2010);
- Научно-практическая конференция «Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2011);
- III Международная научно-практическая конференция «Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах» (Пенза, 2012);
- Научно-практическая конференция «Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2012);
- VIII Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2012).

Публикации и личный вклад автора. Основные научные положения и материалы по теме диссертации изложены в 46 печатных работах, включая 3 официально зарегистрированные программы для ЭВМ, 10 патентов на изобретения и полезные модели, 16 научных статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора диссертации в публикациях в соавторстве, по материалам которых написаны разделы 1.3, 1.4, 7.3, составляет около 50 %, в остальных – более 80 %.

Структура и содержание диссертации. Диссертационная работа содержит 329 страниц машинописного текста и состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 282 наименований и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы задачи исследования и цели работы. Показана научная новизна, практическая ценность работы, перечислены методы научных исследований и положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе анализа литературных источников выполнен информационный обзор и составлена классификация методов контроля параметров электроэнергетики (рис. 1).

Проведен анализ ЭЭС с тяговыми нагрузками как объекта контроля качества электроэнергии и определения составляющих мощности на основе экспериментов по исследованию электрических режимов тяговой сети в режимах тяги, выявивший наличие резонансных явлений, значительных шумов, искажений и резких изменений параметров сигналов напряжений и токов, потоков мощности переменных направлений.

Специфические режимы работы систем тягового электроснабжения: резкие изменения нагрузки, изменение количества локомотивов на межподстанционных зонах, наличие большого количества вентильных преобразователей, режим рекуперации электроэнергии, присущие только этим системам, требуют разработки алгоритмов и средств, обеспечивающих контроль показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и составляющих мощности, имеющих возможность работать с надлежащим качеством в условиях, присущим ЭЭС с тяговыми нагрузками.

Анализ режимов работы тяговой системы электроснабжения показал, что в контактной сети существует возможность возникновения сигналов с частотой интергармоник, что требует включения в алгоритм работы многофункциональных измерительных комплексов функций контроля интергармонических составляющих сигналов.

Вторая глава посвящена обоснованию, выбору и исследованию метода определения составляющих мощности, позволяющего определить структуру и величину потерь мощности и формировать сигналы для устройств управления качеством электроэнергии и параметрами ЭЭС с нелинейными нагрузками с целью снижения потерь мощности.

Проведен анализ теорий и алгоритмов определения реактивной мощности. Показано, что отсутствует единая формулировка понятия реактивной мощности при несинусоидальных напряжениях и токе.

Передача электроэнергии практически всегда осуществляется при наличии гармоник. Для таких систем кроме активной мощности известны еще две составляющие полной мощности: реактивная мощность Q (мощность сдвига или обменная) и мощность искажения D , обусловленная высшими гармониками напряжения и тока. Термин «мощность искажения» повсеместно используется в преобразовательной технике, однако отсутствует общепринятый алгоритм определения этого параметра, не установлены однозначно единицы измерения.



Рис. 1. Классификация методов контроля параметров электроэнергии

Проведен анализ существующих методов определения составляющих мощности при искаженных сигналах, которые можно условно разделить на *спектральные, интегральные и энергопотокные*.

Показано, что для реализации алгоритма определения составляющих мощности принят подход, представленный в стандарте IEEE 1459-2010, который определяет методологию учета неактивной мощности следующим образом. В основу указанной методики положено требование передачи наибольшей мощности от источника потребителю, а именно – прямой последовательности основной гармоники.

В однофазных системах определение действующего значения напряжения U_1 и тока I_1 основывается на расчете мгновенных измеренных значений напряжения u и тока i . При наличии высших гармоник U_H и I_H действующие значения напряжения и тока определяются так:

$$\begin{cases} U^2 = U_1^2 + U_H^2; \\ U_H^2 = \sum_{n \neq 1} U_n^2 = U^2 - U_1^2; \end{cases} \text{ и } \begin{cases} I^2 = I_1^2 + I_H^2; \\ I_H^2 = \sum_{n \neq 1} I_n^2 = I^2 - I_1^2, \end{cases} \quad (1)$$

где U и I – среднеквадратические значения тока и напряжения соответственно. Индекс «1» означает основную гармонику, индекс «H» – сумму действующих значений высших гармоник. Полная (кажущаяся) мощность S определяется как

$$S^2 = (UI)^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (2)$$

и разделена на две составляющие. Первая составляющая S_1 – фундаментальная полная мощность, которая в свою очередь состоит из фундаментальной активной мощности P_1 и фундаментальной реактивной мощности Q_1 , определяемой согласно известным уравнениям, используемым при синусоидальном сигнале как $S_1^2 = (U_1 I_1)^2$.

Вторая составляющая названа нефундаментальной фиксируемой мощностью S_N и состоит из трех составляющих:

$$S_N^2 = D_i^2 + D_u^2 + S_H^2 = (U_1 I_H)^2 + (U_H I_1)^2 + (U_H I_H)^2. \quad (3)$$

Первое слагаемое S_1 – определяет величину мощности основной частоты, отдаваемой в нагрузку, и реактивной мощности, физический смысл второго слагаемого S_N – часть мощности источника, которая теряется из-за возникновения высокочастотных гармоник.

Для сравнения различных методов определения составляющих мощности в сетях при наличии высших гармоник был проведен эксперимент с использованием выражений (1) – (3), были рассчитаны значения реактивной мощности сети для несинусоидального напряжения и нелинейной нагрузки.

Результаты экспериментов (рис. 2) показывают, что все методы дают по сравнению с реактивной мощностью основной гармоники завышенные

результаты величины реактивной мощности, так как все они тем или иным способом признают вклад высших гармонических составляющих в суммарное значение реактивной мощности.

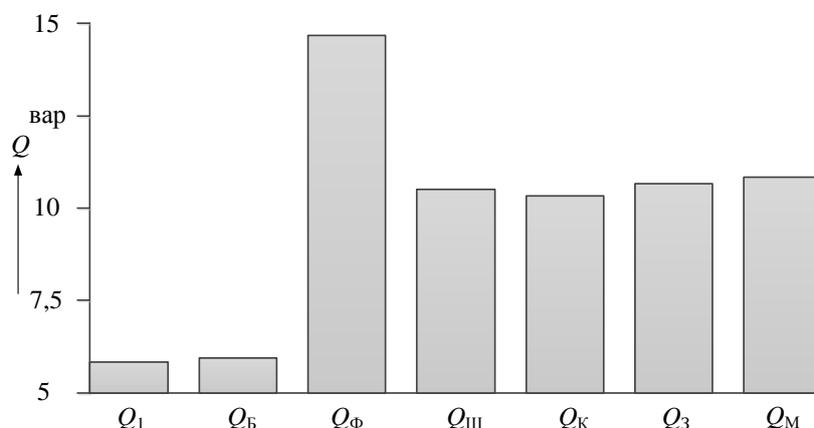


Рис. 2. Результаты моделирования при несинусоидальном напряжении и нелинейной нагрузке (реактивные мощности: Q_1 – фундаментальная; Q_B – по Буденау; Q_F – по Фризе; Q_{Sh} – по Шарону; Q_K – по Кастерсу – Муру; Q_Z – по Зарнецкому; Q_M – по Маевскому)

На основе изучения теоретических положений и проведения экспериментальных исследований выработан методологический подход к определению составляющих мощности, позволяющий устанавливать факторы, влияющие на потери мощности в ЭЭС с нелинейными нагрузками. Предлагается отдельно учитывать составляющую мощности, обусловленную высшими гармониками сигнала, а реактивную (обменную) мощность вычислять только на основной гармонике, мощность искажений предлагается определять по ряду параметров высших гармоник.

Третья глава посвящена разработке принципов и устройств определения составляющих мощности в условиях нелинейности нагрузок.

Предложена система определения составляющих мощности, в которой используется прямое преобразование координат, являющееся модификацией преобразований Кларка и Парка-Горева для трехпроводных цепей, предназначенное для непосредственного преобразования из координатной системы ABC в ортогональную систему dq . При подаче на вход преобразователя координат сигналов X_a, X_b, X_c (X могут принимать значения напряжений или токов) на выходе формируются переменные $X_d = \bar{X}_d + \tilde{X}_d$ и $X_q = \bar{X}_q + \tilde{X}_q$. Составляющая \bar{X}_d формируется напряжением или током прямой последовательности основной частоты U_1^+ и I_1^+ , остальные составляющие определяются высшими гармониками и несимметрией.

В системе используется схема адаптивной синхронизации, которая дает возможность автоподстройки скорости вращения оси координат до получения

синхронизации с пространственным вектором положительной последовательности основной частоты напряжения. Система подстраивает свою тактовую частоту к частоте основной гармоники сети с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), состоящей из преобразователя координат, фильтра скользящего среднего (ФСС), пропорционально-интегрирующего звена (ПИ-звена) и интегратора. При этом сама ФАПЧ является составляющей общего тракта преобразования. Блок-схема системы адаптивной синхронизации (САС), которая кроме основной функции слежения за частотой входного сигнала позволяет по мгновенным значениям напряжения определять прямую последовательность основной гармоники, приведена на рис. 3.

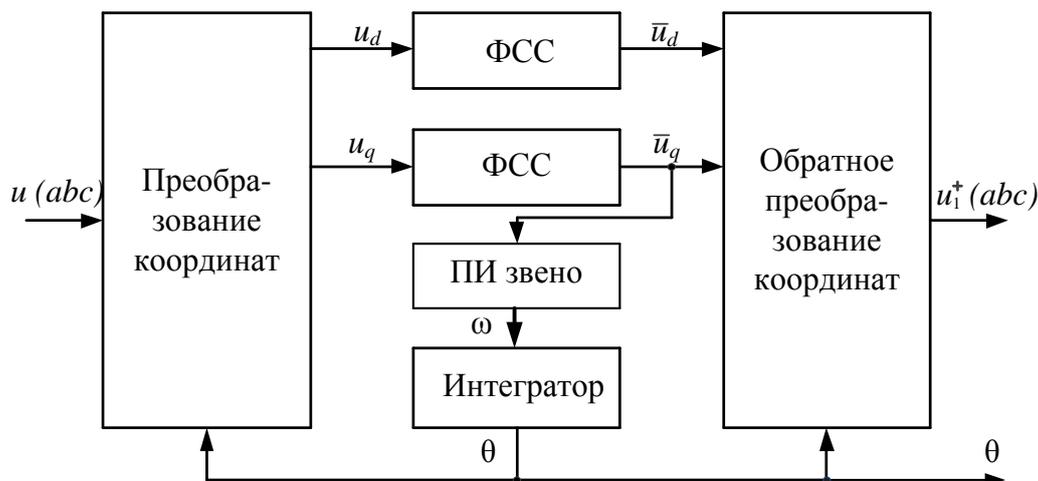


Рис. 3. Функциональная схема системы адаптивной синхронизации

В основу функционирования системы адаптивной синхронизации на базе ФАПЧ положено следующее свойство преобразования Парка-Горева. Изменение частоты питающей сети можно трактовать как появление несимметрии в трехфазной системе напряжений, что вызовет отклонение от нуля составляющей обобщенного вектора напряжения. Выделение постоянной составляющей, содержащей информацию о прямой последовательности основной гармоники напряжения сети, осуществляется ФСС и обратным преобразователем координат. Значение угла поворота вращающейся системы координат может быть получено интегрированием угловой частоты. Благодаря наличию обратной связи обеспечивается слежение за изменением частоты сети.

Значения X_d и X_q (могут принимать значения токов или напряжения) могут быть получены из выражения:

$$\begin{aligned} X_d &= \frac{2}{\sqrt{3}} \left[X_A \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + X_B \sin \theta \right]; \\ X_q &= \frac{2}{\sqrt{3}} \left[X_A \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + X_B \cos \theta \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Значения \bar{X}_d и \bar{X}_q определяются с помощью ФСС:

$$\begin{aligned}\bar{X}_d(j\omega) &= W_\phi(j\omega) \cdot X_d(j\omega); \\ \bar{X}_q(j\omega) &= W_\phi(j\omega) \cdot X_q(j\omega),\end{aligned}\quad (5)$$

где модуль амплитудно-фазовой частотной характеристики будет определяться соответственно:

$$|W_\phi(j\omega)| = \frac{\sqrt{2}}{\omega T_w} \sqrt{1 - \cos(\omega T_w)}; \quad (6)$$

а значения прямой последовательности основных гармоник напряжения и тока X_1^+ можно определить с помощью обратного преобразования координат из dq в ABC -систему:

$$\begin{aligned}X_{A1} &= \bar{X}_d \cos \omega t - \bar{X}_q \sin \omega t; \\ X_{B1} &= \bar{X}_d \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \bar{X}_q \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \\ X_{C1} &= -(\bar{X}_A + \bar{X}_B).\end{aligned}\quad (7)$$

Величину прямой последовательности можно определить по общеизвестной формуле $X_1^+ = (X_{A1} + aX_{B1} + a^2X_{C1})/3$.

Для определения коэффициентов, характеризующих потери мощности из-за высших гармоник и несимметрии вводятся обобщающие понятия эффективного напряжения и тока, которые для трехфазных трехпроводных линий определяются из выражений:

$$U_e = \sqrt{\frac{U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2}{9}}, \quad I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}}. \quad (8)$$

На основе этих значений токов и напряжений вычисляется полная эффективная мощность, полная эффективная мощность основной S_{e1} и высших гармоник S_{eN} :

$$S_e = 3U_e I_e, \quad S_{e1} = 3U_{e1} I_{e1}, \quad S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2}. \quad (9)$$

После этого определяются напряжение U_1^+ , ток I_1^+ и полная мощность S_1^+ прямой последовательности основной гармоники и полная мощность основной гармоники

$$S_1^+ = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2}, \quad S_{U1} = \sqrt{S_{e1}^2 - (S_1^+)^2}. \quad (10)$$

где $P_1^+ = 3U_1^+ I_1^+ \cos \varphi_1^+$; $Q_1^+ = 3U_1^+ I_1^+ \sin \varphi_1^+$.

Показателем уровня высокочастотных искажений является фактор гармоник, который можно определить как

$$K_s = \frac{S_{eN}}{S_{e1}}. \quad (11)$$

а величину несимметрии характеризует коэффициент небаланса

$$K_N = \frac{S_{U1}}{S_1^+}. \quad (12)$$

Преимуществом данного метода является возможность оперирования непосредственно активными и реактивными составляющими тока и напряжения, а также использование фильтров скользящего среднего, которые увеличивают быстродействие (рис. 4) и значительно ослабляют возможные импульсные помехи в канале измерения токов. Недостатком этого метода является необходимость синхронизации с напряжением сети эталонных единичных сигналов ($\cos\theta$ и $\sin\theta$). Система ФАПЧ обеспечивает высокую точность при несинусоидальности напряжения сети, так как она является следящей системой, частота настройки которой определяется частотой управляющего сигнала, а сигналом рассогласования является разность фаз управляющего сигнала и сигнала обратной связи.

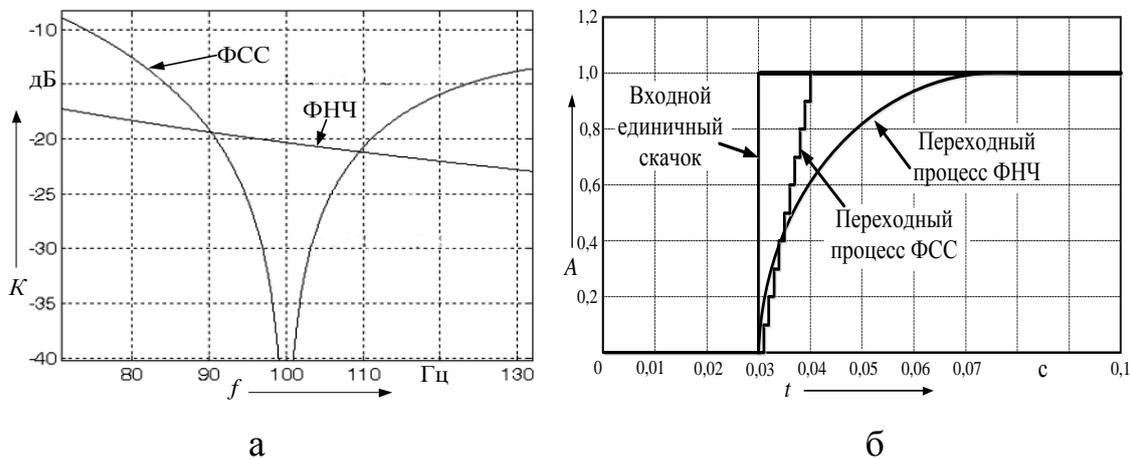


Рис. 4. АЧХ ФСС (а) и переходный процесс (б)

Результаты моделирования (рис. 5) показывают, что САС позволяет достичь синхронизации за три периода основной частоты, что значительно улучшает быстродействие по сравнению с известными системами такого типа.

Обобщенная функциональная схема измерителя составляющих мощности трехфазной трехпроводной сети, работающего по описанной выше методике, представлена на рис. 6. На схеме представлены блоки, осуществляющие синхронизацию с частотой сети, выделение прямой последовательности основной гармоники, сдвиг фаз между напряжением и током.

Для определения составляющих мощности, создаваемых реактивной составляющей, высшими гармоническими составляющими и несимметрией сети, используется схема, показанная на рис. 7, где схеме И – интегратор; СКЗ – вычислители среднеквадратического значения сигнала.

Алгоритм определения действующих значений напряжений и токов сводится к обработке массивов данных, полученных с аналого-цифровых преобразователей шести каналов (три по току и три по напряжению).

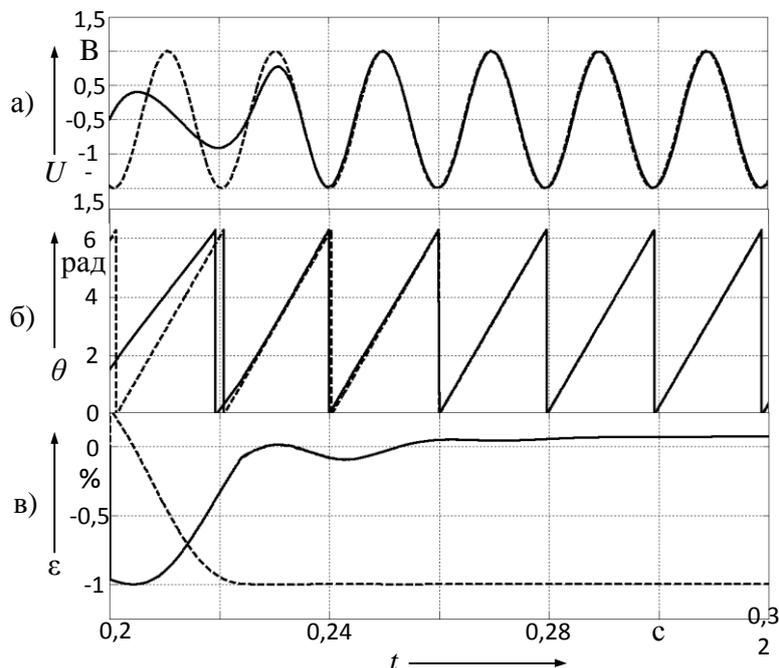


Рис. 5. Выходные сигналы САС с ФСС: а – выходной сигнал; б – угол θ , в – ошибка оценки частоты

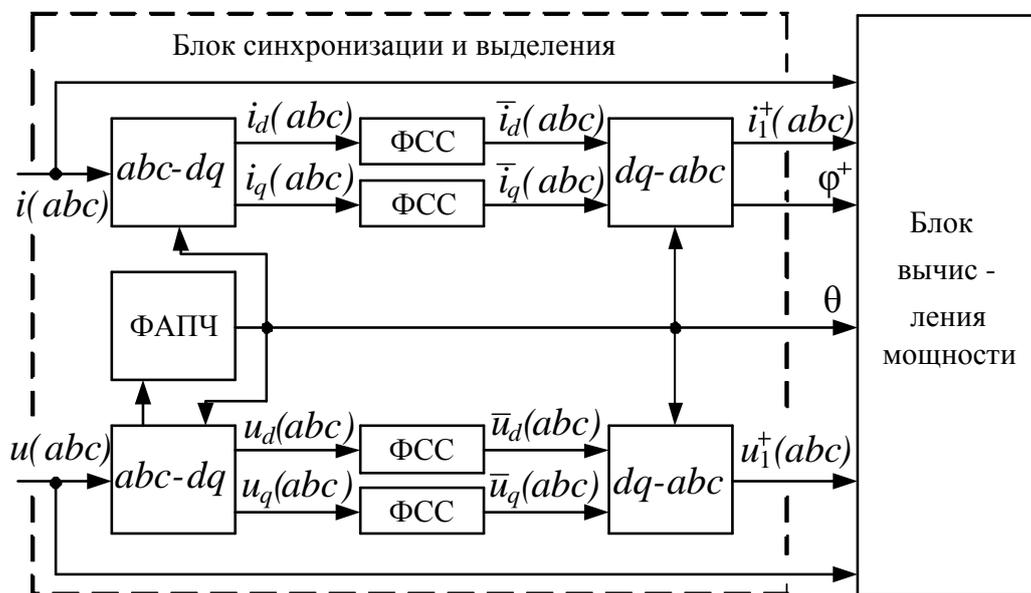


Рис. 6. Функциональная схема измерителя мощности

Четвертая глава посвящена разработке методов и средств контроля составляющих мощности в условиях несимметрии нагрузок. Контроль составляющих мощности осуществляется на базе преобразования Кларка ($abc-\alpha\beta 0$ -преобразование), которое переводит трехфазную систему координат в двухфазную.

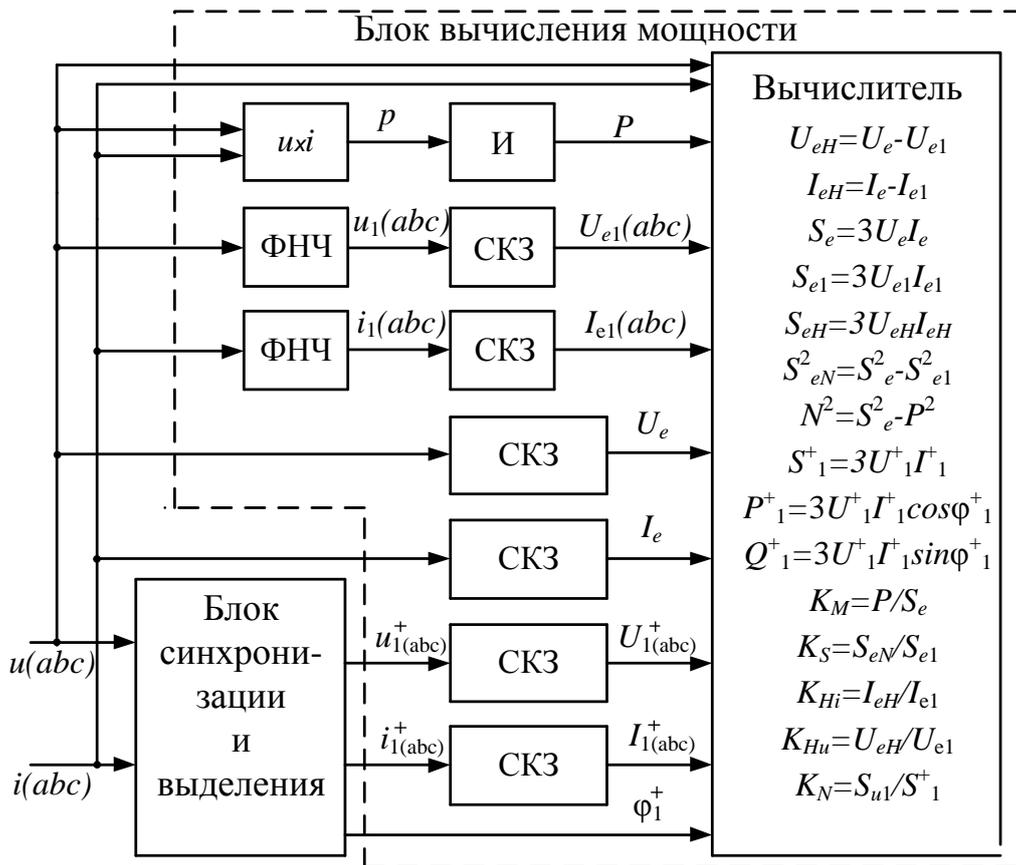


Рис. 7. Структурная схема трехфазного измерителя мощности

Гармоники в трехфазной системе преобразуются в $\alpha\beta$ -систему с чередованием векторов в различных направлениях в зависимости от их номера. Например, векторы основной гармоники тока чередуются против часовой стрелки, векторы 5-й гармоники тока – по часовой стрелке, векторы 7-й гармоники – опять против часовой стрелки.

Для выделения гармоник в $\alpha\beta$ -системе можно применять фильтры прямой (ФПП) и обратной (ФОП) последовательностей, использующие полосно-пропускающие фильтры (ППФ), настроенные на частоту ω_1 :

$$W_{\text{ППФ}}(p) = \frac{K\omega_1 p}{p^2 + K\omega_1 p + \omega_1^2}. \quad (13)$$

В устройстве использованы один прямой и два обратных преобразователя Кларка, два фильтра и четыре сумматора. В предложенной схеме легко осуществляется синхронизация с частотой входного сигнала при различных искажениях, в том числе при наличии высших гармоник. Расчет симметричных составляющих в $\alpha\beta$ -системе делает возможным применение только двух ППФ (рис. 8), что уменьшает вычислительную нагрузку по сравнению с расчетами в abc -системе, где необходимы три ППФ.

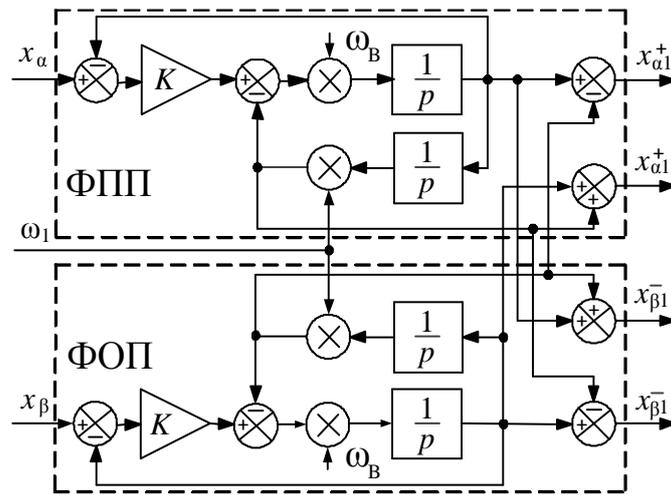


Рис. 8. Структурная схема устройства для определения прямой и обратной последовательностей на базе ППФ

Если в этой схеме использовать звенья, настроенные на частоту высших гармоник, можно строить ППФ высших гармоник и определять составляющие прямых и обратных последовательностей, которые вносят эти гармоники. В данном случае требуется многокаскадная схема, использующая несколько ППФ, настроенных на разные частоты.

Величины n -х компонентов прямой и обратной последовательностей $x_{\alpha\beta n}^+(p)$ и $x_{\alpha\beta n}^-(p)$ определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} x_{\alpha n}^+(p) &= \frac{1}{p} [\omega_b (\varepsilon_\alpha(p) - x_{\alpha n}^+(p)) - n\omega_1 x_{\beta n}^+(p)]; \\ x_{\beta n}^+(p) &= \frac{1}{p} [\omega_b (\varepsilon_\beta(p) - x_{\beta n}^+(p)) - n\omega_1 x_{\alpha n}^+(p)]; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} x_{\alpha n}^-(p) &= \frac{1}{p} [\omega_b (\varepsilon_\alpha(p) - x_{\alpha n}^-(p)) - n\omega_1 x_{\beta n}^-(p)]; \\ x_{\beta n}^-(p) &= \frac{1}{p} [\omega_b (\varepsilon_\beta(p) - x_{\beta n}^-(p)) - n\omega_1 x_{\alpha n}^-(p)]; \end{aligned} \quad (15)$$

Для выделения прямых и обратных последовательностей, формируемых высшими гармониками, используется каскадная схема (рис. 9).

Для трехфазных сетей каждая гармоника может принадлежать прямой или обратной последовательности. Другими словами, гармоника $x_{n\alpha\beta}$ создает прямую последовательность, когда $n = 6m + 1$ ($m = 1, 2, 3 \dots$), или обратную последовательность, когда $n = 6m - 1$. Это упрощает реализацию фильтров, так как возможно выделять каждую гармонику фильтром прямой или обратной последовательности. Аналогично представленной методике может быть построено большее количество разнообразных фильтров в зависимости от практических потребностей.

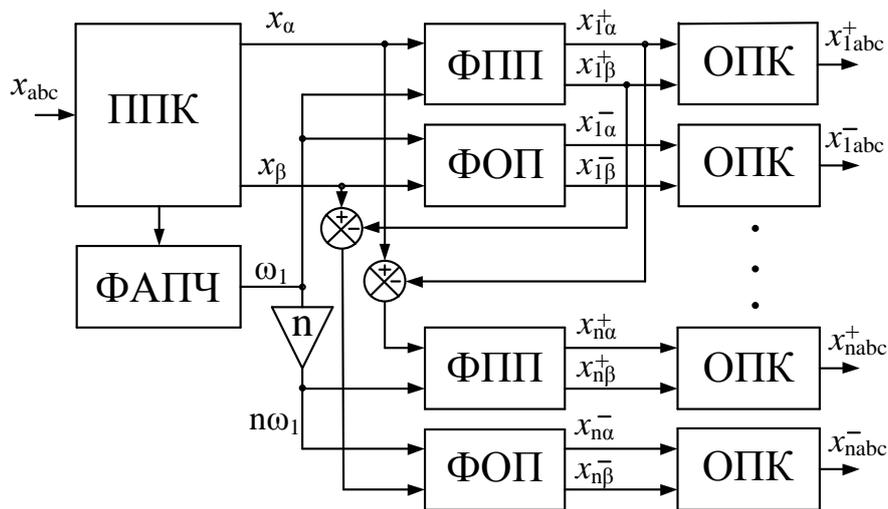


Рис. 9. Структурная схема устройства для выделения прямых и обратных последовательностей основной и n -й гармоники: ППК – прямой преобразователь Кларка; ОПК – обратный преобразователь Кларка

В пятой главе описана методика определения частоты питающего напряжения в ЭЭС с нелинейными нагрузками при наличии помех, основанная на счетном методе. Работа этого метода разделена на два основных этапа: фильтрацию и поиск переходов с дальнейшей их оценкой.

Суть предложенного метода заключается в контроле переходов отсчетов сигнала через ноль и в оценке частоты основной гармоники по этим переходам. Алгоритм настраивается под определенную модель сигнала, с которым он будет работать. Процесс оценивания частоты состоит из периодически повторяющихся трех основных этапов: ожидание, измерение, пропуск. Структурная схема алгоритма представлена на рис. 10 (О – ожидание; И – измерение; Ф1 – внутренний фильтр результата окна измерения; Ф2 – внешний фильтр результата; П – пропуск).

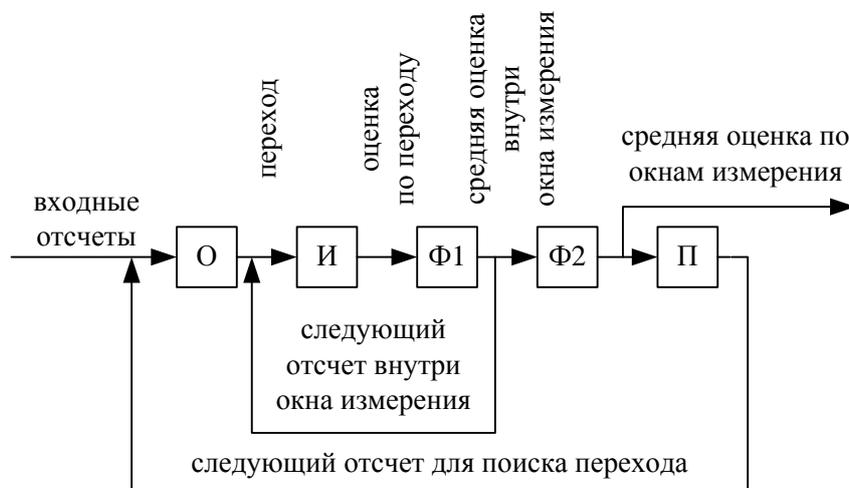


Рис. 10. Графическая интерпретация метода определения частоты

Окно пропуска является элементом оптимизации алгоритма. Пропуск определенного количества отсчетов осуществляется на основании модели сигнала и предположении, что в пределах этого окна переходы через ноль либо отсутствуют, либо носят случайный (редкий) характер (обусловленные мощной высокочастотной помехой, переходным процессом, влиянием высших гармонических составляющих и т. п.). Такой подход позволяет не только сократить объем лишних вычислений, но и отбросить «неправильные» переходы с целью исключения негативного их влияния на результат оценивания. Временная диаграмма сигнала с указанием описанных окон представлена на рис. 11, а, где t_1, t_2, t_3 – окна ожидания, измерения и пропуска. Сигнал $S(t)$ можно представить полиномом, определенным четырьмя последовательными отсчетами (два – меньше, чем ноль, и два – больше, чем ноль) (рис. 11, б).

При использовании этого полинома для получения значения a_j с помощью явной формулы требовалось бы большое количество вычислений. Для уменьшения объема вычислений было использовано рекурсивное выражение. Можно найти хорошее решение только с одной итерацией, если начальное значение взято от средних отсчетов. В этом случае момент пересечения нуля можно определить в соответствии с выражением:

$$a_0 = \frac{S_{j-2}}{S_{j-2} - S_{j-1}}; a_j = \frac{k_1 a_0^3 + k_2 a_0^2 + 6S_{j-2}}{3S_{j-2} - 6S_{j-1} + 2S_{j-3} + S_{j-0}}; b_j = 1 - a_j; \omega t_j = 2\pi(b_j + 1) \frac{T_s}{T}. \quad (16)$$

Вычисление параметров в соответствии с уравнением (9) является более трудоемким по сравнению с использованием двух отсчетов, однако точность расчета при этом выше.

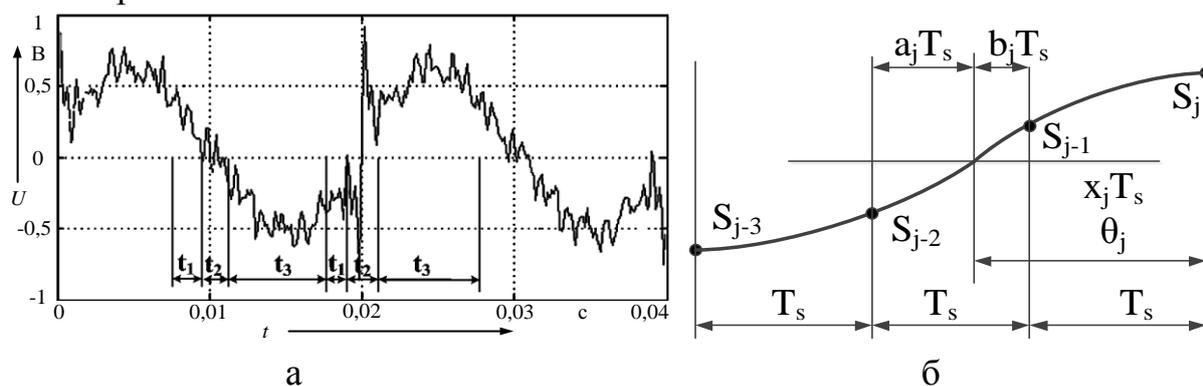


Рис. 11. Последовательность чередования окон ожидания, измерения, пропуска (а) и обнаружение прохождения сигнала через ноль (б)

Шестая глава посвящена разработке и представлению метода спектрального анализа гармонических и интергармонических составляющих сигналов при наличии шумов.

Действующие стандарты предполагают, что необходимо оценивать не только канонические гармоники, кратные основной частоте 50 Гц, но также и

интергармоники с частотами, не кратными основной, например, 55, 60, 65 Гц и т. д. Такой подход предъявляет новые требования к алгоритмам и приборам контроля качества электроэнергии.

Наличие совокупности сигналов канонических гармоник с большими амплитудами и интергармоник с малыми амплитудами, расположенными достаточно близко друг к другу по частоте, требует определения и исследования алгоритмов, дающих удовлетворительные результаты в новых условиях.

В работе представлены результаты эксперимента, показывающего, что использование прямоугольной оконной функции дает неуверенное обнаружение и слабый сигнал едва различим в присутствии сильного сигнала. При использовании окна с лучшими частотными характеристиками, например, окна Кайзера, интергармоники будут легко определяться в присутствии сильных канонических гармоник (рис. 12).

Для спектрального анализа применен метод оконных сглаживающих функций, суть которого заключается в наложении на сигнал во временной области сглаживающего окна, имеющего более качественные характеристики в частотной области, чем прямоугольное окно.

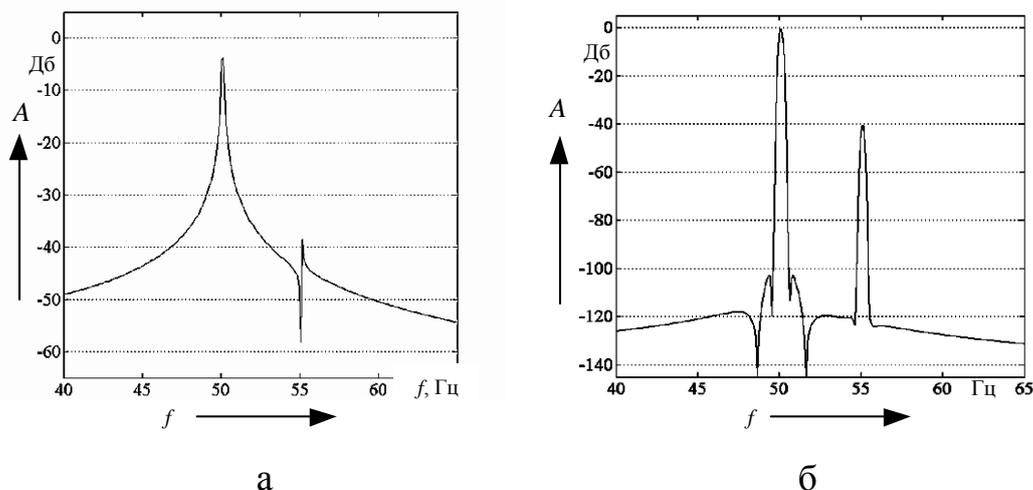


Рис. 12. Результат применения прямоугольного окна (а) и окна Кайзера (б)

Для повышения точности оценки частоты гармоники в спектре сигнала используется свойство преобразования Фурье – перемножение сигнала и функции окна во временной области соответствует свертке спектров сигнала и окна в частотной области. Положение гармоники в спектре можно оценить по максимуму корреляционной функции смещенного спектра оконной функции и спектра сглаженного сигнала:

$$R_{XW}(df) = R(X_w(f), W(f - df)). \quad (17)$$

Таким образом, для синусоидального сигнала рассчитывается автокорреляционная функция спектра сглаживающего окна, взвешенная амплитудой гармоники:

$$R_{xw}(df) = A \cdot R_{ww}(df). \quad (18)$$

По мере приближения к истинному положению гармоники значение $R_{xw}(df)$ будет стремиться к максимуму, а значение $R_{ww}(df)$ – к «мощности» соответствующего спектра сглаживающего окна. Для уменьшения объема вычислений можно произвести нормирование набора спектральных окон предварительно – на этапе их формирования:

$$A = \frac{R_{xw}(df)}{R_{ww}(df)} = \frac{\sum_i X_{wi} W_{ji}}{\sum_i W_{ji} W_{ji}} = \sum_i X_{wi} \frac{W_{ji}}{\sum_i W_{ji} W_{ji}} = \sum_i X_{wi} W'_{ji} = R'_{xw}(df). \quad (19)$$

В этом случае значение $R'_{xw}(df)$ будет стремиться к максимуму – значению амплитуды гармоники (рис. 13).

После определения положения гармоники необходимо произвести оценку амплитуды и фазы гармоники. Для этого оценим синусную и косинусную составляющие сигнала, учитывая, что уже известно смещение сглаживающего окна, при котором корреляционная функция принимает максимальное значение.

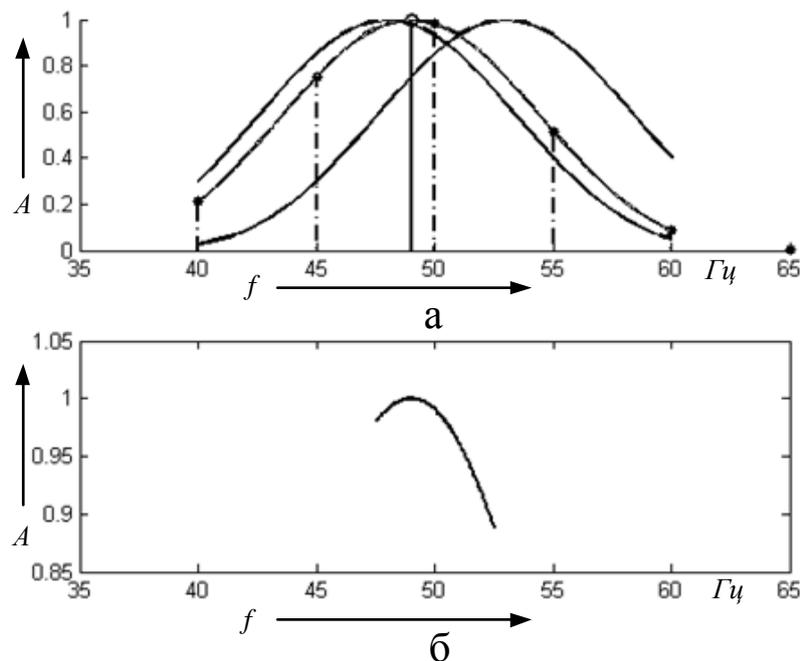


Рис. 13. Определение положения основной гармоники и ее амплитуды по набору спектральных окон

Значения амплитуды косинусной и синусной составляющих сигнала определяются так:

$$A_{\cos} = \sum_{i=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M+1}{2}} \operatorname{Re}(X(f)) \operatorname{Re}'(W(f - f_0)) + \operatorname{Im}(X(f)) \operatorname{Im}'(W(f - f_0)); \quad (20)$$

$$A_{\sin} = \sum_{i=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M+1}{2}} \operatorname{Re}(X(f)) \operatorname{Im}'(W(f - f_0)) - \operatorname{Im}(X(f)) \operatorname{Re}'(W(f - f_0)), \quad (21)$$

где $\operatorname{Re}'(W(f - f_0))$ и $\operatorname{Im}'(W(f - f_0))$ – нормированные реальный и мнимый спектры сглаживающего окна.

Используя полученные значения, амплитуду и фазу гармоники можно оценить по известным выражениям:

$$A = \sqrt{A_{\sin}^2 + A_{\cos}^2}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{A_{\sin}}{A_{\cos}} \right). \quad (22)$$

Точность разработанного алгоритма (точность оценки положения гармоники, оценки ее амплитуды и фазы) определяется частотой формирования набора сглаживающих окон для сравнения.

С помощью разработанного алгоритма можно оценить частоту, амплитуду и фазу канонических гармоник напряжения или тока и определить параметры интергармонических составляющих. Отличие заключается в том, что операции оценки амплитуды и фазы будут производиться не только для каждой гармоники, но и для каждой интергармоники, а затем отдельные составляющие будут группироваться в гармонические группы и центрированные интергармонические подгруппы.

В седьмой главе описаны принципы построения многофункциональных измерительных комплексов для электроподвижного состава (ЭПС) и тяговых подстанций.

На основе проведенных аналитических и экспериментальных исследований разработан МИК для использования на ЭПС, структурная схема которого приведена на рис. 14. В состав схемы входят

измерительный блок (модуль первичной обработки информации (МПОИ) на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и цифрового сигнального процессора), предназначенный для измерения тока, напряжения, мощности и передачи информации об измеряемых величинах в цифровом виде по оптоволоконному кабелю;

изолирующий источник питания, предназначенный для питания измерительного блока и его гальванической развязки от счетчика;

модуль вторичной обработки информации (МВОИ) с системой индикации, интерфейсами, навигатором, приемопередатчиком и универсальной антенной.

МИК предназначен для учета электрической энергии на ЭПС, осциллографирования, контроля качества электрической энергии в диапазоне

частот от 0 до 50 гармоника. Входная измерительная цепь по напряжению подключается к частотно-компенсированному высоковольтному резистивному делителю напряжения на 27,5 кВ, входная токовая измерительная цепь – к датчику тока. Возможно подключение МИК к уже установленным трансформаторам тока и напряжения, а также шунтам, при этом возможна индивидуальная программная и аппаратная настройка МИКа на месте уже после монтажа.

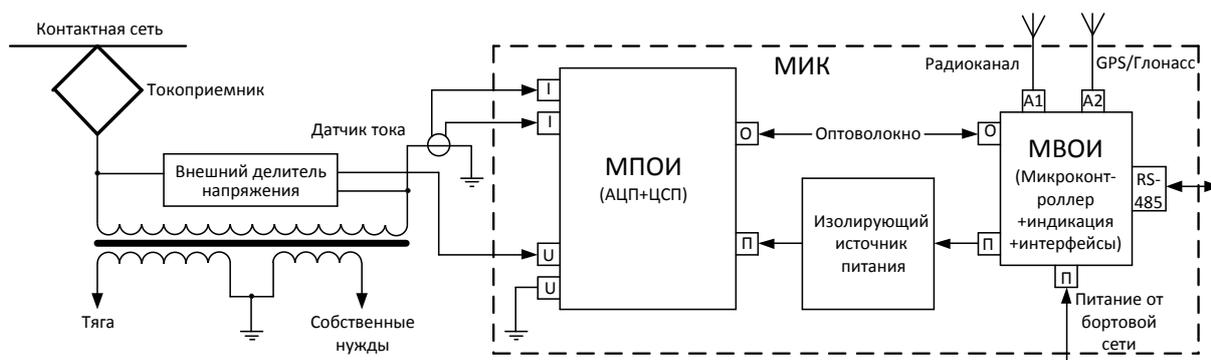


Рис. 14. Структурная схема МИКа для контроля параметров электроэнергии на ЭПС переменного тока

Для учета параметров электроэнергии по различным часовым зонам в приборе есть часы реального времени, по показаниям которых по заранее введенным в программу данным организованы временные накопители.

В МИКе установлен приемник системы глобальной навигации ГЛОНАСС (GPS), который позволяет вести учет параметров электроэнергии, учитывая время и местонахождение ЭПС на определенных участках электроснабжения.

Данные с прибора и персональных карт памяти переносятся в единый компьютер по контролю параметров электроэнергии, где проводятся дальнейшая обработка этих данных и их анализ.

На основе полученных теоретических и экспериментальных результатов разработана система оперативного определения режимов работы и параметров ЭЭС с тяговыми нагрузками. Система работает следующим образом: в режиме реального времени фиксируются напряжения и токи у трех потребителей: двух смежных подстанций и ЭПС, положение которого на межподстанционной зоне определяется с помощью системы ГЛОНАСС, данные передаются на устройство сбора и обработки информации, где и определяется энергетический режим участка системы тягового электроснабжения.

Структурная схема предлагаемой системы изображена на рис. 15.

Произведен расчет экономического эффекта от внедрения автоматизированной системы учёта электрической энергии для пилотного проекта в составе автоматизированной системы учета электрической энергии на фидерах контактной сети (АСУЭ ФКС) на 17 тяговых подстанциях переменного тока

Западно-Сибирской железной дороги и автоматизированной системы учета электрической энергии на 200 единицах электроподвижного состава (АСУЭ ЭПС). Затраты на реализацию проекта составят 51 млн р.

Прогнозируемый суммарный эффект от внедрения АСУЭ ФКС и ЭПС составит до 15,64 млн кВт·ч в год, или 2,32 % от расхода электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций полигона переменного тока Западно-Сибирской железной дороги, в том числе за счет введения энергооптимальных графиков вождения поездов, учета взаимозаездов поездов на участки электроснабжения с различными тарифами, учета горячего простоя локомотивов, определения несанкционированного потребления электроэнергии, проведения технических мероприятий по уменьшению потерь в тяговой сети: снижения уравнильных токов в межподстанционных зонах, компенсации реактивной мощности и сокращения потерь от высших гармоник.

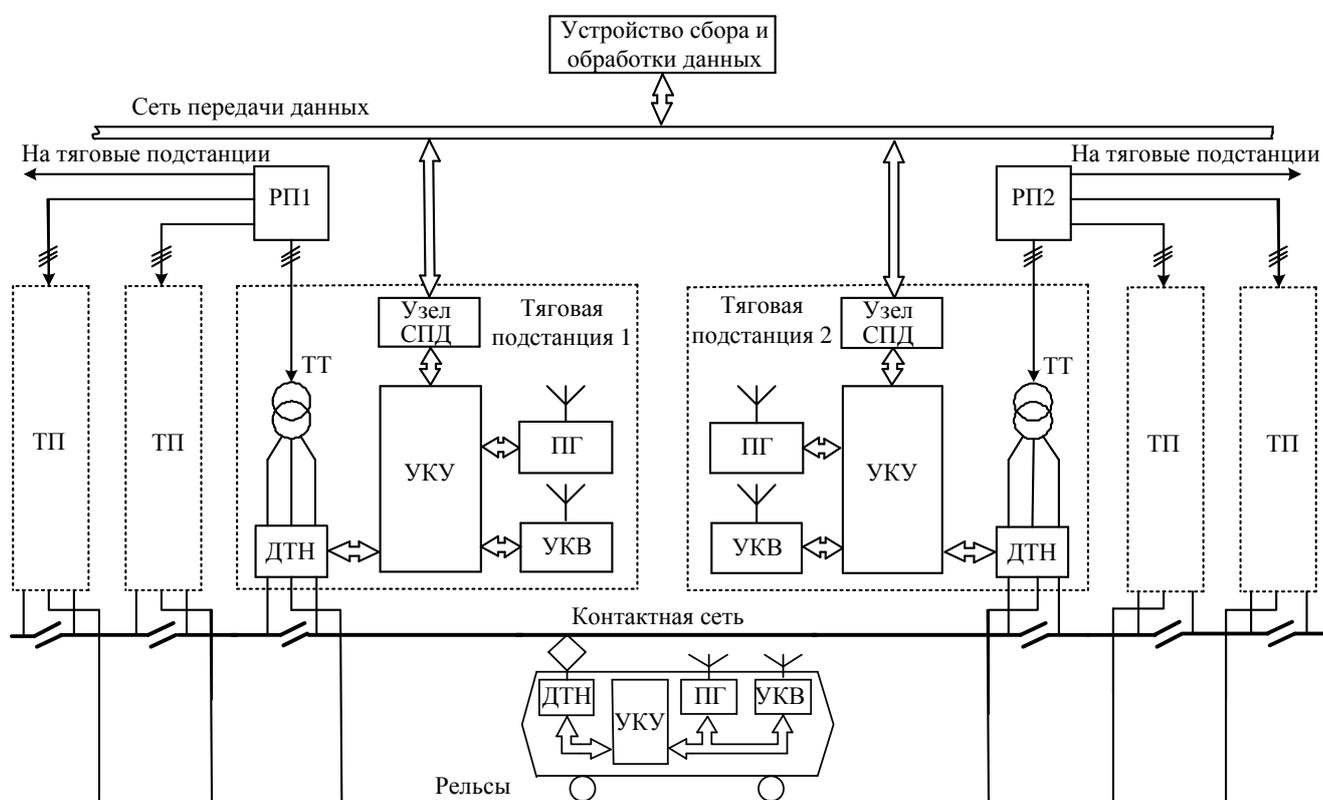


Рис. 15. Система оперативного определения режимов работы и параметров ЭЭС с тяговыми нагрузками: ДТН – датчик тока и напряжения; ПГ – приемник ГЛОНАСС; УКВ – радиомодем; УКУ – устройство контроля и управления

При стоимости 1 кВт·ч в размере 2 р. максимальный суммарный экономический эффект от внедрения АСУЭ ФКС и ЭПС составит до 31,3 млн р. в год.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментальными исследованиями установлено, что используемые в ЭЭС с тяговыми нагрузками методы и средства учета электроэнергии приводят к ошибочным результатам при учете реактивной энергии. Выявлены режимы работы систем тягового электроснабжения, присущие только этим системам – перетоки электроэнергии, резкие скачки сигналов и резонансные явления, которые при работе в таких системах требуют применения специфических технических средств контроля.

2. Разработана классификация, предложен и проанализирован метод и разработана структура устройства для определения составляющих мощности, независимого от различных отклонений параметров сигналов – частоты, несимметрии, искажений, шумов, позволяющие устанавливать факторы, влияющие на потери мощности в электроэнергетических системах с нелинейными нагрузками и формировать управляющие воздействия для активных устройств с целью сокращения потерь.

3. Разработаны теоретические основы и предложена система адаптивной синхронизации устройства контроля параметров электроэнергии в режиме реального времени при изменении частоты в сети и резких скачков уровня сигналов и искажений.

4. Теоретически обоснован и предложен метод определения прямой и обратной последовательностей не только основной, но и высших гармоник и разработана структура реализующей его системы.

5. Предложена модификация счетного метода определения частоты сигнала, позволяющая повысить помехоустойчивость и сократить объем вычислительных операций.

6. Разработан метод анализа гармонического состава сигналов, позволяющий дополнительно к параметрам канонических гармоник определять уровень интергармоник в условиях отклонения частоты, наличия значительных шумов и искажений сигнала

7. Предложена структура технических средств, реализующих разработанные алгоритмы контроля показателей качества электроэнергии и составляющих мощности в режиме реального времени, работающих как автономно, так и в составе интегрированной информационной системы и позволяющих определять режимы работы электроэнергетической системы с тяговой нагрузкой.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАКа

1. Чижма С. Н. Новые показатели искажения синусоидальности сигналов в электрических сетях [Текст] / С. Н. Чижма // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 304 – 306.
2. Чижма С. Н. Виртуальный генератор для исследования сигналов в электрических цепях [Текст] / С. Н. Чижма, Р. И. Газизов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 307 – 310.
3. Чижма С. Н. Анализ параметров электрических сигналов в системах электроснабжения [Текст] / С. Н. Чижма, Р. И. Газизов // Омский научный вестник. Серия Приборы, машины и технологии. – 2009. – № 7. – С. 217 – 219.
4. Чижма С. Н. Современные требования к приборам контроля показателей качества электроэнергии электрических сетей железных дорог [Текст] / С. Н. Чижма // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2009. – № 3. С. – 214 – 216.
5. Чижма С. Н. Применение вейвлет-анализа для контроля сигналов в электрических цепях [Текст] / С. Н. Чижма, В. С. Циркин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2010. – №1. – С. 149 – 153.
6. Чижма С. Н. Контроль шести- и двенадцатипульсовых трехфазных выпрямителей с помощью спектрально-временного анализа [Текст] / С. Н. Чижма, И. Ю. Мацько // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2010. – №1. – С. 153 – 157.
7. Чижма С. Н. Пути повышения пропускной способности каналов передачи данных АСКУЭ [Текст] / С. Н. Чижма, А. Г. Малютин, Д. А. Серов // Известия Транссиба. – 2011. – № 2. – С. 79 – 84.
8. Чижма С. Н. Метод определения частоты питающего напряжения при наличии помех [Текст] / С. Н. Чижма, А. Г. Малютин // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – № 4. – С. 41 – 47.
9. Чижма С. Н. Совершенствование алгоритма определения параметров гармоник в электрической сети для оценки качества электроэнергии [Текст] / С. Н. Чижма, Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – № 4. – С. 5 – 10.
10. Чижма С. Н. Метод спектрального анализа сигналов в системах электроснабжения [Текст] / С. Н. Чижма, Р. И. Газизов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2013. – №1. – С. 198 – 201.
11. Чижма С. Н. Анализ точности метода спектрального анализа сигналов в системах электроснабжения [Текст] / С. Н. Чижма, Р. И. Газизов // Омский

научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2013. – №1. – С. 202 – 206.

12. Чижма С. Н. Система синхронизации частоты в приборах контроля качества электроэнергии [Текст] / С. Н. Чижма // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 4. – С. 54 – 59.

13. Чижма С. Н. Многофункциональный измерительный комплекс для ЭПС и тяговых подстанций [Текст] / В. Т. Черемисин, С. Н. Чижма, А. А. Хряков // Промышленная энергетика. – 2013. – № 5. – С. 27 – 31.

14. Чижма С. Н. Алгоритм определения составляющих мощности в трехфазных трехпроводных системах электроснабжения [Текст] / С. Н. Чижма, А. А. Лаврухин // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2013. – № 2. – С. 12 – 16.

15. Чижма С. Н. Адаптивный метод контроля симметричных составляющих в трехфазных системах электроснабжения [Текст] / С. Н. Чижма, А. А. Лаврухин // Известия Транссиба. – 2012. – №1. – С. 76 – 82.

16. Чижма С. Н. Многофункциональный измерительный комплекс для анализа электрических величин на тяговых и трансформаторных подстанциях электрических железных дорог [Текст] / С. Н. Чижма, А. А. Лаврухин, В. С. Циркин // Транспорт Урала. – 2013. – № 2. – С. 67 – 72.

*Патенты на изобретения, полезные модели и
свидетельства на программы для ЭВМ*

17. Пат. 88157 Российская Федерация, МПК⁷ G01R17/02. Информационно-измерительная система для контроля качества электрической энергии [Текст] / Чижма С. Н., Грицутенко С. С., Альтман Е. А., Газизов Р. И., Циркин В. С.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2009125776/22; заявл. 06.07.2009; опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30. – 7 с.: ил.

18. Пат. 88161 Российская Федерация, МПК⁷ G01R31/02. Устройство диагностики трехфазных выпрямителей [Текст] / Чижма С. Н., Мацько И. Ю.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2009126479/22; заявл. 10.07.2009; опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30. – 6 с.: ил.

19. Пат. 88318 Российская Федерация, МПК⁷ B60M3/02. Информационная система для определения уравнивающего тока на участке тяговой сети переменного тока [Текст] / Черемисин В. Т., Чижма С. Н., Кващук В. А., Кондратьев Ю. В., Онуфриев А. С.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2009125777/22; заявл. 06.07.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 31. – 6 с.: ил.

20. Пат. 97829 Российская Федерация, МПК⁷ G01R11/54. Универсальный электронный счетчик для учета электрической энергии на электроподвижном составе постоянного и переменного тока [Текст] / Черемисин В. Т., Чижма С. Н., Грицутенко С. С., Хряков А. А., Никифоров М. М.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2010118148/28; заявл. 05.05.2010; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26. – 9 с.: ил.

21. Пат. 102565 Российская Федерация, МПК⁷ B60M3/02. Информационная система для определения уравнивающего тока на участке тяговой сети переменного тока [Текст] / Черемисин В. Т., Чижма С. Н., Кващук В. А., Кондратьев Ю. В., Онуфриев А. С.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2010143020/11; заявл. 20.10.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7. – 9 с.: ил.

22. Пат. 2446065 Российская Федерация, МПК⁷ B60M3/02. Информационная система для учета электроэнергии в тяговых сетях [Текст] / Черемисин В. Т., Чижма С. Н., Кондратьев Ю. В., Никифоров М. М., Онуфриев А. С.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2010143100/11; заявл. 20.10.2010; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 9. – 7 с.: ил.

23. Пат. 117613 Российская Федерация, МПК⁷ G01D9/00. Устройство для регистрации и распознавания событий в электрических сетях [Текст] / Чижма С. Н., Циркин В. С., Загородний А. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2012109344/28; заявл. 12.03.2012; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18. – 5 с.: ил.

24. Пат. 118761 Российская Федерация, МПК⁷ G01R23/00. Устройство для определения периода гармонического сигнала [Текст] / Чижма С. Н., Малютин А. Г., Газизов Р. И.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2012109346/28; заявл. 12.03.2012; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21. – 6 с.: ил.

25. Пат. 2463613 Российская Федерация, МПК⁷ G01R21/00. Устройство для определения составляющих мощности в трехфазных трехпроводных цепях переменного тока [Текст] / Чижма С. Н.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2011123310/28; заявл. 08.06.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28. – 14 с.: ил.

26. Пат. 2486531 Российская Федерация, МПК⁷ G01R29/16. Устройство для определения прямых и обратных последовательностей основной и высших гармоник сигналов в трехфазных сетях [Текст] / Чижма С. Н.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2011131118/28; заявл. 25.07.2011; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18. – 10 с.: ил.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008611722. Программный комплекс для анализа электрических величин на

тяговых и трансформаторных подстанциях электрических железных дорог / Грицутенко С. С., Чижма С. Н., Лаврухин А. А., Дербуш С. Н., Газизов Р. И.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. Зарегистрировано 31.03.2008.

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008611722. Анализатор спектра периодических сигналов на базе быстрого преобразования Фурье / Чижма С. Н., Альтман Е. А., Газизов Р. И.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. Зарегистрировано 31.03.2008.

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008611722. Измеритель частоты периодического сигнала с шумами / Чижма С. Н., Малютин А. Г., Газизов Р. И.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. Зарегистрировано 31.03.2008.

Прочие публикации

30. Чижма С. Н. Измерительный комплекс для анализа электрических величин тяговых подстанций [Текст] / С. Н. Чижма, В. С. Циркин // Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта: Материалы науч.-практ. конф. / Самарская гос. акад. путей сообщения. Самара, – 2006. – С.53 – 55.

31. Чижма С. Н. Регистратор событий и процессов на тяговых и трансформаторных подстанциях электрических железных дорог [Текст] / С. Н. Чижма, А. Г. Малютин, А. Б. Кильдибеков // Инновационные проекты и новые технологии на железнодорожном транспорте: Сб. науч. статей / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2007. – С. 162 – 168.

32. Чижма С. Н. Контроль расхода электроэнергии в сетях постоянного тока [Текст] / С. Н. Чижма, И. Ю. Мацько // Теоретические знания – в практические дела: Сб. статей / РосЗИТЛП. – Омск, – 2008. – Ч. 3 – С. 205 – 208.

33. Чижма С. Н. Внедрение и развитие информационных систем учета и контроля в структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги [Текст] / А. Б. Кильдибеков, А. Г. Малютин, С. Н. Чижма // Инновационные проекты и новые технологии на железнодорожном транспорте: Сб. науч. статей / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2008. – С. 29 – 31.

34. Чижма С. Н. Вопросы комплексной автоматизации тяговых подстанций [Текст] / С. Н. Чижма, С. Н. Дербуш, Р. И. Газизов // Инновационные проекты и новые технологии на железнодорожном транспорте: Сб. науч. статей / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2008. – С. 53 – 58.

35. Чижма С. Н. Современные требования к приборам контроля качества электроэнергии на железнодорожном транспорте [Текст] / С. Н. Чижма, Р. И. Газизов // Актуальные проблемы транспортного комплекса: Материалы всерос. науч.-практ. конф / Самарская акад. путей сообщения. – Самара, – 2009. – С. 222 – 224.

36. Чижма С. Н. Совершенствование информационных систем железнодорожного транспорта [Текст] / С. Н. Чижма, Е. А. Альтман, А. Г. Малютин // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2009. – С. 31 – 35.

37. Чижма С. Н. Анализ искажений качества электроэнергии в тяговых сетях [Текст] / С. Н. Чижма // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2009. – С. 99 – 104.

38. Чижма С. Н. Анализ точности алгоритмов оценки спектра в сетях тягового электроснабжения [Текст] / Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров, С. Н. Чижма // Ресурсосберегающие технологии на Западно-Сибирской железной дороге: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2010. – С. 154 – 163.

39. Чижма С. Н. Составляющие мощности при несинусоидальных и несимметричных режимах работы систем электроснабжения железных дорог [Текст] / С. Н. Чижма // Известия Транссиба. – 2010. – № 4. – С. 94 – 103.

40. Чижма С. Н. Анализ трафика системы передачи данных в АСКУЭ Омского отделения Западно-Сибирской железной дороги [Текст] / С. Н. Чижма, Д. А. Серов, А. С. Онуфриев // Инновации для транспорта: Сб. науч. статей с междунар. участием: в 3 частях / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2010. – Ч. 1. – С. 276 – 281.

41. Чижма С. Н. Контроль искажений сигналов в тяговых сетях с использованием новых подходов [Текст] / С. Н. Чижма // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2010. – С. 95 – 107.

42. Чижма С. Н. Мониторинг электрических событий в сетях электроснабжения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / С. Н. Чижма, В. С. Циркин, И. Ю. Мацько // Эффективность и безопасность работы электротехнических комплексов и систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2011. – С. 58 – 64.

43. Чижма С. Н. Применение систем синхронизации времени в сетях электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / С. Н. Чижма, Ю. В. Кондратьев, А. А. Хряков, А. С. Онуфриев // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2011. – С. 263 – 266.

44. Чижма С. Н. Контроль частоты питающего напряжения при наличии помех [Текст] / С. Н. Чижма, А. Г. Малютин, Р. И. Газизов // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах: Сборник статей III Международной научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2012. – С. 72 – 76.

45. Чижма С. Н. Сравнительный анализ методов определения составляющих мощности [Текст] / С. Н. Чижма // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2012. – С. 263 – 266.

46. Чижма С. Н. Использование корреляционных функций для спектрального анализа сигналов в системах электроснабжения [Текст] / С. Н. Чижма, Р. И. Газизов // Динамика систем, механизмов и машин: Материалы VIII Международной научно-технической конференции / Омский гос. технический ун-т. – Омск, – 2012. – С. 292 – 296.