

На правах рукописи

АНТОНОВ Владислав Иванович

**ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ АДАПТИВНОГО СТРУКТУРНОГО
АНАЛИЗА СИГНАЛОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Чебоксары – 2018

Работа выполнена на кафедре Теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Научный консультант

Ванин Валерий Кузьмич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты

Лачугин Владимир Федорович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Акционерное общество «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского», лаборатория информационно-измерительных и управляющих систем в электроэнергетике, заведующий лабораторией

Нагай Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кафедра «Электрические станции и электроэнергетические системы», заведующий кафедрой

Шуин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кафедра автоматического управления электроэнергетическими системами, профессор

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева"

Защита диссертации состоится 14 июня 2018 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.301.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус 3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «23» марта 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.02
к.т.н., доцент

А.В. Серебрянников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Надежное, безопасное и эффективное управление режимами работы электрической системы (ЭС) сегодня видится – согласно Национальной технологической инициативе EnergyNet (энергетика будущего на принципах Internet of Energy) – в построении интеллектуальных электроэнергетических систем, так называемых «умных сетей» (Smart Grids). Новые качества интеллектуальных сетей достигаются за счет расширения информационной основы принятия решений, заключающейся в высокоточных измерениях параметров текущего режима в различных узлах ЭС. Действительно, техническое совершенство современных коммуникационных технологий и систем синхронизации измерений сделало возможным автоматизированное оценивание состояния энергосистемы в реальном масштабе времени и осуществление технологического управления и защиты энергосистем с помощью распределенных иерархических систем, получивших общее название *распределенных систем мониторинга, защиты и управления* – WAMPACS. Функционально WAMPACS интегрирует в себе распределенные системы мониторинга переходных режимов WAMS, защиты WAPS и управления WACS.

Технологии WAMPACS требуют применения новых и эффективных методов обработки сигналов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям работы ЭС. Так, приспособляемость распределенной системы релейной защиты (WAPS) к изменяющейся структуре «умной сети», проявляющаяся в активной перенастройке характеристик и уставок, обеспечивается благодаря интеллектуальным алгоритмам мультиагентных систем защиты и высокой точности измерений в условиях интенсивных переходных процессов в защищаемой системе. В особенности это качество востребовано в релейной защите сетей, прилегающих к высоковольтным сетям передачи постоянного тока (HVDC). При коротком замыкании в сети переменного тока вблизи станции HVDC входные сигналы релейной защиты изобилуют межгармоническими составляющими разных частот, вызванными разрядом сети постоянного тока на сеть переменного тока из-за ошибочной коммутации вентилей на станции HVDC. Именно в релейной защите таких сетей проявляются в полной мере преимущества адаптивных структурных моделей.

Использование адаптивного структурного анализа создает новый кластер алгоритмов цифровой обработки сигналов ЭС, способствующих улучшению быстродействия и надежности систем релейной защиты и автоматики, и совершенствованию систем мониторинга и управления, призванных повысить устойчивость и надежность функционирования интеллектуальных энергосистем.

С общетеоретических позиций прецизионная оценка параметров основной гармоники, как одной из слагаемых сигнала переходного режима ЭС, в принципе невозможна без гибкого учета в модели сигнала и других составляющих процесса. Поэтому при оценке информационных параметров основной гармоники необходимо определить всю структуру сигнала. И поскольку построение модели ведется в условиях структурной неопределенности электрического сигнала (недостаточности информации о компонентах и их характеристиках), его распознавание должно рассматриваться как решение задачи адаптивного структурного анализа, заключающейся в идентификации структуры сигнала текущего режима на множестве собственных мод реакции ЭС и составляющих принужденного режима.

Адаптивные модели различного назначения, являющиеся прообразом структурных моделей, широко применяются в общей теории цифровой обработки сигналов для повышения разрешающей способности спектрального анализа (оценки спектра) сигналов. Однако прямому наследованию их идей в методах распознавания структуры сигналов ЭС для целей управления режимами и релейной защиты интеллектуальной электроэнергетической системы препятствуют существенные различия предметных областей и решаемых задач.

В связи с этим существует настоятельная необходимость в разработке основ теории адаптивного структурного анализа сигналов интеллектуальной ЭС для применения в системах управления ее режимами, релейной защиты и автоматики, что делает тему настоящей работы актуальной.

Цель работы. Разработка теории адаптивного структурного анализа электрических сигналов и методических основ внедрения ее положений в современные приложения интеллектуальной электроэнергетики.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1 Обобщение и исследование существующих адаптивных методов распознавания сигналов и выявление базовых методов распознавания структуры сигнала.

2 Разработка теории адаптивных структурных моделей сигналов электроэнергетики, обеспечивающей каузальность и согласованность формируемых структурных моделей с распознаваемым сигналом.

3 Разработка методов компонентного анализа сигналов интеллектуальной электроэнергетики, обеспечивающие согласованность компонентов модели с сигналом, избегая множественности ее компонентов.

4 Разработка общей теории адаптивного структурного анализа сигнала электрической системы, интегрирующей в себе методы теории адаптивных структурных моделей и методов компонентного анализа и обеспечивающей структурный анализ самой осциллограммы сигнала и идентификацию структуры сигнала на выявленных интервалах однородности.

5 Разработка методических основ применения адаптивного структурного анализа в различных приложениях интеллектуальной электроэнергетики, включая и WAMPACS.

Степень разработанности темы исследования. Методы цифровой обработки сигналов и их приложения в интеллектуальной электроэнергетике развиваются во многих исследованиях как отечественных, так и зарубежных ученых. Широко известны научные труды Я.Л. Арцишевского, В.К. Ванина, А.В. Булычева, И.И. Голуб, А.М. Дмитренко, Н.А. Дони, Ю.К. Евдокимова, А.В. Жукова, А.С. Засыпкина, П.В. Илюшина, С.Л. Кужекова, Т.Г. Климовой, И.Н. Колосок, А.Л. Куликова, В.Ф. Лачугина, Ю.Я. Лямеца, Н.А. Манова, А.В. Мокеева, В.И. Нагая, В.А. Наумова, Г.С. Нудельмана, В.И. Пуляева, Е.И. Сацук, М.И. Успенского, Ю.Г. Шакаряна, В.А. Шуина В.А., J.F. Hauer, J. Ortbandt, T. Lobos, R. Kumaresan, D.W. Tufts, M.A. Rahman и др. Считается, что начала структурного анализа положены в работе Prony (1795 г.). Но, несмотря на множество работ так или иначе связанных с оценкой структуры сигнала, до сих пор цельная и хорошо проработанная теория структурного анализа, методы и определения которой были бы достаточно ясны и методически обоснованы для применения в различных приложениях интеллектуальной электроэнергетики, не создана. Представленное к защите диссертационное исследование решает эту задачу.

Методы исследования. При выполнении исследований применялись методы математического моделирования, теоретических основ электротехники, теории электрических и электромеханических переходных процессов в электроэнергетической системе, основы теории линейной алгебры и теории цифровой обработки сигналов. Исследования проводились на программно-техническом комплексе моделирования процессов в электроэнергетической системе в реальном масштабе времени фирмы RTDS Technologies Inc. (Канада) и программных средах Matlab и Mathcad.

Достоверность полученных результатов основных научных положений и выводов работы подтверждается результатами математического моделирования и экспериментальных исследований на программно-техническом комплексе испытаний в реальном масштабе времени RTDS; апробации положений и методов теории в программно-технических комплексах Испытательного полигона современных систем релейной защиты, автоматики и управления ООО НПП ЭКРА и на цифровом полигоне Нижегородской ГЭС; опытом эксплуатации в энергосистемах России различных устройств релейной защиты и автоматики на базе серийно выпускаемых микропроцессорных терминалов релейной защиты и

автоматики ЭКРА 200 (НПП «ЭКРА») и «Бреслер-0107» (НПП «Бреслер»), использующих разработанные в настоящей работе методы структурного анализа.

Основные положения, выносимые на защиту:

1 Теория адаптивных структурных моделей сигналов, обобщающая научные достижения в области адаптивных алгоритмов распознавания сигналов и формирующая единый подход к методам идентификации структуры сигналов в новых системах мониторинга, управления и релейной защиты интеллектуальной электроэнергетики.

2 Новые методы компонентного анализа сигналов электроэнергетики, обеспечивающие согласованность компонентов модели с сигналом, избегая множественности ее компонентов.

3 Общая теория адаптивного структурного анализа сигнала электрической системы, объединяющая в себе методы теории адаптивных структурных моделей и компонентного анализа и обеспечивающая определение интегрированной структуры сигнала в темпе развития аварийного процесса в энергосистеме.

4 Новый алгоритм разрешения структурной неопределенности сигнала для цифровых систем релейной защиты, автоматики и управления интеллектуальной энергосистемой, работающих в темпе развития аварийного процесса в электрической системе.

5 Новые адаптивные методы предварительной обработки распознаваемого сигнала, повышающие разрешающую способность и достоверность оценок структурного анализа сигнала, обеспечивая улучшение быстродействия и надежности систем релейной защиты и автоматики и совершенствование систем мониторинга и управления интеллектуальными энергосистемами.

6 Методические основы применения адаптивного структурного анализа в различных приложениях интеллектуальной электроэнергетики, формирующие базу знаний и эксперимента, достаточной для использования ее как руководства при внедрении положений теории адаптивного структурного анализа в различные приложения интеллектуальной электроэнергетики.

Научная новизна работы:

1 Разработанная теория адаптивных структурных моделей сигналов обобщает научные достижения в области адаптивных алгоритмов распознавания сигналов и формирует единый подход к методам идентификации их структуры, в частности, структуры сигналов электроэнергетики, и объясняет многие свойства структурных моделей, установленные ранее в различных источниках только эмпирическим путем.

2 Предложенные методы компонентного анализа сигналов формируют ранее не известные правила построения однозначной и компактной модели распознаваемого сигнала, широко используя положения разработанной в работе теории адаптивных структурных моделей.

3 Разработанная впервые общая теория структурного анализа определяет основы структурного анализа сигнала и позволяет в темпе развития аварийного процесса определять интегрированную структуру сигнала, разделяя его на интервалы однородности (интервалы инвариантности структуры) и идентифицируя структуру (компонентный состав) сигнала на выделенных интервалах.

4 Разработанные методические основы реализации положений структурного анализа сигналов формируют базу знаний об их приложениях в интеллектуальную электроэнергетику, создавая алгоритмическое обеспечение для оценивания состояния энергосистемы в реальном масштабе времени и осуществления технологического управления и защиты энергосистем с помощью распределенных систем мониторинга, защиты и управления – WAMPACS.

Теоретическая ценность работы:

1 Разработанная теория адаптивного структурного анализа обогащает теорию информационного анализа состояния электрической системы и открывает новый кластер методов построения систем релейной защиты, мониторинга и управления интеллектуальными электроэнергетическими системами, повышая устойчивость функционирования технических систем интеллектуальной электроэнергетики.

2 Обнаруженная методическая основа синтеза алгоритмов оценки структуры сигнала аварийного процесса в ЭС формирует базу знаний для развития

алгоритмов управления и защиты интеллектуальных электроэнергетических систем, придавая техническим средствам аварийной защиты и управления интеллектуальными электроэнергетическими системами повышенную селективность и эффективность действия.

Практическая ценность работы:

1 В работе создано алгоритмическое обеспечение, использующее структурный анализ сигналов и позволяющее разрабатывать современные программно-технические средства и устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики, мониторинга и управления интеллектуальными электроэнергетическими системами.

2 Для цифровых систем релейной защиты, автоматики и управления интеллектуальной энергосистемой разработан новый алгоритм разрешения структурной неопределенности сигнала на основе метода наложения адаптивных фильтров, обеспечивающий распознавание структуры сигнала в темпе развития аварийного процесса в электрической системе.

3 Разработаны новые адаптивные методы предварительной обработки распознаваемого сигнала, в том числе алгоритмы удаления тренда, оценки частоты сети, локализации и коррекции отсчетов с выбросами (или потерянных отсчетов), повышающие разрешающую способность и достоверность оценок структурного анализа сигнала, обеспечивая улучшение быстродействия и надежности систем релейной защиты и автоматики и совершенствование систем мониторинга и управления интеллектуальными энергосистемами.

4 Создано алгоритмическое обеспечение для нового кластера программно-технических средств и устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики, мониторинга и управления интеллектуальными электроэнергетическими системами (WAMPACS), обладающих повышенными быстродействием, селективностью и устойчивостью функционирования. Разработаны алгоритмы: определения места повреждения; быстродействующей релейной защиты, способной принять решение на основе анализа короткого участка аварийного процесса; защиты электрических генераторов с активно-адаптивным распознаванием слабой информационной слагаемой; мониторинга низкочастотных колебаний в электроэнергетической системе; распознавания информационного образа цифровых сигналов (осциллограмм); релейной защиты электрических систем с высоковольтными передачами постоянного тока; интеллектуального (контролируемого) автоматического повторного включения транзитных ЛЭП в работу после аварийного отключения; структурной компрессии осциллограмм; оценки технического состояния высоковольтного оборудования; реконструкции сигнала ЭС. Создана интерактивная среда адаптивного структурного анализа на основе Simulink.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее результаты докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2017»: Санкт-Петербург, 2017; «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» – РНК IСIGRE: Сочи, 2015; Екатеринбург, 2013; «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России – РЕЛАВЭКСПО» (Чебоксары, 2012 –2017) и всероссийских конференциях: ”Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем” и “Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике” (Чебоксары, 1995–2017 г.); на Всесоюзных конференциях и семинарах в Риге (1986, 1988), Киеве (1990), Мариуполе (1990), Каунасе (1991), С.-Петербурге (1994), Новочеркаске (1994), И.-Оле (1996).

По теме докторской диссертации под научным руководством соискателя защищены 3 диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук:

1. *Лазарева, Н.М.* Алгоритмы структурной компрессии цифровых осциллограмм сигналов электроэнергетических систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Лазарева Надежда Михайловна. – Чебоксары, 1997. – 27 с.

2. *Ильин, А.А.* Совершенствование методов структурного анализа входных сигналов цифровых систем релейной защиты и автоматики: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Ильин Алексей Анатольевич. – Чебоксары, 2014. – 23 с.

3. *Петров, В.С.* Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110–750 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Петров Владимир Сергеевич. – Чебоксары, 2015. – 24 с.

Реализация результатов работы. Предлагаемые в работе методы адаптивного структурного анализа были опробованы еще в 1991 г. в первом в России микропроцессорном определителе места повреждения, разработанном в совместно Чувашским госуниверситетом (В.И. Антонов, Ю.Я. Лямец) и ВНИИР (Н.А. Дони, Г.С. Нудельман) и введенным в эксплуатацию в ОДУ Северного Кавказа на ЛЭП–500 «Кавкасиони» (п/ст «Центральная» Краснодарэнерго). Работа финансировалась РФФИ по гранту №98-01-03276 «Структурный анализ цифровых сигналов электроэнергетических систем для новых поколений цифровых систем противоаварийной защиты».

Результаты работы используются:

в ООО НПП «ЭКРА» (г. Чебоксары) в серийно выпускаемой продукции: аппаратуре противоаварийной автоматики серий ШЭЭ 22х на базе терминалов серии ЭКРА 200; аппаратуре релейной защиты электрических генераторов, работающих на общую шину, серий ШЭ11ХХ на базе терминалов серии ЭКРА 200; алгоритмическом обеспечении терминала интеллектуального (контролируемого) включения ЛЭП; определителе места повреждения (ОМП) в программно-техническом комплексе АСУ ТП EVICON; программном комплексе анализа сигналов аварийного процесса RecViewer;

в ООО «НПП Бреслер» (г. Чебоксары) при разработке серийно выпускаемого базового микропроцессорного терминала релейной защиты и автоматики «Бреслер-0107»;

в ООО «Инженерный центр «Энергосервис» (г. Архангельск) используются для математического моделирования современных интеллектуальных устройств различного функционального назначения автоматизированных систем управления и защиты нового поколения WAMPACS.

Теоретические основы адаптивного структурного анализа, разработанные в диссертации, а также интерактивная среда адаптивного структурного анализа используются в учебном процессе:

в ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары) при чтении лекций по курсам «Цифровая обработка электроэнергетических сигналов», «Автоматическое управление электроэнергетическими системами», «Системы и сети распределенной генерации», «Управляемые системы передачи электроэнергии» направления подготовки магистров 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника», а также при подготовке выпускных квалификационных работ магистрантов и диссертационных работ аспирантов;

в Высшей школе энергетики, нефти и газа ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Архангельск) по дисциплинам «Основы автоматического управления» и «Релейная защита и автоматизация энергетических систем», а также при подготовке выпускных квалификационных работ магистрантов и диссертационных работ аспирантов кафедры Электроэнергетики и электротехники;

в ФГАОУ ДПО "ПЭИПК (г. С.-Петербург) на лекционных и практических, а также конференциях и семинарах кафедры "Релейная защита и автоматика электрических станций, сетей и энергосистем" для повышения квалификации специалистов в области релейной защиты и автоматики энергосистем России и ближнего зарубежья;

в НОУ ДПО «ИПК РЗА» (г. Чебоксары) повышения квалификации специалистов релейной защиты и автоматики энергосистем России и ближнего зарубежья на лекционных, практических и семинарских занятиях.

Публикации. Из 206 печатных работ автора (50 изобретений) к теме диссертации относятся 103, в том числе 1 монография, 14 статей, индексируемых в международных базах данных и систем цитирования (SCOPUS и др.), 29 статей из Перечня научных рецензируемых изданий и Перечня научных изданий, входящих в международные базы данных и системы цитирования ВАК, 19 авторских свидетельств СССР и патентов РФ, 41 доклад на международных и всероссийских (всесоюзных) конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы (240 наименований) и приложений. Общий объем составляет 330 страниц, в том числе основного текста 317 страниц, 119 рисунков, 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы и формулируются основные задачи исследования, тесно связанные с разработкой теории адаптивных структурных моделей и общей теории адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике. Показывается, что современные электроэнергетические системы проявляют ярко выраженный тренд к интеллектуализации процессов управления и релейной защиты энергосистем на основе применения новых технологий обработки сигналов, преимущественно использующих адаптивные методы. Отмечаются научная новизна, практическая ценность работы, основные положения, выносимые на защиту, а также излагается структура представленной работы.

В первой главе изучаются характеристики сигналов интеллектуальной электроэнергетики и формулируются задачи структурного анализа сигналов.

Отмечается, что основной особенностью интеллектуальной энергетики является преобразование токов и напряжений ЭС в цифровые сигналы непосредственно у измерительных трансформаторов тока ТА и напряжения TV устройством сопряжения с шиной процесса МУ (рисунок 1). Интеллектуальные устройства мониторинга, управления и защиты цифровой подстанции подписываются на свои сигналы через шину процесса и получают их в виде потоков оцифрованных сигналов (SV-потоков). Эта означает, что цифровые системы интеллектуальной энергетики не имеют возможности влиять на процесс преобразования электрического сигнала, что потребует от методов распознавания сигналов универсальности и независимости от источников цифровых сигналов.

В работе используются следующие обозначения сигналов: $x(t)$ – непрерывный во времени сигнал, $x(kT_s)$ или $x(k)$ – цифровой сигнал, полученный путем дискретизации и аналогово-цифрового преобразования сигнала $x(t)$. Здесь и далее t и kT_s – непрерывное и дискретное время соответственно, T_s – период дискретизации.

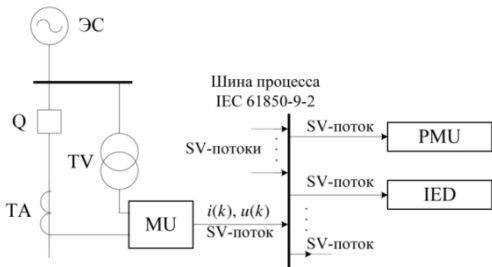


Рисунок 1 – Связь интеллектуальных устройств мониторинга, управления и релейной защиты и автоматики с источниками сигналов через шину процесса IEC 61850-9-2 цифровой подстанции

Цифровой сигнал переходного процесса $x(k) = x(t = kT_s)$ включает в себя множество $\mathbf{S} \in C^m$ слагаемых принужденного режима $x_s(k)$ и множество $\mathbf{V} \in C^n$ слагаемых $x_f(k)$ свободного движения ЭС.

Составляющие свободного процесса

$$\mathbf{V} = \{\underline{\phi}_1(k), \dots, \underline{\phi}_n(k)\}, \quad (1)$$

ассоциированные с корнями характеристического уравнения ЭС представляют собой множеством *собственных мод* реакции ЭС. Очевидно, что размер множества базисных сигналов \mathbf{V} совпадает с

порядком n ЭС.

Множество собственных мод \mathbf{B} , дополненное множеством \mathbf{S} составляющих принужденного режима, образует множество *слагаемых текущего режима* ЭС:

$$\mathbf{F} = (\mathbf{B} \cup \mathbf{S}) \in C^{M_s}, \quad M_s \leq (n + m), \quad (2)$$

где M_s – число слагаемых множества \mathbf{F} . Учитывая, что составляющие принужденного режима сети переменного тока можно рассматривать как частный случай базиса собственных мод ЭС, то *сигнал текущего режима* представляется полностью совокупностью собственных мод (1):

$$x_c(k) = \sum_{l=1}^{M_s} B_l \phi_l(k). \quad (3)$$

Все, что не может быть воспринято как реакция ЭС, должно быть отнесено к шуму $w(k)$ в сигнале:

$$x(k) = x_c(k) + w(k) = \sum_{l=1}^{M_s} B_l \phi_l(k) + w(k). \quad (4)$$

В главе рассматривается природа шума в цифровых сигналах интеллектуальной электроэнергетики. Выявлено, что она в основном связана с погрешностями тракта измерения и АЦП, но в сигнале имеют место и внешние помехи, не связанные с процессами в ЭС. Может появиться значительное локальное искажение сигнала в результате появления выбросов или потерь отсчетов в потоке сообщений (SV-потоков). В связи с этим сделан вывод, что для прецизионного распознавания структуры сигнала необходима ее предварительная обработка, включающая в себя операции удаления тренда и коррекции отсчетов с выбросами.

В работе показано, что существуют две задачи структурного анализа сигнала электрической системы: общая и локальная. Теория распознавания структуры осциллограммы сигнала является общей в том смысле, что его методы решают задачу идентификации структуры осциллограммы, представляя ее в виде интервалов однородности, на протяжении каждого из которых состав сигнала однороден и включает в себя некоторую вполне определенную для этого интервала совокупность составляющих. Задача локального структурного анализа опирается на теорию адаптивных структурных моделей, определяет методы выбора и настройки структурной модели и данного интервала однородности. Возможности локального структурного анализа полностью определяются субстантивными свойствами адаптивных структурных моделей.

Во второй главе разрабатываются основы теории адаптивных структурных моделей переходного режима ЭС, обобщающей научные достижения в области адаптивного распознавания сигналов и формирующей единый подход к методам идентификации структуры сигналов интеллектуальной энергетики. Исследуемые в этой главе фундаментальные свойства структурных моделей формулируются впервые.

Общие начала теории адаптивных структурных моделей сигналов электрической системы. Основным инструментом метода является адаптивная структурная модель, обладающая универсальной способностью распознавать структуру сигнала любой сложности, опираясь лишь на предположение, что во время мониторинга состояния ЭС ее параметры не меняются во времени или меняются значительно медленней, чем развиваются процессы измерения сигнала.

Истоки теории адаптивных моделей восходят к методу Прони, хотя он в исходном виде малоприменим для практического применения. Дело в том, что шум в сигнале вызывает значительную дисперсию оценок аргументов экспонент в модели Прони. Но в современном изложении метод Прони можно рассматривать как общее начало методов структурного анализа, основанных на фундаментальном свойстве эквивалентности компонентов модели структуре распознаваемого сигнала, если множество слагаемых сигнала полностью поглощается базисом собственных функций структурной модели. Именно это свойство модели и является краеугольным камнем метода Прони, поскольку оно обосновывает связь между корнями характеристического уравнения адаптивной структурной модели с компонентами распознаваемого сигнала.

Следуя этой идее, в работе искомый адаптивный оператор формируется как сумма взвешенных предыдущих реализаций распознаваемого сигнала $x(k)$

$$a_0 \hat{x}(k) = - \sum_{m=1}^M a_m x(k - mv), \quad k \geq Mv, \quad (5)$$

где $a_0 \hat{x}(k)$ – взвешенная с коэффициентом a_0 оценка текущего отсчета $x(k)$, a_m – вес m -й реализации сигнала $x(k - mv)$ в модели (искомые коэффициенты модели), v – коэффициент внутримодельной децимации (разрежения) отсчетов, изменяющий масштаб времени внутри окна фильтра; $v = 1$, если используется исходный масштаб времени. Масштабирующий коэффициент a_0 произволен. Невязка

$$e(k) = a_0 x(k) - a_0 \hat{x}(k) = \sum_{m=0}^M a_m x(k - mv) \quad (6)$$

является мерой близости к модели к сигналу.

В работе показывается, что если фильтр (6) настроен на полное подавление компонентов распознаваемого сигнала, то его базис собственных сигналов поглощает множество слагаемых сигнала и содержит всю информацию о параметрах компонентов. Собственные сигналы базиса фильтра (6) предопределяются корнями его характеристического уравнения

$$\sum_{m=0}^M a_m \underline{\zeta}^{(M-m)} = \prod_{m=1}^M (\underline{\zeta} - \underline{\zeta}_m) = 0, \quad |\underline{\zeta}_m| \leq 1, \quad (7)$$

где переменная

$$\underline{\zeta} = \underline{z}^v = e^{pvT_s}$$

учитывает изменение масштаба времени внутри окна фильтра.

Тогда связь между полюсами изображения сигнала ЭС $x(t)$ и корнями характеристического уравнения (7) устанавливает уравнение согласования корней:

$$p_m v T_s = (\alpha_m + j\omega_m) v T_s = \ln \zeta_m. \quad (8)$$

Фундаментальные свойства структурных моделей. Основным препятствием к достижению полной информативной согласованности модели и сигнала является шум в сигнале. Именно из-за шума структурный анализ приобретает многозначность, представляя результаты анализа в области, охватывающей истинные параметры сигнала.

Эффективные структурные модели. В работе показано, что для повышения результативности структурного анализа необходимо уменьшить указанную область неоднозначности, рассматривая решение задачи распознавания сигналов ЭС как задачу построения *эффективных структурных моделей*. Под эффективностью моделей в работе понимается их способность распознавать структуру сигнала путем формирования в своем характеристическом полиноме эффективного ядра, состоящего только из корней, согласованных в идеальном случае только со слагаемыми распознаваемого сигнала, а при обработке сигнала с шумом – только с существенными составляющими сигнала.

При распознавании структуры сигнала фильтр (6) формирует в себе каскад из заграждающих фильтров, предназначенных для подавления слагаемых сигнала. Поскольку порядок модели M всегда больше порядка сигнала M_s , то в заграждении компонентов сигнала участвует только часть фильтров каскада. Поэтому характеристический полином (7) фильтра можно разделить на два:

$$P_M(\underline{\zeta}) = P_{M_c}(\underline{\zeta}) P_{M-M_c}(\underline{\zeta}). \quad (9)$$

Первый из полиномов – полиномом *эффективного ядра*

$$P_{M_c}(\underline{\zeta}) = (\underline{\zeta} - \underline{\zeta}_1) \dots (\underline{\zeta} - \underline{\zeta}_{M_c}) \quad (10)$$

целиком согласован с компонентами полезного сигнала. Второй – *полином шума*

$$P_{M_n}(\underline{\zeta}) = P_{M-M_c}(\underline{\zeta}) = a_0 (\underline{\zeta} - \underline{\zeta}_{M_c+1}) \dots (\underline{\zeta} - \underline{\zeta}_M) \quad (11)$$

не связан с компонентами сигнала; все его ресурсы направлены на преодоление шума в сигнале.

Если эффективное ядро модели сформировано, то модель содержит всю информацию о структуре сигнала, и сигнал может быть распознан полностью. Такая структурная модель в работе определена как *эффективная*. Хотя общий порядок модели M будет всегда больше порядка M_s сигнала, но размер его эффективного ядра M_c будет, по крайней мере, не меньше порядка полезного сигнала, т.е. $M_c \geq M_s$. Тогда справедливо утверждение, что модель M -го порядка настроена на сигнал $x(k)$, если она эффективна.

Введение понятия эффективного фильтра важно по той причине, что оно позволяет пояснить, почему один и тот же сигнал может быть распознан фильтрами

различного порядка. Действительно, сигнал будет распознан только теми из фильтров, ресурсов которых достаточно для формирования эффективного ядра, т.е. эффективными фильтрами.

Следуя полиному (9), эффективный фильтр можно разбить на каскадно соединенные фильтр заграждения компонентов эффективного ядра (*фильтр эффективно-го ядра*) с передаточной функцией $H_c(\zeta) = P_{M_c}(\zeta)$ и *фильтр шума* с передаточной функцией $H_n(\zeta) = P_{M-n_c}(\zeta)$ (рисунок 2). Поскольку операция умножения в полиноме (9) коммутативна, то порядок следования фильтров в каскаде произволен.

Как видно из схем соединения фильтров, фильтр шума изменяет полезный сигнал, влияя тем самым на настройку фильтра эффективного ядра (рисунок 2, а), а фильтр эффективного ядра преобразует шум, меняя условия работы фильтра шума (рисунок 2, б).

Показывается, что главными факторами, влияющими на разрешающую способность структурной модели, являются: а) конкуренция составляющих фильтра эффективного ядра; б) порядок M первоначального фильтра (6); в) частота дискретизации; г) децимация отсчетов невязок.

Конкуренция составляющих фильтра эффективного ядра. Теоретически полином эффективного ядра (10) инвариантен относительно порядка M первоначального фильтра (6). Поэтому, следуя (9), можно сказать, что все эффективные фильтры сигнала отличаются друг от друга лишь фильтрами шума.

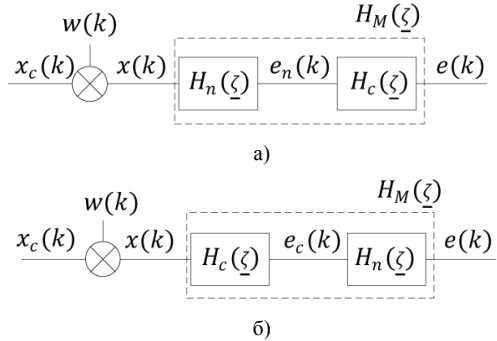


Рисунок 2 – Декомпозиция фильтра на фильтр эффективного ядра $H_c(\zeta)$ и фильтр шума $H_n(\zeta)$. Обе схемы эквивалентны фильтру (9)

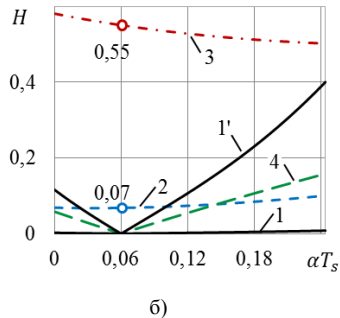
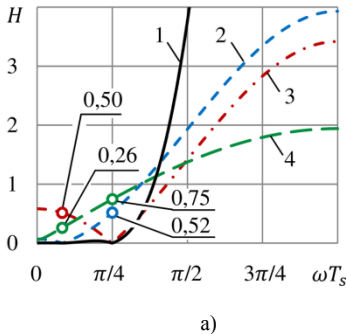


Рисунок 3 – АЧХ (а) и экспоненциальные характеристики (б) канонических фильтров слагаемых эффективного ядра на исходной частоте дискретизации сигнала: 1 – фильтр эффективного ядра, 1' – кривая 1 в масштабе 50:1; 2 – фильтр основной гармоники; 3 – фильтр 3-й гармоники; 4 – фильтр аperiodической слагаемой. Здесь и далее на рисунках кружочками и цифрами при них отмечены коэффициенты передачи фильтров

Так, для сигнала рисунка 29 при исходной частоте дискретизации частоты заграждения фильтров основной ($\omega_1 T_s \approx \pi/12$) и 3-й ($3\omega_1 T_s \approx \pi/4$) гармоник на амплитудно-частотной характеристике фильтра эффективного ядра будут «прижаться» к началу координат (рисунок 3, а). По этой причине фильтры заграждения отдельных компонентов сигнала конкурируют между собой: на исходной частоте дискретизации каждый из них ослабляет «чужие» компоненты эффективного ядра. Это отчет-

ливо видно из АЧХ канонических фильтров заграждения отдельных компонентов (рисунок 3, а): коэффициенты передачи фильтров 3-й гармоники и аperiodической составляющей на частоте основной гармоники (0,26 и 0,50) и фильтров основной гармоники и аperiodической на частоте 3-й гармоники (0,52 и 0,75) меньше единицы. Столь же «недружелюбно» ведут себя фильтры заграждения основной и 3-й гармоник по отношению к аperiodической составляющей, значительно подавляя ее (рисунок 3, б) – коэффициенты передачи их экспоненциальных характеристик при $\alpha T_s = 0,06$ составляют 0,07 и 0,55 соответственно.

В результате коэффициенты передачи составных фильтров слагаемых, полученных из фильтра эффективного ядра путем исключения соответствующего из канонических фильтров и характеризующие усиление фильтром эффективного ядра распознаваемой слагаемой, будут недостаточно высоки: коэффициенты передачи основной и 3-й гармоник будут составлять только 0,129 и 0,390 соответственно (рисунок 4, а), а коэффициент передачи аperiodической слагаемой – и вовсе 0,049 (рисунок 4, б).

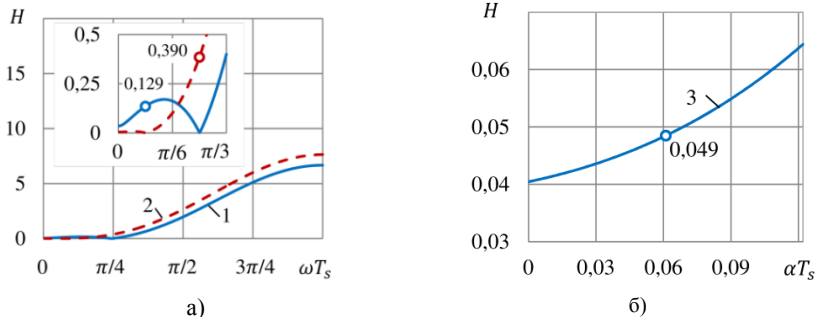


Рисунок 4 – АЧХ (а) и экспоненциальная характеристика (б) составных фильтров слагаемых, полученных из фильтра эффективного ядра: 1 и 2 – фильтры основной и 3-й гармоник, 3 – фильтр аperiodической слагаемой

Понятно, что исходная частота дискретизации неоптимальна для структурного анализа сигнала и должна быть уменьшена.

Роль фильтра шума. Фильтр эффективного ядра полностью согласован с компонентами сигнала, и его характеристики невозможно улучшить за счет повышения порядка первоначального фильтра. Следовательно, весь потенциал фильтра, ассоциированный с порядком M , будет реализован в фильтре шума.

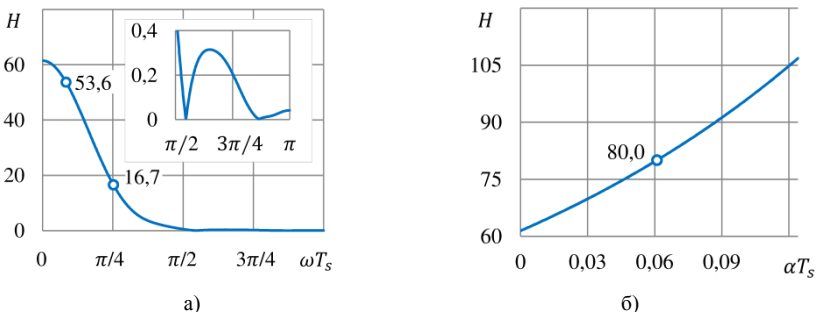


Рисунок 5 – АЧХ (а) и экспоненциальная характеристика (б) фильтра шума

На первый взгляд, фильтр шума должен лишь ослабить шум в сигнале, повышая отношение сигнал/шум, и тем самым улучшить настройку первоначального фильтра. Но вычислительный эксперимент показывает, что существует более результативный путь, заключающийся не столько в ослаблении шума, а сколько в значительном избирательном усилении составляющих эффективного ядра. И как видно из амплитудно-частотных и экспоненциальных характеристик (рисунки 5, а и б),

фильтр шума не столько ослабляет шум, сколько усиливает составляющие эффективного ядра. Фильтру шума удается во много раз усилить как гармоники (коэффициенты усиления 53,6 и 16,7), так и аperiodическую составляющую сигнала (коэффициент передачи амплитуды 80).

Причем фильтру шума удается учесть то обстоятельство, что фильтр эффективного ядра вносит в подавление аperiodической составляющей большую лепту, чем в ослабление гармоник: как видно, усиление аperiodической составляющей более 1,5 раз превышает усиление основной гармоники. Неожиданно и то, что фильтр шума практически не ослабляет шум и главным образом восполняет потерю в уровне составляющих эффективного ядра, возникшую из-за неоптимальной частоты дискретизации сигнала.

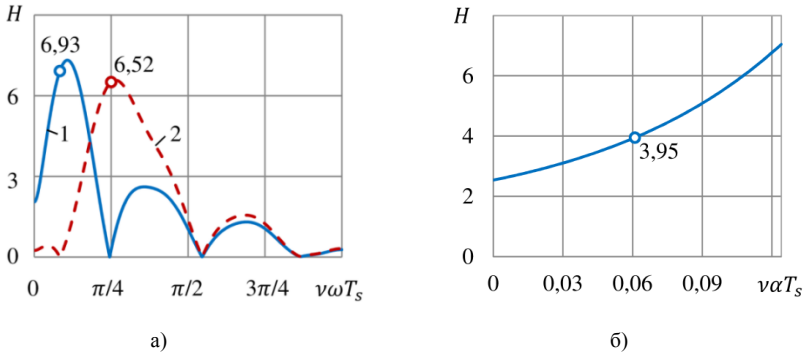


Рисунок 6 – АЧХ (а) составных фильтров основной и 3-й гармоник (кривые 1 и 2 соответственно), экспоненциальная характеристика (б) фильтра аperiodической слагаемой

В итоге составные фильтры слагаемых усиливают основную и 3-ю гармоники 6,93 и 6,52 раза (рисунок 6, а), а аperiodическую слагаемую – 3,95 раза (рисунок 6, б), улучшая разрешающую способность структурной модели.

И как видно из АЧХ составных фильтров (рисунок 6, а), фильтр шума всегда нацелен на максимальное усиление полезных составляющих сигнала. Благодаря этому свойству фильтра шума АЧХ составных фильтров достигают максимума, как правило, именно на частотах слагаемых эффективного ядра, создавая наиболее благоприятные условия для распознавания структуры сигнала.

Этот вывод имеет фундаментальное значение для структурного анализа и объясняет феномен обретения фильтром эффективности даже в случае, когда число невязок L меньше порядка фильтра M (недоопределенная система уравнений).

Влияние частоты дискретизации на распознаваемость сигнала. В работе доказывается, что кажущийся очевидным способ повышения разрешающей способности алгоритма путем увеличения частоты дискретизации приводит к противоположному результату, поскольку уменьшение интервала времени между соседними отсчетами делает изменение сигнала слабо различимым для обработки.

В работе обосновывается повышение разрешающей способности за счет изменения масштаба времени внутри структурной модели путем виртуального понижения частоты дискретизации (внутримодельная децимации отсчетов). Частоту дискретизации необходимо изменять с таким расчетом, чтобы фильтры заграждения отдельных компонентов не ослабляли слагаемых эффективного ядра, обеспечивая, по возможности, равномерность АЧХ на всей полосе частот от 0 до частоты Найквиста ω_N (в относительных частотах $v\omega T_s$ – от 0 до π). Достигается это путем внутримодельной децимации отсчетов с шагом v в фильтре (6).

Предпринятое таким образом виртуальное повышение интервала дискретизации устраняет *внутреннюю конкуренцию* составляющих эффективного ядра и значительно уменьшает необходимый порядок фильтра шума. В нашем примере опасение, что для распознаваемого сигнала (69) при снижении частоты дискретизации могут появиться нежелательные эффекты наложения спектров, не позволяет поднимать коэффициент внутримодельной децимации ν выше 3. Но и этого оказывается достаточно для значительного улучшения всех характеристик эффективного фильтра (рисунок 7, а): при внутримодельной децимации коэффициенты передачи канонических фильтров 3-й гармоники и аperiodической составляющей на частоте основной гармоники ($\nu\omega T_s = \pi/4$) составляют уже 2,81 и 0,72 против 0,50 и 0,26 на исходной частоте (рисунок 3, а), а коэффициенты передачи канонических фильтров основной гармоники и аperiodической составляющей на частоте 3-й гармоники – соответственно 2,81 и 1,67 против 0,52 и 0,75. Внутримодельная децимация улучшает и экспоненциальные характеристики фильтров гармоник: коэффициенты их передачи растут до 0,74 и 4,10 (рисунок 7, б) против 0,07 и 0,55 на исходной частоте дискретизации (рисунок 3, б).

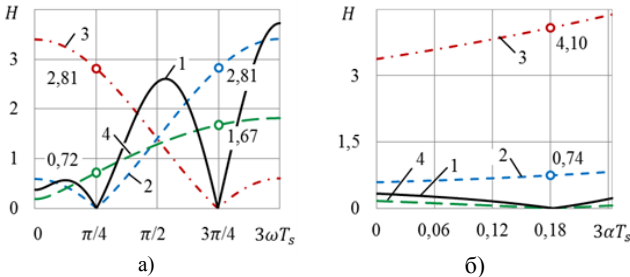


Рисунок 7 – Амплитудно-частотные (а) и экспоненциальные (б) характеристики слагаемых фильтра эффективного ядра при внутримодельной децимации с шагом $\nu = 3$: 1 – фильтр эффективного ядра; 2 – канонический фильтр основной гармоники; 3 – канонический фильтр третьей гармоники; 4 – канонический фильтр аperiodической слагаемой

В итоге, благодаря устранению конкуренции между каноническими фильтрами эффективного ядра путем внутримодельной децимации, удается снизить минимальный порядок первоначального фильтра с 15 до 7.

Влияние числа и децимации невязок. В работе исследуется влияние числа отсчетов невязок

$$e(k - i\eta) = 0, (i = \overline{0, L - 1}; k \geq M\nu + L\eta) \quad (12)$$

используемых для настройки адаптивного фильтра (6) по критерию наименьших квадратов

$$\min_{a_m} \sum_{i=0}^{L-1} e^2(k - i\eta) \quad (13)$$

на заданном отрезке сигнала размером $M\nu + L\eta + 1$, где L – число уравнений (отсчетов невязки), η – шаг децимации (шаг разрежения) отсчетов невязки, изменяющий масштаб времени вне окна фильтра.

Показывается, что повышение числа уравнений и децимация невязок сокращает выгнутость линий уровня критерия (13), но значимость децимации растет лишь с увеличением частоты дискретизации распознаваемого сигнала. И как следует из результатов вычислительного эксперимента, повышение разрешающей способности моделей при наращивании числа невязок и внемодельной децимации несравнимо меньше, чем при внутримодельной децимации и наращивании порядка первоначального фильтра.

В третьей главе теория структурных моделей распространяется на неадаптивные и гибридные модели. Рассматриваемые в этой главе модели важны для различных приложений интеллектуальной электроэнергетики.

Многообразие моделей, используемых при структурном анализе, вызвано стремлением к эффективной реализации задач практических приложений метода. Все они так или иначе подчинены единой цели структурного анализа. В периодическом режиме ЭС наиболее эффективны неадаптивные модели. В переходном режи-

ме сети не обойтись без адаптивных моделей, но если информация о некоторых составляющих текущего режима известна, то наибольшую гибкость имеют гибридные структуры (*гибридные модели*). В гибридных моделях предполагаемые (известные) составляющие сигнала текущего режима составляют основу неадаптивной части модели, а неизвестные слагаемые сигнала включаются в адаптивную часть.

Неадаптивные модели известны в электроэнергетике, прежде всего, как фильтры ортогональных составляющих основной гармоники. Именно в такой перспективе исследуются и рассматриваются в работе неадаптивные структурные модели.

Формулируются *генеральные свойства* ортогональных составляющих

$$c(k) = X_m \cos(h\omega_b kT_s + \psi) \quad (14)$$

и

$$s(k) = X_m \sin(h\omega_b kT_s + \psi) \quad (15)$$

цифровой гармоники

$$x(k) = X_m \cos(\omega kT_s + \psi),$$

закрывающиеся в том, что:

а) гармоника может быть представлена в базисе синусоидальных слагаемых выбранной опорной частоты ω_b :

$$x(k) = c(k) \cos(\omega_b kT_s) - s(k) \sin(\omega_b kT_s);$$

б) оценка амплитуды

$$\hat{X}_m = \sqrt{c^2(k) + s^2(k)} = X_m$$

не зависит от частоты гармоники и равна искомой амплитуде гармоники;

в) оценка $\hat{\psi}$ начальной фазы ψ будет иметь смещение, зависящее от разностной частоты $h\omega_b = \omega - \omega_b$, $|h| < 1$ и времени k :

$$\hat{\psi} = \tan^{-1}[s(k)/c(k)] = \psi + h\omega_b kT_s. \quad (16)$$

Обнаруживается, что среди множества методов оценки ортогональных составляющих можно выделить два центральных. Первый из них основан на преобразовании частоты и последующей фильтрации, а второй метод – на оптимальных оценках, в основном, по методу наименьших квадратов.

Метод преобразования частот так или иначе основан на широко известной схеме демодуляции, осуществляющей сдвиг спектра входного сигнала на частоту ω_b опорных сигналов влево и вправо на оси частот ω . Преобразование частот происходит за счет перемножения входного сигнала с сигналами ортогональной пары

$$\{\cos(\omega_b kT_s), \sin(\omega_b kT_s)\}.$$

Искомые ортосоставляющие (14) и (15), например, основной гармоники будут представлены в низкочастотной полосе частот от 0 до $h\omega_b$, а все остальные составляющие сигнала будут перенесены в промежуточных сигналах в высокочастотную область спектров.

Формулируется граничное условие разделимости оцениваемой гармоники частоты $q\omega_b$ и соседней гармоники частоты $r\omega_b$ полигармонического сигнала

$$x(k) = \sum_{r=1}^R X_{mr} \cos(r\omega_1 kT_s + \psi_r), \quad (17)$$

позволяющее избегать перекрытия частот после их преобразования:

$$h_{\max} < |r - q|/(r + q),$$

Классический фильтр Фурье унаследовал алгоритм от схем, использующих различные окна для сглаживания промежуточных сигналов, отдавая предпочтение прямоугольному окну. Известно, что такое усреднение эквивалентно действию каскада заграждающих фильтров гармоник, что и объясняет успешное применение фильтра Фурье в различных приложениях электроэнергетики. В работе предлагаются различные *модификации фильтра Фурье*, в том числе и быстродействующие фильтры, способные работать на коротких отрезках сигнала, меньших периода основной гармоники. Эти способности фильтра достигаются за счет использования различных линейных операторов для предварительной обработки как входного,

так и промежуточных сигналов, добиваясь тем самым смягчения влияния высших гармонических и аперидической составляющей во входном сигнале на точность оценок ортосоставляющих.

Методы оптимальной оценки используют, как правило, оценки метода наименьших квадратов, формулируя задачу определения ортосоставляющих полигармонического сигнала (17) как задачу настройки неадаптивной модели

$$\hat{x}(k) = -\sum_{r=1}^R [\hat{c}_r(k) \cos r\omega_b kT_s - \hat{s}_r(k) \sin r\omega_b kT_s]. \quad (18)$$

Качество приближения модели к сигналу оценивают с помощью критерия

$$E(k) = \sum_{i=0}^{L-1} e^2(k-i), \quad (19)$$

где $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ – невязка между отсчетами сигнала и модели. В этом случае оценки $\hat{c}_r(k)$ и $\hat{s}_r(k)$ оптимальны по критерию наименьших квадратов.

Показано, что несмещенные оценки параметров слагаемых сигнала (17) достижимы, если только в модели будет предусмотрены все ее значимые слагаемые и известны частоты гармоник в сигнале, т.е. если опорная частота будет принята равной частоте основной гармоники: $\omega_b = \omega_1$. Лучшей мерой, избавляющей от смещения в оценках, является синхронная дискретизация. Однако в WAMPACS это в принципе невозможно, поскольку сигналы поступают в виде SV-потока по шине процесса. Поэтому предлагается использовать оценку частоты основной гармоники входного сигнала с тем, чтобы опорную частоту ω_b подстраивать под нее.

Исследована точность оценок комплексной амплитуды различными неадаптивными моделями и фильтрами. Показано, что модифицированные фильтры Фурье обладают не только лучшим быстродействием (коротким окном обработки), но и превосходят классические фильтры по точности: точность оценки ими амплитуды основной гармоники при уходе ее частоты до ± 5 Гц лучше 3% против 7% классического фильтра Фурье.

Гибридные структурные модели сигналов. Во многих приложениях интеллектуальной электроэнергетики частота основной гармоники ω_1 , как правило, известна; в цифровой релейной защите это обеспечивается модулем мониторинга частоты. Поэтому удобно учитывать основную и высшие гармоники неадаптивным оператором, а задачу оценки составляющих свободного процесса и учет шума лучше переложить на плечи адаптивного оператора:

$$a_0 \hat{x}(k) = \sum_{r=1}^R [\hat{c}_r \cos(r\omega_1 kT_s) - \hat{s}_r \sin(r\omega_1 kT_s)] - \sum_{m=1}^M a_m x(k-mv). \quad (20)$$

Эффективность гибридных моделей обоснована прежде всего той их особенностью, что характеристические параметры (частоты гармоник) ее неадаптивной части полностью определены и согласованы с периодическими слагаемыми сигнала. В большинстве практических случаев, когда свободный процесс представлен только аперидической составляющей, адаптивная часть может иметь минимальный порядок $M = 1$.

В четвертой главе исследуются методы разрешения структурной неопределенности сигнала и построения эффективных структурных моделей. В рамках исследований разрабатывается новый алгоритм разрешения структурной неопределенности сигналов интеллектуальных систем электроэнергетики, работающих в темпе развития аварийного процесса. Важным качеством нового алгоритма является его способность формировать эффективную структурную модель с непрерывным контролем достоверности результата во время ее настройки.

Задача построения эффективной структурной модели формулируется как решение системы уравнений (12), представляемой в терминах матричной алгебры как

$$\mathbf{Xa} = \mathbf{b}, \quad (21)$$

где

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T(k-L) \\ \vdots \\ \mathbf{x}^T(k-1) \end{bmatrix}_{16} \in \mathbf{R}^{L \times M} \quad (22)$$

траекторная матрица,

$$\mathbf{x}(k) = [x(k - M + 1), x(k - M + 2), \dots, x(k)]^T \in \mathbf{R}^M, (i = \overline{1, L}) - \quad (23)$$

выборки наблюдаемых отсчетов сигнала,

$$\mathbf{a} = [a_M, a_{M-1}, \dots, a_1]^T \in \mathbf{R}^M - \quad (24)$$

вектор коэффициентов модели (5),

$$\mathbf{b} = [x(k - L + 1), x(k - L + 2), \dots, x(k)]^T \in \mathbf{R}^L - \quad (25)$$

вектор наблюдений. Вектор коэффициентов фильтра (6) будет определяться как расширенный вектор коэффициентов (24):

$$\mathbf{c} = [\mathbf{a}^T; -1]^T = [a_M, a_{M-1}, \dots, a_1, -1]^T \in \mathbf{R}^{(M+1)}. \quad (26)$$

Задача оценивания вектора коэффициентов модели (24) формулируется в двух формах. Первая формулировка известна как решение задачи наименьших квадратов, а вторая – как решение общей задачи наименьших квадратов (в англоязычной литературе – Total Least Square Method).

В рамках задачи МНК рассматриваются два решения: винеровское и решение с минимальной нормой.

Свойства *винеровского решения*

$$\hat{\mathbf{a}}_{LS}(k) = [\mathbf{X}^T(k)\mathbf{X}(k)]^{-1}\mathbf{X}^T(k)\mathbf{b}(k) \quad (27)$$

предопределены самим принципом решения уравнения (21), полагаящем, что траекторная матрица \mathbf{X} задана точно, без ошибок. Вектор $\mathbf{X}\hat{\mathbf{a}}_{LS}$ лежит в пространстве столбцов $\mathbf{R}(\mathbf{X})$ траекторной матрицы, поскольку является комбинацией столбцов \mathbf{x}_j ($j = \overline{1, M}$) с компонентами вектора $\hat{\mathbf{a}}_{LS}$ в качестве весов:

$$\mathbf{x}_1\hat{a}_M + \mathbf{x}_2\hat{a}_{M-1} + \dots + \mathbf{x}_M\hat{a}_1 = \mathbf{b}_{LS} \quad (28)$$

и занимает такое положение в пространстве столбцов $\mathbf{R}(\mathbf{X})$, чтобы его конец был соединен с точкой, наиболее близкой к концу вектора правой части \mathbf{b} , минимизируя квадратичную норму

$$\min_{\mathbf{a} \in \mathbf{R}^M} \|\mathbf{X}\mathbf{a} - \mathbf{b}\|_2. \quad (29)$$

Модели с минимальной нормой. В случае дефекта ранга траекторной матрицы \mathbf{X} , решение (27) вырождается, порождая бесконечное множество решений. Структурная модель сигнала теряет эффективность.

Для повышения стабильности работы структурной модели предлагается использовать аппроксимацию с требуемой точностью исходной траекторной матрицы \mathbf{X} матрицей меньшего ранга. Метод основан на определении численно-го ранга с помощью сингулярного разложения

$$\mathbf{U}^T\mathbf{X}\mathbf{V} = \mathbf{\Sigma} \in \mathbf{R}^{L \times M}, p = \min(L, M), \quad (30)$$

где $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_L] \in \mathbf{R}^{L \times L}$ и $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_M] \in \mathbf{R}^{M \times M}$ – ортогональные вещественные матрицы. Векторы \mathbf{u}_i и \mathbf{v}_i называются левыми и правыми сингулярными векторами, а матрица

$$\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_p) \in \mathbf{R}^{L \times M}, \sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_p \geq 0 - \quad (31)$$

матрицей сингулярных чисел σ_i . Как правило, сингулярные числа располагаются в порядке невозрастания.

Показывается, что, пользуясь понятием ϵ -ранга матрицы

$$r_\epsilon = \text{rank}(\mathbf{X}, \epsilon) = \min_{\|\mathbf{X} - \mathbf{X}_\epsilon\|_2 \leq \epsilon} \text{rank}(\mathbf{X}_\epsilon), \quad (32)$$

определяющего, что квадратичное расстояние от траекторной матрицы до аппроксимирующей матрицы \mathbf{X}_ϵ не больше заданного порога ϵ , можно разделить сингулярные числа на два подмножества

$$\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_{r_\epsilon} \geq \epsilon \geq \sigma_{r_\epsilon+1} \geq \dots \geq \sigma_p, p = \min\{L, M\} \quad (33)$$

и отделить лишние решения, формируя эффективное ядро структурной модели, близкой к информационным составляющим сигнала. Мэру доверия к решениям устанавливается величиной порога ε .

Эффективная модель, выбранная по критерию минимума двоичной нормы вектора коэффициентов, определяется как

$$\hat{\mathbf{a}}_{MN} = \sum_{i=1}^{r_\varepsilon} \sigma_i^{-1} \mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T \mathbf{b}. \quad (34)$$

Разрешение структурной неопределенности в общей задаче наименьших квадратов. В практических приложениях траекторная матрица формируется на основе тех же отсчетов сигнала, что и вектор наблюдения, и оказывается, что они оба несвободны от ошибок измерения и шума. Поэтому решение МНК, основанное на постулате, что траекторная матрица \mathbf{X} определена точно, и все ошибки сосредоточены в векторе наблюдения \mathbf{b} , испытывает на себе сильное влияние шумов в сигнале.

С целью смягчения влияния шумов в траекторной матрице и векторе наблюдения на оценку предлагается рассматривать настройку структурной модели как общее решение задачи МНК, формулируемое для однородного уравнения

$$[\mathbf{X}; \mathbf{b}][\mathbf{a}^T; -1]^T \approx \mathbf{0}, \quad (35)$$

где $[\mathbf{X}; \mathbf{b}]$ – расширенная матрица, полученная присоединением справа к траекторной матрице \mathbf{X} вектора наблюдения \mathbf{b} .

В работе исследуются два основных варианта решения общей задачи наименьших квадратов: базовое и решение с минимальной нормой. Оба решения основаны на сингулярном разложении расширенной матрицы $[\mathbf{X}; \mathbf{b}] \in \mathbf{R}^{L \times (M+1)}$ по аналогии с (30) и (31):

$$\mathbf{U}'^T [\mathbf{X}; \mathbf{b}] \mathbf{V}' = \text{diag}(\sigma'_1, \dots, \sigma'_{M+1}) \in \mathbf{R}^{L \times (M+1)}. \quad (36)$$

Базовое решение общей задачи наименьших квадратов определяется через элементы $v'_{i,M+1}$ $(M+1)$ -го правого сингулярного вектора расширенной матрицы:

$$\hat{\mathbf{a}}_{TLS} = -[v'_{1,M+1}, \dots, v'_{M,M+1}]^T / v'_{M+1,M+1}. \quad (37)$$

Решение существует, если выполняются условия

$$\sigma'_M > \sigma'_{M+1} \text{ и } v'_{M+1,M+1} \neq 0.$$

TLS-решение с минимальной нормой использует согласованность между подмножеством доминирующих сингулярных чисел с полезными составляющими сигнала. Разделение множества сингулярных чисел на подмножества доминирующих

$$\sigma'_1 \geq \dots \geq \sigma'_B > (\sigma'_{M+1} + \varepsilon) \quad (38)$$

и малых

$$(\sigma'_{M+1} + \varepsilon) \geq \sigma'_{B+1} \geq \sigma'_{B+2} \dots \geq \sigma'_{M+1}, \quad (39)$$

чисел осуществляется путем формирования верхней грани малых сингулярных чисел относительно самого маленького из них σ'_{M+1} с помощью порога $\varepsilon > 0$. Подмножества (38) и (39) делят пространство векторов правой ортонормированной матрицы

$$\mathbf{V}' = [\mathbf{V}'_s \ \mathbf{V}'_n] = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_s & \mathbf{G}_n \\ \mathbf{g}_s^T & \mathbf{g}_n^T \end{bmatrix} \quad (40)$$

на подпространства собственных векторов \mathbf{V}'_s и \mathbf{V}'_n , формально ассоциированных с полезными составляющими сигнала и шума соответственно; здесь \mathbf{g}_s^T и \mathbf{g}_n^T – векторы, содержащие последние элементы собственных векторов подпространств \mathbf{V}'_s и \mathbf{V}'_n .

TLS-решение с минимальной нормой имеет две эквивалентные формы записи. Если использовать подпространство сигнала \mathbf{V}'_s , то TLS-решение с минимальной нормой будет равно

$$\hat{\mathbf{a}}_{TLS, MN} = \mathbf{G}_s \mathbf{g}_s / (1 - \mathbf{g}_s^T \mathbf{g}_s), \quad (41)$$

а в случае использования подпространства шума \mathbf{V}'_n –

$$\hat{\mathbf{a}}_{TLS, MN} = -\mathbf{G}_n \mathbf{g}_n / \mathbf{g}_n^T \mathbf{g}_n. \quad (42)$$

Предложены новые методы настройки адаптивных структурных моделей в темпе развития процесса в ЭС, особенно актуальных для цифровой релейной защиты и противоаварийной автоматики и для устройств векторных измерений (PMU). Одним из таких проверенных многократно в различных приложениях релейной защиты и автоматики является метод наложения моделей.

Метод наложения решает систему нормальных уравнений

$$\mathbf{e}^T \mathbf{x}_m = 0, \quad m = \overline{0, M}, \quad m \neq j, \quad (43)$$

$$\mathbf{e}^T \mathbf{y}_r = 0, \quad (44)$$

$$\mathbf{e}^T \mathbf{z}_r = 0, \quad r = \overline{1, R}. \quad (45)$$

путем последовательного наложения промежуточных (в общем случае гибридных) фильтров

$$\mathbf{e} = [e(k - (L - 1)\eta), \dots, e(k - \eta), e(k)]^T \in \mathbf{R}^L, \quad (46)$$

где \mathbf{x}_m (23) – вектор отсчетов распознаваемого сигнала, и $\mathbf{y}_r, \mathbf{z}_r$ – векторы искоемых гармоник.

Идея метода основана на свойстве промежуточных фильтров $\mathbf{e}_p^q, p = \overline{0, (M + 2R - q)}$, текущего q -го этапа настройки сохранять ортогональность к вектору, например \mathbf{x}_s , если они получены путем попарного наложения двух других аналогичных фильтров \mathbf{e}_h^{q-1} и \mathbf{e}_t^{q-1} предыдущего $(q - 1)$ -го этапа, уже ортогональных с вектором \mathbf{x}_s , по следующему правилу:

$$\mathbf{e}_p^q = \mathbf{e}_h^{q-1} + \gamma_p^q \mathbf{e}_t^{q-1}. \quad (47)$$

Коэффициент наложения γ_p^q определяется из уравнения ортогональности вектора невязки нового фильтра \mathbf{e}_p^q к вектору новой последовательности \mathbf{x}_m

$$(\mathbf{e}_p^q)^T \mathbf{x}_m = 0 \quad (48)$$

и с учетом (47) будет равен

$$\gamma_p^q = -\frac{(\mathbf{e}_h^{q-1})^T \mathbf{x}_m}{(\mathbf{e}_t^{q-1})^T \mathbf{x}_m}. \quad (49)$$

Повышение достоверности результата на каждом этапе настройки и разрешение структурной неопределенности модели в предлагаемом алгоритме обеспечивается целым рядом принимаемых стратегий:

А. Контроль уровня корреляций. На каждом этапе настройки контролируются величины корреляций и исключаются из процесса адаптации те последовательности \mathbf{x}_m , абсолютное значение корреляций которых ниже некоторого порога $\varepsilon > 0$ (исключение ложной ортогональности):

$$\left| (\mathbf{e}_p^{q-1})^T \mathbf{x}_m \right| < \varepsilon, \quad p = \overline{0, M - q}. \quad (50)$$

Б. Ранжирование последовательностей. Из множества критериев ранжирования выделен наиболее оптимальный: последовательность \mathbf{x}_m из набора (23) выбирается по минимаксному критерию, то есть таким образом, чтобы перед началом наложения данного q -го этапа минимальная по абсолютной величине из всех корреляций имела максимальное значение:

$$\min_p \left| (\mathbf{e}_p^{q-1})^T \mathbf{x}_m \right| \xrightarrow{m} \max, \quad p = \overline{0, M - q}, \quad m = \overline{0, M} \quad (51)$$

(кроме тех последовательностей \mathbf{x}_m , для которых ортогональность уже достигнута на предыдущих этапах или которые отвергнуты по условию ложной ортогональности (50)).

В. Ранжирование промежуточных фильтров. Ортогональность промежуточных фильтров \mathbf{e}_p^q с выбранной последовательностью \mathbf{x}_m , определяемая как выполнение условия (48), должна достигаться в результате оптимального выполнения наложений промежуточных фильтров предыдущего $(q - 1)$ -го этапа, избегая наложения двух близких фильтров – фильтров с одинаковой абсолютной величиной корреляции:

$$\left| (\mathbf{e}_h^{q-1})^T \mathbf{x}_m \right| \approx \left| (\mathbf{e}_t^{q-1})^T \mathbf{x}_m \right|. \quad (52)$$

Г. Выбор схемы наложения. Схема наложения промежуточных фильтров должна обеспечивать наложение фильтров, максимально различающихся по абсолютной величине корреляции с последовательностью \mathbf{x}_m . Наиболее простой является схема, основанная на ранжировании промежуточных фильтров по невозрастанию абсолютных величин корреляций:

$$|w_0| \geq |w_1| \geq \dots \geq |w_p| \geq \dots \geq |w_{M-(q-1)}|, \quad (53)$$

где

$$w_p = (\mathbf{e}_p^{q-1})^T \mathbf{x}_m -$$

корреляция p -го промежуточного фильтра с последовательностью \mathbf{x}_m . Фильтры этапа q получают путем наложения фильтра с наименьшим номером со всеми остальными фильтрами.

Д. Контроль и исключение линейно зависимых фильтров. Выявление линейно зависимых фильтров путем сравнения коэффициентов наложения γ_p^q (49) удобнее, чем контроль корреляций по условию (52). Условием отбраковки соседнего фильтра с младшим номером будет служить неравенство (*критерий линейной зависимости фильтров*)

$$|1 - \gamma_{p+1}^q / \gamma_p^q| \leq \delta, \quad \gamma_p^q = -w_p / w_0, \quad p = 1, M - (q - 1). \quad (54)$$

Обычно $\delta = 0,02 \div 0,03$.

Е. Окончание настройки фильтра. Настройка прекращается, если в рассмотрении остается единственный фильтр, либо абсолютные величины корреляций фильтров с оставшимися в распоряжении последовательностями \mathbf{x}_m малы и должны быть исключены из рассмотрения согласно критерию (50), либо фильтры отбрасываются по критерию линейной зависимости (54).

Характеристики методов настройки моделей. Характеристики методов исследуются с помощью вычислительного эксперимента, полагая, что в сигнале (68) присутствует только аддитивный белый гауссовский шум с нулевым средним и дисперсией σ_x^2 . Принимается, что полезная часть сигнала не взаимодействует с шумом. Принятые исходные предпосылки являются обычными при исследовании методов распознавания сигнала.

В винеровской оценке траекторная матрица транслирует шум в ковариационную матрицу $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$, вызывая погрешность в оценке вектора коэффициентов фильтра $[\hat{\mathbf{a}}_{LS}; -1]$. Известно, что влияние искажений траекторной матрицы \mathbf{X} приводит к более тяжелым последствиям, чем влияние возмущений вектора наблюдений \mathbf{b} . Оценки подвержены влиянию возмущения вектора наблюдения пропорционально числу обусловленности

$$\kappa(\mathbf{X}) = \sigma_1 / \sigma_M$$

траекторной матрицы, а влиянию возмущений самой траекторной матрицы – пропорционально $\kappa^2(\mathbf{X})$ (здесь σ_1 и σ_M – старший и младший сингулярные чис-

ла траекторной матрицы \mathbf{X}). Следовательно, винеровское решение предпочтительно в случае с хорошо обусловленной траекторной матрицей.

Преимущества моделей с минимальной нормой в задаче МНК. Показывает, что модели с минимальной нормой (34) при значительном уровне шума ведут себя как винеровские оценки. Разница в оценках $\hat{\mathbf{a}}_{LS}$ (27) и $\hat{\mathbf{a}}_{MN}$ (34) появляется лишь при увеличении порядка модели – решение с минимальной нормой $\hat{\mathbf{a}}_{MN}$ превращается вырождение решения МНК.

Преимущества моделей общей задачи МНК. Разница между винеровской оценкой $\hat{\mathbf{a}}_{LS}$ и базовым TLS-решением $\hat{\mathbf{a}}_{TLS}$ (37) хорошо видна из рассмотрения замкнутой формы записи для последнего:

$$\hat{\mathbf{a}}_{TLS} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X} - \sigma_{M+1}'^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{b} = \sum_{i=1}^M (\sigma_i^2 - \sigma_{M+1}'^2)^{-1} \sigma_i \mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T \mathbf{b}. \quad (55)$$

Здесь σ_{M+1}' – последнее из сингулярных чисел расширенной матрицы $[\mathbf{X}; \mathbf{b}]$ (36), σ_i – сингулярные числа траекторной матрицы \mathbf{X} (30). Прежде чем вычислить инверсию в решении (55), базовое решение уменьшает элементы главной диагонали ковариационной матрицы $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ на величину самого малого сингулярного числа расширенной матрицы.

Ожидается, что это свойство позволяет базовому решению улучшить свою оценку по сравнению с винеровской оценкой за счет очистки диагонали ковариационной матрицы от шума. Однако в задачах распознавания сигналов часто сингулярные числа σ_{M+1}' и σ_M (σ_M – последнее из сингулярных чисел траекторной матрицы \mathbf{X}) близки друг к другу, поскольку элементы траекторной матрицы \mathbf{X} и вектора наблюдения \mathbf{b} являются отсчетами одного и того же сигнала. В связи с этим базовое TLS-решение проявляет сильную чувствительность к шуму в данных, это подтверждают и результаты вычислительного эксперимента.

Преимущества TLS-решения с минимальной нормой. Исходя из условия разделения сингулярных чисел (38), TLS-решение с минимальной нормой в замкнутой форме можно записать как

$$\hat{\mathbf{a}}_{TLS, MN} = \sum_{i=1}^B (\sigma_i^2 - \sigma'^2)^{-1} \sigma_i \mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T \mathbf{b}, \quad (56)$$

где σ' – некоторое число, входящее в область значений сингулярных чисел, объединенных соотношением (39), т.е. $\sigma' \in (\sigma_{M+1}', \sigma_{M+1}' + \varepsilon)$. Отличие оценки $\hat{\mathbf{a}}_{TLS, MN}$ (56) от оценок $\hat{\mathbf{a}}_{TLS}$ (55) заключается в том, что в нем число σ' не определено явно и символизирует собой эффект усредненного учета влияния шума в траекторной матрице и векторе наблюдения.

Идея учета шума становится более ясной, если переписать (56) в следующем виде:

$$\hat{\mathbf{a}}_{TLS, MN} = \sum_{i=1}^B (\sigma_i - \sigma'^2 / \sigma_i)^{-1} \mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T \mathbf{b}. \quad (57)$$

Оценка $\hat{\mathbf{a}}_{TLS, MN}$ (57) будет доставлять лучшее решение, чем решение $\hat{\mathbf{a}}_{MN}$ (34), если возмущение сингулярных чисел будет порядка σ'^2 / σ_i . Как показывают эксперименты, оценка $\hat{\mathbf{a}}_{TLS, MN}$ (41) или (42) практически всегда лучше остальных оценок и свободна от сильных колебаний.

Сравнение методов. Возможности рассмотренных методов исследовались при распознавании сигнала (68) с белым гауссовским шумом. В эксперименте использовалось 100 различных реализаций сигнала с размером выборки 24 (48) отсчетов, порядок структурной модели M изменялся от 3 до 12 (от 3 до 24). Критериями сравнения были приняты среднеквадратическая ошибка оценки частоты \hat{f}_i основной гармоники и оценки коэффициента затухания $\hat{\alpha}_i$ апериодической слагаемой.

Главный вывод по результатам экспериментов: при распознавании сигнала с шумом проявляется в полной мере фундаментальное свойство структурных моделей, устанавливающее, что структура сигнала может быть определена, если фильтр шума имеет достаточно ресурсов, чтобы повысить отношение сиг-

нал/шум до необходимого уровня. При этом используемый метод разрешения структурной неопределенности не играет решающей роли в распознавании сигнала. Вычислительный эксперимент полностью подтверждает это свойство; разница в методах настройки ощутима только при малых порядках модели, когда ресурсов фильтра шума недостаточно.

В пятой главе разрабатывается общая теория адаптивного структурного анализа цифрового сигнала электрической системы, соединяющая в себе методы теории адаптивных структурных моделей и компонентного анализа и обеспечивающая определение интегрированной структуры сигнала в темпе развития аварийного процесса в энергосистеме. Предлагаются новые методы компонентного анализа сигналов электроэнергетики, обеспечивающие согласованность компонентов модели с сигналом и повышающие устойчивость функционирования систем мониторинга, управления и релейной защиты интеллектуальной электроэнергетики. Разрабатываются адаптивные методы предварительной обработки сигналов, способствующие повышению разрешающей способности методов структурного анализа и достоверности их оценок (методы локализации и коррекция выбросов, определение частоты сигнала (сети), удаления тренда (смещения нуля АЦП)).

Методы общей теории структурного анализа сигнала решают следующие основные задачи: а) сегментация сигнала – разделение осциллограммы сигнала на множество интервалов однородности; б) формирование экстраполирующего фильтра; в) обнаружение возможных выбросов (потерь) в отсчетах сигнала и их коррекция; г) определение границы интервала с помощью экстраполирующего фильтра.

Экстраполирующий фильтр используется для предсказания отсчетов сигнала при поиске границ интервала однородности и так или иначе строится в согласии с характеристическим полиномом (7) и на основе избранных и скорректированных корней первоначального адаптивного или гибридного фильтра.

Определение границ интервалов однородности сигнала является одной из важнейших задач в структурном анализе сигналов. В то же время сегментация используется во многих приложениях релейной защиты и противоаварийной автоматики, например, при восстановлении кривой тока, искаженного насыщенным трансформатором тока, при определении начала фронта волны тока в волновых определителях места повреждения, при разделении осциллограммы сигнала на интервалы предшествующего и аварийного режима защищаемого объекта и т.д.

Предлагается *многомерный способ сегментации сигнала*, построенный как алгоритм релейной защиты и обеспечивающий определение границ интервалов в темпе развития процесса. Он использует, как и измерительные органы релейной защиты, характеристику срабатывания. Алгоритм сочетает в себе преимущества многоканальных систем обработки сигнала и многомерность характеристики срабатывания (рисунок 8). Каждый канал формирует свое предсказание развития сигнала аварийного процесса в ЭС и является источником координаты характеристики срабатывания.

Компонентный анализ является заключительной стадией структурного анализа, методы которого формируют компонентный состав сигнала на каждом из выделенных интервалов однородности, обеспечивая однозначность и ком-

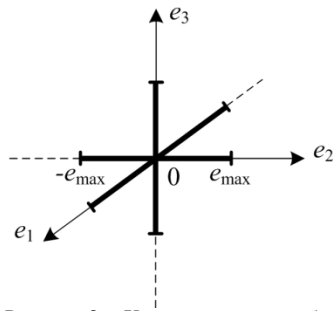


Рисунок 8 – Характеристика срабатывания исполнительного реле при трехканальной схеме определения границ интервалов однородности сигнала аварийного процесса

пактность моделей и избегая множественности представления сигнала. Он осуществляется после настройки адаптивной структурной модели, поскольку будут созданы все условия для оценивания амплитуд и фаз компонентов сигнала на интервале. Он полностью основан на достижениях эффективного фильтра, сконцентрированных в его характеристическом уравнении. Поэтому базис составляющих компонентной модели известен и формируется на основе корней характеристического уравнения (7) эффективного ядра и согласуется с компонентами распадаемого сигнала по правилу (8).

Показывается, что компонентная модель может быть представлена в двух формах; каждая из них будет математически обоснованной. Первая форма модели образуется путем формального соотнесения корней характеристического уравнения фильтра (7) с базисом собственных мод сигнала. В этом случае сигнал (3) будет включать в себя линейную комбинацию компонентов базиса:

$$\hat{x}(k) = \sum_{m=1}^{M_c} \underline{B}_m \underline{\zeta}_m^k.$$

Вторая форма компонентной модели воспроизводит физическую сущность сигнала и представляется суммой слагаемых, характеристические параметры которых связаны с корнями фильтра эффективного ядра с помощью уравнения согласования корней (8).

Для определения неизвестных коэффициентов в обеих формах решается система уравнений, составленная для существующей выборки отсчетов сигнала $x(k)$. Число уравнений L может превышать число M_c неизвестных коэффициентов \underline{B}_m . При $L > M_c$ решение ищется по методу наименьших квадратов.

Поскольку компонентные модели строятся на основе корней эффективного ядра адаптивной модели, то формулируются правила разделения корней:

А) Каузальные корни. Корни характеристического уравнения физической реализуемой цифровой модели должны находиться в пределах единичного круга на комплексной плоскости. Поэтому все составляющие, ассоциированные с корнями уравнения (7) с $|\underline{\zeta}_m| > 1$, должны быть удалены из компонентной модели.

Б) Коррекция корней. Коррекции подлежат корни, ассоциированные с составляющими принужденного режима ЭС, поскольку из-за шума в сигнале их модуль будет отличаться от 1. Критерий коррекции

$$\left| |\underline{\zeta}_m| - 1 \right| \leq \xi, \quad m = \overline{1, M} \quad (58)$$

настраивается с учетом слагаемой с малым затуханием α_{\min} . Как правило, такой слагаемой является аperiodическая составляющая. Ее постоянная времени может составлять от 0,15 до 0,35 с (α от 6,67 до 2,86 с⁻¹) при КЗ на шинах электрической станции и от 0,02 до 0,08 с (α от 50 до 12,5 с⁻¹) – при КЗ на шинах подстанции. При КЗ на линиях коэффициенты затухания обычно еще больше. Тогда, ограничиваясь линейной составляющей в разложении экспоненты в ряд, из (58) при $\alpha_{\min} = 2,86$ с получаем простое равенство для выбора порога

$$\xi = 2,86vT_s. \quad (59)$$

Порог ξ определяет ширину области «притяжения» корней, ассоциированных с гармониками или постоянной составляющей, к единичной окружности (рисунок 9, а). Принимается, что смещение модулей $|\underline{\zeta}_m|$ симметрично относительно 1.

В) Разделение корней шума. Поскольку в России отсутствуют требования к содержанию высших гармоник в токе, то для оценки уровня высших гармоник предлагается использовать опыт зарубежных исследователей. Согласно им в сетях высокого напряжения действующее значение гармоник с номерами до 11 не превышает 7,5% и 1,875% от основной гармоники для нечетных и четных

гармоник соответственно. В сетях сверхвысокого и ультравысокого напряжения те же параметры будут равны 3,0% и 0,75% соответственно.

Предлагается отсеивать высокочастотные составляющие в компонентной модели двумя способами. В первом случае можно ограничиться верхними предельными значениями коэффициента затухания α_{\max} и частоты слагаемой ω_{\max} . На комплексной плоскости ζ (рисунок 9, а) предельной частоте сигнала соответствует угловая длина дуги $\Omega_{\max} = \omega_{\max} \nu T_s$, а предельному коэффициенту затухания – минимальное значение модуля корня $\xi_{\min} = |\zeta_{\min}| = e^{-\alpha_{\max} \nu T_s}$. Положительной частоте сигнала соответствует верхняя область на плоскости $(\alpha T_s, \omega T_s)$ (рисунок 9, б).

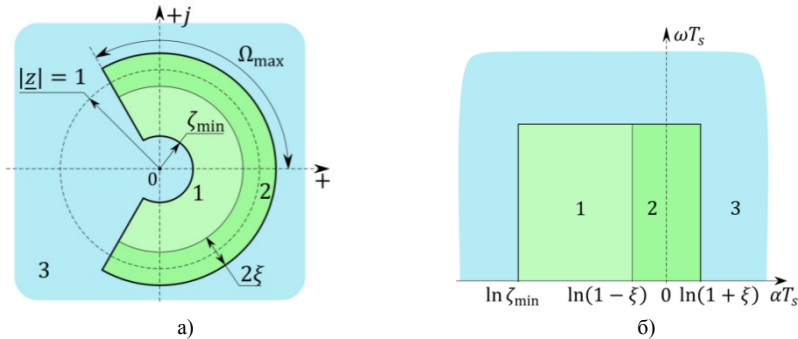


Рисунок 9 – Иллюстрация механизма декомпозиции структурной модели сигнала на эффективное ядро и ядро шума: а) на единичной окружности комплексной плоскости ζ ; б) на плоскости $(\alpha T_s, \omega T_s)$. 1 – область затухающих слагаемых сигнала; 2 – область «притяжения» модуля корня $|\zeta_m|$ к 1 согласно (58) и (59). Области 1 и 2 относятся к фильтру эффективного ядра, а область 3 – к фильтру шума

Во втором случае селекция составляющих основана на сравнении амплитуды колебательной составляющей с амплитудой доминирующей составляющей в сигнале.

Оценка частоты сети. Для повышения разрешающей способности и упрощения структурного анализа предлагается определять частоту основной гармоники сигнала (частоту сети) и использовать гибридные модели (20). В работе проводится анализ работы алгоритмов оценки частоты в различных режимах работы ЭС, сопровождающихся изменением самого оцениваемого параметра во времени, при наличии в сигнале высших гармоник, в режимах асинхронного хода различных частей ЭС. Отмечается, что цифровые алгоритмы оценки частоты в корне отличаются от предшественников, поэтому дается развернутое изложение понятия частоты электрической величины и устанавливается ее связь с частотой ЭС, излагаются теоретические основы построения алгоритмов оценки частоты и возможные принципы их практического приложения в цифровых системах релейной защиты, противоаварийной автоматики и управления интеллектуальной электроэнергетикой. Показывается, что при определении базовых понятий параметров сигнала ЭС в установившемся синусоидальном режиме, таких, как амплитуда, фаза и частота удобно использовать понятие *аналитического сигнала*.

Значительное внимание уделяется изложению теоретических основ известных и предлагаемых автором алгоритмов оценки частоты и исследованию их характеристик точности. Рассмотрены оценки частоты сети: а) по переходу через нуль; б) с помощью фильтров ортогональных составляющих; в) операторами с частотно-зависимыми характеристиками; г) адаптивными структурными

моделями; д) адаптивными заграждающими моделями в периодическом несинусоидальном (квазигармоническом) режиме сети.

Исследования показывают, что алгоритм оценки частоты по переходу через нуль выигрывает у известных алгоритмов универсальностью и малой зависимостью от формы сигнала. Главными факторами повышения его точности являются увеличение частоты дискретизации и улучшение отношения сигнал/шум. Исследования, проведенные в работе, позволяют утверждать, что точность определения частоты современными цифровыми устройствами релейной защиты (частота дискретизации 2кГц, отношение сигнал/шум=2000) при использовании алгоритма по переходу через нуль достигает 9 мГц.

Предварительная обработка сигнала. Прежде всего, рассматриваемые методы предварительной обработки сигнала носят сервисный характер и предназначены для коррекции сигналов, получивших локальные искажения сигнала из-за выбросов или потерь отсчетов в потоке сообщений от цифровых трансформаторов тока и напряжения (SV-потоков шины процесса). Для сохранения точности распознавания таких сигналов необходима их предварительная обработка, заключающаяся в основном в коррекции выбросов и удалении трендов.

Коррекция выбросов. В работе предлагаются два метода коррекции выбросов. Первый из них предназначен для работы в реальном масштабе времени, т.е. для работы в цифровых системах релейной защиты и противоаварийной автоматики и основан на использовании специальных неадаптивных фильтров предсказания. Второй основан на использовании гибридного фильтра и обладает высокой точностью, но требует значительных вычислительных ресурсов; он предназначен для работы в программных средах отложенного времени.

А) неадаптивные методы. Основная идея метода заключается в том, что в каждый дискретный момент времени с помощью двух – основного и дополнительного – операторов линейного предсказания формируется оценка произвольно выбранного отсчета цифрового сигнала (рисунок 10). При предсказании одного и того же отсчета «чистого» сигнала (сигнала, свободного от выброса) на основе одной и той же последовательности операторы дают близкие оценки отсчета. Поэтому при обработке чистого сигнала уровень выходного сигнала фильтра

$$w(k) = \frac{1}{6}x(k-4) - \frac{4}{6}x(k-3) + x(k-2) - \frac{4}{6}x(k-1) + \frac{1}{6}x(k), \quad (60)$$

интегрирующего в себя эти операторы, будет мал. Если же в сигнале появится выброс, то, благодаря сдвигу во времени последовательностей отсчетов, используемых операторами, отсчет с выбросом сначала попадает только в окно обработки основного оператора, а окно обработки дополнительного оператора будет без выброса. Поэтому ошибка предсказания основного оператора значительно возрастет, а ошибка предсказания дополнительного оператора останется на уровне предсказания отсчета «чистого» сигнала. Это вызывает резкого повышения уровня сигнала на выходе фильтра.

Приводятся алгоритмы локализации выбросов и их коррекции.

Б) метод прецизионной коррекции выбросов основан на идентификации структуры сигнала на фоне выбросов без предварительной обработки сигнала. При этом оценки отсчетов-выбросов, оптимальные на заданном отрезке сигнала, появляются как побочный продукт процесса формирования структурной модели.

Сигнал с выбросами представляется состоящим из «чистого» сигнала

$$\chi(k) = \begin{cases} x(k), & k \neq k_i; \\ 0, & k = k_i, \quad i = \overline{1, R}; \end{cases}$$

отсчеты с номерами k_i , соответствующие отсчетам сигнала $x(k)$ с выбросами, заменены на нули, и выбросов. Сигнал $x_r(k)$ с восстановленными отсчетами-выбросами представляется в виде суммы двух составляющих:

$$x_r(k) = \chi(k) + \sum_{i=1}^R \hat{x}_{k_i} \delta(k - k_i), \quad (61)$$

где \hat{x}_{k_i} – восстановленные значения отсчетов с выбросами. Оценка текущего отсчета восстановленного сигнала (при $a_0 = 1$) будет:

$$\hat{x}_r(k) = -K_M\{\delta(k)\} - \sum_{m=1}^M a_m \chi(k-m), \quad (62)$$

где

$$K_M\{\delta(k)\} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^R c_{m,i} \delta(k - k_i - m) - \text{неадаптивный оператор-корректор отсчетов с выбросами,} \\ c_{m,i} = a_m \hat{x}_{k_i} - \quad (63)$$

дополнительные коэффициенты, с помощью которых при известных коэффициентах a_m будут получены оценки отсчетов-выбросов \hat{x}_{k_i} .

Уравнения для коэффициентов $c_{m,i}$ получают как условия минимизации критерия наименьших квадратов; это так называемые нормальные уравнения.

Удаление тренда. Из-за невысокой скорости дрейфа нуля АЦП можно считать, что смещение нуля осциллограммы неизменно в пределах текущей записи событий. Поэтому наилучшей оценкой тренда на стационарном участке сигнала будет среднее значение:

$$\bar{x} = \frac{1}{L} \sum_{l=k-L+1}^k x(l). \quad (64)$$

Во избежание смещения оценки (64) из-за отклонения частоты предлагаются специальные фильтры для подавления периодической составляющей сигнала. Подобные фильтры обязательны, если число используемых в (64) отсчетов L невелико ($10 \div 20$) и не кратно числу N .

При оценке тренда нужно учитывать то обстоятельство, что формула (64) предназначена для определения тренда только на стационарном участке сигнала. Поэтому алгоритм определения тренда должен проявлять способность обнаруживать стационарный участок. Это свойство ему придает применение принципа инвариантности оцениваемого параметра.

Принцип инвариантности оцениваемого параметра. Он широко используется при оценке частоты на основе адаптивных заграждающих моделей, а также при удалении тренда сигнала. Его разработка была вызвана тем обстоятельством, что упомянутые и многие другие алгоритмы определения параметров сигнала требуют контроля достижения оцениваемым параметром заданной точности.

Алгоритм выявляет стационарный участок изменения оценки параметра, на котором колебания оценки находятся в пределах заданной точности. При этом сам сигнал, параметр компонента которого оценивается, может быть и не стационарен.

Суть принципа заключается в следующем. Для каждого дискретного момента времени k определяется оценка $\hat{y}(k)$ искомого параметра у сигнала. На заданном числе n_ε последовательных отсчетов определяется текущее среднее значение оцениваемого параметра

$$\bar{Y}(k) = \frac{1}{R} \sum_{l=k-n_\varepsilon+1}^k \hat{y}(l) \quad (65)$$

и отклонения от текущего среднего

$$\Delta \hat{y}(k) = \bar{Y}(k) - \hat{y}(k).$$

Считается, что стационарный участок и оценка $\hat{y}(k)$ определены (рисунок 11), если на отрезке $[(k - n_\varepsilon + 1), k]$ абсолютные значения отклонений $|\Delta \hat{y}(k)|$ не превышают заданный порог

$$|\Delta \hat{y}(k)| < \varepsilon |\bar{Y}(k)|, \quad (66)$$

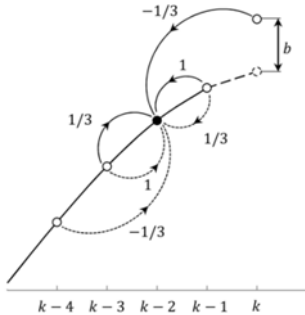


Рисунок 10 – Схема предсказания оценки одного и того же отсчета основным (сплошные стрелки) и дополнительным (пунктирные стрелки) линейными операторами. Числа при стрелках указывают значение веса используемого отсчета; b – величина выброса

где ε – порог (обычно $\varepsilon = 0,01 \div 0,1$). Тогда значение $\bar{Y}(k)$ (65) принимается за оценку параметра. Иначе формируется новая последовательность значений $\hat{y}(k)$, и действия (65) – (66) повторяются снова.

В шестой главе разрабатываются методические основы применения адаптивного структурного анализа в различных приложениях интеллектуальной электроэнергетики:

А) Интерактивная среда адаптивного структурного анализа сигналов электрических сетей в Simulink. Среда предназначена для идентификации структуры сигнала на множестве собственных мод реакции ЭС и составляющих принужденного режима. Может использоваться как для исследовательских, так и учебных целей. Предусмотрен весь спектр методов настройки структурной модели, включая: а) винеровское решение (27); б) решение МНК с минимальной нормой (34); в) базовое TLS-решение (37); г) TLS-решение с минимальной нормой, использующее собственные векторы подпространства сигнала (41) или (42); д) метод наложения моделей (43) – (45).

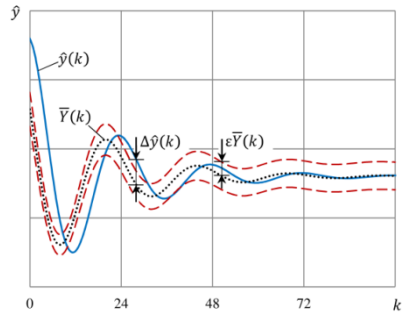


Рисунок 11 – Определение стационарного участка изменения оценки параметра

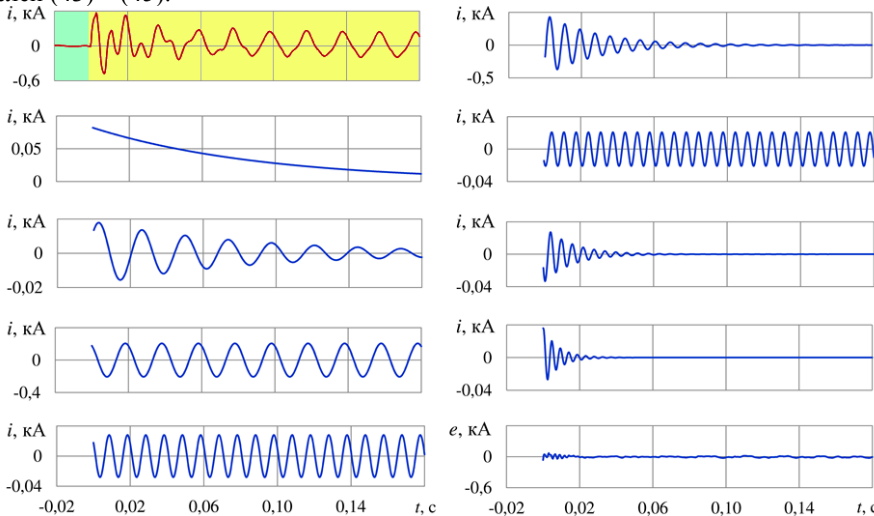


Рисунок 12 – Пример работы интерактивной среды адаптивного структурного анализа при распознавании тока включения высоковольтной ЛЭП-500 кВ на х.х.

Среда может использоваться как программный комплекс в АСУ ТП и как резидентное программное обеспечение различных интеллектуальных устройств в системе WAMPACS. Пример ее работы приведен на рисунках 12 и 13.

Б) Релейная защита электрических систем с высоковольтными передачами постоянного тока. Короткое замыкание в сети (рисунок 14), вызывая понижение напряжения на шинах преобразовательной станции HVDC, приводит к режиму аварийно-ошибочной коммутации вентилей. Создаются условия, при которых сеть постоянного тока разряжается на сеть переменного тока. Нередко основная гармоника тока в неповрежденной линии $L1$ ЭС, прилегающей к станции, на начальном отрезке аварийного процесса практически неразличима на фоне свободных состав-

ляющих (рисунок 15, а) и изобилуют межгармоническими составляющими разных частот). Известны неоднократные случаи излишней работы релейной защиты вблизи систем HVDC.

Компонентный состав сигнала:

№	Частота, Гц	Коэффициент затухания, 1/с	Амплитуда, ед	фаза, град
1	0.000	0.000	0.063	0.00
2	49.817	-0.000	0.202	43.18
3	113.304	-37.954	0.466	-19.28
4	123.111	-151.440	0.875	-151.08
5	223.879	-170.226	0.149	-103.46
6	252.514	-153.210	0.120	-33.62
7	297.107	-123.639	0.067	-15.79
8	342.982	-141.390	0.126	-20.77
9	371.096	-192.324	0.139	34.40
10	411.583	-96.015	0.065	151.64

Рисунок 13 – Результаты компонентного анализа сигнала рисунка 12

Релейная защита с относительной селективностью должна обладать способностью распознавания сигналов, искаженных свободными составляющими значительного уровня.

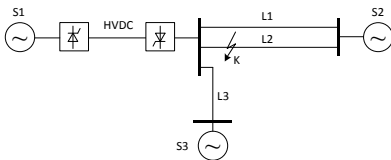


Рисунок 14 – Электрическая сеть с HVDC. Место короткого замыкания отмечено символом К

2,5 периода, однако в этом случае на начальном этапе аварийного процесса алгоритм релейной защиты будет заблокирован от излишней работы по причине отсутствия информационной составляющей в модели сигнала.

Ток в неповрежденной линии L1 сильно искажен свободными составляющими переходного процесса (рисунок 15, а). Фильтр Фурье всегда дает оценку, и в течение первых 2,5 периодов основной гармоники имеет недопустимо высокую погрешность (рисунок 15, б), и использующие его алгоритмы релейной защиты могут срабатывать излишне. Адаптивный структурный анализ обеспечивает распознавание основной гармоники также через

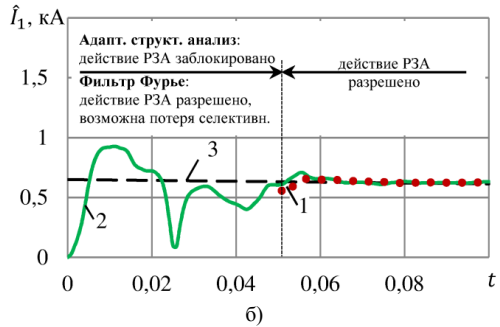
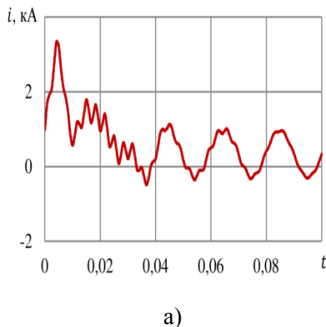
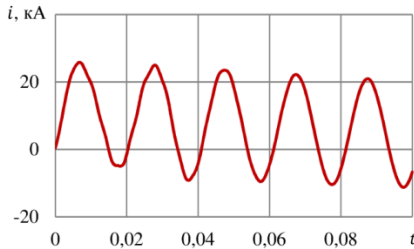


Рисунок 15 – Кривая фазного тока в неповрежденной линии L1 при коротком замыкании на землю одной из фаз в сети (а) и амплитуда основной гармоники (б): кривая 1 – оценка, полученная при помощи адаптивного структурного анализа; кривая 2 – оценка фильтра Фурье; кривая 3 – действительное значение.

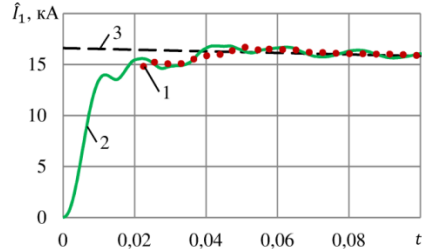
В то же время информационная составляемая в поврежденной линии $L2$ искажена свободными составляющими значительно слабее (рисунок 16,а), поэтому она успешно распознается обоими способами в течение одного периода после начала аварии (рисунок 16, б).

В сетях с HVDC селективность алгоритма релейной защиты, использующего фильтр Фурье, может быть сохранена лишь за счет выдержки времени на срабатывание (в рассмотренном случае – длительностью 2,5 периода). Однако такое решение приводит к ухудшению быстродействия защиты, расположенной и на поврежденной линии $L2$.

Распознавание сигнала с применением адаптивного структурного анализа позволяет обеспечить селективность защиты при внешних КЗ и сохранить ее быстродействие при КЗ в защищаемой зоне за счет непрерывного контроля достоверности оценки информационной составляющей и блокировки защиты, если информационная составляющая недоступна для распознавания.



а)



б)

Рисунок 16 – Кривая фазного тока в поврежденной линии $L2$ при коротком замыкании на землю одной из фаз в сети (а) и амплитуда основной гармоники (б). Обозначения кривых приведены на рисунке 15

В) Адаптивный структурный анализ в быстродействующей релейной защите. Быстродействующая релейная защита использует алгоритмы оценки параметров основной гармоники (комплексной амплитуды – фазора), способные распознать структуру сигнала на коротком отрезке (менее периода) в темпе развития процесса.

Показывается, что если в сигнале существенно присутствуют лишь основная гармоника и аperiodическая составляющая, то удобно учитывать основную гармонику неадаптивным оператором, а задачу определения аperiodической составляющей и учет шума лучше переложить на адаптивный оператор. Формулируется вывод, что структурный анализ таких сигналов (рисунок 17) проще выполнять с помощью гибридных моделей (20), поскольку они позволяют с высокой точностью оценить параметры основной гармоники за короткий отрезок времени после наступления аварийного режима защищаемой сети, повышая быстродействие систем релейной защиты.

В) Мониторинг низкочастотных колебаний в электроэнергетических системах. В работе исчерпывающе разрабатываются методические основы применения методов адаптивного структурного анализа при идентификации доминирующих мод колебаний ЭС.

Рассматриваются причины возникновения низкочастотных колебаний энергосистем. Отмечается, что протяженность линий связи между частями энергосистемы, большие нагрузки и особенности характеристик систем регулирования напряжения приводят к понижению демпфирующих свойств энергосистем, усиливая их склонность к колебаниям на низких частотах 0,2–1,0 Гц. Кроме того, стремление повысить динамическую устойчивость систем в переходных процессах с помощью быстродействующих регуляторов с высоким коэффициентом усиления еще больше



Рисунок 17 – Модуль структурного анализа входного сигнала быстродействующей защиты

обостряет колебательные свойства ЭС. Усугубляет положение и слабость взаимосвязей между системами, делая устойчивую систему неустойчивой с ростом колебаний.

Анализ и локализацию доминирующих мод колебаний системы можно проводить по доступным сегодня измерениям, таким как активная и/или реактивная мощность, частота энергосистемы, или по рассчитываемым величинам, таким как разность углов напряжений различных областей (зон) энергосистемы. Задача анализа и локализации доминантных мод колебаний заключается в выделении моды из сигнала наблюдений и оценке ее затухания (коэффициента демпфирования) и частоты.

Показывается, что распознавание низкочастотных колебаний требует решения целого комплекса задач, связанного с подготовкой данных к обработке (предварительная обработка), выбором параметров метода распознавания сигнала и самой идентификацией мод.

Предварительная обработка. Этот шаг включает в себя удаление выбросов, удаление тренда (постоянной составляющей) и фильтрацию высокочастотных составляющих сигнала.

Предлагается использовать полосовую фильтрацию с частотами среза 0,05 Гц в низкочастотной и 4 Гц в высокочастотной областях для удаления высокочастотных составляющих сигнала и медленно меняющихся составляющих установившегося режима сети. В сетях со статическими компенсаторами реактивной мощности могут потребоваться заграждающие фильтры для подавления субгармонических слагаемых резонансного режима сети, частоты которых оказываются в полосе пропускания фильтра.

Настройка параметров метода распознавания. Распознавание мод зависит от порядка модели и выбранного окна обработки сигнала. Очевидно, что нужно учитывать и особенность самого сигнала, заключающуюся, главным образом, в относительно высокой частоте измерений.

Предлагается, следуя сформулированным в работе фундаментальным свойствам эффективных фильтров, виртуально изменять частоту путем внутримодельной децимации и устанавливать ее в два раза выше частоты распознаваемой моды. В этом случае создаются лучшие условия для настройки адаптивного фильтра, поскольку исключается конкуренция канонических фильтров эффективного ядра.

Порядок модели, как следует из практики, рекомендуется выбирать около 20÷25. Ширина окна обработки сигнала определяется исходя из порядка и шага разрежения невязок в критерии (13). Поскольку шаг разрежения невязок не оказывает существенного влияния на разрешающую способность модели, то его можно принять равным шагу внутримодельной децимации. В этом случае число учитываемых в критерии невязок (число уравнений L) рекомендуется принять 4÷6 раз больше порядка модели.

Распознавание доминирующих мод. Выделение доминанты осуществляется в интерактивной среде адаптивного структурного анализа. Следуя выводам из исследований методов настройки структурной модели, рекомендуется использовать TLS-решение с минимальной нормой. Оно обладает лучшим разрешением и стабильностью оценок.

Г) Активно-адаптивное распознавание «слабой» информационной слагаемой. Предлагается программно-аппаратная среда, предназначенная для оценки информационной слагаемой неразличимой для тракта аналого-цифрового преобразования цифровой защиты на фоне доминирующей составляющей (например, основной гармоники).

Классический подход к решению этой задачи, подразумевающий использование аналоговых режекторных фильтров с высокой добротностью, настроенных на усиление информационной слагаемой и подавление других компонентов сигнала, не обеспечивает стабильных характеристик распознавания из-за выраженной зависимости коэффициента передачи аналогового фильтра от частоты в окрестности частоты режекции. Это приводит к значительному ослаблению избирательности фильтра при девиации частоты информационной слагаемой, снижая чувствительность защиты.

Основополагающая идея предлагаемой системы активно-адаптивного распознавания заключается в преобразовании входного сигнала со слабой информационной слагаемой в промежуточный непрерывный сигнал, уровень информационной слагаемой в котором достаточно высок и находится в области разрешения АЦП. Блок-схема системы, реализующей идею, приведена на рисунке 18. Система принципиально невозможна без использования адаптивного структурного анализа.

Суть новой технологии заключается в следующем. Сигнал

$$x(t) = x_0(t) + x_p(t), \quad (67)$$

представляющий собой сумму слабой информационной слагаемой $x_0(t)$ и доминирующего побочного сигнала $x_p(t)$, преобразуется в цифровой сигнал $x(k)$ с помощью первого АЦП (ADC_1). На основе цифрового сигнала в блоке адаптивного структурного анализа (ASA_1) формируется цифровой образ $x_p(k)$ доминирующего побочного сигнала $x_p(k)$, свободного от информационной слагаемой. Затем упомянутый цифровой сигнал $x_p(k)$ преобразуется обратно в непрерывный сигнал $x'_p(t)$ путем цифро-аналогового преобразования (DAC) и вычитается из входного сигнала $x(t)$. Полученный таким образом промежуточный непрерывный сигнал $x'_0(t)$ будет содержать в себе информационную слагаемую без изменения и заметно подавленный побочный сигнал (в идеальном случае промежуточный сигнал будет включать только информационную слагаемую). Соотношение сигнал/шум для промежуточного сигнала будет основательно повышено. Поэтому в цифровом сигнале $x'_0(k)$, полученном после аналого-цифрового преобразования промежуточного сигнала $x'_0(t)$ вторым АЦП (ADC_2), информационная слагаемая представлена с достаточной точностью.

Следы побочного сигнала $x_p(k)$ в цифровом сигнале $x'_0(k)$ исключаются при последующей обработке в программной среде интеллектуального устройства (блок ASA_2 на рисунке 18, изображенный штриховой линией).

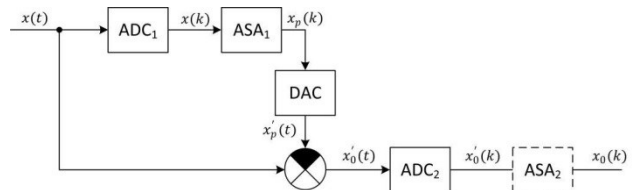


Рисунок 18 – Активно-адаптивная система распознавания «слабой» информационной слагаемой сигнала: ADC_1 и ADC_2 – АЦП, ASA_1 и ASA_2 – блоки адаптивного структурного анализа, DAC – ЦАП

Экспериментальные исследования показали, что система распознает 3-ю гармонику амплитудой 0,001 А на фоне доминирующей основной гармоники 2 А (отношение сигнал/шум = $5 \cdot 10^{-4}$) с точностью 1% при 16-разрядных АЦП и ЦАП. При этом система поднимает уровень отношения сигнал/шум 120 раз. Система сохраняет работоспособность при изменении частоты выделяемой слагаемой в широких пределах, поскольку использует операции, свойства которых не зависят от частоты. В настоящее время система используется в разработке новой высокочувствительной защиты генераторов от однофазных замыканий на землю.

Д) Адаптивный структурный анализ в системах сбора и передачи технологической информации (ССПТИ). Концепция интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью подразумевает, что системы технологического управления строятся как распределенные иерархические системы, частью нижнего уровня иерархии которых являются программно-технические средства систем сбора, обработки и передачи неоперативной телеметрической информации – ССПТИ. Эффективность применения подобной распределенной системы мониторинга тесно связана с решением задач оперативной обработки множества осциллограмм, их систематизации и архивирования, компрессии с целью повышения компактности, отсортировки осциллограмм с низкой информативностью на основе адаптивного распознавания информационного образа сигнала.

В работе разработаны методические основы применения адаптивного структурного анализа при решении различных задач ССПТИ.

Распознавание информационного образа сигнала как одна из важнейших операций присутствует во многих приложениях, связанных с обработкой осциллограмм аварийных процессов. Идея метода основана на предположении, что присутствие в сигнале информационной составляющей всегда усиливает оценку мощности информационной составляющей. Противоположные остальные, зачастую доминирующие компоненты сигнала, преодолевается адаптивным структурным анализом путем извлечения информационной составляющей из сигнала.

Распознавание образа сигнала осуществляется путем сравнения оценки мощности шума с порогом, пропорциональным оценке мощности информационной составляющей. Считается, что информационный образ сигнала соответствует рабочему и анализируемая выборка отсчетов сигнала содержит информационную составляющую сигнала, если мощность шума P_n ниже порога R_i , иначе полагают, что информационный образ сигнала нерабочий и упомянутая выборка не содержит информационной составляющей сигнала.

На рисунке 19 приведена блок-схема, поясняющая предлагаемый метод распознавания информационного образа сигнала.



Рисунок 19 – Блок-схема системы распознавания информационного образа сигнала

Важно отметить, что порог R_i не фиксируется на одном уровне и полностью определяется только уровнем информационной составляющей сигнала. Поэтому способ приобретает избирательность по отношению к информационной составляющей, и его работа не зависит от других составляющих сигнала.

Предлагается формировать порог пропорционально мощности информационной составляющей $R_i(k) = \lambda P_i(k)$, принимая за $P_i(k)$ либо ее средневывпрямленное, либо среднеквадратичное (в случае гармоника – действующее) значения. Мощность шума формируется аналогично по невязке $\hat{w}(k)$. Коэффициент λ (коэффициент чувствительности) определяет чувствительность метода: чем он больше, тем выше чувствительность способа к уровню информационной составляющей. Выбор коэффициента зависит от конкретных условий применения метода.

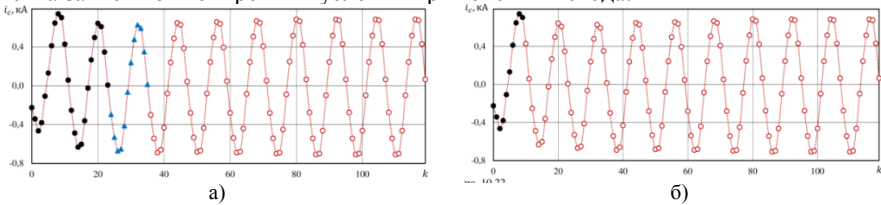


Рисунок 20 – Компрессия осциллограммы тока короткого замыкания: а) на основе метода разделения (необходимая информация о процессе содержится в 36 из 120 отсчетов осциллограммы; ● – 24 отсчета нестационарного режима, ▲ - 12 отсчетов периода основной частоты); б) с помощью экстраполирующего фильтра 10-го порядка (необходимая информация о процессе содержится в 10 (отмечены знаком●) из 120 отсчетов осциллограммы)

Компрессия осциллограмм значительно повышает эффективность архивирования цифровых осциллограмм в базе данных ССПТИ, использования каналов связи и помехоустойчивость передачи благодаря уплотнению данных. Наибольший эффект дает использование алгоритмов компрессии цифровых осциллограмм, базирующихся на анализе структуры сигналов и учитывающих специфику процессов, происходящих в ЭС. Алгоритмы структурной компрессии имеют ясную физическую интер-

претацию и формируют у пользователя конкретную модель процесса, доступную для дальнейших исследований.

Предлагается два метода структурной компрессии: алгоритм, основанный на методе разделения (рисунок 20, а) и алгоритм на основе метода структурного анализа (рисунок 20, б). Работа методов иллюстрируется на примере компрессии цифровых осциллограмм тока короткого замыкания на ЛЭП-500 «Кавказиони» (Краснодарский край – Грузия).

Задача определения места повреждения. Учитывая цели настоящей работы, основное внимание обращается разработке методических основ приложения структурного анализа в задачах ОМП, имея в виду, что сами методы ОМП изложены в работах автора и научной литературе достаточно полно.

Разнообразие задач, решаемых процессором обработки сигналов, зависит от вида реализации ОМП.



Рисунок 21 – Блок-схема процессора обработки электрического сигнала в автономном ОМП (показан только один канал)

Автономный ОМП. Если ОМП реализуется как автономное интеллектуальное устройство (терминал), то процессор обработки сигнала самостоятельно анализирует текущий режим ЭС и управляет регистратором аварийных сигналов (РАС) с помощью пускового органа или сигнала пуска от релейной защиты (рисунок 21). По сути, пусковой орган решает задачу обнаружения границ интервалов однородности предшествующего и аварийного режимов ЭС, синхронизируя работу РАС с моментом наступления аварии.

По сигналу **Start** РАС формирует осциллограмму аварийного процесса, программная среда адаптивного структурного анализа терминала получает конечные номера отсчетов предшествующего и аварийного режимов L_{pre} и L_f соответственно. Модуль адаптивного структурного анализа предшествующего режима (рисунок 21) формирует на основе отсчетов сигнала отрезка $[0, L_{pre}]$ (рисунок 22) комплексное действующее значение (фазор) основной гармоники доаварийного режима X_1^{pre} . Компонентный состав аварийного процесса получается в модуле адаптивного структурного анализа аварийного процесса. Он использует отсчеты сигнала на отрезке $[L_{pre}, L_f]$. Обычно его выходным параметром является комплексное действующее значение основной гармоники аварийного режима X_1^f , но возможно использование параметров и свободных составляющих аварийного процесса X_i^f , расширяя информационную базу ОМП.

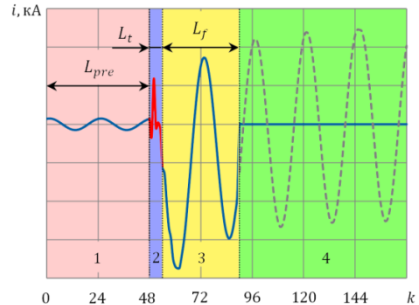


Рисунок 22 – Сигнал аварийного процесса в сети с быстродействующими выключателями. Цифрами обозначены: 1 – интервал предшествующего режима; 2 – начальный участок аварийного процесса; 3 – основной интервал аварийного процесса; 4 – интервал после отключения аварии (штриховой кривой показано экстраполяция сигнала аварийного процесса).

Часто начальный участок аварийного процесса содержит быстрозатухающие и высокочастотные составляющие переходного процесса (интервал отсчетов $[L_{pre}, L_t]$). Сигнал на этом интервале потребует от модуля структурного анализа аварийного режима излишнего наращивания порядка структурной модели. Поэтому полезно исключать этот интервал сигнала из рассмотрения без особого ущерба для ОМП, обрабатывая отсчеты на интервале $[L_t, L_f]$.



Рисунок 23 – Блок-схема процессора обработки электрического сигнала ОМП в составе ССПТИ (показан только один канал)

обладать свойствами, достаточными для реализации различных методов структурного анализа, включая обработку осциллограммы со слабой информационной составляющей. Поэтому задача ОМП должна иметь в процессоре обработки сигналов специальную процедуру распознавания информационного образа осциллограммы.

Интервалы однородности осциллограммы определяются сегментатором, он же предоставит модулям адаптивного структурного анализа предшествующего и аварийного режимов необходимые номера отсчетов L_{pre} и L_f .

Особенности ОМП в электрической системе с быстродействующими выключателями. Многие ОМП часто основаны на оценивании комплексных действующих значений установившейся составляющей входных сигналов. Поэтому при обработке сигналов аварийного режима точность их оценок становится недопустимо низкой. Обычно этот недостаток преодолевается тем, что интервал обработки сигнала аварийного режима переносится вправо настолько, чтобы на вход фильтров ортогональных составляющих проступали отсчеты установившегося режима (на рисунке 24 отсчеты 3-го интервала).

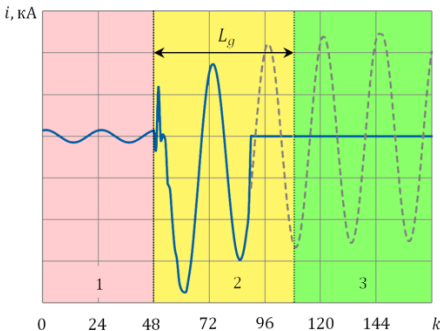


Рисунок 24 – Интервалы сигнала аварийного процесса: 1 – интервал предшествующего режима; 2 – интервал нестационарного участка сигнала аварийного процесса; 3 – интервал почти стационарного участка аварийного процесса – интервал правильной работы фильтров ортогональных составляющих. Штриховой кривой показана экстраполяция сигнала аварийного процесса

В современных ЭС используются выключатели с малым временем отключения. Поэтому в сетях с быстродействующими выключателями токи короткого замыкания отключаются раньше, чем затухают его свободные составляющие и наступает установившийся режим аварийного процесса, т.е. $L_f < L_g$. Другими словами, ОМП, использующие фильтры ортогональных составляющих, будут иметь значительную погрешность определения расстояния до места повреждения. Очевидно, что адаптивный структурный анализ является лучшей альтернативой для ОМП в таких сетях.

Е) Адаптивная идентификация системных функций элементов электрической сети и ее приложения. Идентификация системных функций (передаточной функции или им-

пульсной характеристики) – еще одна область применения адаптивного структурного анализа. Системные функции используются при неразрушающем контроле технического состояния испытуемого элемента ЭС, например, кабельной линии. С помощью системных функций возможна реконструкция сигналов ЭС с целью исключения погрешности, вызванной несовершенством измерительного тракта.

Идентификация системной функции элемента (рисунок 25). Идентификация сводится к формированию оценки передаточной функции $\hat{H}(p)$ как изображение оценки переходной функции $\hat{h}(t)$, компоненты которой определяются путем адаптивного структурного анализа реакции идентифицируемого элемента на единичную функцию $1(t)$.



Рисунок 25 – Процесс идентификации системной функции $H(p)$

Реконструкция сигнала электрической сети. При измерении сигнала ЭС часто возникает необходимость исключения погрешности, вызванной несовершенством измерительного тракта (задача была поставлена ООО «Динамика», Чебоксары). Решение этой задачи с помощью адаптивного структурного анализа иллюстрируется на примере восстановления сигнала ЭС, испытавшего на себе действие емкостного трансформатора напряжения (ЕТН).

Задача решается в два этапа. Сначала оценивается передаточная функция ЕТН, а затем, используя ее частотные и экспоненциальные характеристики, восстанавливаются компоненты сигнала. Для восстановления входного сигнала ЕТН по отсчетам выходного определяется: а) структура сигнала на выходе ЕТН $y(t)$ (компонентная модель); б) определяется комплексная амплитуда \underline{Y}_i каждого компонента сигнала на входе ЕТН с учетом комплексного коэффициента передачи (АФЧХ) трансформатора $\hat{H}(p_i = \alpha_i + j\omega_i)$ на комплексной частоте компонента $\underline{Y}_i = \hat{Y}_i / \hat{H}(\alpha_i + j\omega_i)$.

Оценка технического состояния элементов электрической сети. Одним из примеров использования адаптивного структурного анализа при оценке технического состояния элементов ЭС является процедура неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных кабелей. Важность этой практической задачи не преложна, поскольку кабельные линии, например, класса напряжения 6 кВ имеют широкое применение в распределительных сетях и повреждаются в 2–3 раза чаще, чем все другие элементы ЭС. Распространенный метод испытания кабельных линий под высоким напряжением часто приводит к пробое кабелей (42% от случаев повреждения). Поэтому методы неразрушающего контроля кабельных линий имеют большое значение.

Основной одним из методов такого контроля является идентификация передаточной функции и исследование поведения ее полюсов. Обычно метод девиации положения полюсов передаточной функции сочетают с оценкой сопротивления изоляции, добротности, емкости и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, располагая их на шестилучевой диаграмме. Техническое состояние кабеля определяется в зависимости от места расположения полюсов.

Ж) Интеллектуальное (контролируемое) автоматическое повторное включение компенсированной линии. Транзитные линии весьма чувствительны к неконтролируемому повторному включению, поскольку оно часто приводит к значительным электродинамическим и диэлектрическим перенапряжениям рабочего оборудования в системах высокого напряжения. Причина кроется в нерастроченной

энергии свободного процесса после аварийного отключения, из-за которой, при неудачном стечении обстоятельств, напряжение отключенной ЛЭП синфазно накладывается на напряжение подключаемой сети, повышая напряжение на высоковольтном оборудовании несколько раз относительно номинального напряжения.

Поэтому во время повторного включения линии в работу для смягчения пере напряжений используются различные технические мероприятия, но наиболее перспективно использование контролируемое включение линии, дополненной разрядниками (рисунок 26).

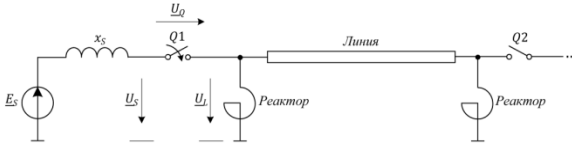


Рисунок 26 – Контролируемое включение компенсированной линии

частота и коэффициент затухания определяются характеристиками контура, образованного самой ЛЭП и шунтирующими реакторами (рисунок 26). При повторном включении ЛЭП напряжение колебательного контура накладывается на напряжение сети, создавая условия возникновения повышенных напряжений. Поэтому для успешного повторного включения ЛЭП к сети нужно создавать благоприятные условия, смягчающие переходные процессы после коммутации.

Известно, что оптимальные условия повторного включения ЛЭП складываются тогда, когда кривая огибающей напряжения на контактах выключателя проходит

Как правило, транзитная линия представляет собой компенсированную ЛЭП. В такой линии после снятия напряжения (например, при отключении релейной защитой с обоих концов) возникает затухающее колебание. Его

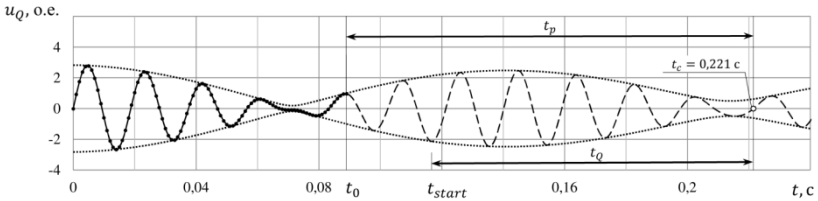


Рисунок 27 – Предсказание точки минимума огибающей и перехода кривой напряжения на контактах выключателя через нуль. Отрезок сигнала, на котором настраивается адаптивная модель, выделена сплошной линией. Штриховой линией показана кривая предсказанного напряжения. Светлым кружком обозначен предсказываемый момент t_c перехода кривой напряжения через нуль (в этот момент контакты выключателя Q1 должны замкнуться)

через минимум, а кривая напряжения переходит через нуль (рисунок 27). Для реализации идеи метода контролируемого включения необходимо предсказать момент будущего перехода кривой напряжения на контактах выключателя Q1 в зоне минимума огибающей этого напряжения (момент t_c) и привести в действие выключатель с упреждением, равном его времени включения t_Q (момент времени t_{start} на рисунке 27). Поскольку характеристические параметры колебаний в отключенной линии неизвестны, то наилучшим решением этой задачи является применение методов адаптивного структурного анализа.

В работе предлагается новый подход к реализации принципа контролируемого включения, основанный на адаптивном структурном анализе напряжения на контактах выключателя $u_Q(t) = u_S(t) - u_L(t)$.

В результате отсекаются лишние составляющие в $u_Q(t)$ и определяются комплексные амплитуды составляющих напряжения источника $\underline{U}_S = U_S e^{j\psi_S}$ и линии $\underline{U}_L = U_L e^{j\psi_L}$. Будущему минимуму огибающей на оси времени соответствует точка, в момент которой векторы напряжений источника \underline{U}_S и линии \underline{U}_L будут совпадать по

направлению и лежать на одной линии (линии минимума огибающей на рисунке 28).

Затем определяется момент перехода кривой напряжения $u_Q(t)$ через нуль \hat{t}_c в окрестности минимума огибающей. Точки перехода могут появиться как до, так и после минимума огибающей, все зависит от направления вращения векторов относительно друг друга и их положения на координатной плоскости. На рисунке 28 показан момент перехода кривой напряжения $u_Q(t)$ через нуль после прохождения точки минимума огибающей. Переход кривой $u_Q(t)$ через нуль наступит в момент, когда вектор \underline{U}_Q будет лежать на прямой, перпендикулярной мнимой оси. Поэтому концы векторов напряжений источника \underline{U}_S и линии \underline{U}_L будут лежать на этой прямой, и их проекции на мнимую ось будут одинаковы.

Таким образом, использование адаптивного структурного анализа позволяет прецизионно предсказать точку перехода напряжения на контактах выключателя через нуль в окрестности минимума огибающей, обеспечивая наилучшие условия включения линии под напряжение. Важно, что метод сохраняет свою эффективность и при затухающем напряжении на отключенной линии, поскольку адаптивный структурный анализ обеспечивает высокую точность оценки комплексной амплитуды и в этом случае.

В приложениях приведены осциллограммы аварийных процессов, используемые для иллюстрации свойств и методов настройки структурных моделей, акты внедренных результатов исследований в диссертационной работе.

Используются сигналы:

а) с белым шумом $w(k)$:

$$x(k) = \cos(k\pi/12) - e^{-k/24} + w(k); \quad (68)$$

б) осциллограмма аварийного процесса

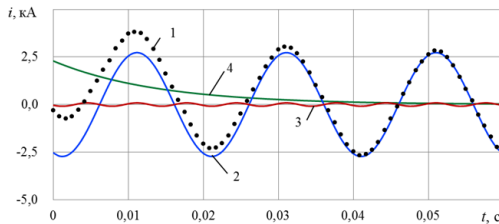


Рисунок 29 – Сигнал (ток) аварийного процесса и его компоненты: 1 – отсчеты сигнала; 2 – основная гармоника частоты 50,18 Гц; 3 – третья гармоника частоты 150,54 Гц; 4 – аperiodическая составляющая с основанием $e^{-\alpha T_s} = 0,9418$, $\alpha T_s = 0,060$ – нормированный коэффициент затухания, $T_s = 1/1200$, с.

Модель процесса рисунка 29 (при частоте дискретизации $f_s = 1/T_s = 1200$ Гц)

$$x(k) = 2,73 \cos\left(\frac{k\pi 50,18}{600} + 2,77\right) + 0,089 \cos\left(\frac{k\pi 150,54}{600} + 2,02\right) + 2,29(0,9418)^k + w(k). \quad (69)$$

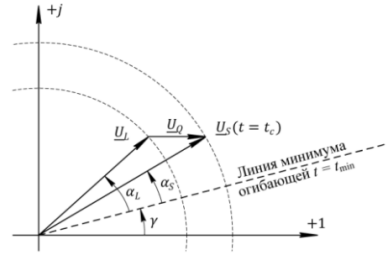


Рисунок 28 – Положение векторов во время перехода кривой напряжения на контактах $u_Q(t)$ через нуль в окрестности минимума огибающей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1 Создана теория адаптивных структурных моделей сигнала, обобщающая научные достижения в области адаптивных алгоритмов распознавания сигналов и формирующая единый подход к методам идентификации структуры сигналов в новых системах мониторинга, управления и релейной защиты интеллектуальной электроэнергетики.

2 Разработаны новые методы компонентного анализа сигналов электроэнергетики, обеспечивающие согласованность компонентов модели с сигналом и повышающие устойчивость функционирования интеллектуальных систем мониторинга, управления и релейной защиты электроэнергетики.

3 Впервые построена общая теория адаптивного структурного анализа сигнала электрической системы, объединяющая в себе методы теории адаптивных структурных моделей и компонентного анализа и обеспечивающая определение интегрированной структуры сигнала в темпе развития аварийного процесса в энергосистеме.

4 Предложен новый алгоритм разрешения структурной неопределенности сигнала для цифровых систем релейной защиты, автоматики и управления интеллектуальной энергосистемой, работающих в темпе развития аварийного процесса в электрической системе.

5 Разработаны новые адаптивные методы предварительной обработки распознаваемого сигнала, повышающие разрешающую способность и достоверность оценок структурного анализа сигнала, обеспечивая улучшение быстродействия и надежности систем релейной защиты и автоматики и совершенствование систем мониторинга и управления интеллектуальными энергосистемами.

6 Разработаны методические основы применения адаптивного структурного анализа, позволяющие сформировать базу знаний и эксперимента, достаточной для использования ее как руководство при внедрении положений теории адаптивного структурного анализа в различные приложения интеллектуальной электроэнергетики.

7 Создано алгоритмическое обеспечение для нового кластера программно-технических средств и устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики, мониторинга и управления интеллектуальными электроэнергетическими системами, повышающие быстродействие, селективность и устойчивость функционирования технических систем интеллектуальной электроэнергетики, включающие в себя алгоритмы:

- 7.1 Автономных устройств определения места повреждения;
- 7.2 Быстродействующей релейной защиты, способной принять решение на основе анализа короткого участка аварийного процесса;
- 7.3 Защиты электрических генераторов с активно-адаптивным распознаванием слабой информационной слагаемой;
- 7.4 Мониторинга низкочастотных колебаний в электроэнергетической системе;
- 7.5 Релейной защиты электрических систем с высоковольтными передачами постоянного тока;
- 7.6 Интеллектуального (контролируемого) автоматического повторного включения транзитных ЛЭП в работу после аварийного отключения;
- 7.7 Оценки технического состояния энергооборудования;
- 7.8 Реконструкции сигнала электрической системы;
- 7.9 Программно-технических комплексов систем сбора и передачи технологической информации интеллектуальной электроэнергетики, в том числе алгоритмы: структурной компрессии осциллограмм; распознавания информационного образа цифровых сигналов (осциллограмм); определения места повреждения; интерактивной среды адаптивного структурного анализа.

8 Результаты работы используются:

в ООО НПП «ЭКРА» (г. Чебоксары) серийно выпускаемой продукции: аппаратуре противоаварийной автоматики серий ШЭЭ 22х на базе терминалов серии ЭКРА 200; аппаратуре релейной защиты электрических генераторов, работающих на общую шину, серий ШЭ11ХХ на базе терминалов серии ЭКРА 200; алгоритмическом обеспечении терминала интеллектуального (контролируемого) включения ЛЭП; определителе места повреждения (ОМП) в программно-техническом комплексе АСУ ТП EVICON; программном комплексе анализа сигналов аварийного процесса RecViewer;

в ООО «НПП Бреслер» (г. Чебоксары) при разработке серийно выпускаемого базового микропроцессорного терминала релейной защиты и автоматики «Бреслер-0107»;

в ООО «Инженерный центр «Энергосервис» (г. Архангельск) для математического моделирования современных интеллектуальных устройств различного функционального назначения автоматизированных систем управления и защиты нового поколения WAMPACS.

9 Теоретические основы адаптивного структурного анализа, разработанные в диссертации, а также интерактивная среда адаптивного структурного анализа используются в учебном процессе

в ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары) при чтении лекций по курсам «Цифровая обработка электроэнергетических сигналов», «Автоматическое управление электроэнергетическими системами», «Системы и сети распределенной генерации», «Управляемые системы передачи электроэнергии» направления подготовки магистров 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника», а также при подготовке выпускных квалификационных работ магистрантов и диссертационных работ аспирантов;

в Высшей школе энергетики, нефти и газа ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Архангельск) по дисциплинам «Основы автоматического управления» и «Релейная защита и автоматизация энергетических систем», а также при подготовке выпускных квалификационных работ магистрантов и диссертационных работ аспирантов кафедры Электроэнергетики и электротехники;

в ФГАОУ ДПО "ПЭИПК (г. С.-Петербург) на лекционных и практических, а также конференциях и семинарах кафедры "Релейная защита и автоматика электрических станций, сетей и энергосистем" для повышения квалификации специалистов в области релейной защиты и автоматики энергосистем России и ближнего зарубежья;

в НОУ ДПО «ИПК РЗА» (г. Чебоксары) повышении квалификации специалистов релейной защиты и автоматики энергосистем России и ближнего зарубежья на лекционных, практических и семинарских занятиях.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Антонов, В.И. Методы обработки цифровых сигналов энергосистем / В.И. Антонов, Н.М. Лазарева, В.И. Пуляев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2000. – 84 с.

Публикации по Перечню научных рецензируемых изданий и Перечню научных изданий, входящих в международные базы данных и системы цитирования ВАК

2. Антонов, В.И. Распознавание слабых гармонических составляющих сигналов в защите генератора от однофазного замыкания на землю / В.И. Антонов [и др.] // Электрические станции. – 2018. – №1. – С.52-55.

3. Антонов, В.И. Распознавание информационного образа электрического сигнала в условиях его структурной неопределенности / В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – №4. – С.40-46.

4. Антонов, В.И. Характеристики методов настройки адаптивных структурных моделей аварийных сигналов электрической сети / В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – №1. – С.23-30.

5. Солдатов, В.А. Информационный базис защиты генератора от однофазных замыканий статора на землю с контролем высших гармоник дифференциального тока / А.В. Солдатов, В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – №3. – С. 12-20.

6. Антонов, В.И. Общие начала теории фильтров ортогональных составляющих / В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – №1. – С.16-25.
7. Антонов, В.И. Адаптивный структурный анализ входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов [и др.] // Электротехника. – 2015. – № 7. – С. 28-35.
8. Антонов, В.И. Оценка гармоника электрической величины на фоне преобладающего гармонического спектра шума / Антонов В.И. [и др.] // Электричество. – 2014. – №5. – С.29-33.
9. Антонов, В.И. Эффективные алгоритмы обработки входных сигналов цифровой автоматики ограничения повышения напряжения / В.И. Антонов, В.А. Наумов, В.С. Петров // Электрические станции. – 2013. – №11. – С.42-45.
10. Антонов, В.И. Адаптивные структурные модели входных сигналов релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов, А.А. Ильин, Н.М. Лазарева // Электротехника. – 2012. – №1. – С.52-55.
11. Антонов, В.И. Адаптивные структурные модели цифровых электроэнергетических сигналов с локальными нарушениями закономерностей / В.И. Антонов, А.А. Ильин, Н.М. Лазарева // Электротехника. – 2012. – №4. – С.11-14.
12. Антонов, В.И. Эффективные структурные модели входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.И. Фомин // Электричество. – 2012. – №11. – С.2-8.
13. Антонов, В.И. Определение частоты в энергосистеме путем цифровой обработки электрических сигналов / В.И. Антонов, В.И. Пуляев // Энергетик. – 2002. – №4. – С. 15-16.
14. Антонов, В.И. Эффективные методы структурного анализа цифровых сигналов электроэнергетических систем / Антонов В.И. [и др.] // Вестник Чувашского университета. – 2000. – №3-4. – С. 82-90.
15. Антонов, В.И. Решетчатый адаптивный фильтр с контролем достоверности результата для распознавания сигналов электрических систем / В.И. Антонов, Н.М. Лазарева // Изв. РАН. Энергетика. – 1997 – №6. – С. 63-69.
16. Лазарева, Н.М. Методы структурной компрессии цифровых электроэнергетических сигналов / Н.М. Лазарева, Антонов В.И. [и др.] // Вестник Чувашского университета. – 1997. – №1. – С. 101-109.
17. Лазарева, Н.М. Основные характеристики и цифровые модели электротехнических сигналов / Н.М. Лазарева, В.И. Антонов, В.И. Пуляев // Вестник Чувашского университета. – 1996. – №2. – С. 73-82.
18. Антонов, В.И. Оперативная обработка цифровых осциллограмм электрической сети / Антонов В.И. [и др.] // Вестник Чувашского университета. – 1996. – №1. – С. 61-66.
19. Антонов, В.И. Неадаптивные алгоритмы оперативной обработки сигналов релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов, Н.М. Лазарева, В.М. Шевцов // Вестник Чувашского университета. – 1995. – №2. – С. 87-92.
20. Антонов, В.И. Адаптивные алгоритмы оценки частоты сети для цифровых систем релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов, А.А. Ильин, Н.М. Лазарева // Электротехника. – 1995. – №8. – С.29-31.
21. Антонов, В.И. Структурный анализ входных сигналов цифровых систем релейной защиты и противоаварийной автоматики / В.И. Антонов // Электротехника. – 1995. – №6. – С.56-61.
22. Лямец, Ю.Я. Оптимизационный алгоритм контроля состояния электрической сети / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, Г.С. Нудельман // Изв. РАН. Энергетика. – 1994 – №2. – С. 101-109.
23. Антонов, В.И. Выбор частоты дискретизации и разрядности аналого-цифрового преобразователя в цифровых системах релейной защиты / В.И. Антонов, Е.В. Сидяряков, В.М. Шевцов // Электротехника. – 1993. – №4. – С.56-59.
24. Лямец, Ю.Я. Определение места повреждения линии электропередачи по компонентам свободного процесса / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, С.Х. Ахметзянов // Электротехника. – 1993. – №3. – С.60-66.
25. Лямец, Ю.Я. Параметрическая модель переходного процесса и ее применение / Ю.Я. Лямец, А.П. Арсентьев, В.И. Антонов // Электротехника. – 1992. – №8-9. – С.51-56.
26. Лямец, Ю.Я. Анализ состава напряжения (тока) аварийного режима электроустановки как алгоритм релейной защиты и автоматики / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, В.А. Ильин // Электротехника. – 1992. – №1. – С.46-52.
27. Лямец, Ю.Я. Спектральный анализ переходных процессов в электрических сетях / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, А.П. Арсентьев // Изв. РАН. Энергетика. – 1992 – №2. – С. 31-43.
28. Лямец, Ю.Я. Оценивание параметров как алгоритм релейной защиты / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, Г.С. Нудельман // Электротехника. – 1990. – №2. – С.21-24.
29. Лямец, Ю.Я. Адаптивный цифровой фильтр основной гармоники токов и напряжений электрической сети / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, А.П. Арсентьев // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт – 1989. – №6. – С. 115-126 [Индексируется в SCOPUS; EID: 2-s2.0-0024896361].

30. Лямец, Ю.Я. Адаптивная цифровая обработка входных величин релейной защиты / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, А.П. Арсентьев // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт – 1988. – №6. – С. 51-59 [Индексируется в SCOPUS; EID: 2-s2.0-0024186311].

Патенты на изобретения

31. Пат. 2573274 Российская Федерация, МПК G06F 17/17 (2006.01). Способ удаления импульсного шума (выброса) из электрической величины / В.И. Антонов, В.А. Наумов, В.С. Петров. Оpubл. 20.01.2016, Бюл. № 2.

32. Пат. 2564536 Российская Федерация, МПК G01R 23/167 (2006.01). Способ выделения слагаемой электрической величины / В.И. Антонов [и др.] Оpubл. 10.10.2015, Бюл. №28.

33. Пат. 2556864 Российская Федерация, МПК H02H 3/40 (2006.01). Способ определения ортогональных составляющих гармоники периодической электрической величины / В.А. Наумов, В.И. Антонов [и др.] Оpubл. 20.07.2015, Бюл. №20.

34. Пат. 2540267 Российская Федерация, МПК G01R 31/02, G01R 31/08, G01R 31/327, H02H 3/16, H02H 3/26 (2006.01). Способ определения интервалов однородности слагаемой электрической величины / В.И. Антонов [и др.] Оpubл. 10.02.2015, Бюл. №4.

35. Пат. 2536857 Российская Федерация, МПК H02H 3/38 (2006.01). Способ выделения слагаемой электрической величины / В.И. Антонов [и др.] Оpubл. 27.12.2014, Бюл. №36.

36. Пат. 2525832 Российская Федерация, МПК H02H 9/04 (2006.01). Способ мониторинга ресурса изоляции высоковольтного оборудования переменного тока / В.И. Антонов, В.А. Наумов, В.С. Петров. Оpubл. 20.08.2014, Бюл. № 23.

37. Пат. 2110804 Российская Федерация, МПК G01R 23/165, H02J 3/24, 01H 83/22 (1995.01). Способ определения частоты электрической сети / В.И. Антонов, А.А. Ильин, В.М. Шевцов. Оpubл. 10.05.1998, Бюл. № 13.

38. Пат. 2073876 Российская Федерация, МПК G01R 31/08, H02H 3/40 (1995.01). Способ определения зоны и места замыкания линии электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов [и др.] Оpubл. 20.02.1997, Бюл. №5.

39. Пат. 2066511 Российская Федерация, МПК H02H 3/40, G01R 31/08 (1995.01). Дистанционный способ защиты и автоматики линии электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов [и др.] Оpubл. 10.09.1996, Бюл. №25.

40. Пат. 2033622 Российская Федерация, МПК G01R 31/11, H02H 3/28 (1995.01). Способ определения места и характера повреждения линии электропередачи с использованием ее моделей / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов [и др.] Оpubл. 20.04.1995, Бюл. №8.

41. Пат. 2033623 Российская Федерация, МПК G01R 31/11, H02H 3/28 (1995.01). Способ определения места и характера повреждения в электрической системе с использованием моделей входящих в нее линий электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, Г.С. Нудельман. Оpubл. 20.04.1995, Бюл. №8.

42. Пат. 2031506 Российская Федерация, МПК H02H 3/16, H02H 3/26, H02H 3/42 (1995.01). Способ определения особой фазы при замыкании на землю линии электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, В.А. Ефремов. Оpubл. 20.03.1995, Бюл. №6.

43. Пат. 2012971 Российская Федерация, МПК H02H 3/38, H01H 83/20 (1990.01). Адаптивный пусковой орган / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, С.Х. Ахметзянов. Оpubл. 15.05.1994, Бюл. №9.

44. Пат. 2006124 Российская Федерация, МПК H02H 3/26, H02H 7/26 (1990.01). Способ определения поврежденных фаз и вида повреждения линии электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, Г.С. Нудельман. Оpubл. 15.01.1994, Бюл. №1.

45. А. с. 1820974 СССР, МПК H02H 3/26 (1990.01). Способ определения поврежденных фаз и вида повреждения линии электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов [и др.] Оpubл. 07.06.1993, Бюл. №21.

46. А. с. 1817153 СССР, МПК H01H 83/22 (1990.01). Формирователь доаварийной слагаемой тока (напряжения) / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, С.Х. Ахметзянов. Оpubл. 20.05.1993, Бюл. №19.

47. А. с. 1775787 СССР, МПК H02H 3/40 (1990.01). Способ дистанционной защиты линии электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов [и др.] Оpubл. 15.11.1992, Бюл. №42.

48. А. с. 1744733 СССР, МПК H01H 83/22 (1990.01). Устройство для выделения ортогональных составляющих электрической величины / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов. Оpubл. 30.06.1992, Бюл. №24.

49. А. с. 1647468 СССР, МПК H01H 83/22 (1990.01). Устройства для контроля параметров электроустановки / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, Г.С. Нудельман. Оpubл. 07.05.1991, Бюл. №17.

Публикации в других изданиях

50. Антонов, В.И. Контролируемые величины цифровых систем автоматического ограничения повышения напряжения: новые методы оценки и их характеристики / В.И. Антонов, В.А. Наумов, В.С. Петров // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – №4. – С.24-29.

51. Иванов, Н.Г. Оценка частоты сети в цифровых системах РЗА по переходу через нуль: характеристики точности / Н.Г. Иванов, В.А. Солдатов, В.А. Наумов, В.И. Антонов // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – №4. – С.22-25.

52. Антонов, В.И. Разрешающая способность метода наименьших квадратов при оценке основной гармоники тока короткого замыкания / В.И. Антонов, Ю.Я. Лямец // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1990. – №2. – С. 48-51.
53. Антонов, В.И. Методы настройки адаптивных структурных моделей сигналов аварийных режимов электрической сети / Антонов В.И. [и др.] // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. труд. НПП «ЭКРА». Выпуск 5. – Чебоксары: РИЦ "СРЗАУ", 2016. – С.7-44.
54. Антонов, В.И. Адаптивные алгоритмы цифровой автоматики ограничения повышения напряжения / В.И. Антонов, В.А. Наумов, В.С. Петров // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. трудов НПП «ЭКРА». Выпуск 4. – Чебоксары: РИЦ "СРЗАУ", 2015. С.14-29.
55. Антонов, В.И. Совершенствование методов структурного анализа сигналов электроэнергетических систем / В.И. Антонов, А.А. Ильин // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. научн. тр. Вып.11. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С.19-34.
56. Антонов, В.И. Фундаментальные свойства эффективных структурных моделей тока короткого замыкания электрической сети / Антонов В.И. [и др.] // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. труд. НПП «ЭКРА». Выпуск 3. – Чебоксары: РИЦ "СРЗАУ", 2014. – С.18-29.
57. Антонов, В.И. Обработка сигнала с высокой частотой дискретизации в цифровой релейной защите и автоматике / Антонов В.И. [и др.] // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. труд. НПП «ЭКРА». Выпуск 2. – Чебоксары: РИЦ "СРЗАУ", 2013. – С.12-21.
58. Антонов, В.И. Оценка частоты электрической сети: теоретические основы и практические алгоритмы / В.И. Антонов, В.А. Наумов, В.М. Шевцов // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. труд. НПП «ЭКРА». Выпуск 1. – Чебоксары: РИЦ "СРЗАУ", 2012. – С. 20-38.
59. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ сигналов как инструмент для информационного анализа и оценки состояния электроэнергетической системы / В.И. Антонов, А.А. Ильин, Н.М. Лазарева // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. научн. тр. Вып.7. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – С.141-151.
60. Лямец, Ю.Я. Диагностика линий электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов [и др.] // Электротехнические микропроцессорные устройства и системы. Чебоксары: Изд-во Чуваш ун-та, 1992. – С. 9-32.
61. Антонов, В.И. О методах обработки сигналов в технике релейной защиты / В.И. Антонов, В.К. Ванин, А.В. Мокеев // Электротехнические устройства и системы на основе микропроцессоров и микроЭВМ: межвуз. сб. научн. статей. Чебоксары: Изд-во Чуваш ун-та, 1985. – С. 110-118.
62. Антонов, В.И. Адаптивный структурный анализ аварийных сигналов в релейной защите сетей с FACTS и HVDC / В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматика энергосистем – 2017: междунар. конф. и выставка. СПб: 25 – 28 апреля 2017. – Доклад С.5.2-15.
63. Антонов, В.И. Адаптивные алгоритмы построения моделей электрической сети / В.И. Антонов [и др.] // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Матер. 12 Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С.213-215.
64. Антонов, В.И. Новый способ выявления момента изменения режима сети / В.И. Антонов [и др.] // Там же. – С.382-385.
65. Антонов В.И. Адаптивные структурные модели цифровых сигналов электроэнергетических систем / В.И. Антонов, А.А. Ильин // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: Матер. 1-й междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С.23-27.
66. Антонов, В.И. Оптимальная частота дискретизации при оценке частоты гармоники / В.И. Антонов, В.А. Наумов, Д.Е. Васильева // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Матер. 10-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – С.223–225.
67. Антонов, В.И. Структурный анализ сигналов в среде SIMULINK / В.И. Антонов [и др.] // Там же. – С. 232-240.
68. Антонов, В.И. Адаптивное распознавание неразличимой информационной слагаемой на фоне преобладающих составляющих сигнала / В.И. Антонов [и др.] // Там же. – С. 241–243.
69. Антонов, В.И. Лестничная декомпозиция сигналов – эффективный метод структурного анализа входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики / Антонов [и др.] // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: Докл. 5-й междунар. науч.-техн. конф. Сочи, 1–5 июня 2015. – С.13-14.
70. Антонов, В.И. Методы повышения эффективности структурных моделей входных сигналов релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов [и др.] // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Матер. 11 Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 154–165.

71. Солдатов, А.В. Высшие гармоники тока синхронного генератора как информационные сигналы релейной защиты / А.В. Солдатов, В.И. Антонов [и др.] // Там же. – С. 380-385.
72. Антонов, В.И. Общие закономерности фильтров ортогональных оставляющих электрического сигнала / В.И. Антонов [и др.] // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Матер. 9-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – С.238-240.
73. Антонов, В.И. Особенности структурного анализа тока сетей 110 – 750 кВ / В.И. Антонов [и др.] // Там же. – С. 240-242.
74. Антонов, В.И. Использование принципа инвариантности оценки параметра сигналов в цифровых системах релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов, А.А. Ильин // Там же. – С. 247–249.
75. Антонов, В.И. Гибридные модели входных сигналов в системах синхронизированных векторных измерений (Phasor Measurement Unit) / В.И. Антонов [и др.] // РЕЛИАВЭКСПО-2013: Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: Сб. тез. и докл. междунар. науч.-практ. конф. и выставки. Чебоксары, 23-26 апр. 2013. – С.124-125.
76. Антонов, В.И. Структурный анализ входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов [и др.] // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: Сб. докл. 4-ой междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 3-7 июня 2013 г. – Доклад С.1.1-6. – С.1-8.
77. Антонов, В.И. Новый метод декомпозиции сигналов электроэнергетических систем по собственным модам / В.И. Антонов [и др.] // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Матер. 10-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С.73–79.
78. Антонов, В.И. Эффекты дискретизации сигналов и их использование в алгоритмах релейной защиты / В.И. Антонов [и др.] // Там же. – С. 325 - 327.
79. Антонов, В.И. Алгоритмы Фурье для воздействующих цифровых защит / В.И. Антонов [и др.] // РЕЛИАВЭКСПО-2012: Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: Сб. тез. и докл. междунар. науч.-практ. конф. и выставки. Чебоксары, 17-20 апр. 2012. – С. 75-76.
80. Антонов, В.И. Адаптивные структурные модели сигналов электроэнергетических систем / В.И. Антонов, А.А. Ильин, Н.М. Лазарева // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Матер. 9-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – С. 37-40.
81. Антонов, В.И. Цифровая обработка электроэнергетических сигналов с локальными нарушениями закономерностей / В.И. Антонов, А.А. Ильин, Н.М. Лазарева // Там же. – С. 40-45.
82. Ильин, А.А. Алгоритм определения характеристик стационарного режима динамических систем / А.А. Ильин, В.И. Антонов, Н.М. Лазарева // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Матер. 4-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2001. – С. 168-169.
83. Антонов, В.И. Повышение достоверности компонентных моделей сложных динамических систем / В.И. Антонов, Н.М. Лазарева // Там же. – С. 164-167.
84. Антонов, В.И. Робастные алгоритмы обработки сигналов с локальными нарушениями закономерностей / В.И. Антонов [и др.] // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Матер. 3-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2000. – С. 282-285.
85. Антонов, В.И. Реконструкция цифровых электроэнергетических сигналов, искаженных измерительным трактом регистратора / В.И. Антонов [и др.] // Там же. – С. 286-289.
86. Антонов, В.И. Задачи и основные методы структурного анализа электроэнергетических сигналов / В.И. Антонов [и др.] // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Матер. 2-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – С.167-170.
87. Антонов, В.И. Программный комплекс обработки и анализа аварийных процессов в электроэнергетических системах / В.И. Антонов, В.В. Курзанов // Там же. – С. 170-172.
88. Антонов, В.И. Идентификация цифровых электроэнергетических сигналов методом исключения компонентов / В.И. Антонов, А.А. Ильин // Там же. – С. 222-226.
89. Лазарева, Н.М. Структурные методы компрессии цифровых осциллограмм / Н.М. Лазарева, В.И. Антонов [и др.] // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Матер. 2-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1997. – С. 12-14.
90. Ильин, А.А. Метод исключения как элемент структурного анализа электротехнических сигналов / А.А. Ильин, С.В. Петров, В.И. Антонов // Там же. – С. 14-15.
91. Овечкин, Ю.А. Процессор структурного анализа сигналов электротехнических систем / Ю.А. Овечкин, Н.М. Лазарева, В.И. Антонов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Тез. докл. Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1996. – С. 140-141.
92. Антонов, В.И. Реконструкция сигнала электротехнической системы по ее информационной модели / В.И. Антонов, Н.М. Лазарева // Там же. – С. 138–140.

93. Антонов, В.И. Компрессия цифровых осциллограмм и передача их на удаленный терминал / В.И. Антонов, Н.М. Лазарева, Ю.А. Овечкин // Там же. – С. 102–104.
94. Антонов, В.И. Адаптивная идентификация информационной модели электротехнической системы / В.И. Антонов, Н.М. Лазарева // Там же. – С. 136–138.
95. Антонов, В.И. Цифровые информационные модели и алгоритмы с контролем достоверности результата для анализа динамических процессов / В.И. Антонов, Н.М. Лазарева // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Матер. Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1995. – С. 26–28.
96. Антонов, В.И. Интеллектуальный информационный комплекс анализа динамических процессов в электрических системах электроэнергетики / В.И. Антонов [и др.] // Там же. – С. 58–59.
97. Антонов, В.И. Микропроцессорные регистраторы и интеллектуальные программные комплексы анализа аварий в электроэнергетике / В.И. Антонов [и др.] // Кибернетика электрических систем, секция "Диагностика электрооборудования", 16 сессия семинара: Доклады. Новочеркасск, 21–24 сентября 1994.
98. Антонов, В.И. Компьютерные регистраторы электротехнических сигналов и интеллектуальные программные комплексы обработки цифровых осциллограмм / В.И. Антонов [и др.] // 1-я междунар. конф. по электромех. и электротехнол. (МКЭЭ-94): Тез. докл. Суздаль, 13–16 сентября, 1994. – Т. 2. – С. 60.
99. Антонов, В.И. Цифровая регистрация и автоматизированный анализ аварийных процессов в энергообъектах / В.И. Антонов, А.А. Ильин, В.М. Шевцов // Информационные средства и технологии: Тез. докл. 19-й междунар. науч.-техн. конф. Москва, 26–28 октября 1993.
100. Антонов, В.И. Автономный регистратор аварий-локатор повреждений: аппаратные средства, алгоритмическое и программное обеспечение / В.И. Антонов [и др.] // 10-я науч.-техн. конф. по обмену опытом проектир., наладки и эксплуатации устр. релейной защиты и автоматики в энергосистемах Урала: Тез. докл., 1992. – Екатеринбург. – С. 40–42.
101. Антонов, В.И. Оценка параметров электрической сети на основе спектральных компонентов / В.И. Антонов [и др.] // Современ. релейная защита электроэнергетич. объектов: Матер. Всесоюзн. науч.-техн. конф., 1991. – Чебоксары. – С. 42–43.
102. Лямец, Ю.Я. Спектральный анализ токов и напряжений электроэнергетических систем / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, А.П. Арсентьев // Проблемы комплекс. автоматиз. электроэнерг. систем на основе микропроцесс. техн.: Тез. докл. 1-й науч.-техн. конф. Киев, 1990. – Т.3. – С. 21–29.
103. Лямец, Ю.Я. Оптимизационный алгоритм контроля состояния электрической системы / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, Г.С. Нудельман // Там же. – Т.2. – С. 30–34.

Личный вклад: В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит постановка задач, вошедших в диссертацию, и их аналитическое решение. Авторские права на изобретения распределены поровну.

АНТОНОВ Владислав Иванович

ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ АДАПТИВНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать __ марта 2018 г. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Печ. л. 2,0.

Бумага офсетная. Печать оперативная Тираж 100 экз. Заказ № ____.

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
428015, г. Чебоксары, пр. Московский, д. 15