

На правах рукописи

МОКЕЕВ Алексей Владимирович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ
ЭНЕРГОСИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Специальность 05. 14. 02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

Научный консультант	доктор технических наук, профессор Ванин Валерий Кузьмич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Булычев Александр Витальевич
	доктор технических наук, профессор Дмитриков Владимир Федорович
	доктор технических наук, профессор Нагай Владимир Иванович
Ведущая организация:	ФГУП “ВНИИМ им. Д.И. Менделеева”

Защита состоится “11” ноября 2011 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главное здание, ауд. 325).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан “__” _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Эффективность современных автоматизированных систем технологического управления электрических сетей, электростанций и в целом энергосистем во многом определяется техническим совершенством применяемых микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, устройств телемеханики, измерительных приборов, устройств мониторинга электрооборудования и т.д. Перечисленные выше устройства нового поколения, объединенные согласно МЭК 61850 единым названием – интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ), должны обладать более высоким уровнем технического совершенства.

Перспективы развития энергосистем в ближайшие годы связаны с внедрением технологий активно-адаптивных (интеллектуальных) сетей и использованием систем автоматического управления и регулирования нового поколения. Совершенствование управления энергосистемами предполагает широкое применение быстродействующих ИЭУ на основе синхронизированных измерений векторов тока и напряжения основной гармоники. Вместе с тем в ближайшей перспективе для автоматизации электрических сетей 6-110 кВ наиболее предпочтительны ИЭУ на основе синхронизированных измерений параметров режима электрической сети. Внедрение подобных ИЭУ позволит создать недорогие и эффективные системы управления и регулирования подстанций в рамках создания активно-адаптивных электрических сетей.

В связи с совершенствованием технологической базы управления электрическими сетями к современным ИЭУ предъявляются повышенные требования к основным показателям качества обработки сигналов, определяющих их техническое совершенство. Прежде всего, это относится к быстродействию и точности обработки сигналов, обеспечению синхронности измерений параметров режима электрической сети.

Большой вклад в развитие методов обработки сигналов в электроэнергетике внесли российские и зарубежные ученые: А.М. Федосеев, В.Л. Фабрикант, Г.М. Павлов, Я.Л. Арцишевский, А.В. Булычев, В.К. Ванин, В.Ф. Дмитриков, А.Ф. Дьяков, С.Л. Кужеков, Ю.Я. Лямец, Б.К. Максимов, В.И. Нагай, В.И. Новаш, В.Н. Новелла, Н.И. Овчаренко, Р.В. Темкина, А.С. Саухатас, Е.М. Ульяницкий, В.М. Шевцов, Э.М. Шнеерсон, В.Л. Mann, J.F. Morisson, J. Mokino, M. Kezunovic, A.G. Padke, G.D. Rockefeller, M.A. Sachdev, E.O. Schweitzer и другие ученые.

Разработка современных ИЭУ требует применения более эффективных алгоритмов обработки сигналов, обеспечивающих требуемые показатели качества функционирования ИЭУ при всех возможных режимах работы энергосистемы. Задаче обеспечения необходимого качества функционирования ИЭУ при различных сочетаниях параметров принужденных и свободных составляющих токов и напряжений контролируемого энергообъекта уделяется недостаточное внимание при проектировании и исследовании современных ИЭУ, так как ее решение сопряжено с большим объемом вычислений. В связи с этим актуальной является задача разработки эффективных методов анализа и синтеза алгоритмов обработки сигналов ИЭУ с учетом нестационарного характера контролируемых процессов.

Цель работы. Исследование, разработка и внедрение эффективных методов проектирования и анализа интеллектуальных электронных устройств энергосистем, совершенствование математического и алгоритмического обеспечения ИЭУ с целью повышения их технического совершенства, расширения функциональных

возможностей для повышения надежности, наблюдаемости и управляемости энергосистем.

Задачи исследования. Исходя из поставленной цели определены следующие задачи исследований:

1. Для исследований интеллектуальных устройств на соответствие современным требованиям по качеству функционирования ИЭУ, связанных с обеспечением высокого быстродействия и точности обработки сигналов, обеспечением необходимого уровня достоверности контроля параметров режима энергосистемы, требуется совершенствование методов анализа функционирования ИЭУ. Применяемые методы анализа функционирования ИЭУ должны обеспечивать эффективное решение задачи определения показателей качества при всех возможных сочетаниях параметров входных сигналов ИЭУ, соответствующих токам и напряжениям нормальных и аварийных режимов энергосистем.
2. Повышение технического совершенства ИЭУ энергосистем за счет применения более совершенных алгоритмов фильтрации сигналов. Постановка задачи фильтрации сигналов ИЭУ энергосистем в условиях нестационарного характера контролируемых процессов и разработка методов синтеза фильтров ИЭУ энергосистем, обеспечивающих заданные показатели качества обработки сигналов при различных сочетаниях параметров принужденных и свободных составляющих токов и напряжений контролируемого энергообъекта.
3. Разработка алгоритмов обработки сигналов ИЭУ на основе технологии синхронизированных измерений с целью повышения эффективности использования ИЭУ в автоматизированных системах технологического управления и АСУ ТП подстанций активно-адаптивных электрических сетей.
4. Разработка специализированных алгоритмов ИЭУ, обеспечивающих снижение вычислительных затрат при реализации указанных алгоритмов и использование более простых микроконтроллеров или сигнальных процессоров.
5. Разработка рекомендаций по эффективному применению ИЭУ в составе автоматизированных систем технологического управления электрических сетей, электростанций и энергосистем на основе математического моделирования, натуральных испытаний и опыта эксплуатации ИЭУ нового поколения.

Методы исследования. Разработанные в диссертационной работе научные положения основываются на известных достижениях в области релейной защиты и автоматики энергосистем, теоретических основ электротехники, теории электромагнитных и электромеханических переходных процессов, теории автоматического управления и цифровой обработки сигналов.

Достоверность результатов работы подтверждается математическим и физическим моделированием разработанных ИЭУ энергосистем, а также опытом эксплуатации интеллектуальных электронных устройств ЭНИП-2 в составе автоматизированных систем технологического управления ФСК, холдинга МРСК, оптовых и территориальных генерирующих компаниях, электростанциях Русгидро.

Основные научные результаты и их новизна состоят в следующем:

1. Предложены двухстадийные методы проектирования ИЭУ. Показано, что основные показатели качества функционирования ИЭУ чаще всего определяются применяемыми алгоритмами фильтрации сигналов.
2. Для исследования ИЭУ нового поколения, выполняющих быстрые измерения и контроль параметров режима электрической сети в условиях интенсивных переходных процессов, разработаны эффективные методы анализа качества

- функционирования аналоговых фильтров-прототипов и цифровых фильтров.
3. Предложено и обосновано использование для анализа и синтеза частотных фильтров ИЭУ спектральных представлений преобразования Лапласа, в том числе для решения задач анализа качества функционирования фильтров, выявления предельных возможностей фильтров ИЭУ по быстродействию при заданной точности обработки сигналов и для формирования требований к трехмерным частотным характеристикам фильтров.
 4. Предложены, разработаны и реализованы с учетом специфики фильтрации сигналов в современных ИЭУ энергосистем методы синтеза частотных фильтров, обеспечивающих требуемые показатели качества обработки сигналов при различных сочетаниях параметров принужденных и свободных составляющих токов и напряжений контролируемого энергообъекта.
 5. Для ИЭУ на основе технологии векторных измерений предложен метод синтеза робастных усредняющих фильтров с конечной импульсной характеристикой. Впервые синтезированы асимметричные временные окна усредняющих фильтров, которые обеспечивают наилучшие показатели качества обработки сигналов ИЭУ энергосистем.
 6. Предложенные обобщенные математические модели входных сигналов и частотных фильтров ИЭУ энергосистем в сочетании со спектральными представлениями в координатах комплексной частоты позволили совместить спектральный подход и временной подход для анализа линейных систем и синтеза быстрых алгоритмов анализаторов спектра и фильтров с конечной импульсной характеристикой. Реализация указанных алгоритмов позволит снизить требования к производительности микроконтроллеров или сигнальных процессоров при реализации современных ИЭУ энергосистем.
 7. Разработаны робастные и адаптивные алгоритмы обработки сигналов для устройств релейной защиты и автоматики, многофункциональных ИЭУ и ИЭУ на основе технологии векторных измерений, обеспечивающие необходимое качество обработки сигналов.
 8. Предложены способы совершенствования автоматизированных систем технологического управления и АСУ ТП подстанций при использовании ИЭУ на основе синхронизированных измерений параметров режима электрической сети и ИЭУ на основе технологии векторных измерений.

Практическая ценность работы и реализация результатов работы.

1. Для повышения технического совершенства ИЭУ на основе использования известных алгоритмов обработки сигналов устройств релейной защиты и других ИЭУ энергосистем разработаны методы синтеза робастных фильтров, обладающих малой чувствительностью к изменению параметров токов и напряжений контролируемого энергообъекта.
2. Результаты исследований и предложенные методы синтеза позволили усовершенствовать существующие и разработать новые алгоритмы функционирования ИЭУ различного функционального назначения, в том числе для решения задач измерения параметров режима электрической сети на основе среднеквадратических и средневыпрямленных значений токов и напряжений, на основе токов и напряжений основной гармоники, на основе синхронных измерений комплексных амплитуд тока и напряжения основной гармоники.
3. Для ИЭУ на основе технологии векторных измерений разработаны робастные и адаптивные алгоритмы обработки сигналов, обеспечивающие сочетание высо-

кого быстродействия и высокой точности обработки сигналов. Реализация указанных алгоритмов позволит существенно повысить техническое совершенство устройств релейной защиты и других ИЭУ, позволит расширить их функциональные возможности, повысит эффективность использования ИЭУ в автоматизированных системах технологического управления и АСУ ТП подстанций.

4. Теоретические и практические результаты, полученные в диссертационной работе, использованы в серийных интеллектуальных электронных устройствах ЭНИП-2 и ЩМ-120, в опытном образце устройства ЭНИП-3 на основе технологии векторных измерений, в программно-техническом комплексе "ES-Энергия", используемом для построения автоматизированных систем технологического управления и АИИС КУЭ.
5. Теоретические и практические результаты исследований применимы не только в автоматических и измерительных устройствах энергосистем, но и для разработки интеллектуальных устройств для других отраслей промышленности.
6. Материалы исследований опубликованы в учебных пособиях и используются в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного политехнического университета и Северного (Арктического) федерального университета.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на 30 международных и 24 всероссийских симпозиумах, семинарах и конференциях, в том числе на научно-техническом семинаре "Программируемые устройства релейной защиты и автоматики энергосистем" (Рига, 1986), Восьмой научно-технической конференции по эксплуатации и проектированию УРЗиА в энергосистемах СЭС Урала (Свердловск, 1986), Специализированном научно-техническом семинаре "Системы АСКУЭ и автоматизация расчетов с потребителями" (2000-2008), Специализированном научно-техническом семинаре "Современные средства телемеханики, организация рабочих мест и щитов управления" (2001-2008), Международной научно-технической конференции "Релейная защита и автоматика энергосистем" (Москва, 2004, 2006), Международном научно-техническом семинаре "Кибернетика электрических систем" (ЮРГТУ, Новочеркасск, 2004, 2008), Международном научно-техническом семинаре "Прогресс в проектировании, строительстве и эксплуатации электрических сетей" (Москва, 2005-2009), Международной научно-технической конференции "Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA" (Москва, 2006-2011), Международной научно-практической конференции "Современные энергетические системы и управление ими" (ЮРГТУ, Новочеркасск, 2006, 2007), IEEE International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON-2007 и SIBCON-2009 (Tomsk), The 7th International Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Processing SMMSP-2007 (TICSP, Moscow, 2007), International Conference on Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems CIGRE-2007 (Cheboksary) и CIGRE-2009 (Moscow).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 119 печатных работ, в том числе 2 авторских свидетельства. После получения ученой степени кандидата технических наук опубликовано 114 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка и 7 приложений. Общий объем работы составляет 240 страниц основного текста, включая 102 рисунка, 23 таблицы и 18 страниц библиографического списка (265 наименований), а также приложения общим объемом 67 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность темы диссертации с точки зрения современного этапа развития электроэнергетики, в том числе решение задач повышения надежности, наблюдаемости и управляемости энергосистем, а также в связи с совершенствованием технологической базы управления электрическими сетями и созданием активно-адаптивных электрических сетей.

Сформулированы задачи исследования, связанные с разработкой методов обработки сигналов электронных устройств энергосистем нового поколения. Отмечены научная новизна, практическая ценность работы, основные положения, выносимые на защиту, а также структура представленной работы.

В первой главе рассмотрены вопросы современного состояния и тенденций развития ИЭУ энергосистем различного функционального назначения, в том числе микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, цифровых измерительных преобразователей телемеханики, многофункциональных измерительных приборов, устройств для мониторинга электромеханических переходных процессов и т.д.

Приведены основные тенденции развития автоматизированных систем технологического управления и АСУ ТП подстанций на основе широкого применения современных ИЭУ. Показано, что несмотря на возрастание в настоящее время роли многофункциональных ИЭУ энергосистем, указанная тенденция претерпит значительные изменения при переходе на две принципиально новые технологии обработки и передачи данных, связанных с применением шины процесса согласно МЭК 61850 и технологии векторных измерений.

На основании документации заводов-производителей и лабораторных исследований произведен сравнительный анализ показателей качества функционирования современных устройств релейной защиты и многофункциональных измерительных преобразователей телемеханики. Отмечено, что показатели качества обработки сигналов большинства многофункциональных ИЭУ, не отвечают современным требованиям с точки зрения сочетания высокого быстродействия и требуемой точности обработки сигналов.

Рассмотрены вопросы технического и математического обеспечения ИЭУ, в том числе вопросы математического описания входных сигналов ИЭУ во временной и спектральной областях. Показано возрастание роли фильтрации сигналов в современных ИЭУ различного функционального назначения. Рассмотрены особенности решения типовых задач фильтрации в ИЭУ энергосистем для последующего измерения и контроля параметров режима электрической сети, в том числе задачи фильтрация синусоидальных сигналов промышленной частоты на фоне помех в виде свободных составляющих переходных процессов и высших гармоник, задачи фильтрации для формирования действующих значений токов и напряжений и т.д.

Рассмотрены общие вопросы синтеза алгоритмов обработки сигналов ИЭУ энергосистем. В связи со сложностью синтеза оптимальных алгоритмов обработки сигналов ИЭУ предлагается производить синтез в два этапа. На первом этапе производится синтез алгоритмов обработки сигналов при отсутствии помех. Задачей второго этапа является синтез оптимальных стационарных или нестационарных частотных фильтров. Показано, что наиболее полно учитывается специфика обработки сигналов в ИЭУ при применении адаптивных алгоритмов обработки сигналов, в том числе адаптивных алгоритмов фильтрации сигналов. Вместе с тем

отмечено, что среди стационарных фильтров наиболее перспективно использование робастных алгоритмов фильтрации, обладающих малой чувствительностью к изменению спектров полезного сигнала и помехи.

Сформулированы основные этапы синтеза робастных фильтров с учетом специфики обработки сигналов в ИЭУ энергосистем:

1. Формирование математических моделей входных сигналов ИЭУ.
2. Выбор спектрального представления входных сигналов ИЭУ с целью упрощения формализации требований к частотным характеристикам фильтров.
3. Синтез фильтров в соответствии с некоторым критерием (критериями) оптимальности, проверка физической реализуемости и устойчивости фильтров.
4. Анализ фильтров с целью проверки обеспечения заданных требований по качеству обработки сигналов при всех возможных значениях параметров полезного сигнала и помехи.
5. Выбор наиболее эффективного способа реализации цифровых фильтров.

С учетом аналоговой природы контролируемых процессов в большинстве практических случаев проектирование фильтров ИЭУ энергосистем целесообразно производить на основе аналоговых фильтров-прототипов с последующим переходом к описанию цифровых фильтров. Сравнительный анализ фильтров и последующий анализ качества функционирования ИЭУ энергосистем также целесообразно производить для аналоговых фильтров-прототипов или при использовании моделей дискретных сигналов и дискретных фильтров для обеспечения независимости от типа используемого микроконтроллера или сигнального процессора, его разрядности, погрешностей АЦП и т.д.

Вторая глава диссертации посвящена вопросам математического моделирования и анализа функционирования ИЭУ энергосистем.

В большинстве практических случаев сигналы и импульсные функции частотных фильтров ИЭУ могут быть описаны набором непрерывных/дискретных полубесконечных или финитных затухающих колебательных составляющих. Так входные сигналы ИЭУ, соответствующие токам и напряжениям контролируемого энергообъекта для нескольких следующих друг за другом режимов, могут быть представлены для каждого режима работы энергосистемы в виде совокупности затухающих колебательных составляющих конечной длительности.

Математическое описание обобщенного комплексного/вещественного непрерывного и дискретного входного сигнала ИЭУ может быть записано в следующей компактной форме

$$\dot{x}(t) = \dot{\mathbf{X}}^T e^{\mathbf{P}(Ct-t)} - \dot{\mathbf{X}}'^T e^{\mathbf{P}(Ct-t)}, \quad x(t) = \text{Re}(\dot{x}(t)), \quad (1)$$

$$\dot{x}(k) = \dot{\mathbf{X}}^T Z(\mathbf{P}, \mathbf{C}k - \mathbf{K}) - \dot{\mathbf{X}}'^T Z(\mathbf{P}, \mathbf{C}k - \mathbf{K}'), \quad x(k) = \text{Re}(\dot{x}(k)), \quad (2)$$

где $\dot{\mathbf{X}} = [\dot{X}_n]_N = [X_{m_n} e^{-j\varphi_n}]_N$ и $\dot{\mathbf{X}}' = [\dot{X}'_n]_N = [X'_n e^{p_n(t'_n - t_n)}]_N$ – векторы (вектор-столбцы) комплексных амплитуд двух компонент входного сигнала; $\mathbf{p} = [p_n]_N = [-\beta_n + j\omega_n]_N$ – вектор комплексных частот, $\mathbf{t} = [t_n]_N$, $\mathbf{t}' = [t'_n]_N$, $\mathbf{K} = [K_n]_N$ и $\mathbf{K}' = [K'_n]_N$ – векторы, элементы которых определяют временную задержку компонент входного сигнала; $\mathbf{P} = \text{diag}(\mathbf{p})$; \mathbf{C} – единичный вектор; T – шаг дискретизации; $Z(p, k) = e^{pkT}$.

При $\dot{\mathbf{X}}' = \mathbf{0}$ и $t=0$ ($\mathbf{K}=\mathbf{0}$) входной сигнал описывается в виде набора непрерывных (дискретных) “полубесконечных” синусоидальных, постоянных, экспоненциальных и затухающих колебательных составляющих.

При моделировании и анализе фильтров следует учитывать, что ИЭУ осуществляют контроль процессов аналоговой природы. Поэтому аналоговая система-прототип идеальна с теоретической точки зрения. Введено понятие аналогового фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) и модифицированы методы перехода от аналогового КИХ-фильтра к цифровому фильтру. Дополнительно такой подход обеспечивает простой и эффективный способ синтеза быстрых алгоритмов цифровых КИХ-фильтров для ИЭУ энергосистем.

Математическое описание аналогового фильтра-прототипа и цифрового (дискретного) КИХ-фильтра представим в виде следующих обобщенных импульсных функций

$$\dot{g}(t) = \dot{\mathbf{G}}^T e^{\mathbf{q}t} - \dot{\mathbf{G}}'^T e^{\mathbf{Q}(Ct-T)}, \quad g(t) = \text{Re}(\dot{g}(t)), \quad (3)$$

$$\dot{g}(k) = \dot{\mathbf{G}}^T Z(\mathbf{q}, k) - \dot{\mathbf{G}}'^T Z(\mathbf{Q}, Ck - \mathbf{N}), \quad g(k) = \text{Re}(\dot{g}(k)), \quad (4)$$

Таким образом, для описания аналогового или цифрового фильтра достаточно использовать векторы комплексных амплитуд двух компонент импульсной функции $\dot{\mathbf{G}} = [\dot{G}_m]_M = [k_m e^{-j\phi_m}]_M$ и $\dot{\mathbf{G}}' = [\dot{G}'_m]_M = [\dot{G}'_m e^{\rho_m T_m}]_M$, вектор комплексных частот $\mathbf{q} = [\rho_m]_M = [-\alpha_m + j\omega_m]_M$ и векторы $\mathbf{T} = [T_m]_M$ и $\mathbf{N} = [N_m]_M = [T_m / T]_M$, определяющие длительность составляющих импульсной функции фильтра; $\mathbf{Q} = \text{diag}(\mathbf{q})$. Импульсная функция (3) при $\dot{\mathbf{G}}' = \mathbf{0}$ соответствует фильтру с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтру).

Передачная функция фильтра с обобщенной комплексной импульсной функцией (3)

$$\underline{K}(p) = \sum_{m=1}^M \underline{K}_m(p) = \dot{\mathbf{G}}^T \mathbf{S}(p) - \dot{\mathbf{G}}'^T \mathbf{S}'(p), \quad (5)$$

где $\mathbf{S}(p) = [S_m]_M = [(p - \rho_m)^{-1}]_M$, $\mathbf{S}'(p) = [S'_m]_M = [(p - \rho_m)^{-1} e^{-pT_m}]_M$, $\underline{K}_m(p) = \dot{G}_m S_m(p) - \dot{G}'_m S'_m(p)$.

Передачная функция $\underline{K}(p)$ является изображением комплексной импульсной функции (3) и содержит наряду с комплексной переменной p комплексные коэффициенты, определяемые векторами $\dot{\mathbf{G}}$, $\dot{\mathbf{G}}'$ и \mathbf{q} . Фильтру с передачной функцией $\underline{K}(p)$ соответствуют два обычных фильтра.

Приведенные выше выражения соответствуют параллельному соединению фильтров $\underline{K}_m(p)$ с импульсной функцией $\dot{g}_m(t) = \dot{G}_m e^{\rho_m t} - \dot{G}'_m e^{\rho_m(t-T_m)}$. При синтезе фильтров в ряде случаев будет использоваться и последовательное соединение фильтров с набором импульсных функций вида $\dot{g}_m(t)$

$$\underline{K}(p) = \prod_{m=1}^M \underline{K}_m(p). \quad (6)$$

Однотипность математического описания сигналов и частотных фильтров ИЭУ позволяет с одной стороны использовать единообразную компактную форму

их описания в виде набора комплексных амплитуд, комплексных частот и временных параметров, а с другой стороны значительно упрощает решения задач математического моделирования и анализа частотных фильтров ИЭУ при различных вариациях параметров входных сигналов, соответствующих токам и напряжениям контролируемого энергообъекта.

На основе исследования особенностей спектральных представлений преобразования Лапласа, или по-другому, спектральных представлениях в координатах комплексной частоты, для обобщенного сигнала (1) предложен метод анализа линейных систем (линейных цепей, фильтров). Целесообразность использования указанных спектральных представлений следует из того простого факта, что затухающая колебательная составляющая является базовой функцией преобразования Лапласа. Предлагаемый метод анализа следует рассматривать как расширение символического метода и его преимущества связаны с использованием простых алгебраических операций для определения параметров принужденных и свободных составляющих реакции линейной системы (3) на входное воздействие, описываемое совокупностью "полубесконечных" или финитных затухающих колебательных составляющих.

На рис. 1 и рис. 2 в качестве примера приведены выражения для определения принужденных и свободных составляющих на выходе аналогового/дискретного БИХ-фильтра с передаточной/системной функцией $K(p)$ и $K(z)$ при подаче на его вход сигнала в виде совокупности непрерывных/дискретных затухающих колебательных составляющих. В выражениях используются следующие обозначения: $X(p)$ или $X(z)$ – изображение непрерывного или дискретного входного сигнала, $Z(p,k) = e^{pkT}$, $Z = e^{PT}$, $\Omega = e^{QT}$.

$$\begin{array}{c} \dot{\mathbf{X}}, x(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{X}}^T e^{pt}) \\ \dot{\mathbf{X}}, x(k) = \text{Re}(\dot{\mathbf{X}}^T Z(\mathbf{P}, k)) \end{array} \begin{array}{c} K(p) \\ K(z) \end{array} \begin{array}{c} \dot{\mathbf{Y}} = K(\mathbf{P})\dot{\mathbf{X}}, y_1(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{Y}}^T e^{pt}) \\ \dot{\mathbf{Y}} = K(\mathbf{Z})\dot{\mathbf{X}}, y_1(k) = \text{Re}(\dot{\mathbf{Y}}^T Z(\mathbf{P}, k)) \end{array}$$

Рис. 1. Определение принужденных составляющих выходного сигнала

$$\begin{array}{c} \dot{\mathbf{G}}, g(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{G}}^T e^{qt}) \\ \dot{\mathbf{G}}, g(k) = \text{Re}(\dot{\mathbf{G}}^T Z(\mathbf{Q}, k)) \end{array} \begin{array}{c} X(p) \\ X(z) \end{array} \begin{array}{c} \dot{\mathbf{V}} = X(\mathbf{Q})\dot{\mathbf{G}}, y_2(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{V}}^T e^{qt}) \\ \dot{\mathbf{V}} = X(\mathbf{\Omega})\dot{\mathbf{G}}, y_2(k) = \text{Re}(\dot{\mathbf{V}}^T Z(\mathbf{Q}, k)) \end{array}$$

Рис. 2. Определения свободных составляющих выходного сигнала

Приведенные на рис. 1 и рис. 2 выражения вход-выход распространены на случаи фильтров с конечной импульсной характеристикой и финитных сигналов. На основе предложенного метода эффективно решаются задачи анализа качества функционирования ИЭУ энергосистем при различных сочетаниях параметрах токов и напряжений контролируемого энергообъекта. Указанные зависимости для линейных систем (фильтров) справедливы и для линейных цепей, которые используются в схемах замещения энергосистем при расчете нормальных и аварийных режимов. Таким образом, для описания контролируемых процессов и функционирования ИЭУ энергосистем становится возможным использование единых образных моделей и единого метода анализа.

Использование обобщенной модели фильтра (3) позволяет совместить спектральный подход и метод пространства состояний для анализа и синтеза частотных фильтров ИЭУ энергосистем. Обобщенной импульсной функции (3) соответ-

ствуется следующее дифференциальное уравнение

$$\frac{d\dot{\mathbf{Y}}(t)}{dt} = \mathbf{A}\dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{B}x(t) + \mathbf{D}x(\mathbf{C}t - \mathbf{T}), \quad y(t) = \text{Re}(\mathbf{C}^T \dot{\mathbf{Y}}(t)), \quad (7)$$

где $\mathbf{A} = \text{diag}([\rho_m]_M)$, $\mathbf{D} = \text{diag}([\dot{G}'_m]_M)$, $\mathbf{B} = [\dot{G}_m]_M$.

В случае БИХ-фильтров ($\mathbf{D}=\mathbf{0}$) выражение (7) соответствует одной из известных форм метода пространства состояний и поэтому выражение (7) можно рассматривать как обобщение метода пространства состояний для линейных систем с конечной импульсной функцией. С другой стороны, каждое из M -го количества независимых уравнений (7) описывает простейший анализатор спектра в координатах комплексной частоты.

Дополнительное преимущество предложенного описания фильтров (3) и (7) связано с простотой формирования быстрых алгоритмов КИХ-фильтров. Так, в случае применения метода дискретизации дифференциального уравнения получим следующее выражение для быстрого алгоритма КИХ-фильтра

$$\dot{\mathbf{Y}}(k) = \mathbf{H}x(k) - \mathbf{Q}x(\mathbf{C}k - \mathbf{N}) + \mathbf{F}\dot{\mathbf{Y}}(k-1), \quad y(k) = \text{Re}(\mathbf{C}^T \dot{\mathbf{Y}}(k)), \quad (8)$$

где $\mathbf{F} = \text{diag}\left(\left[\frac{1}{(1-\rho_m T)}\right]_M\right)$, $\mathbf{Q} = \text{diag}\left(\left[\frac{T\dot{G}'_m}{1-\rho_m T}\right]_M\right)$, $\mathbf{H} = \left[\frac{T\dot{G}_m}{1-\rho_m T}\right]_M$.

Алгоритм КИХ-фильтра представлен рис. 3, где $\mathbf{Z} = [z^{-N_m}]_M$.

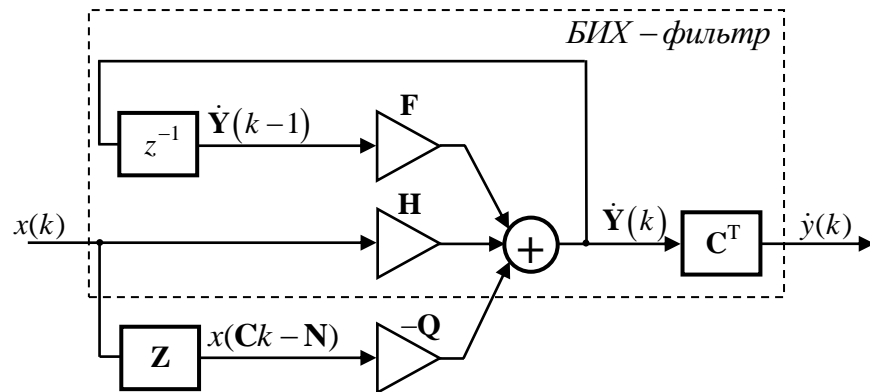


Рис. 3. Структурная схема быстрого алгоритма реализации КИХ-фильтра

Преимущество метода пространства состояний, как известно, состоит в однотипности математического описания стационарных и нестационарных линейных систем. Поэтому на основе предложенного подхода может быть получено и аналогичным образом интерпретировано описание и для нестационарных фильтров. При этом матрицы \mathbf{F} , \mathbf{Q} и \mathbf{H} в уравнении (8) будут зависеть от времени

$$\dot{\mathbf{Y}}(k) = \mathbf{H}(k)x(k) - \mathbf{Q}(k)x(\mathbf{C}k - \mathbf{N}) + \mathbf{F}(k)\dot{\mathbf{Y}}(k-1). \quad (9)$$

На основе выражения (9) получен быстрый алгоритм для нестационарного фильтра с периодическими коэффициентами, который используется для реализации дискретного преобразования Фурье. При использовании изложенного подхода синтезированы быстрые алгоритмы для дискретных оконных преобразований Фурье и Лапласа для применения в современных ИЭУ энергосистем.

В третьей главе рассмотрены вопросы использования различных спектральных представлений для анализа и синтеза фильтров ИЭУ энергосистем.

Частотно-временные представления сигналов на основе преобразования

Фурье связаны с использованием текущего и мгновенного спектров сигналов. Показано, что исследования текущих спектров сигналов ИЭУ позволяет определить минимальное время, необходимое для разделения полезного сигнала и помехи. Исследование мгновенных спектров полезного сигнала и помехи позволяет со спектральной точки зрения объяснить причины погрешностей широко используемых в настоящее время алгоритмов обработки сигналов ИЭУ энергосистем.

С позиций частотно-временных представлений сигналов и линейных систем в координатах комплексной частоты предложено три метода анализа частотных фильтров. Спектры полубесконечных сигналов (1) и частотные характеристики БИХ-фильтров (3) в координатах комплексной частоты наряду со сплошным трехмерным спектром содержат соответственно N и M дискретных компонент, которые определяют закон изменения принужденных (рис.1) и свободных (рис.2) составляющих реакции фильтра по отношению к составляющим входного сигнала и импульсной функции фильтра. В двух других предлагаемых методах анализа фильтров (линейных систем) динамические свойства фильтра учитываются при использовании только одной из указанных групп составляющих.

При подстановке в интеграл свертки выражения для комплексной импульсной функции БИХ-фильтра (3) получим следующую зависимость для выходного сигнала фильтра

$$\dot{y}(t) = \int_0^t x(\tau) \dot{g}(t - \tau) d\tau = \dot{\mathbf{G}}^T X(\mathbf{Q}, t) e^{\mathbf{Q}t}, \quad (10)$$

где $X(p, t) = \int_0^t x(\tau) e^{-p\tau} d\tau$ - текущая спектральная плотность входного сигнала при использовании преобразования Лапласа.

Следовательно, выходной сигнал БИХ-фильтра зависит от значений текущего спектра по Лапласу входного сигнала на комплексных частотах импульсной функции фильтра и может быть рассчитан согласно выражений рис. 4.

$$\frac{\dot{\mathbf{G}}}{g(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{G}}^T e^{\mathbf{Q}t})} \boxed{X(p, t)} \frac{\dot{\mathbf{Y}}(t) = X(\mathbf{Q}, t) \dot{\mathbf{G}}}{y(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{Y}}(t)^T e^{\mathbf{Q}t})}$$

Рис. 4. Определение реакции фильтра

Подставив выражение для комплексного полубесконечного входного сигнала (1) в выражение для интеграла свертки получим следующую зависимость

$$\dot{y}(t) = \int_0^t \dot{x}(\tau) g(t - \tau) d\tau = \dot{\mathbf{X}}^T K(\mathbf{P}, t) e^{\mathbf{P}t}, \quad (11)$$

где $K(p, t) = \int_0^t g(\tau) e^{-p\tau} d\tau$ - зависящая от времени передаточная функция фильтра.

Тогда зависимость вход-выход для БИХ-фильтра (3) при подаче на его вход полубесконечного сигнала может быть представлена выражениями рис. 5.

$$\frac{\dot{\mathbf{X}}}{x(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{X}}^T e^{\mathbf{P}t})} \boxed{K(p, t)} \frac{\dot{\mathbf{Y}}(t) = K(\mathbf{P}, t) \dot{\mathbf{X}}}{y(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{Y}}(t)^T e^{\mathbf{P}t})}$$

Рис. 5. Определение реакции фильтра

Таким образом, значение модуля передаточной функции $K(p_n, t)$ описывает закон изменения огибающей n -ой составляющей выходного сигнала фильтра, а ее аргумент – изменение фазы указанной выше компоненты выходного сигнала. После окончания переходных процессов в фильтре комплексная амплитуда $\dot{Y}_n(t)$ будет совпадать с комплексной амплитудой принужденной составляющей \dot{Y}_n .

Амплитудно-частотные и фазово-частотные функции фильтра в этом случае будут являться функциями трех переменных и для их практической визуализации следует использовать подход, основанный на использовании трехмерных частотных характеристик при фиксированном значении вещественной или мнимой части комплексной частоты. На рис. 6 представлен график функции $|K(-\beta_1 + j\omega, t)|e^{-\beta_1 t}$ при значениях комплексной частоты $p = -\beta_1 + j\omega$. График функции, равный указанному выше произведению на комплексной частоте входного сигнала $p_1 = -\beta_1 + j\omega_1$, совпадает с огибающей (кривые 1 и 2) выходного сигнала фильтра (кривая 3).

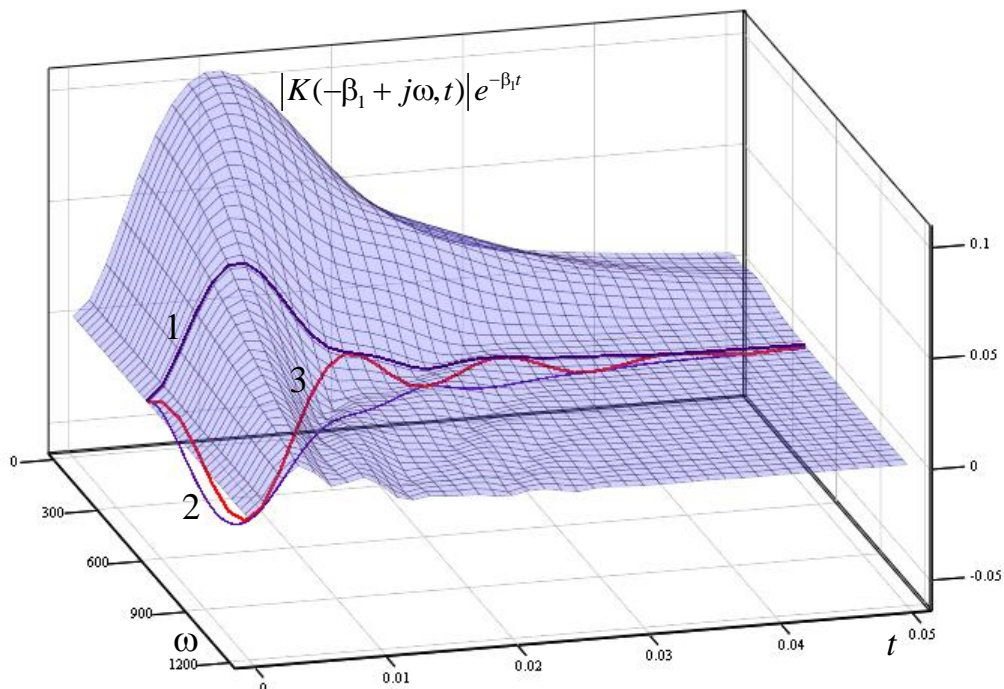


Рис. 6. График функции $|K(-\beta_1 + j\omega, t)|e^{-\beta_1 t}$

Предлагаемые методы анализа фильтров в силу простоты вычислений являются эффективным инструментом для анализа показателей качества обработки сигналов частотными фильтрами ИЭУ при различных значениях параметров полезного сигнала и помехи. С другой стороны, полученные выражения вход-выход позволяют сформулировать требования к частотным характеристикам фильтров в координатах комплексной частоты, что обеспечивает значительное упрощение синтеза фильтров для ИЭУ различного функционального назначения.

В третьей главе рассмотрены также вопросы разработки быстрых алгоритмов анализаторов спектра на основе оконных преобразований Фурье и Лапласа. На основании сравнения с алгоритмами быстрого преобразования Фурье показана эффективность разработанных алгоритмов применительно к ИЭУ энергосистем. Предложены два способа реализации быстрых анализаторов спектра в координатах комплексной частоты, преодолевающие трудности прямой реализации оконного преобразования Лапласа.

В четвертой главе произведен анализ алгоритмов обработки сигналов ИЭУ различного функционального назначения. Для определения показателей качества обработки сигналов ИЭУ при различных параметрах полезного сигнала и помехи использовались разработанные автором методы анализа линейных систем, основанные на спектральных представлениях преобразования Лапласа.

Наиболее распространенные алгоритмы обработки сигналов могут быть сведены на примере своих аналоговых прототипов к структурным схемам, представленных на рис. 7. Еще один из распространенных алгоритмов связан со структурной схемой рис. 7 б) при $K_2(p) = K_1(p)H(p)$.

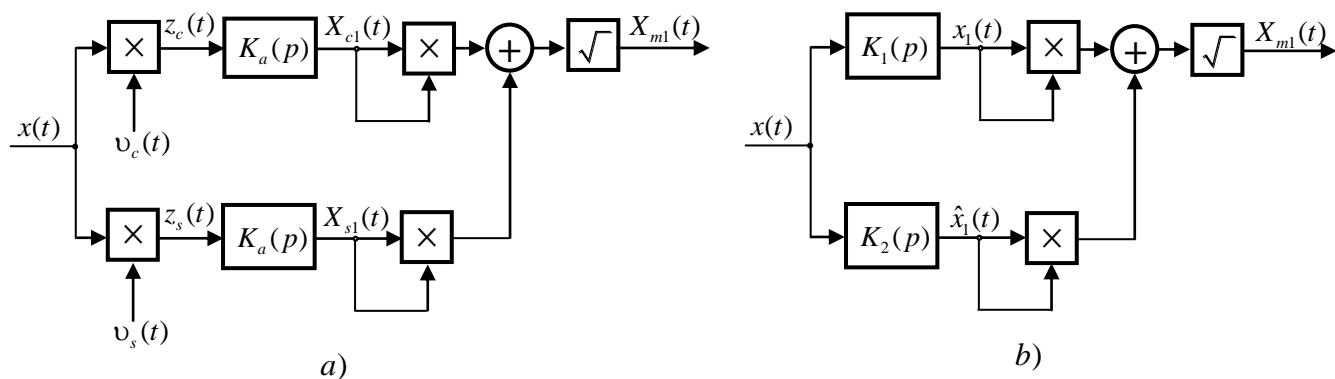


Рис. 7. Структурные схемы алгоритмов обработки сигналов

В приведенных структурных схемах используются следующие обозначения: $x(t)$ – входной сигнал, пропорциональный контролируемому току или напряжению; $x_1(t) = X_{m1} \cos(\omega_1 t - \varphi)$ – полезный сигнал промышленной частоты ω_1 ; $\hat{x}_1(t)$ – ортогональная составляющая полезного сигнала $x_1(t)$; X_{c1} и X_{s1} – ортогональные составляющие комплексной амплитуды $\dot{X}_{m1} = X_{c1} + jX_{s1}$ полезного сигнала; $K_a(p)$ – передаточная функция усредняющего КИХ-фильтра.

В установившемся режиме работы при номинальной частоте энергосистемы при отсутствии помех сигналы на выходе усредняющего КИХ-фильтра (рис. 7) $X_{c1}(t)$ и $X_{s1}(t)$ соответствуют ортогональным составляющим комплексной амплитуды полезного сигнала, а сигналы $x_1(t)$ и $\hat{x}_1(t)$ на выходе фильтров с передаточными функциями $K_1(p)$ и $K_2(p)$ – соответственно полезному сигналу и его ортогональной составляющей. Вследствие нестационарного характера входных сигналов устройств защиты сигналы на выходе фильтров рис. 7 а) зависят от времени.

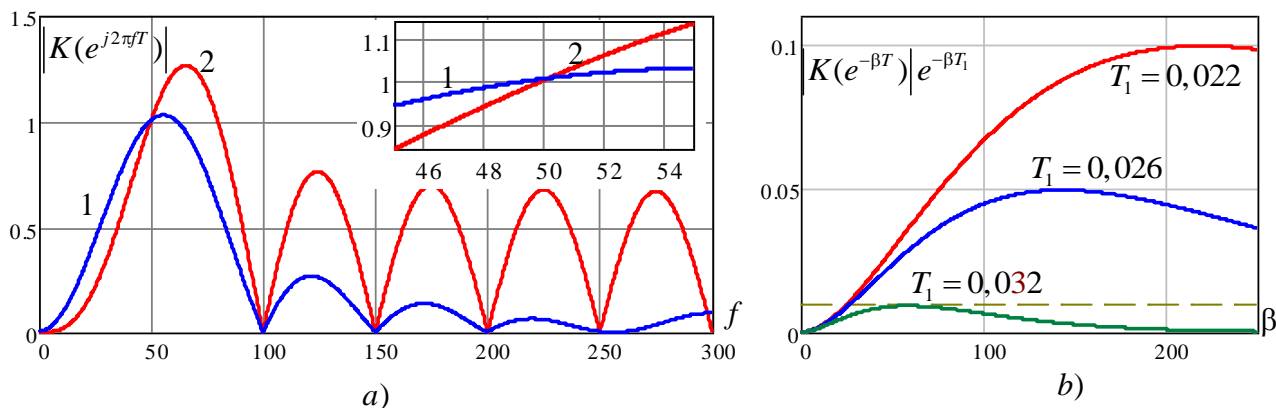


Рис. 8. АЧХ фильтра в сечении $p = j2\pi f$ (а) и в сечении $p = -\beta$ (б)

На основании проведенного анализа наиболее распространенных алгоритмов обработки сигналов ИЭУ энергосистем следует вывод о том, что абсолютное большинство алгоритмов не удовлетворяют требованиям по качеству обработки сигналов, предъявляемым к современным ИЭУ энергосистем.

Рис.8 иллюстрирует анализ качества обработки сигналов двух КИХ-фильтров, используемых в алгоритме LSE при коэффициентах фильтров, рекомендованных рабочей группой П6 комитета по релейной защите IEEE. Если полезным сигналом является синусоидальный сигнал промышленной частоты, а помеха представлена апериодической составляющей и высшими гармониками, то для анализа достаточно рассмотреть АЧХ фильтров в сечении $p = j2\pi f$ (а) и в сечении $p = -\beta$ (б). Из представленных графиков следует, что исследуемые фильтры обеспечивают приемлемый уровень подавления апериодической составляющей при $T_1 \geq 0,026$ с (рис. 8 б), но вносят большую погрешность при девиации частоты в энергосистеме (рис. 8 а).

В пятой главе рассматриваются вопросы повышения технического совершенства ИЭУ различного функционального назначения за счет применения более эффективных алгоритмов частотной фильтрации.

Показано, что применение известных методов синтеза фильтров, в том числе основанных на аппроксимации прямоугольных АЧХ (фильтры Баттерворта, Чебышева и т.д.), оптимальных фильтров Винера, КИХ-фильтров, синтезированных с помощью метода временных окон, не обеспечивает требуемые для современных ИЭУ показатели качества обработки сигналов, прежде всего связанные с обеспечением высокого быстродействия и точности обработки сигналов.

Поэтому основное внимание уделено синтезу робастных фильтров с помощью специально разработанных методов синтеза. Приведены примеры синтеза фильтров для наиболее распространенных алгоритмов обработки сигналов ИЭУ, в том числе алгоритмов, основанных на измерении параметров режима энергосистемы на основе среднеквадратичных и средневыпрямленных значений токов и напряжений, ортогональных составляющих комплексных амплитуд токов и напряжений основной гармоники, ортогональных составляющих токов и напряжений промышленной частоты.

Дополнительно рассмотрены вопросы синтеза фильтров ИЭУ с максимально возможным быстродействием и вопросы синтеза робастных фильтров на основе фильтров Винера.

На рис.9 приведены АЧХ быстродействующих усредняющих КИХ-фильтров, которые в отличие от фильтра с прямоугольным временным окном (кривая 1), используемым в алгоритме Фурье, при наличии подобной АЧХ (кривая 2) или более избирательной АЧХ (кривая 3), не вносят задержку в обработку сигналов, т.е. обладают максимально возможным быстродействием. Существенный недостаток синтезированных фильтров связан с усилением неучтенных высокочастотных помех и шумов, так как АЧХ синтезируемых фильтров (кривые 2 и 3) вне рассматриваемого на рис.9 частотного диапазона с ростом частоты будут стремиться к бесконечности. Подобная ситуация типична для многих алгоритмов устройств релейной защиты, подробный анализ которых выполнен в четвертой главе диссертации. Вместе с тем алгоритмы ИЭУ энергосистем с использованием быстродействующих фильтров могут рассматриваться как предварительные при использовании двухстадийных методов синтеза.

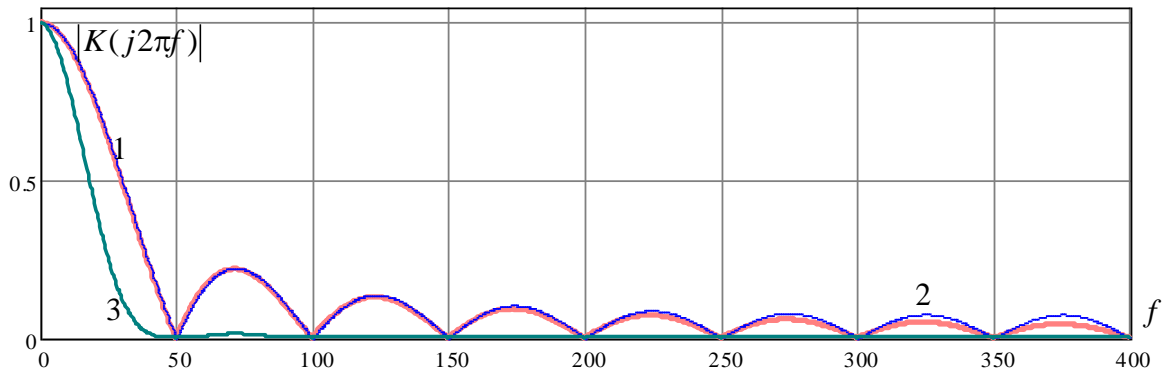


Рис. 9. АЧХ быстродействующих фильтров

Рассмотрены особенности синтеза фильтров Винера для ИЭУ энергосистем. Показано, что синтез фильтров Винера с учетом специфики обработки сигналов в ИЭУ в простейшем случае необходимо производить на наихудший случай с точки зрения наложения спектров полезного сигнала и помехи. На рис. 10 представлены АЧХ фильтра Винера в сечениях $p = j2\pi f$ и $p = -\beta$, предназначенный для выделения полезного синусоидального сигнала промышленной частоты на фоне аperiodической помехи (кривая 1). Синтезируемый фильтр обеспечивает приемлемое подавление аperiodической помехи (рис. 7 б), но вносит большую погрешность (до 9 %) при девиации частоты энергосистемы.

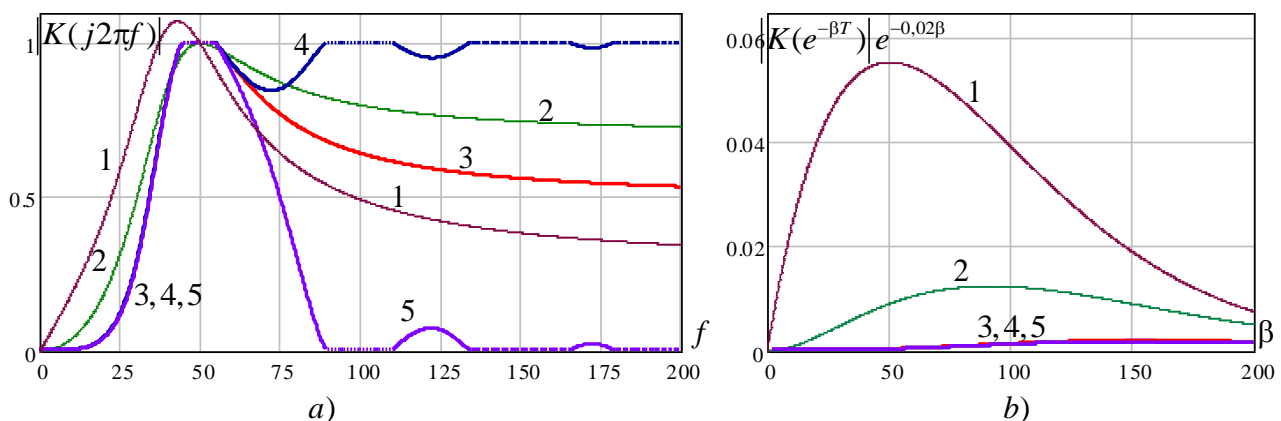


Рис. 10. АЧХ фильтров Винера в сечении $p = j2\pi f$ (а) и в сечении $p = -\beta$ (б)

Для рассматриваемой задачи фильтрации при допущении допустимости изменения начальной фазы полезного синусоидального сигнала, предложено использовать следующее выражение для определения передаточной функции физически нереализуемого фильтра

$$K_{\text{опт}}(p) = \frac{X_1(p)X_1(-p)}{X_1(p)X_1(-p) + X_2(p)X_2(-p)}, \quad (12)$$

где $X_1(p)$, $X_2(p)$ – изображение полезного сигнала и помехи.

При переходе к передаточной функции физически реализуемого фильтра на основе операции факторизации выражения (12) получим фильтр, обеспечивающий значительно лучшие статические и динамические характеристики (кривая 2 рис.10), чем фильтр Винера (кривая 1). Фильтр обеспечивает подавление аperiodической помехи при любом коэффициенте затухания за время около 20 мс и обладает относительно небольшой погрешностью при девиации частоты энергосистемы (менее 3 %). Выражение (12) справедливо для полубесконечного входного сигнала (1), содержащего только по одной составляющей полезного сигнала и од-

ной составляющей помехи. В других случаях необходимо использовать суммы компонент вида $X_1(p)X_1(-p)$.

Дальнейшее улучшение фильтров может быть достигнуто за счет усложнения выражения (12). На рис. 10 приведены АЧХ фильтра для выделения полезного синусоидального сигнала промышленной частоты на фоне апериодической помехи (кривая 3), АЧХ фильтра для подавления помехи и выделения основной и высших гармоник (кривая 4), АЧХ фильтра для выделения полезного синусоидального сигнала промышленной частоты на фоне апериодической помехи и высших гармоник (кривая 5). Рассмотренный выше метод синтеза фильтров для ИЭУ энергосистем позволяет обеспечить требуемые показатели по точности обработки сигналов, но не позволяет при синтезе учитывать один из важнейших показателей качества обработки сигналов - быстродействие.

При проектировании (синтезе) частотных фильтров ИЭУ энергосистем целесообразно использовать критерии синтеза, напрямую связанные с показателями качества обработки сигналов. Решение задачи синтеза фильтров ИЭУ в определенной степени упрощает наличие аналитической формы описания полезного сигнала и помехи в виде совокупности “полубесконечных” или финитных затухающих колебательных составляющих согласно выражения (1).

На рис.11 представлена структурная схема, иллюстрирующая синтез оптимального аналогового фильтра-прототипа.

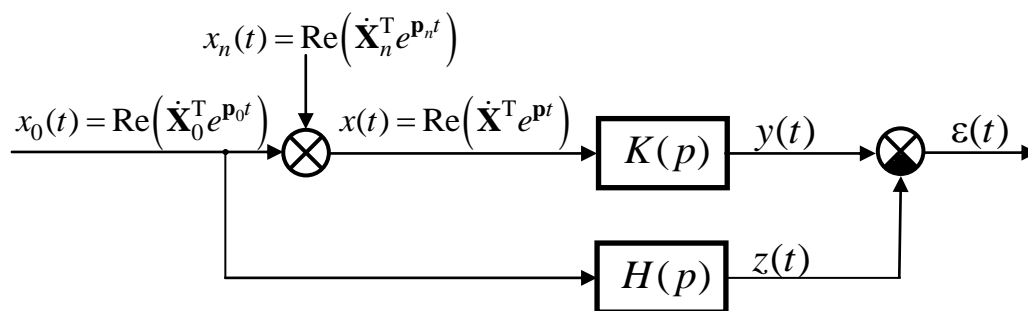


Рис. 11. Структурная схема оптимального фильтра

На представленной схеме полезный сигнал $x_0(t)$ и помеха $x_n(t)$ полностью определяются векторами-столбцами комплексных амплитуд \dot{X}_0 , \dot{X}_n и комплексных частот \mathbf{p}_0 , \mathbf{p}_n . В свою очередь вектор-столбцы комплексных амплитуд и частот входного сигнала определяются как $\dot{X} = [\dot{X}_0 \quad \dot{X}_n]^T$, $\mathbf{p} = [\mathbf{p}_0 \quad \mathbf{p}_n]^T$. При этом вектора \dot{X}_0 и \mathbf{p}_0 могут содержать только по одной компоненте, соответствующей комплексной амплитуде и частоте полезного синусоидального сигнала промышленной частоты, а вектора \dot{X}_n и \mathbf{p}_n содержат комплексные амплитуды и частоты помех в виде свободных составляющих переходных процессов в контролируемом объекте (экспоненциальные составляющие и затухающие колебательные составляющие) и комплексные амплитуды высших гармоник. Для ИЭУ на основе измерения и контроля среднеквадратических значений вектора \dot{X}_0 и \mathbf{p}_0 включают комплексные амплитуды и частоты основной и высших гармоник.

Для упрощения задачи синтеза погрешность обработки сигнала с некоторым запасом будем оценивать по огибающим составляющим выходного сигнала фильтра. Указанные изменения отражены на структурной схеме рис. 12.

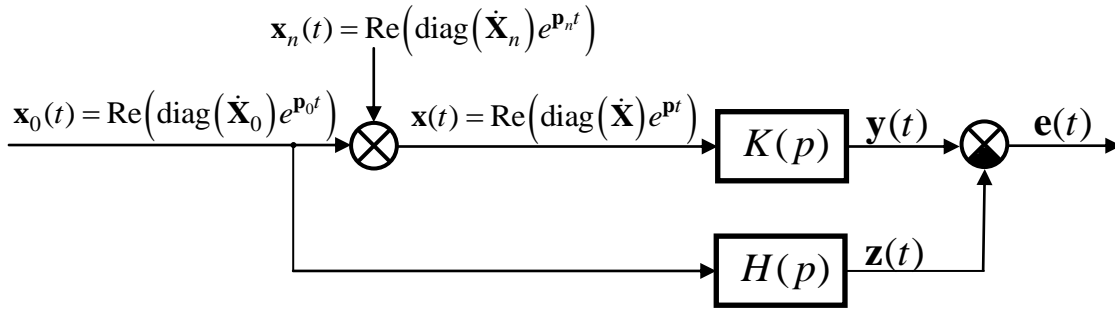


Рис. 12. Структурная схема оптимального фильтра

На рис. 12 используются следующие обозначения: $\mathbf{x}(t)$ - вектор-функция составляющих входного сигнала, при этом $x(t) = \mathbf{C}^T \mathbf{x}(t)$; $\mathbf{x}_0(t)$, $\mathbf{x}_n(t)$ - вектор-функции составляющих полезного сигнала и помехи; $\mathbf{y}(t)$, $\mathbf{z}(t)$ - вектор-функции составляющих выходных сигналов фильтра и оператора преобразования $H(p)$; $\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}(t) - \mathbf{z}(t)$ вектор-функция составляющих ошибки. При $H(p) = 1$ вектор-функция ошибки $\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}(t) - \mathbf{x}_0(t)$.

Представим вектор-функции выходного сигнала и ошибки в виде двух компонент $\mathbf{y}(t) = [\mathbf{y}_1(t) \ \mathbf{y}_2(t)]^T$ и $\mathbf{e}(t) = [\mathbf{e}_1(t) \ \mathbf{e}_2(t)]^T$, определяющих принужденные $\mathbf{y}_1(t)$, $\mathbf{e}_1(t)$ и свободные $\mathbf{y}_2(t)$, $\mathbf{e}_2(t)$ составляющие выходного сигнала фильтра и аналогичные составляющие ошибки. Принужденные составляющие ошибки можно исключить, так как их уровень определяется заданными ограничениями на значения частотных характеристик фильтра на комплексных частотах составляющих входного сигнала с учетом их изменения. При этом быстродействие фильтра τ будет определяться длительностью переходного процесса в фильтре, т.е. затуханием свободных составляющих ниже допустимой погрешности обработки сигнала.

При $t \geq \tau$ должно выполняться условие

$$\mathbf{C}^T \mathbf{y}_2(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{V}}^T e^{\mathbf{q}t}) \leq \varepsilon, \quad (13)$$

где $\dot{\mathbf{V}} = \text{diag}(\dot{\mathbf{G}}) X(\mathbf{q})$; $\mathbf{q} = [\rho_1 \ \rho_2 \ \rho_3 \ \dots \ \rho_m \ \dots \ \rho_M]^T$.

Таким образом, синтез фильтра при заданной структуре сводится к определению его параметров, при которых обеспечиваются заданные требования к частотным характеристикам в координатах комплексной частоты, и определении минимально-возможного времени, при котором обеспечивается выполнение неравенства (13). Еще один из предлагаемых способов, позволяющий упростить нахождение оптимального фильтра, связан с использованием модели зависимой от времени передаточной функции $K(p, t)$ фильтра.

Поиск оптимальных параметров импульсных (передаточных) функций фильтра производился с помощью пакета Optimization Toolbox системы MATLAB при использовании минимизации заданной целевой функции (функционала) при наличии ограничений или методов нелинейной многокритериальной оптимизации с ограничениями, а также с помощью специально разработанной программы FFIR для синтеза оптимальных КИХ-фильтров. В качестве ограничений принимались значения передаточной функции на заданных комплексных частотах входного сигнала, определяющие значения принужденных составляющих на выходе фильтра.

В диссертации рассмотрено решение синтеза БИХ-фильтров для наиболее часто используемых задач частотной фильтрации сигналов в устройствах РЗА и ИЭУ энергосистем. На рис. 13 приведены АЧХ некоторых из синтезируемых фильтров. По сравнению с АЧХ рассмотренных ранее фильтров Винера (кривые 1 и 2) синтезированный фильтр 2 порядка (кривая 3) обладает лучшими статическими и динамическими характеристиками. Фильтр 4 предназначен для использования в алгоритмах измерения среднеквадратических значений тока и напряжения (кривая). Фильтры 4 и 8 порядков (кривые 5 и 6) наряду с подавлением экспоненциальной помехи обеспечивают подавление дополнительно высших гармоник.

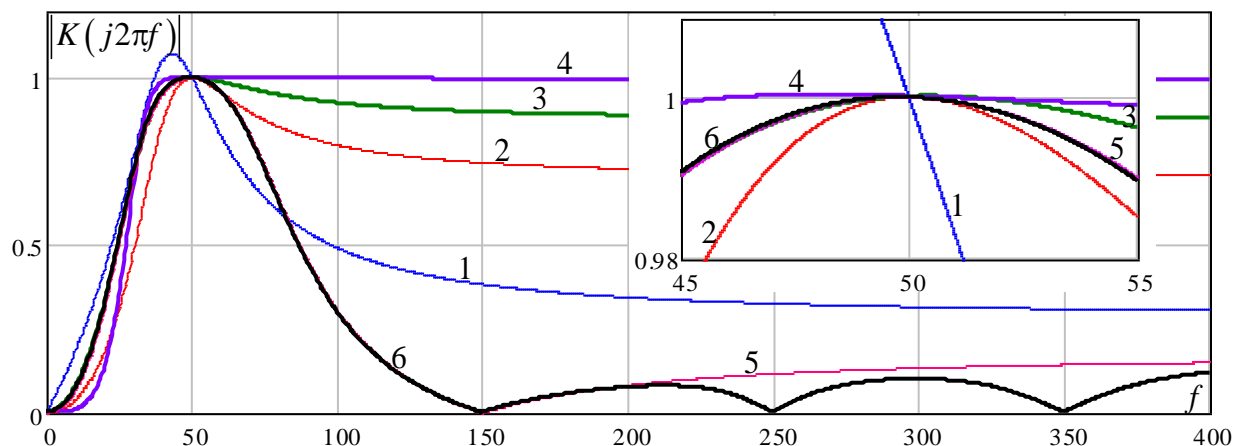


Рис. 13. АЧХ БИХ-фильтров в сечении $p = j2\pi f$

Синтез КИХ-фильтров (2) для ИЭУ энергосистем в отличие от БИХ-фильтров, согласно рис.11, упрощается вследствие более простого контроля над длительностью переходных процессов в фильтре. При выполнении требований к АЧХ фильтра в координатах комплексной частоты быстродействие фильтра будет определяться длительностью его импульсной характеристики.

В диссертации рассмотрены вопросы синтеза КИХ-фильтров для ИЭУ энергосистем различного функционального назначения. Произведен синтез усредняющих КИХ-фильтров для алгоритмов обработки сигналов рис. 7 а), используемых в измерительных ИЭУ, устройствах мониторинга электромеханических переходных процессов, устройствах релейной защиты и автоматики энергосистем.

Усредняющие КИХ-фильтры для алгоритма обработки сигнала рис. 7 а) используются для выделения постоянной (низкочастотной) составляющей входного сигнала после его перемножения на опорный сигнал в виде комплексной экспоненты $e^{-j\omega_0 t}$ для смещения спектра сигнала влево на величину номинального значения основной частоты ω_0 . Структурная схема, иллюстрирующая задачу синтеза с возможностью оперирования отдельными составляющими ошибки, представлена на рис.14. Используются следующие обозначения: $\mathbf{x}(t)$ - вектор-функция входного сигнала, $x(t) = \mathbf{C}^T \mathbf{x}(t)$; $\dot{\mathbf{X}} = [X_0 \quad \dot{X}_1 \quad \dot{X}_2 \quad \dot{X}_3 \quad \dots \quad \dot{X}_N]$ и $\mathbf{p} = [-\beta \quad j\omega_1 \quad j2\omega_1 \quad j3\omega_1 \quad \dots \quad jN\omega_1]$ – набор комплексных амплитуд и частот экспоненциальной помехи, полезного сигнала промышленной частоты ω_1 и высших гармоник, $\dot{X}(t)$ - выходной сигнал усредняющего КИХ-фильтра; \dot{X}_1 – комплексная амплитуда полезного сигнала; $\dot{e}(t) = \dot{X}_1 - \dot{X}(t)$ – ошибка определения комплексной амплитуды полезного сигнала.

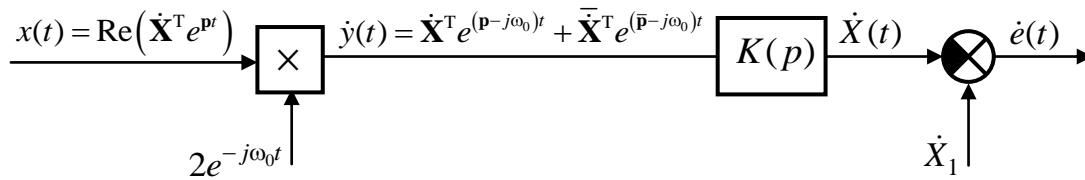


Рис. 14. Синтез усредняющего фильтра

При синтезе усредняющих КИХ-фильтров использовались временные окна, согласно обобщенной модели (3) или (6), а также частный случай временного окна (3) - косинусоидальные временные окна. Произведен синтез усредняющих КИХ-фильтров при различных требованиях по быстродействию и точности обработки сигналов для алгоритма рис. 7 а) и алгоритмов рис. 24.

Одна из рассматриваемых задач связана с синтезом усредняющих КИХ-фильтров для устройств мониторинга электромеханических переходных процессов (PMU) при отсутствии жестких требований по подавлению аperiodической помехи, как принято в большинстве PMU. Фильтр должен обеспечить подавление высших гармоник на входе фильтра и обеспечить быстродействие не хуже 40 мс и класс точности 0,1. Приняты следующие параметры для импульсной функции КИХ-фильтра: $\dot{\mathbf{G}} = \dot{\mathbf{G}}' = [G_0 \ G_1 \ G_2 \ G_3 \ G_4]^T$, $\mathbf{q} = [0 \ j\omega_1 \ j2\omega_1 \ j3\omega_1 \ j4\omega_1]^T$, $\mathbf{T} = [T_1 \ T_1 \ T_1 \ T_1 \ T_1]^T$, $T_1 = 2\pi / \omega_1$. Данный частный случай соответствует так называемому обобщенному косинусоидальному временному окну, которое может быть описано с помощью следующих параметров - $\dot{\mathbf{G}}$ и T_1 . Результаты синтеза при различной длине фильтра представлены на рис.15. и рис.16.

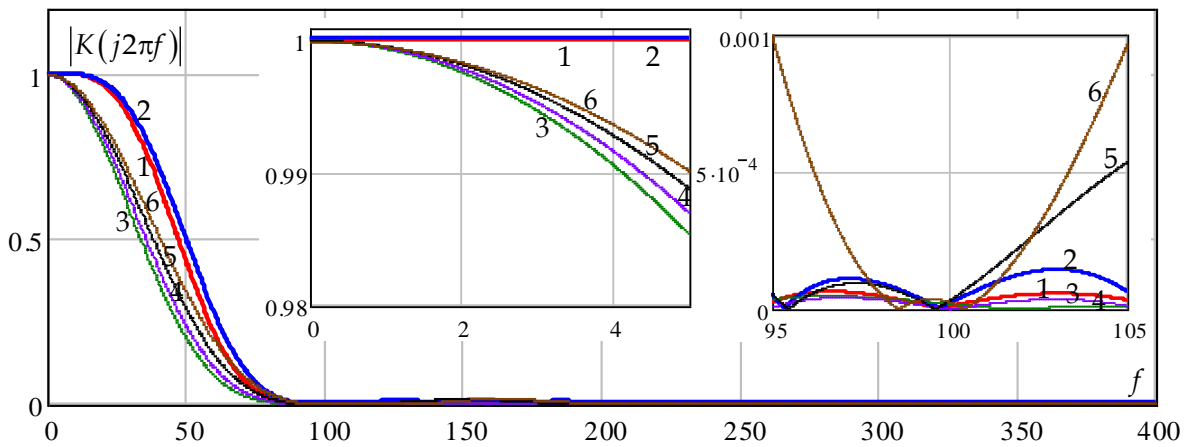


Рис. 15. АЧХ усредняющих КИХ-фильтров

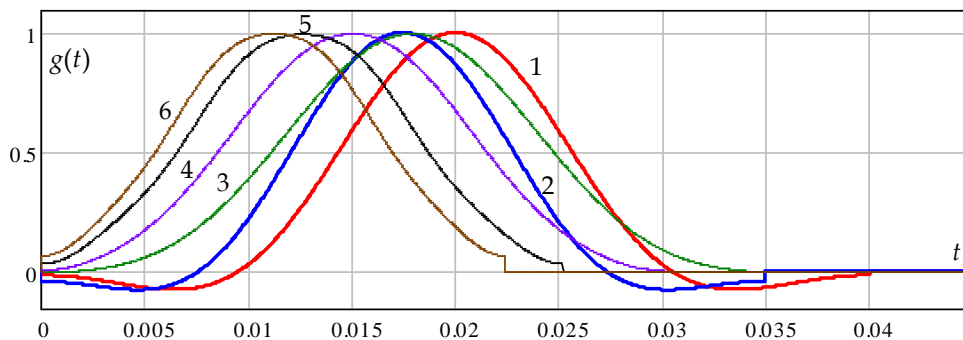


Рис. 16. Импульсные функции (временные окна) усредняющих КИХ-фильтров

Произведен сравнительный анализ полученных результатов с усредняющими КИХ-фильтрами, применяемыми в одном из наиболее совершенных PMU

1133A Power Sentinel американской фирмы Arbiter. В данном устройстве может быть реализовано одно из следующих временных окон: Raised cosine, Hann, Hamming, Blackman, Bartlett, Rectangular, Flat Top, Kaiser, Nutall 4-term при различной длине фильтра. В результате анализа установлено, что синтезируемые фильтры значительно превосходят усредняющие КИХ-фильтры, используемые в РМУ 1133А, по всем основным показателям качества обработки сигналов. При этом фильтры $3 \div 6$ используются в алгоритмах обработки сигналов ИЭУ рис. 24, для которых не требуется обеспечение стабильности АЧХ в диапазоне $0 \div 5$ Гц в соответствии с заданным классом точности.

В диссертации произведен синтез усредняющего фильтра при использовании обобщенной модели КИХ-фильтра (3) при $M = 2$. Синтезируемые фильтры должны обеспечивать требуемую точность обработки сигнала (класс точности 0,1). Дополнительная погрешность при девиации частоты энергосистемы в диапазоне от 45 до 55 Гц не должна превышать значения 0,2 %, а дополнительная динамическая погрешность при максимальном уровне экспоненциальной помехи и диапазоне изменения коэффициента затухания $\beta_0 = 20 \div 200 \text{ с}^{-1}$ не должна превышать 3 %. Длины всех финитных затухающих составляющих импульсной функции фильтра принимаем одинаковыми.

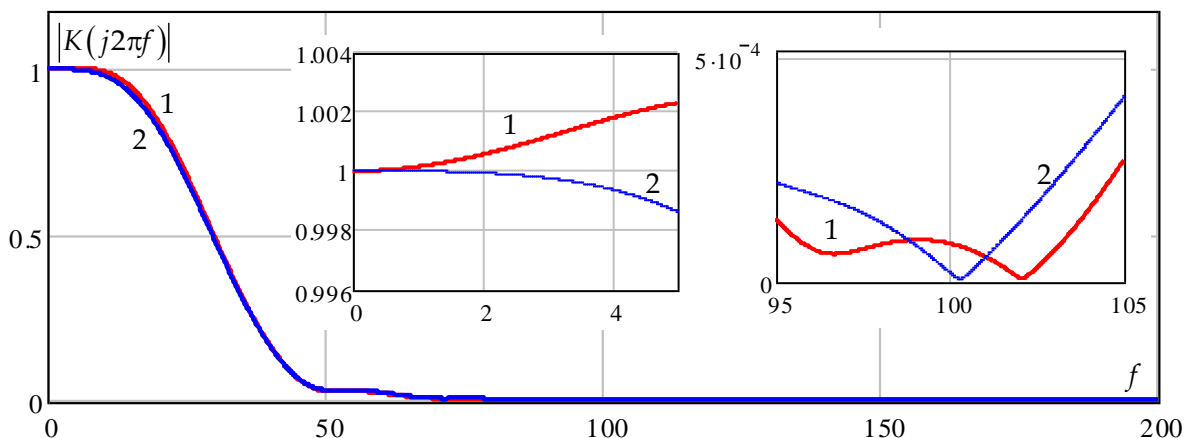


Рис.17. АЧХ фильтра в сечении $p = j2\pi f$

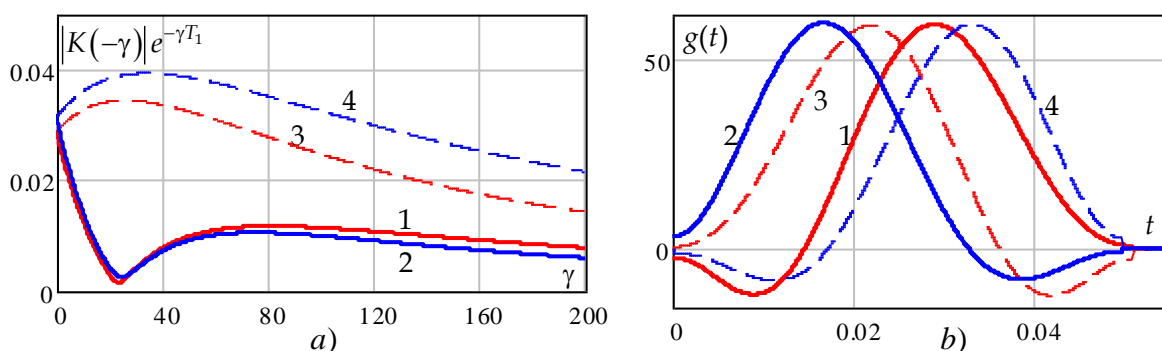


Рис.18. АЧХ в сечении $p = -\gamma + j\omega_0$ и импульсные характеристики фильтров

При использовании различных целевых функций получены два усредняющих КИХ-фильтра с практически идентичными частотными характеристиками, представленными на рис.17 (кривые 1 и 2). Импульсные характеристики усредняющих фильтров в отличие от рассмотренных ранее (рис.18 б) являются асимметричными. Следовательно, точно же такую же АЧХ будет в сечении $p = j2\pi f$ будут иметь фильтры практически с зеркально противоположными импульсными характеристиками (кривые 3 и 4), т.е. $g_3(t) = g_1(T_1 - t)$ и $g_4(t) = g_2(T_2 - t)$. Но в се-

чении $p = -\gamma + j\omega_0$ согласно рис.18 а) АЧХ фильтров под номером 3 и 4 существенно отличаются от аналогичных АЧХ фильтров родителей (фильтров 1 и 2). Отсюда следует важный вывод о неоднозначности использования традиционных АЧХ фильтров для анализа аperiodических сигналов.

Принципиальное отличие в использовании фильтров 1 и 2 состоит в следующем: в первом случае (фильтр с номером 1) колебательный характер переходного процесса будет наблюдаться в начале, а во втором случае – по завершению переходного процесса в фильтре. Как следует из рис. 19 совместное использование фильтров 1 и 2 с практически идентичной АЧХ позволит выявить наличия переходных процессов в фильтрах (кривая 3) и позволит повысить достоверность контроля ИЭУ энергосистем.

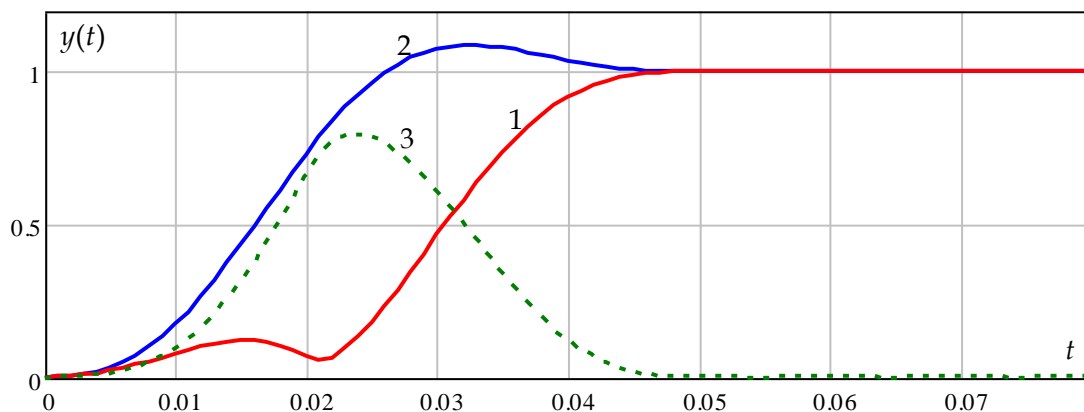


Рис.19. Выходные сигналы КИХ-фильтров

Синтезированные фильтры обеспечивают сочетание высокого быстродействия и высокой точности обработки сигналов, обладают низкой чувствительностью к отклонению частоты энергосистемы и к изменению спектра помехи.

На примере синтеза фильтров для частной задачи можно сформулировать следующие закономерности временных окон для усредняющих КИХ-фильтров:

1. При использовании косинуидальных временных окон и/или временных окон (3) при отсутствии жестких требований по подавлению аperiodической помехи форма синтезируемых окон близка к симметричной “колоколообразной” или к форме в виде “шляпы” (рис.16).
2. При использовании временных окон общего вида (3) при необходимости подавления аperiodической помехи получены окна с явно выраженной асимметричной формой (рис.18 b).

При этом второй фильтр (рис. 19, кривая 2) обеспечивает сочетание высокого быстродействия и точности обработки сигналов. Быстродействие фильтра составляет менее 30 мс (класс точности 10) для релейной защиты и около 40 мс (класс точности 0,2) для целей измерения параметров режима энергосистемы.

Синтез КИХ-фильтров для выделения полезного сигнала промышленной частоты на фоне аperiodических помех и высших гармоник может быть произведен на основе полученных решений для усредняющих КИХ-фильтров путем умножение временного окна $w(t)$ усредняющего фильтра на комплексную экспоненту $\dot{g}(t) = 2e^{j\omega_0 t} w(t)$. Получим два фильтра с импульсными функциями $g_1(t)$ и $g_2(t)$, при этом $\dot{g}(t) = g_1(t) + jg_2(t)$.

Рассмотрим переход от усредняющего КИХ-фильтра рис. 17 (кривая 1) алгоритма рис. 7 а) к двум КИХ-фильтрам алгоритма рис. 7 б) . На рис. 20 приведе-

ны амплитудно-частотные характеристики синтезированных фильтров (кривые 1 и 2) и АЧХ усредняющего фильтра-прототипа (кривая 3), а на рис. 21 а) представлены ФЧХ фильтров. На рис. 21 б) приведены импульсные характеристики. Временное окно усредняющего фильтра-прототипа является огибающей для импульсных функций синтезированных фильтров (кривые 3 и 4).

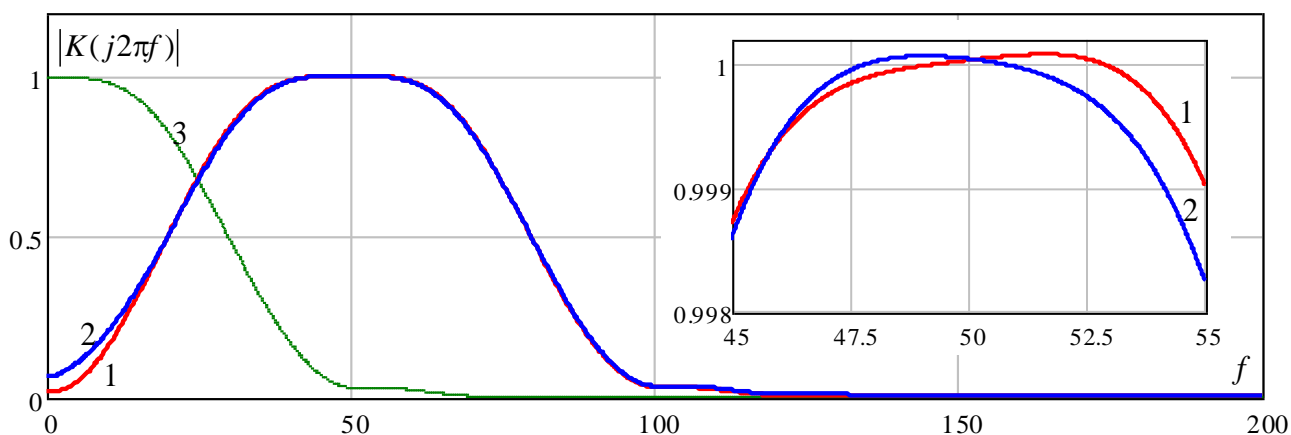


Рис. 20. Амплитудно-частотные характеристики КИХ-фильтров

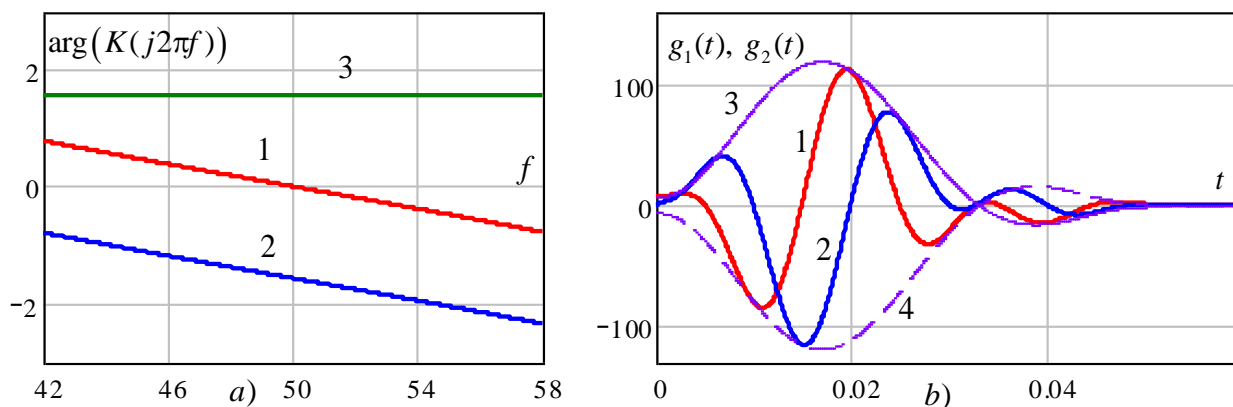


Рис. 21. ФЧХ и импульсные характеристики КИХ-фильтров

Как следует из рис.20, АЧХ синтезируемых фильтров очень близки к друг к другу, а разность значений ФЧХ фильтров в диапазоне частот 45÷55 Гц практически неизменна и близка к $\pi/2$ (кривая 3). Таким образом, полученные фильтры обеспечивают высокое качество обработки сигнала при большом диапазоне изменения частоты энергосистемы, при наличии гармоник в нормальных режимах работы контролируемого объекта и аperiodических помех в переходных режимах.

Синтезированные фильтры пригодны и для использования в устройствах РЗА, так как обеспечивают быстродействие меньше 30 мс при 10 % допустимой погрешности. Этот показатель значительно лучше, чем у большинства устройств РЗА 6-35 кВ российских и зарубежных производителей. Использование приведенных выше фильтров обеспечивает формирование симметричных составляющих токов (напряжений) вне зависимости от значения частоты энергосистемы.

При снижении требований к точности обработки сигналов и к диапазону возможных изменений коэффициента затухания аperiodической помехи может быть получены фильтры, обеспечивающие более высокое быстродействие. Так, для алгоритма рис. 7 б) устройств релейной защиты произведен синтез трех КИХ-фильтров при использовании модели фильтра (6) при допустимой погрешности обработки сигналов 5 (10) %. Параметры первых двух фильтров:

$$\dot{\mathbf{G}}_1 = \begin{bmatrix} 32931e^{-j0,7854} & e^{-j0,7854} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{q}_1 = [12 + j290 \quad -20 + j440]^T, \quad \mathbf{T}_1 = [0,0105 \quad 0,011]^T;$$

$$\dot{\mathbf{G}}_2 = \begin{bmatrix} 25430e^{j1,2566} & 1 \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{q}_2 = [j314 \quad -80 + j300]^T, \quad \mathbf{T}_2 = [0,020 \quad 0,011]^T.$$

На рис. 22 а) приведены амплитудно-частотные характеристики синтезируемых фильтров (кривые 1, 2 и 3), а на рис. 22 б) соответствующие им импульсные характеристики.

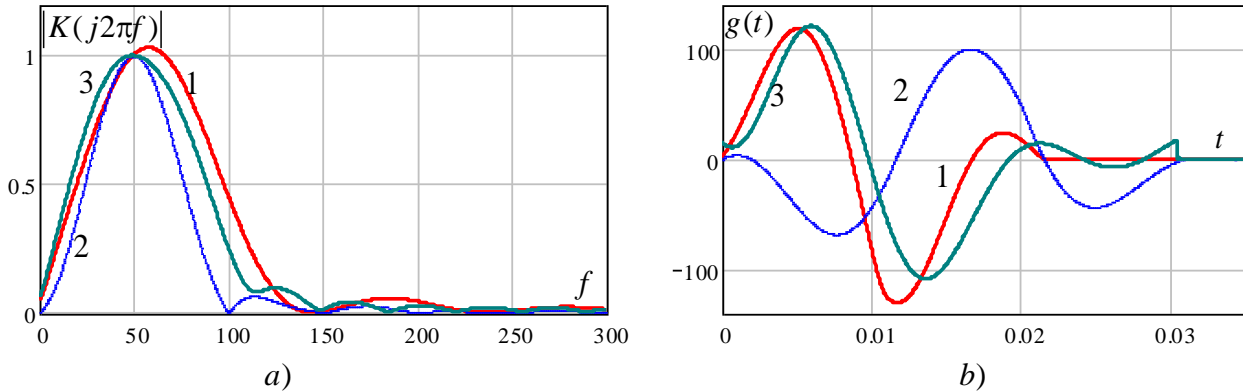


Рис. 22. АЧХ и импульсные характеристики КИХ-фильтров

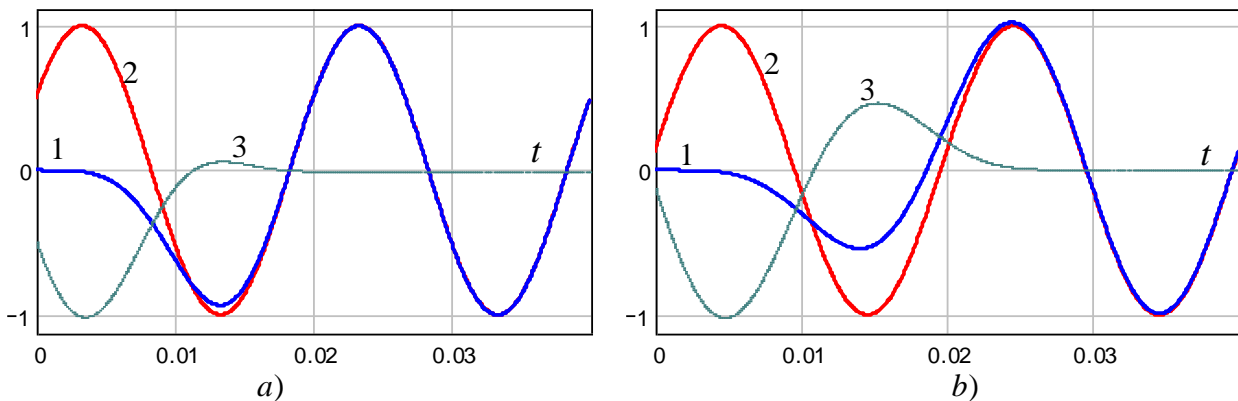


Рис. 23. Выходной сигнал первого (а) и второго (б) КИХ-фильтров

На рис. 23 а) и рис. 23 б) приведены выходные сигналы (кривая 1) соответственно первого и второго фильтров при подаче на его вход аддитивной смеси полезного сигнала и апериодической помехи. На рисунках также приведены принужденная составляющая реакции фильтра (кривая 2) и суммарная погрешность (кривая 3). Первый фильтр обеспечивает более высокое быстродействие около 10 мс при 10% и 18 мс при 1% допустимой погрешности. Второй фильтр имеет меньшие погрешности при изменении частоты энергосистемы (около 2%) и его быстродействие составляет около 20 мс при 10% и около 31 мс при 1% погрешности обработки сигналов.

На основе предлагаемого метода синтеза БИХ- и КИХ-фильтров в пятой главе рассмотрены и другие примеры синтеза фильтров для ИЭУ энергосистем различного функционального применения. Приведены примеры перехода от аналоговых фильтров-прототипов к цифровым фильтрам, в том числе к фильтрам с целочисленными коэффициентами.

В шестой главе рассмотрены двухстадийные методы синтеза алгоритмов обработки сигналов ИЭУ энергосистем. На первом этапе производится синтез алгоритма для обработки полезного сигнала, а на втором этапе производится синтез робастных или адаптивных алгоритмов фильтрации.

Предлагаемые методы синтеза робастных алгоритмов обработки сигналов обеспечивают высокую эффективность как для целей устройств РЗА, так и для выполнении функций по измерению параметров режима энергосистемы. В свою очередь адаптивные алгоритмы обработки сигналов на основе технологии векторных измерений обеспечивают максимально возможное сочетание высокого быстродействия и высокой точности обработки сигналов ИЭУ за счет адаптации алгоритмов к изменению частоты энергосистемы и изменению параметров помехи.

На рис.24 приведен один из разработанных алгоритмов векторных измерений, в котором используются робастные усредняющие КИХ-фильтры, но при этом сам алгоритм является адаптивным. Для обеспечения требуемой точности обработки сигналов синтезируемые усредняющие КИХ-фильтры должны обеспечивать эффективное подавление всех высших гармоник с частотами, кратными частоте энергосистемы, а также высокий уровень подавления затухающей колебательной составляющей с комплексной частотой $p = -\beta + j\omega_0$.

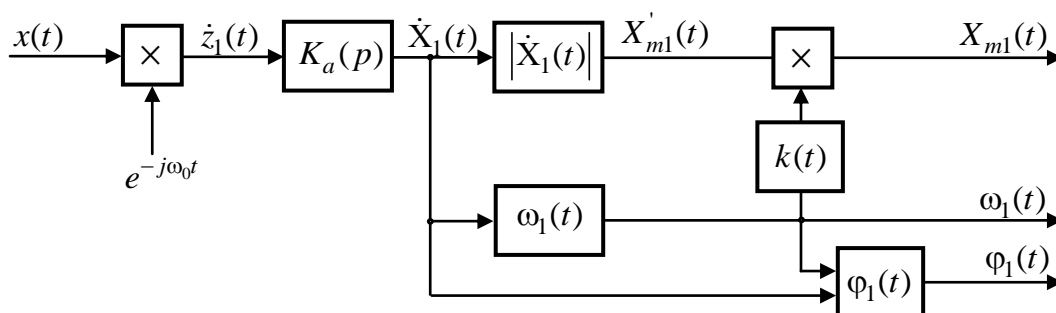


Рис. 24. Структурная схема алгоритма

При этом для АЧХ усредняющего фильтра в области от 0 до 5 Гц в отличие от традиционного случая (рис. 7 а) не требуется обеспечение коэффициента усиления в диапазоне от 0 до 5 Гц, близкого к единице. Более того, чем больше АЧХ будет уменьшаться в рассматриваемом диапазоне с ростом частоты, тем более точно можно определить частоту энергосистемы согласно следующего алгоритма

$$\omega_1(t) = \omega_0 - \frac{\frac{dX_{c1}(t)}{dt} X_{s1}(t) - \frac{dX_{s1}(t)}{dt} X_{c1}(t)}{X_{m1}^2(t)}.$$

Множитель $k(t)$ для корректировки измерения модуля комплексной амплитуды полезного сигнала, определяется на основании следующей зависимости

$$k(t) = K_a(j(\omega_0 - \omega_1(t)))^{-1}.$$

Разработаны новые алгоритмы обработки сигналов ИЭУ энергосистем, в том числе с использованием анализаторов мгновенного спектра на основе оконного преобразования Фурье и Лапласа, обеспечивающие анализ мгновенного спектра на нескольких частотах.

Для реализации векторных измерений разработан адаптивный алгоритм согласно рис.25. На структурной схеме рис. 25 используются следующие обозначения: $n=1..N$ - количество учитываемых гармоник, $\dot{X}_n(t) = X'_n(f_1, t)$ - оценка комплексной амплитуды n -й гармоники по скорректированному (скомпенсировано влияние экспоненциальной составляющей и девиации частоты) значению мгновенного спектра на частоте $2\pi f_1$ при времени наблюдения, равном $1/f_1$.

Результатом измерений с использованием рассматриваемого алгоритма является совокупность оценок комплексных амплитуд гармоник

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{X}'(f, t),$$

где $\dot{\mathbf{X}}(t) = [\dot{X}_1(t) \quad \dot{X}_2(t) \quad \dots \quad \dot{X}_N(t)]^T$.

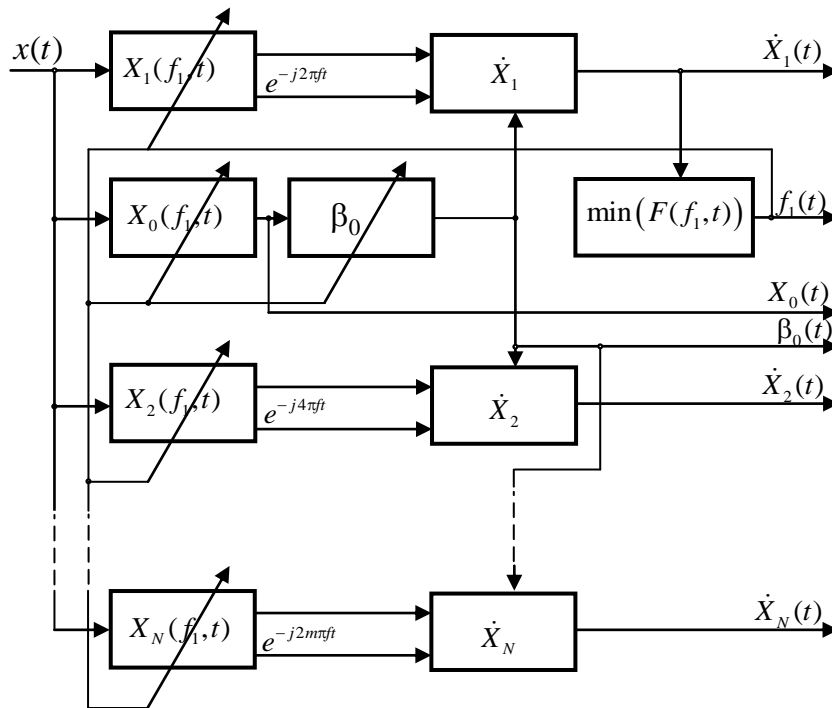


Рис. 25. Адаптивный алгоритм обработки сигналов

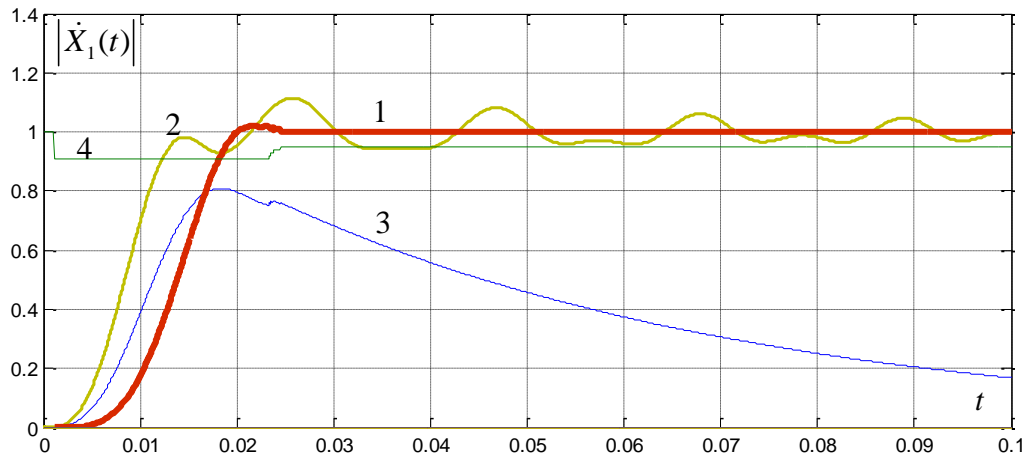


Рис. 26. График выходного сигнала

При этом комплексная амплитуда n -ой гармоники вычисляется на основе скорректированного значения мгновенного спектра на частоте заданной гармоники

$$\dot{X}_n(t) = 2nf_1 X_n'(f_1, t) = 2nf_1 X_1(f_1, t) - \frac{2nf_1 \beta_0}{\beta_0 + j2\pi n f_1} X_0(f_1, t) e^{-j2\pi n f_1 t},$$

Измерение коэффициента затухания экспоненциальной помехи $\beta_0 \rightarrow \beta_0(t)$ и частоты энергосистемы $f_1 \rightarrow f_1(t)$ производится по специально разработанным алгоритмам. Дополнительно измеряется частота основной гармоники f_1 , коэффициент затухания эквивалентной экспоненциальной составляющей β_0 и значе-

ние мгновенного спектра сигнала на нулевой частоте $X_0(f,t)$. Последний параметр может использоваться для оценки уровня экспоненциальной помехи.

Рассматриваемый алгоритм обработки сигналов обеспечивает быстроедействие около 20 мс для точных измерений. На рис. 26 приведены графики модулей выходных сигналов $|\dot{X}_1(t)|$ (кривая 1), $2f_1|X_1(f_1,t)|$ (кривая 2), $X_0(t)$, а также график $f_1(t)/50$ (кривая 4) при входном сигнале в виде аддитивной смеси полезного сигнала и экспоненциальной помехи при $\omega_1 = 2\pi 47,5$ рад/с, $X_2 = X_{m1} = 1$, $\beta_2 = 20$ с⁻¹.

Теоретические и практические результаты, полученные в диссертационной работе, использованы в серийных многофункциональных измерительных преобразователях ЭНИП-2, производимых ЗАО “Инженерный центр “Энергосервис” (г.Архангельск), и многофункциональных измерительных приборах ЩМ120, производимых ОАО “Электроприбор” (Чебоксары).



Рис. 27. Многофункциональные интеллектуальные устройства ЭНИП-2

Интеллектуальные электронные устройства ЭНИП-2 являются составной частью программно-технического комплекса “ЕС-Энергия”, включающего в свой состав компоненты, необходимые для создания АСТУ электрических сетей, АСУ ТП подстанций, АИИС КУЭ. В состав комплекса входят ИЭУ различного функционального назначения, устройства сбора данных, блок коррекции времени, программно-технический комплекс верхнего уровня.

Устройства ЭНИП-2 обеспечивают быстрые синхронизированные измерения параметров режима электрической сети в широком диапазоне токов и напряжений, обладают малой чувствительностью к изменению параметров полезного сигнала и помехи за счет применения разработанных автором алгоритмов обработки сигналов. Преобразователь производит измерение среднеквадратичных значений параметров режима электрической сети, а также параметров по первой гармонике с временем усреднения 40 (20) мс и 250 мс, обеспечивает выполнение функций телемеханики, технического учета электроэнергии, мониторинга качества электроэнергии. ЭНИП-2 содержит до 5 цифровых интерфейсов, в т.ч. до 2 портов Ethernet, с независимой и гибкой настройкой каждого порта. Реализована возможность удаленного считывания и изменения конфигурации ЭНИП-2. Обеспечена поддержка протоколов: Modbus, МЭК 60870-5-104 и МЭК 61850.

Предусмотрено подключение к ЭНИП-2 одного или нескольких внешних модулей индикации на основе черно-белых и цветных сенсорных ЖКИ. При использовании графических ЖКИ обеспечивается визуальное представление телеизмерений в виде виртуального аналогового щитового прибора (одно и трехфаз-

ный амперметр, вольтметр, ваттметр и т.д.), отображение мнемосхемы присоединения с отображением измерений и индикацией состояния коммутационной аппаратуры, отображение векторных диаграмм, трендов телеизмерений и т.д.

Применение ЭНИП-2 с функциями быстрых синхронных измерений позволяет повысить наблюдаемость электрической сети, реализовать распределенные автоматические системы управления и регулирования для интеллектуальных электрических сетей. Многофункциональные измерительные преобразователи ЭНИП-2 успешно используются в системах сбора телемеханической информации на электростанциях (Киришская ГРЭС, Бурейская ГЭС, Архангельская ТЭЦ) и сетевых предприятиях МРСК холдинга (Архэнерго, Вологдаэнерго, Карелэнерго, Комиэнерго, Колэнерго, Курганэнерго, Ленэнерго, Нижновэнерго, Рязаньэнерго, Удмуртэнерго и др.) и филиалах ФСК.

Под руководством и участия автора разработаны опытные образцы интеллектуальных электронных устройств ЭНИП-3 с поддержкой технологии векторных измерений. На базе ЭНИП-3 разрабатываются следующие интеллектуальные электронные устройства: устройство, совмещающее функции цифрового измерительного преобразователя телемеханики и РМУ; объединительное устройство с функциями векторных измерений; устройства релейной защиты и автоматики.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен комплекс исследований, связанных с разработкой эффективных методов проектирования и анализа интеллектуальных электронных устройств энергосистем, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение технического совершенства и расширения функциональных возможностей ИЭУ для повышения надежности, наблюдаемости и управляемости энергосистем.

2. Предложены и разработаны на основе частотно-временных представлений сигналов в координатах комплексной частоты с учетом специфики обработки сигналов в ИЭУ энергосистем методы анализа аналоговых и цифровых фильтров, использование которых значительно упрощает решения задачи анализа качества функционирования ИЭУ энергосистем при различных вариациях параметров контролируемых токов и напряжений.

3. Исследованы при использовании разработанных методов анализа наиболее распространенные алгоритмы функционирования ИЭУ энергосистем, выявлены существенные недостатки большинства исследуемых алгоритмов по качеству обработки сигналов, прежде всего связанных с обеспечением требуемого быстродействия при заданной точности обработки сигналов. Предложены способы совершенствования исследуемых алгоритмов функционирования ИЭУ.

4. Использование спектральных представлений в координатах комплексной частоты позволило совместить спектральный и временной подходы для анализа фильтров, синтеза быстрых алгоритмов цифровых КИХ-фильтров и анализаторов спектра на основе оконных преобразований Фурье и Лапласа. Применение быстрых алгоритмов КИХ-фильтров и анализаторов спектра позволит снизить требования к производительности микроконтроллеров или сигнальных процессоров при реализации современных ИЭУ энергосистем.

5. Предложено и обосновано использование для синтеза частотных фильтров ИЭУ энергосистем спектральных представлений в координатах комплексной частоты. Предложена методика определения предельных возможностей частотных фильтров ИЭУ по быстродействию при заданной точности обработки сигнала.

лов. При синтезе фильтра вместо формирования требований к его частотной характеристике необходимо составить простые зависимости для передаточной функции фильтра на комплексных частотах составляющих входного сигнала с учетом их изменения.

6. Показано, что для обеспечения требований по качеству функционирования ИЭУ нового поколения наряду с адаптивными фильтрами целесообразно использование робастных фильтров, обладающих малой чувствительностью к изменению параметров полезного сигнала и помехи. Выполнена постановка задачи и предложены методы синтеза робастных фильтров для ИЭУ энергосистем. Разработанные методы синтеза робастных фильтров, основанные на использовании многокритериальной оптимизации с ограничениями в сочетании со спектральными представлениями в координатах комплексной частоты, позволяют эффективно решать задачи синтеза фильтров ИЭУ с заданными показателями качества обработки сигналов.

7. На основе предложенного метода синтеза произведен синтез робастных усредняющих КИХ-фильтров для ИЭУ на основе технологии векторных измерений. Впервые получены ассиметричные временные окна усредняющих КИХ-фильтров, использование которых обеспечивает наилучшие показатели качества обработки сигналов ИЭУ энергосистем.

8. Предложено использование двухстадийных методов синтеза алгоритмов обработки сигналов ИЭУ энергосистем. На первом этапе производится синтез алгоритма для обработки полезного сигнала, а на втором этапе производится синтез робастных или адаптивных алгоритмов обработки сигналов ИЭУ. Разработаны робастные и адаптивные алгоритмы обработки сигналов ИЭУ энергосистем, которые обеспечивают сочетание высокого быстродействия и высокой точности обработки сигналов. Реализация указанных алгоритмов позволит повысить эффективность использования ИЭУ в АСУ ТП подстанций и в АСТУ.

9. Предложен и разработан для ИЭУ на основе технологии векторных измерений метод синтеза робастных и адаптивных алгоритмов обработки сигналов на основе применения анализаторов мгновенного спектра входных сигналов на нескольких комплексных частотах.

10. Теоретические и практические результаты, полученные в диссертационной работе, используются при разработке современных ИЭУ энергосистем и реализованы в серийных интеллектуальных электронных устройствах, производимых ЗАО "Инженерный центр "Энергосервис" (г.Архангельск) и ОАО "Электроприбор" (Чебоксары), а также в программно-техническом комплексе "ES-Энергия", используемом для построения АСТУ и АИИС КУЭ.

11. Материалы теоретических, методических разработок нашли отражение в учебных пособиях и используются в учебном процессе СПбГПУ и Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова.

По результатам конкурсного отбора, проводимого крупнейшей справочной корпорацией "Marquis Who's Who", информация о А.В. Мокееве включена в 11 издание ведущего международного справочника "Кто есть кто в науке и технике" ("Who's Who in Science and Engineering").

По теме диссертации опубликовано 119 работ, полный список которых приведен в диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии, книги и учебные пособия

1. Мокеев, А.В. Основы автоматического управления систем электроснабжения: уч. пособие / А.В. Мокеев. – Часть I. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2005. – 136 с. – ISBN 5-261-00233-8.
2. Мокеев, А.В. Обработка сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем: в 4 т. : монография / А.В. Мокеев. – Архангельск: Изд-во АГТУ. – Т. 2: Математическое описание сигналов и систем, 2008. – 177 с. – ISBN 978-5-261-00371-7.
3. Мокеев, А.В. Обработка сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем : в 4 т. : монография / А.В. Мокеев. – Архангельск: Изд-во АГТУ. – Т. 3. Спектральные представления сигналов и систем в координатах комплексной частоты, 2008. – 196 с. – ISBN 978-5-261-00373-1.
4. Мокеев, А.В. Обработка сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем : в 4 т. : монография / А.В. Мокеев. – Архангельск: Изд-во АГТУ. – Т. 4. Математическое описание цифровых систем, 2008. – 201 с. – ISBN 978-5-261-00375-5.
5. Мокеев, А.В. Обработка сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем : в 4 т. : монография / А.В. Мокеев. – Архангельск: Изд-во АГТУ. – Т. 5. Фильтрация сигналов, 2008. – 190 с. – ISBN 978-5-261-00377-9.
6. Ванин, В. К. Аналоговые и цифровые фильтры в измерительных устройствах и устройствах автоматики энергосистем: уч. Пособие / В.К. Ванин, А.В. Мокеев, М.Г. Попов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 196 с. – ISBN 978-5-7422-1973-6.
7. Digital Filters / A.V. Mokeev and etc., Ed. F.P.G. Márquez. – Rijeka, InTech, 2011. – 290 с. – ISBN 978-953-307-190-9.

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

8. Ванин, В.К. Разработка алгоритмов обработки сигналов для многофункциональных устройств релейной защиты / В.К. Ванин, А.В. Мокеев // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2006. – Т.1. – № 5 – С. 93-98.
9. Мокеев, А.В. Разработка и внедрение систем сбора телемеханической информации / А.В. Мокеев // Электрические станции. – 2007. – № 6. – С. 60-61.
10. Мокеев, А.В. Программно-технический комплекс "ES-энергия" / А.В. Мокеев, Д.Н. Ульянов, В.Н. Бовыкин // Энергетик. – 2007. – № 6. – С. 45.
11. Мокеев, А.В. Синтез частотных фильтров для устройств релейной защиты / А.В. Мокеев // Изв. вузов. Электромеханика. – 2008. – Спецвыпуск "Диагностика оборудования". – С. 73-74.
12. Мокеев, А. В. Обработка сигналов частотными фильтрами устройств релейной защиты / А.В. Мокеев // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2009. – № 1. – С. 25-30.
13. Мокеев А. В. Анализ частотных фильтров на основе особенностей спектральных представлений сигналов // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2009. – № 2. – С. 61-68.
14. Мокеев, А. В. Совмещение спектрального подхода и метода пространства состояний для анализа и синтеза цифровых фильтров / А.В. Мокеев // Вестник поморского университета. Серия Естественные науки. – 2009. – № 2. – С. 92-99.
15. Мокеев, А. В. Цифровые измерительные преобразователи ЭНИП-2 / А.В. Мокеев // Датчики и системы. 2009. – № 6. – С. 68-71.
16. Мокеев, А.В. Анализ цифровых фильтров, используемых для предварительной обработки сигналов устройств релейной защиты / А.В. Мокеев // Изв. вузов. Электромеханика. – 2009. – № 4. – С. 37-42.
17. Мокеев, А.В. Синтез усредняющих КИХ-фильтров для интеллектуальных электронных устройств энергосистем / А.В. Мокеев // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – Спецвыпуск "Диагностика оборудования". – С. 95-98.

Публикации в других изданиях, авторские свидетельства

18. Антонов, В.И. О методах обработки сигналов релейной защиты / В.И. Антонов, В.К. Ванин, А.В. Мокеев // Электротехнические устройства и системы на основе микропроцессоров и микроЭВМ: Межвузовский сборник. – Чебоксары: Изд.Чуваш. ун-та, 1985. – С.110-118.
19. Ванин, В.К. Оптимальные алгоритмы предварительной обработки сигналов программируемых устройств защиты и автоматики энергосистем / В.К. Ванин, А.В. Мокеев // Тез. докл.

- Республ. науч.-техн. семинара "Программируемые устройства релейной защиты и автоматики энергосистем". – Рига, 1986. – С.18-20.
20. Ванин, В.К. Современные методы обработки сигналов в технике релейной защиты / В.К. Ванин, А.В. Мокеев // Тр. ЛПИ. – Л.: ЛПИ, 1986. – вып.421. – С.111-123.
 21. А.с. 1327258 СССР, М.Кл. Н02 Н 3/40. Устройство для комплексной релейной защиты электроустановки / Ванин В.К., Мокеев А.В. – Оpubл. 30.07.87, Бюл. № 28.
 22. А.с. 1343494, М.Кл. Н02 Н 3/38. Устройство для измерения и контроля параметров электрооборудования / Ванин В.К., Мокеев А.В. – Оpubл. 07.10.87, Бюл. № 37.
 23. Мокеев, А.В. Синтез фильтров ортогональных составляющих для систем противоаварийной автоматики энергосистем / А.В. Мокеев // Тез. докл. науч.-техн. конф. "Вопросы рационального использования природных, сырьевых и энергетических ресурсов на европейском севере". – Архангельск, РИО АЛТИ, 1991. – С. 39-40.
 24. Мокеев, А.В., Автоматизированная система контроля и учета электроэнергии «ES-Энергия» / А.В. Мокеев, Д.Г. Козлов, Д.Н. Ульянов // Совершенствование энергетических систем и технологического оборудования: сб. науч. трудов. - Архангельск, Изд-во АГТУ, 2002. – С.124-129.
 25. Мокеев, А.В., Разработка систем сбора данных с цифровых измерительных преобразователей и микропроцессорных устройств релейной защиты / А.В. Мокеев, А.В. Миклашевич // Тез. докл. конф. "Релейная защита и автоматика энергосистем – 2004". – М.: ВВЦ, 2004. – С.149-150.
 26. Мокеев А.В. Совершенствование микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики 6-35 кВ / А.В. Мокеев // Сборник научных трудов. Выпуск LX. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2004. – С.198-202.
 27. Мокеев, А.В. Использование спектральных представлений сигналов и систем на основе преобразования Лапласа для анализа линейных систем / А.В. Мокеев // Тез. докл. 8-й Междун. науч.-техн. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2006". – М.: РНТОРЭС, 2006. – Т.1. – С.43-47.
 28. Мокеев, А.В. Анализ и синтез частотных фильтров с использованием спектральных представлений на основе преобразования Лапласа / А.В. Мокеев // Тез. докл. XII Междун. науч.-техн. конф. "Радиолокация, навигация, связь". – Воронеж, 2006. – Т.1. – С. 1174-1186.
 29. Мокеев, А.В. Математические модели сигналов и частотных фильтров устройств релейной защиты и автоматики энергосистем / А.В. Мокеев // Тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф. "Моделирование. теория, методы и средства". – Новочеркасск, ЮРГТУ, 2006. – Ч.2. – С. 35-40.
 30. Мокеев, А.В. Повышение качества телеинформации, используемой для оценки состояния и управления энергообъектами / А.В. Мокеев // Тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф. "Современные энергетические системы и управление ими". – Новочеркасск, ЮРГТУ, 2006. – Ч.1. – С. 54-60.
 31. Мокеев, А.В. Разработка многофункциональных измерительных преобразователей / А.В. Мокеев // Тез. докл. VII Междунар. науч.-практ. конф. "Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики". – Новочеркасск, ЮРГТУ, 2006. – Ч.2. – С. 33-35.
 32. Мокеев, А.В. Разработка и исследование многофункциональных измерительных преобразователей для АСДУ энергосистем / А.В. Мокеев // Тез. докл. Мат. VII Междунар. науч.-практ. конф. "Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах". – Новочеркасск, НПО Темп, 2006. – Ч.1. – С. 42-46.
 33. Мокеев, А.В. Быстрые алгоритмы реализации усредняющих КИХ-фильтров / А.В. Мокеев // Тез. докл. XIX ВНТК "Информационные технологии в науке, проектировании и производстве (Computer-Based Conference)". - Нижний Новгород, МВВО АТН РФ. –2006. – Ч.2. – С. 13-15.
 34. Мокеев, А.В. Анализ фильтров в координатах комплексной частоты / А.В. Мокеев // Тез. докл. 9-й Междун. науч.-техн. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2007". – Москва, РНТОРЭС. – Т.1. – С.40-44.
 35. Мокеев, А.В. Анализ КИХ-фильтров при входных сигналах конечной длительности / А.В. Мокеев // Тез. докл. 9-й Междун. науч.-техн. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2007". – М.: РНТОРЭС. – Т.1. – С.52-55.

36. Мокеев, А.В. Анализ спектра в координатах комплексной частоты при использовании КИХ-фильтров / А.В. Мокеев // Тез. докл. 9-й Междун. науч.-техн. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2007". – М.: РНТОРЭС. – Т.1. – С.55-59.
37. Mokeev, A.V. The Digital Filter Analysis by the Complex Amplitude Method / A.V. Mokeev // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2007). – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter, Russia. – 2007. – Pp. 99-103.
38. Мокеев, А.В. Математическое моделирование цифровых фильтров / А.В. Мокеев // Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. ПМ-2007. - Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. – Ч. 1. – С. 81-85.
39. Мокеев, А.В. Математическое моделирование многофункционального устройства релейной защиты // Тез. докл. 5-й Всерос. науч.-техн. конф. – Вологда, ВоГТУ, 2007. – т.1. – С. 155-158.
40. Мокеев, А.В. Анализ трехфазных цепей с использованием модифицированного метода комплексных амплитуд / А.В. Мокеев // Тез. докл. 5-й Всерос. науч.-техн. конф. – Вологда, ВоГТУ, 2007. – Т.1. – С. 158-161.
41. Мокеев, А.В. Синтез рекурсивных алгоритмов КИХ-фильтров / А.В. Мокеев // Тез. докл. XIII Междунар. науч.-техн. конф. "Радиолокация, навигация, связь RLNC-2007". – Воронеж, 2007. – Т.1. – С. 342-349.
42. Мокеев, А.В. Расширение области применения символического метода при анализе линейных цепей / А.В. Мокеев // Тез. докл. II Всерос. науч.-техн. конф. "Проблемы электротехники электроэнергетики и электротехнологии". – Тольятти, ТГУ, 2007. – С. 168-171.
43. Mokeev, A.V. Spectral expansion in coordinates of complex frequency application to analysis and synthesis filters / A.V. Mokeev // in Proc. Int. TICSP Workshop Spectral Meth. Multirate Signal Process SMMSP-2007. –Moscow, 2007. – Pp. 159-167.
44. Мокеев, А.В. Три подхода к математическому моделированию частотных фильтров / А.В. Мокеев // Тез. докл. VII Междунар. науч.-практ. конф. "Моделирование. теория, методы и средства". – Новочеркасск, ЮРГТУ, 2007. – Ч.3. – С. 28-34.
45. Мокеев, А.В. Особенности разработки алгоритмов обработки сигналов многофункциональных устройств релейной защиты / А.В. Мокеев // Тез. докл. VII Междунар. науч.-практ. конф. "Современные энергетические системы и комплексы и управление ими". – Новочеркасск, ЮРГТУ, 2007. – Ч.1. – С.35-36.
46. Мокеев, А.В. Синтез фильтров для многофункциональных устройств релейной защиты / А.В. Мокеев // Тез. докл. VII Междунар. науч.-практ. конф. "Современные энергетические системы и комплексы и управление ими". – Новочеркасск, ЮРГТУ, 2007. – Ч.1. – С.25-29.
47. Мокеев, А.В. Синтез КИХ-фильтров для многофункциональных устройств релейной защиты 6-35 кВ // Тез. докл. VII Междунар. науч.-практ. конф. "Современные энергетические системы и комплексы и управление ими". – Новочеркасск, ЮРГТУ, 2007. – Ч.1. – С.29-34.
48. Мокеев, А.В. Синтез КИХ-фильтров для интеллектуальных устройств энергосистем / А.В. Мокеев // Тез. докл. VIII Междунар. науч.-практ. конф. "Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики". – Новочеркасск, ЮРГТУ, 2007. – С.63-67.
49. Vanin, V.K., Designing of protection IED of electric power systems / V.K. Vanin, A.V. Mokeev, M.G. Popov // in Proc. Int. Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems CIGRE-2007. – Cheboksary, 2007.
50. Мокеев, А. В. Синтез быстрых алгоритмов КИХ-фильтров, преобразований Фурье и Лапласа / А.В. Мокеев // Тез. докл. 10-й Междун. науч.-техн. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2008". – М.: РНТОРЭС, 2008. – С.43-47.
51. Мокеев, А.В. Повышение качества телемеханической информации для АСДУ электростанций и электрических сетей / А.В. Мокеев // Электроинфо. – 2008. – № 11. – С. 58-65.
52. Мокеев А.В. Синтез БИХ-фильтров на основе спектральных представлений в координатах комплексной частоты / А.В. Мокеев // Тез. докл. 11-й Междун. науч.-техн. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2009". – М.: РНТОРЭС, 2009. – С.169-172.
53. Mokeev, A.V. Description of the digital filter by the state space method / A.V. Mokeev // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2009). – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter, 2009. – Pp. 128-132.
54. Mokeev, A.V. Intellectual electronic devices design for electric power systems based on phasor measurement technology / A.V. Mokeev // in Proc. Int. Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems CIGRE-2009. – Moscow, 2009. – Pp. 523-530.