

На правах рукописи



ПЕТРОВ Владимир Сергеевич

**ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА
АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ
НАПРЯЖЕНИЯ СЕТЕЙ 110-750 КВ**

Специальность 05.14.02
Электрические станции и электроэнергетические системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2015

Работа выполнена на кафедре теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары).

Научный руководитель

Антонов Владислав Иванович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Официальные оппоненты

Мокеев Алексей Владимирович,

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Архангельск)

Павлов Александр Олегович,

кандидат технических наук, главный инженер общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие Бреслер» (ООО «НПП Бреслер», г. Чебоксары)

Ведущая организация

Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством» (ОАО «ВНИИР», г. Чебоксары)

Защита состоится 19 июня 2015 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д212.301.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» в зале заседания Ученого совета (г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус (корпус № 3), третий этаж, к. 301).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять на имя учёного секретаря диссертационного совета по адресу: 428015, г. Чебоксары, Московский проспект, д. 15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус, (8352) 45-02-07, library@chuvsu.ru) и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан « 27 » апреля 2015 г.

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

Серебрянников
Александр Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Межсистемные связи представляют собой протяженные магистральные ЛЭП. Это определяет высокую вероятность опасного повышения напряжения на них при различных оперативных переключениях, особенно, при включении на холостой ход. С целью предотвращения повреждения высоковольтного электрооборудования в этих режимах применяются специальные устройства автоматического ограничения повышения напряжения (АОПН). Основное предназначение устройств АОПН заключается в приведении в действие различных технических мероприятий, направленных на ликвидацию перенапряжения (например, включение шунтирующих реакторов).

Требования к электрической прочности изоляции электрооборудования регламентируются ГОСТ 1516.3-96. Устройства АОПН в своей работе должны их учитывать. Однако технические характеристики применяемых в настоящее время в энергосистемах устройств АОПН (например, устройств с использованием реле РН-58, устройств с РНВК, шкафа ШП 2704) не в полной мере соответствуют требованиям ГОСТ 1516.3-96. Главным образом это связано с тем, что упомянутые устройства имеют всего две ступени действия и не могут полноценно учитывать зависимость допустимой продолжительности нахождения высоковольтного оборудования под перенапряжением от уровня напряжения (предусмотренную вольт-временной характеристикой, приведенной в ГОСТ 1516.3-96).

Задача учета вольт-временной характеристики в какой-то мере решена в микропроцессорных устройствах АОПН, но остается ряд нерешенных научных и технических задач, возникающих при разработке и эксплуатации цифровой системы АОПН.

Согласно ГОСТ 1516.3-96, учет процессов восстановления ресурса изоляции после исчезновения перенапряжения в АОПН должен осуществляться в зависимости от уровня существовавшего перенапряжения. Однако в известных в настоящее время устройствах АОПН восстановление ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного оборудования либо вовсе не учитывается, либо учет осуществляется с фиксированной интенсивностью во всем диапазоне возможных перенапряжений. В первом случае это может привести к повреждению высоковольтного оборудования, поскольку оно остается под напряжением при исчерпанном ресурсе изоляции, особенно при действии серии перенапряжений. Во втором случае учет восстановления ресурса электрической изоляции является паллиативным, поскольку заданная интенсивность восстановления может не соответствовать реальному процессу. Это может приводить к преждевременному отключению электрооборудования или, так же, как и в первом случае, к продолжению его эксплуатации при исчерпанном ресурсе электрической изоляции.

Также недостаточно высока эффективность применения технических мероприятий из-за несовершенства реализации контроля их успешности, особенно в случае возникновения перемежающихся перенапряжений.

Кроме того, важной является задача повышения точности оценки контролируемой величины (задачи повышения точности оценки максимального и действующего значений напряжения) в различных режимах сети. Необходимость решения этой задачи вызвана особенностью структуры входного сигнала и его цифрового представления.

Столь же важна задача обеспечения устойчивости функционирования АОПН в условиях возникновения локальных искажений во входных сигналах, поскольку они влияют на оценку контролируемой величины, и, в конечном счете, на оценку цифровой системой АОПН остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования. Для повышения точности цифровой системы АОПН в этих условиях должен быть предусмотрен специальный алгоритм восстановления отсчетов с локальными искажениями.

В связи с вышеизложенным разработка цифровой системы АОПН с повышенной точностью измерения контролируемой величины, усовершенствованным алгоритмом учета ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного оборудования, эффективным способом управления техническими мероприятиями и повышенной устойчивостью функционирования является весьма актуальной.

Цель работы заключается в разработке теоретических и инженерных основ усовершенствованной цифровой системы автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ.

Задачи исследования.

1. Анализ процессов электроэнергетической системы, сопровождающихся повышениями напряжения (перенапряжениями), с целью выявления наиболее опасных для электрооборудования и сложных для функционирования цифровой системы АОПН.

2. Обзор существующих принципов построения систем АОПН и выявление основных тенденций их развития.

3. Повышение точности оценки ресурса электрической изоляции высоковольтного электрооборудования цифровой системой АОПН за счет совершенствования алгоритмов оценки контролируемой величины (максимального и действующего значений напряжения).

4. Совершенствование методов оценки ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного электрооборудования за счет нового способа учета процессов его расхода и восстановления.

5. Совершенствование методов формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения.

6. Повышение устойчивости функционирования цифровой системы АОПН в условиях локальных искажений входных сигналов.

Методы исследования. При выполнении исследований применялись методы математического моделирования, теоретических основ электротехники, основы теории техники высоких напряжений и теории цифровой обработки сигналов. Исследования проводились в программных средах Matlab, Mathcad и Excel.

Достоверность полученных результатов работы подтверждается результатами математического моделирования и экспериментальных исследований в реальном масштабе времени на программно-аппаратном комплексе испытаний RTDS (RTDS Technologies Inc., Канада).

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Способы повышения точности оценки контролируемой величины цифровой системой АОПН (способы оценки максимального и действующего значения

напряжения), обладающие повышенной точностью измерения при отклонении частоты сети от номинального значения, а также при наличии в сигнале высших гармоник.

2. Новые алгоритмы цифровой системы АОПН на основе предложенного в работе способа учета восполнения ресурса электрической изоляции контролируемого электрооборудования после исчезновения перенапряжения и способа формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения. Предложенные способы исключают преждевременное отключение электрооборудования, а также продолжение его эксплуатации при исчерпанном ресурсе электрической изоляции.

3. Способ повышения устойчивости функционирования цифровой системы АОПН в условиях локального искажения входного сигнала.

Научная новизна работы.

1. Предложенные способы оценки максимального и действующего значений напряжения отличаются от известных повышенной точностью измерения в режимах со значительным содержанием гармоник, а также при отклонении частоты сети от номинального значения.

2. Предложенные способ учета восполнения ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного электрооборудования и способ формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения отличаются от известных повышенной точностью оценки ресурса электрической изоляции и эффективностью применения технических мероприятий по ликвидации затянувшихся перенапряжений.

3. Разработанный способ повышения устойчивости функционирования АОПН в условиях локальных искажений входного сигнала отличается от известных более высокой эффективностью.

Теоретическая и практическая ценность работы.

1. Предложенные способы оценки максимального и действующего значений напряжения могут быть использованы в различных измерительных органах устройств РЗ и А (например, в цифровых защитах с одной подведенной величиной).

2. Предложенные способ учета восполнения ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного электрооборудования и способ формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения могут быть применены в цифровой системе автоматического ограничения повышения напряжения.

3. Разработанный способ повышения устойчивости функционирования АОПН в условиях локальных искажений входного сигнала может быть применен при разработке различных цифровых систем противоаварийной автоматики и релейной защиты.

4. Предложенные в работе способы развивают теоретические положения релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее результаты докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях: 4-ой международной научно-технической конферен-

ции “Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем” (Российский национальный комитет CIGRE, г. Екатеринбург, 3-7 июня 2013 г.); IX Всероссийской научно-технической конференции “Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике” (г. Чебоксары, 5-7 июня 2014 г.); V международной научно-практической заочной конференции “Энергетика и энергоэффективные технологии” (г. Липецк, 15-16 декабря 2011); X всероссийской научно-технической конференции “Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем” (г. Чебоксары, 6-8 июня 2013 г.); VII и VIII международных молодежных научных конференциях “Тинчуринские чтения” (г. Казань, 25-27 апреля 2012 г., 27-29 марта 2013 г.); VI открытой молодежной научно-практической конференции “Диспетчеризация в электроэнергетике: проблемы и перспективы” (г. Казань, 16-17 ноября 2011 г.).

Реализация результатов работы. Результаты работы положены в основу разработки микропроцессорного устройства АОПН на базе терминалов серии ЭКРА 200 предприятия «ЭКРА» (г. Чебоксары) в составе шкафа противоаварийной автоматики, подготовленного к серийному выпуску.

Теоретические положения цифровой обработки сигналов и алгоритмы АОПН, разработанные в диссертации, используются в учебном процессе по дисциплинам «Цифровая обработка электроэнергетических сигналов» и «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» магистерской программы «Автоматика энергосистем», направления подготовки магистров 140400.68 – «Электроэнергетика и электротехника» в ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

Публикации. Результаты выполненных исследований изложены в 15 научных трудах, в том числе: 2 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ (в журналах «Электричество» и «Электрические станции»), 1 статья в журнале «Релейная защита и автоматизация», 3 патента РФ на изобретения №№ 2422966, 2525832 и 2521745, патент на полезную модель № 96448 и 8 докладов в материалах международных (в том числе конференция CIGRE) и всероссийских конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (87 наименований) и двух приложений. Общий объем составляет 154 страницы, в том числе основного текста 138 страниц, 49 рисунков, 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены цель работы и актуальность поставленных задач, обоснованы научная новизна темы и практическая ценность результатов работы, дана аннотация диссертации.

В первой главе дана классификация перенапряжений в ЭЭС, рассмотрены основные режимы перенапряжений, описаны особенности поведения электрической изоляции высоковольтного оборудования при различных уровнях перенапряжений и их учет в алгоритмах цифровой системы АОПН, проведен обзор существующих устройств АОПН, сформулированы научные и технические задачи совершенствования цифровой системы АОПН.

Устройства АОПН предназначены для работы при резонансных перенапряжениях в электрической сети. Резонансные перенапряжения представляют собой аварийные режимы работы электрической сети и могут быть ограничены путем изменения ее режима и структуры, например, путем включения шунтирующих реакторов. Резонансные перенапряжения возникают, как правило, при подключении линии к источнику напряжения с одной стороны, например, при включении линии в процессе синхронизации различных частей энергосистемы или при действии АПВ на одной стороне линии, а также при аварийном отключении линии с одной стороны. При этом перенапряжения в указанных режимах могут существовать длительное время и достигать значительных величин.

Анализ режимов показывает, что наиболее тяжелые резонансные перенапряжения могут возникать как в результате явлений, связанных с емкостным эффектом на линии электропередач в режиме холостого хода, так и в случае параметрического резонанса на второй гармонике. Оба случая перенапряжения могут быть отягощены отклонением частоты сети до 12 Гц в режимах, связанных с потерей устойчивости. Как показывают исследования автора, обработка входных сигналов и определение контролируемых величин при параметрическом резонансе требуют от цифровой системы АОПН специальных алгоритмов.

Учитывая вышеизложенное, параметрический резонанс на второй гармонике с вероятным уходом частоты основной гармоники от номинального значения до 12 Гц в данной работе принят за основной режим перенапряжения при разработке цифровой системы АОПН. Параметрический резонанс на второй гармонике может возникать при включении линии электропередачи на холостой ход и обусловлен изменением нелинейной индуктивности из-за наличия в магнитном потоке трансформатора медленно затухающей апериодической составляющей.

При незначительных перенапряжениях главным фактором разрушения электрической изоляции высоковольтного оборудования является ее нагрев, а при перенапряжениях с высоким уровнем решающую роль уже играют процессы ионизации изоляционного промежутка. Действительно, допустимое время нахождения изоляции под высоким напряжением относительно невелико, и процессы нагрева в этом случае не успевают оказать на изоляцию сколь-нибудь заметного эффекта. Исходя именно из этих предпосылок, национальный стандарт Российской Федерации (ГОСТ Р 55105-2012) предписывает принимать в современных устройствах АОПН в качестве *контролируемой величины* действующее значение при перенапряжениях невысокого уровня и максимальное значение – при перенапряжениях значительного уровня.

Прямое использование понятий и определений, изложенных в классическом курсе основ электротехники, для формирования алгоритмов измерения действующего и максимального значений контролируемого напряжения неэффективно из-за особенностей цифрового представления информации и входных сигналов АОПН. Как известно, максимальное значение кривой входного сигнала недоступно для непосредственного измерения из-за дискретизации и существующей неопределенности между отсчетами. Цифровое представление сигнала накладывает свои особенности и на алгоритм оценки действующего значения напряжения. При номинальной частоте сети классический метод определения действующего значения свободен от погрешностей, но при ее отклонении от номинального значения в оценке действующего значения появляется смещение, вызванное тем, что усред-

нение не обеспечивает подавления составляющих суммарных частот от гармоник входного сигнала. Поэтому алгоритм определения действующего значения должен учитывать эту особенность.

Кроме того, контроль максимального и действующего значений напряжения связан, так или иначе, с анализом мгновенных значений (отсчетов), и его точность подвержена значительному влиянию различных локальных искажений. Учитывая, что это напрямую влияет на устойчивость функционирования цифровой системы АОПН, а также на точность расчёта контролируемых величин, характеризующих остаточный ресурс электрической изоляции оборудования, в АОПН необходимо предусмотреть специальный алгоритм коррекции локальных искажений в сигнале напряжения. В измерительных органах цифровой системы АОПН для определения максимального и действующего значений должны использоваться отсчёты напряжения только после коррекции локальных искажений.

Таким образом, в цифровой системе АОПН должны использоваться нетрадиционные с точки зрения теоретических основ электротехники алгоритмы, но в полной мере обеспечивающие необходимые метрологические характеристики измерения действующего и максимального значений контролируемого напряжения.

Согласно ГОСТ 1516.3-96 учет процессов восстановления ресурса электрической изоляции после исчезновения перенапряжения должен осуществляться в устройстве АОПН в зависимости от уровня напряжения, действовавшего во время перенапряжения. Это связано с тем, что различные уровни перенапряжения оказывают неодинаковое воздействие на свойства электрической изоляции. При незначительных уровнях существовавшего перенапряжения интенсивность восстановления электрической изоляции будет невысокой, а при высоких уровнях будет значительной. Однако проведенный обзор устройств АОПН отечественного и зарубежного производства показал, что они либо не учитывают процессы восстановления свойств электрической изоляции, либо ведут учет с фиксированной интенсивностью. В первом случае это может привести к повреждению высоковольтного оборудования, поскольку оно остается под напряжением при исчерпанном ресурсе электрической изоляции, особенно при действии серии перенапряжений. Во втором – оборудование может быть либо отключено преждевременно (излишнее отключение), либо, наоборот, необоснованно оставлено под напряжением.

Успешность ликвидации перенапряжений в значительной мере зависит от обоснованности и своевременности применения тех или иных технических мероприятий (например, включение реакторов). Однако указанные мероприятия не всегда успешны. Поэтому для обеспечения надежной ликвидации перенапряжения необходимо контролировать их успешность. Практически все известные устройства АОПН выполняют этот контроль путем измерения длительности перенапряжения. Если длительность перенапряжения превысит заданное время, то формируется признак отказа технических мероприятий ступени и приводятся в действие технические мероприятия следующей ступени. Использование фиксированного времени является паллиативом, заменяющим оценку уровня остаточного ресурса электрической изоляции контролем продолжительности перенапряжения. Это снижает эффективность применения технических мероприятий, особенно в случае перемежающихся перенапряжений, поскольку не учитывается расход ресурса электрической изоляции при предыдущих перенапряжениях.

Дальнейшее совершенствование способов управления техническими мероприятиями возможно, на взгляд автора, путем прямой оценки остаточного ресурса электрической изоляции в соответствии с вольт-временной характеристикой (ВВХ) высоковольтного оборудования и более детального учета процессов восстановления свойств электрической изоляции после ликвидации перенапряжения.

Во второй главе предлагаются способы повышения точности оценки контролируемой величины (оценки максимального и действующего значения напряжения), исследуются их характеристики точности в режиме параметрического резонанса на второй гармонике в электрической сети. Предлагаемые способы защищены патентами РФ № 2525832 и 2521745.

Оценка максимального значения. Очевидно, что оценка максимального значения контролируемого напряжения по наибольшему из отсчетов около предполагаемого максимума кривой выпрямленного напряжения будет смещенной. Действительно, как видно из рис. 1, наибольший по величине отсчет u_0 отличается от максимального значения u_{\max} текущего полупериода и практически всегда будет меньше него на величину $\Delta u = u_{\max} - u_0$. Относительная ошибка оценки максимального значения доходит до 5% (рис. 2) и зависит от положения отсчета с наибольшим значением u_0 относительно максимальной точки кривой u_{\max} .

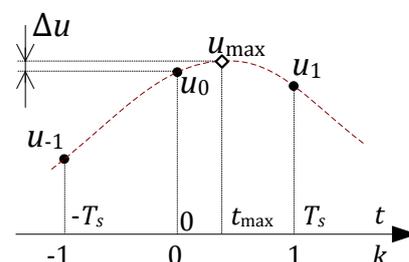


Рис. 1. Оценка максимального значения u_{\max} кривой (помечено ромбиком) по отсчетам цифрового сигнала

С целью повышения точности оценки предлагается определять максимальное значение напряжения по экстремуму интерполяционной кривой, проведенной через отсчеты вблизи предполагаемого максимума напряжения. Для этого формируются отсчеты выпрямленного сигнала u_k (метки в виде светлых кружков на кривой 2 рис. 3). Затем на каждом периоде уже выпрямленного сигнала выделяется отрезок, все отсчеты которого выше порога (отсчеты между точками a и b). Тем самым на каждом полупериоде сигнала (на периоде выпрямленного сигнала) определяется отрезок, содержащий в себе абсолютное максимальное значение напряжения.

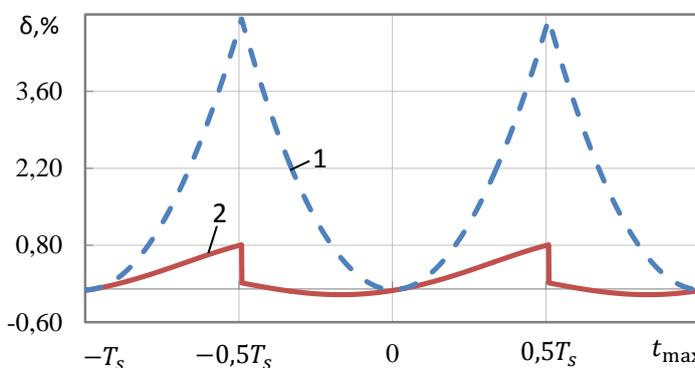


Рис. 2. Погрешность оценки максимального значения сигнала при параметрическом резонансе на второй гармонике (интервал дискретизации $T_s = 1/1000$ с): 1 – по максимальному отсчету; 2 – по предлагаемому способу

Как видно из рис. 3, порог должен обеспечивать однозначное определение отрезка с максимальным значением напряжения для данного периода выпрямленного сигнала. Неудачный выбор порога может привести к выделению на периоде нескольких отрезков со своими максимумами, что приведет к неправильному учету остаточного ресурса. Поэтому порог нужно выбирать с учетом режимов перенапряжения, при которых существует вероятность появления нескольких экстремумов на периоде выпрямленного сигнала. С этой точки зрения наиболее харак-

терным является случай параметрического резонанса, когда в выпрямленном сигнале (кривая 2 на рис. 3) появляется два экстремума. Для правильного выделения отрезка, содержащего абсолютный максимум на полупериоде сигнала, порог выбирается выше малой полуволны выпрямленного сигнала.

После выделения необходимого отрезка, способ интерполирует кривую напряжения полиномом с единственным максимумом, проведенным по отсчетам напряжения. Для этого определяется наибольший отсчет u_0 на выделенном отрезке, а затем заданное число отсчетов слева и справа от него. Через эти отсчеты проводят интерполяционную кривую и принимают ее экстремум \hat{u}_{\max} за абсолютное максимальное значение электрического напряжения на полупериоде.

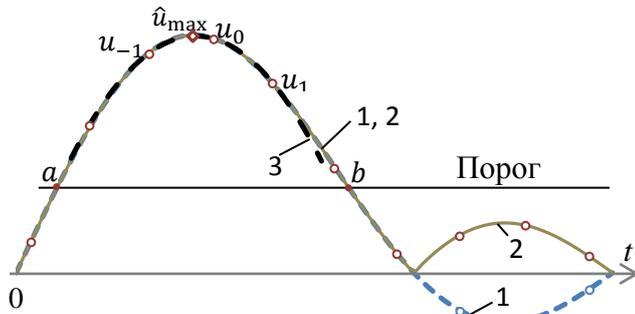


Рис. 3. Определение максимального значения по новому способу при периодическом несинусоидальном напряжении, содержащем синфазные основную и вторую гармоники равной амплитуды (показан полупериод напряжения): 1 – сигнал напряжения, 2 – выпрямленный сигнал напряжения, 3 – интерполяционная кривая (ее максимальное значение \hat{u}_{\max} (1) отмечено ромбиком)

Требование единственности максимума накладывает на выбор интерполяционного полинома ограничение, заключающееся в том, что порядок полинома должен быть четным. Минимальный порядок такого полинома равен 2; в этом случае берут по одному отсчету слева и справа от отсчета с максимальным значением (рис. 3) и проводят через упомянутые отсчеты интерполяционную кривую второго порядка и определяют ее максимум как

$$\hat{u}_{\max} = u_0 - \frac{(u_{-1} - u_1)^2}{8(u_{-1} - 2u_0 + u_1)}. \quad (1)$$

Погрешность предлагаемого способа оценки максимального значения при параметрическом резонансе не превышает 1% (рис. 2).

Оценка действующего значения. Традиционно, квадрат действующего значения $U^2(k)$ периодического сигнала $u(k)$ в текущий момент времени k определяется по отсчетам сигнала как $\hat{U}^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=k-N+1}^k u^2(m)$, где N – число отсчетов на периоде (рис. 4).

В случае параметрического резонанса на второй гармонике

$$u(k) = A_1 \sin(k\omega_1 T_s) + A_2 \sin(k2\omega_1 T_s),$$

где ω_1 – частота основной гармоники, сигнал на выходе квадратора (промежуточный сигнал)

$$u_t(k) = u^2(k) = U^2 + u_a(k) \quad (2)$$

будет содержать в себе постоянную составляющую, равную квадрату действующего значения напряжения,

$$U^2 = \left(\frac{A_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{A_2}{\sqrt{2}}\right)^2 \quad (3)$$

и переменную составляющую

$$u_a(k) = -\frac{1}{2} A_1^2 \cos(k2\omega_1 T_s) - \frac{1}{2} A_2^2 \cos(k4\omega_1 T_s) + A_1 A_2 [\cos(k\omega_1 T_s) - \cos(k3\omega_1 T_s)], \quad (4)$$

подлежащую удалению.

В классическом способе удаление переменной составляющей достигается усреднением промежуточного сигнала $u_t(k)$ на периоде основной гармоники измеряемого напряжения:

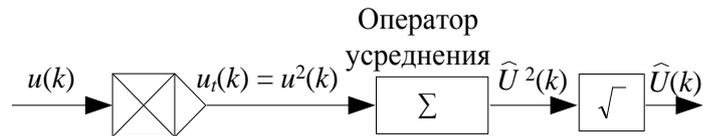


Рис. 4. Блок-схема классического способа оценки действующего значения

$$\hat{U}^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=k-N+1}^k u_t(m). \quad (5)$$

Тогда, вводя в рассмотрение амплитудно-фазовую частотную характеристику оператора усреднения $H_\Sigma(j\omega T_s) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N e^{-jk\omega T_s}$, оценку квадрата действующего значения (5) с учетом (2) - (4) можно представить как

$$\hat{U}^2(k) = H_\Sigma\{U^2\} + H_\Sigma\{u_a(k)\}, \quad (6)$$

где $H_\Sigma\{\dots\}$ – условное обозначение выходного сигнала оператора усреднения.

При номинальной частоте $\omega_1 = \omega_{1n}$ слагаемые (4) будут подавлены оператором усреднения (5) полностью, поскольку его коэффициенты усиления на нормированных частотах $\omega_{1n}T_s \div 4\omega_{1n}T_s$ равны нулю. Однако отклонение частоты сети от номинального значения ω_{1n} вызовет смещение в оценке действующего значения из-за ухудшения подавляющих свойств оператора усреднения составляющих суммарных частот. В силу особенностей АЧХ оператора (5) наибольшая погрешность возникает при снижении частоты.

В предельном случае, когда амплитуды основной и второй гармоники равны, т.е. $A_1 = A_2$ и частота сети снижается до 45 Гц, ошибка в оценке действующего значения достигает 11%, а при дальнейшем уменьшении частоты до 38 Гц – 17%.

В новом способе оценки действующего значения предлагается использовать дополнительные преобразования промежуточного сигнала $u_t(k)$ с помощью различных фильтров, включаемых между квадратором и оператором усреднения (рис. 5). Фильтры должны обеспечивать подавление составляющих суммарных и разностных частот в переменной составляющей (4). Особенность этих фильтров будет заключаться в их АЧХ, оптимально подобранной для подавления составляющих, возникающих в промежуточном сигнале именно в режиме параметрического резонанса на второй гармонике, с учетом отклонения частоты сети. Как видно из (4), в переменной составляющей $u_a(k)$ промежуточного сигнала $u_t(k)$ преобладают первая и третья гармоники. Поэтому фильтры должны обеспечивать значительное подавление именно этих составляющих с учетом возможного отклонения частоты.

Квадрат оценки действующего значения $\hat{U}(k)$ сигнала $u(k)$ в этом случае определяется как

$$\hat{U}^2(k) = H_\Sigma[H_e\{u_t(k)\}], \quad (7)$$

где $H_e\{\dots\}$ – условное обозначение выходного сигнала фильтра $e(k)$.

Рассматривалось использование фильтров наиболее простых с точки зрения реализации в цифровой системе АОПН. Например, этому критерию отвечает фильтр

$$e(k) = \frac{1}{4} \left[u_t(k) + u_t\left(k - \frac{N}{4}\right) + u_t\left(k - \frac{N}{2}\right) + u_t\left(k - \frac{3N}{4}\right) \right]. \quad (8)$$

а также предложенный автором специальный фильтр

$$e(k) = \frac{1}{4} \left[u_t(k) + u_t\left(k - \frac{N}{4}\right) + u_t\left(k - \frac{N}{2}\right) + u_t\left(k - \frac{4N}{5}\right) \right] \quad (9)$$

со смещением частот наибольшего подавления влево по оси. Хотя фильтр (9) не

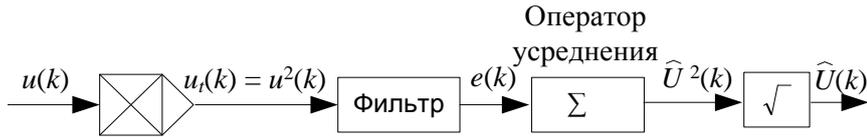


Рис. 5. Блок-схема нового способа оценки действующего значения

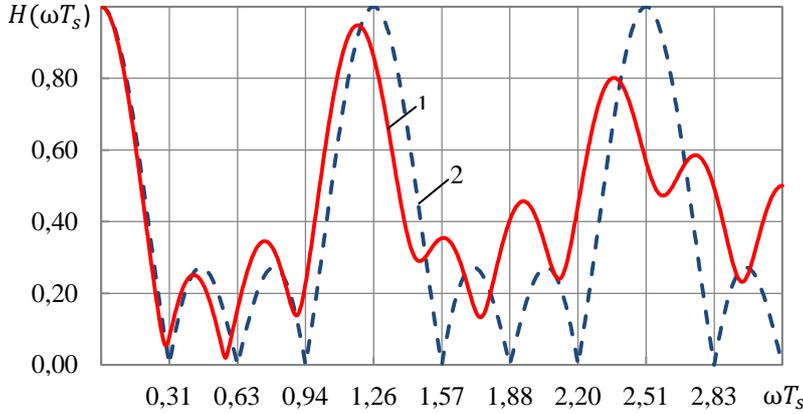


Рис. 6. АЧХ фильтров ($N = 20$): 1 – (9), 2 – (8)

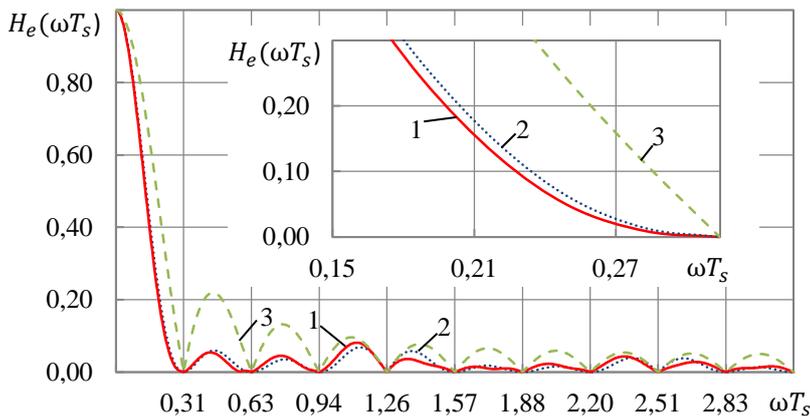


Рис. 7. АЧХ результирующего фильтра ($N = 20$): 1 – при использовании фильтра (9); 2 – при фильтре (8); 3 – без фильтра (оператор усреднения)

с частотой дискретизации сигнала 1000 Гц. Таким образом, разработанный метод позволяет значительно снизить погрешность оценки действующего значения по сравнению с классическим способом.

В третьей главе предложен новый способ формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения и способ учета восполнения ресурса электрической изоляции, введено новое понятие диаграммы расхода остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования.

Введенное в работе понятие диаграммы расхода остаточного ресурса электрической изоляции упрощает контроль ресурса в цифровой системе АОПН. Диаграмма строится с использованием вольт-временной характеристики (ВВХ).

Положим, что остаточный ресурс изоляции не расходован и составляет 1, отн. ед. Если высоковольтное оборудование подвергнется перенапряжению $\gamma_n = U/U_{\text{раб}}$, где U – текущий уровень напряжения, $U_{\text{раб}}$ – максимально допустимое напряжение рабочего режима, то ресурс его изоляции будет полностью из-

обеспечивает полного подавления гармоник (рис. 6), но, благодаря подавляющим свойствам оператора усреднения (рис. 7, кривая 3), результирующий фильтр (рис. 7, кривая 1) будет свободен от этого недостатка.

Для работы предлагаемого способа не важно, богат ли сигнал высшими гармониками или содержит лишь составляющую основной гармоники. Предпринимаемые алгоритмом действия будут инвариантны на множестве предусмотренных в нем операций.

Благодаря использованию дополнительной фильтрации с помощью (9) промежуточного сигнала погрешность нового метода оценки действующего значения при параметрическом резонансе с уменьшением частоты сети на 12(5) Гц не превышает 5(3,7)% в АОПН

расходован за время T_n (задается ВВХ). Поэтому интенсивность расхода ресурса при постоянном уровне перенапряжения γ_n определяется как

$$\Delta_R^{T_n} = \frac{1}{T_n}. \quad (10)$$

Отсюда следует, что диаграмма расхода остаточного ресурса показывает, как меняется остаток ресурса R изоляции в течение времени действия перенапряжения γ_n (рис. 8).

Если уровень перенапряжения γ_n не меняется во времени, то, как следует из (10), ресурс изоляции уменьшается линейно от 1 до 0 за время T_n . Поэтому диаграмма расхода ресурса R представляет собой семейство прямых, имеющих общее начало в точке $R = 1$

при $T = 0$ и заканчивающихся на пересечении с осью T в точках T_n . Каждая линия дает количественную оценку изменения остаточного ресурса R изоляции во времени при перенапряжении с неизменным заданным уровнем. На рис. 8 сплошные наклонные прямые соответствуют линиям расхода ресурса изоляции при перенапряжениях $\gamma_I \div \gamma_{III}$ (допустимые времена $T_I \div T_{III}$). В дальнейшем линии расхода при перенапряжении неизменного уровня γ_n и соответствующем ему допустимым временем T_n будем обозначать как $\gamma_n(T_n)$.

Для повышения точности учета расхода ресурса электрической изоляции R_n предлагается определять его на каждом полупериоде контролируемой величины γ_n путем вычитания из остаточного ресурса предыдущего полупериода R_{n-1} части ресурса ΔR_n текущего n -го полупериода

$$R_n = R_{n-1} - \Delta R_n. \quad (11)$$

Часть ресурса ΔR_n , которую теряет изоляция после воздействия напряжения γ_n полупериода продолжительностью T_0 , определяется с учетом интенсивности расхода ресурса согласно (10), т.е. $\Delta R_n = T_0 \Delta_R^{T_n} = T_0 / T_n$.

На основе диаграммы расхода и на непосредственной оценке остаточного ресурса электрической изоляции (11) разработан **новый способ формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения**.

Предлагаемый способ может иметь неограниченное число ступеней для управления техническими мероприятиями. Однако с целью упрощения пояснения принципа его работы будем считать, что на ВВХ и диаграмме расхода ресурса технические мероприятия представлены тремя ступенями.

Способ в первую очередь и без замедления вводит в действие технические мероприятия той ступени, которая соответствует перенапряжению γ_n . И логика действия ступеней такова, что отказ предпринятых данной ступеню технических мероприятий (отказ оборудования или неэффективность действия) должен привести в действие технические мероприятия следующей ступени.

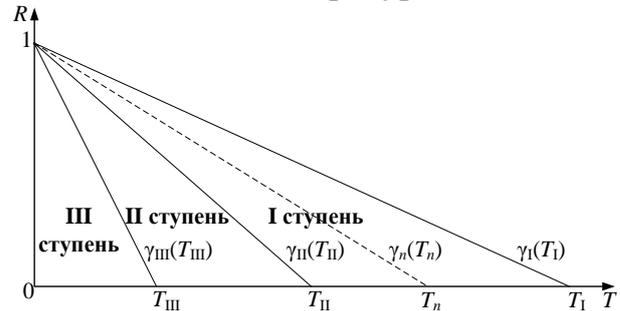


Рис 8. Диаграмма расхода остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования

Для контроля успешности технических мероприятий используется признак их отказа. За признак отказа принимается снижение остаточного ресурса R изоляции до пороговой величины текущей ступени, при которой еще способ успеет последовательно, по мере необходимости, привести в действие технические мероприятия старших ступеней. В случае первой ступени пороговой величиной будет $R_I^{T_n}$, при достижении которой принудительно приводятся в действие технические мероприятия второй ступени. Эта пороговая величина рассчитывается исходя из времени $T_{\Sigma 1}$, необходимого для осуществления технических мероприятий всех старших ступеней с учетом вероятности отказа всех ступеней, кроме последней (III ступени) – ступени отключения оборудования от сети. Под действием текущего напряжения γ_1 расход ресурса будет происходить с интенсивностью, определяемой выражением (10) [на диаграмме рис. 9 изменение ресурса происходит по штриховой наклонной линии

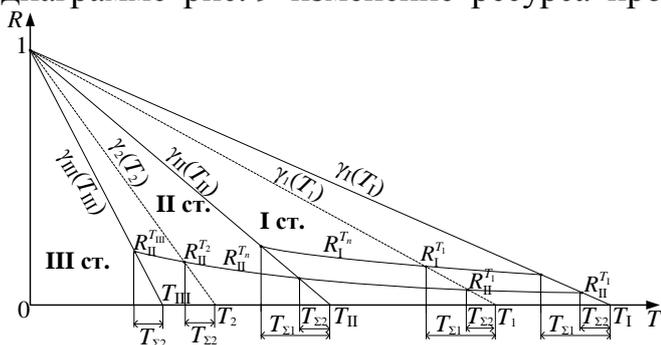


Рис. 9. Иллюстрация работы предлагаемого нового способа с помощью диаграммы расхода остаточного ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного оборудования

$\gamma_1(T_1)$]. Поэтому пороговая величина будет равна

$$R_I^{T_1} = \Delta_R^{T_1} T_{\Sigma 1} = \frac{T_{\Sigma 1}}{T_1} \quad (12)$$

и будет тем выше, чем круче линия расхода ресурса на диаграмме (чем меньше T_1). Как видно из (12), кривая зависимости пороговой величины $R_I^{T_n}$ признака отказа технических мероприятий первой ступени на диаграмме (рис. 9) будет представлять собой гиперболу.

Поведение способа на II ступени практически полностью совпадает с поведением на I ступени. Разница лишь в том, что пороговая величина $R_{II}^{T_n}$ признака отказа технических мероприятий на II ступени рассчитывается исходя из времени $T_{\Sigma 2}$, нужного для осуществления технических мероприятий III ступени – отключения оборудования от сети

$$R_{II}^{T_n} = \Delta_R^{T_n} T_{\Sigma 2} = \frac{T_{\Sigma 2}}{T_n}. \quad (13)$$

На диаграмме кривая пороговой величины $R_{II}^{T_n}$ (13) берет начало на левой граничной линии $\gamma_{III}(T_{III})$ III ступени (точка $R_{II}^{T_{III}}$) и заканчивается на правой граничной линии $\gamma_1(T_1)$ I ступени (точка $R_{II}^{T_1}$). Это дает возможность, в случае последовательного отказа мероприятий I, а затем и II ступени, выработать признак их отказа и ввести в действие III ступень (в данном случае – дать сигнал на отключение оборудования). Сценарий такого действия способа иллюстрируется примером развития событий по линии $\gamma_1(T_1)$: в точке $R_I^{T_1}$ способ вводит в действие технические мероприятия II ступени, а затем, при их отказе, в точке $R_{II}^{T_1}$ – мероприятия III ступени. При работе способа на последней ступени (в данном примере – III) оборудование отключается от сети.

Способ позволяет вводить технические мероприятия следующей ступени в действие вовремя, не допуская ни преждевременного приведения их в действие (исключая недоиспользование ресурса электрооборудования), ни их запаздывания (предотвращая повреждение оборудования).

Новый способ учета выполнения ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного оборудования. Удобно раскрывать сущность работы предлагаемого способа в режиме ликвидации перенапряжения или отключения высоковольтного оборудования из-за исчерпания ресурса электрической изоляции (рис. 10). В этом случае с помощью предпринятых технических мероприятий уровень перенапряжения будет снижен от первоначального значения до некоторого уровня. Будем считать, что перенапряжение будет снижено в момент времени T_1 , ликвидировано перенапряжение или отключено высоковольтное оборудование в момент времени T_2 .



Рис. 10. Процессы учета восстановления ресурса электрической изоляции при изменении уровня перенапряжения в предлагаемом способе

Оценка истраченного ресурса электрической изоляции ведется известными устройствами путем накапливания его расхода в единственной переменной. В связи с этим известные устройства в принципе не могут учитывать зависимость характера деструктивных процессов в изоляции от уровня напряжения, действовавшего во время перенапряжения, и вынуждены использовать некоторый усредненный (фиксированный) учет восстановления ресурса изоляции. Как уже отмечалось выше, такой подход к учету восстановления ресурса не соответствует реальным процессам восстановления изоляции.

Этот недостаток известных устройств устраняется предлагаемым способом путем деления диапазона возможных перенапряжений на ступени восстановления и ведения учета расхода и восстановления ресурса изоляции для каждой ступени отдельно. Своим названием они обязаны новому свойству предлагаемого способа, заключающемуся в его способности учитывать процессы восстановления ресурса после исчезновения перенапряжения в зависимости от уровня напряжения, действовавшего во время перенапряжения. Ступени восстановления учитывают разницу в процессах восстановления электрических свойств изоляции в зависимости от характера деструктивных процессов, происходящих в изоляции при различном уровне действующего напряжения. На каждой ступени восстановления учет восстановления ресурса электрической изоляции ведется со своей интенсивностью. Способ может иметь неограниченное число ступеней восстановления. ГОСТ 1516.3-96 предусматривает их две, поэтому далее работа способа поясняется на примере двух ступеней восстановления.

Предположим, что первоначально перенапряжение в течение времени T_1 находится на уровне 2-ой ступени восстановления, а затем, благодаря предпринятым техническим мероприятиям, перенапряжение понижается до уровня 1-ой ступени восстановления. Поэтому расход ресурса предлагаемым способом учитывается отдельно 2-ой ступенью восстановления как

$$L^{(2)} = t\Delta_L^{(2)}, L^{(1)} = 0, t \leq T_1, \quad (14)$$

и 1-ой ступенью восстановления как

$$L^{(1)} = (t - T_1)\Delta_L^{(1)}, L^{(2)} = T_1\Delta_L^{(2)} = L_1, T_1 < t \leq T_2. \quad (15)$$

На рис. 10 изменение оценок затраченных ресурсов ступеней показаны как наклонные $L^{(2)}$ и $L^{(1)}$.

Общий расход ресурса изоляции определяется суммированием затраченных ресурсов ступеней (14) и (15):

$$L = L^{(2)} + L^{(1)}. \quad (16)$$

После ликвидации перенапряжения (при $t > T_2$) восполнение ресурса изоляции для каждой ступени восстановления учитывают путем одновременного уменьшения затраченных ресурсов ступеней с интенсивностью восстановления, соответствующей каждой ступени:

$$L^{(2)} = L_1 - (t - T_2)\Delta_R^{(2)}, T_2 < t \leq T_3, \quad (17)$$

и

$$L^{(1)} = (L_2 - L_1) - (t - T_2)\Delta_R^{(1)}, \quad T_2 < t \leq T_4. \quad (18)$$

На рис. 10 выражения (17) и (18) представлены наклонными $L^{(2)}$ и $L^{(1)}$ при $t > T_2$.

Изменение общего ресурса изоляции оборудования определяется выражением (16) и на рис. 10 показано в виде наклонной L .

Используемый в предлагаемом способе отдельный учет процессов восстановления ресурса изоляции позволяет повысить точность оценки ресурса изоляции при перенапряжениях, обеспечивая полноценную эксплуатацию высоковольтного оборудования.

В четвертой главе исследуется влияние локального искажения на оценку контролируемой величины и остаточного ресурса электрической изоляции, предлагается новый способ повышения устойчивости функционирования цифровой системы АОПН в условиях локальных искажений входного сигнала.

Под локальным искажением в работе понимается нарушение закономерности изменения сигнала из-за импульсной помехи или потери отсчета. Природа происхождения локальных искажений многообразна. Искажения могут возникать, например, из-за потерь отсчетов при их передаче по цифровой сети согласно протоколу МЭК 61850.

Наибольшую погрешность на оценку максимального значения напряжения вносит локальное искажение, возникшее на отсчете вблизи максимума кривой напряжения. При этом абсолютная погрешность оценки равна величине локального искажения.

В отличие от оценки максимального значения, на которую локальное искажение влияет линейно, оценка действующего значения испытывает влияние в меньшей степени (рис.11). Причем с увеличением частоты дискретизации f_s влияние нивелируется благодаря росту эффекта усреднения. Предлагаемый в работе способ оценки действующего значения (раздел 2) заметно снижает влияние локального искажения за счет применения дополнительного преобразования. Так, при относительной величине локального искажения $\eta = b/U_m = 1$ и частоте дискретизации $f_s = 1000$ Гц точность оценки (7) по новому методу превосходит точность оценки (6) классического метода на 3,3% (рис.11).

Влияние локального искажения на оценку остаточного ресурса электрической изоляции. Поскольку локальное искажение сказывается на оценке контролируемой величины, то оно оказывает влияние и на оценку цифровой системой АОПН остаточного ресурса электрической изоляции.

Смещение оценки остаточного ресурса электрической изоляции из-за ошибки оценки контролируемой величины зависит от уровня перенапряжения γ_n . Например, ложное изменение уровня γ_n из-за локального искажения с 1,025 до 1,05 приводит к ошибке в оценке ресурса на 62,5%, а при изменении уровня с 1,25 до 1,67 ошибка составит уже 95%. Возникновение единичного локального искажения не вызывает столь существенной ошибки в оценке остаточного ресурса изоляции. Однако появление серии таких локальных искажений может стать недопустимым.

Повышение устойчивости функционирования цифровой системы АОПН в условиях локальных искажений входного сигнала. Для этого используется новый способ коррекции входного сигнала. Его основная идея заключается в том, что в каждый момент времени с помощью основного и дополнительного операторов линейного предсказания формируется оценка одного и того же произвольно выбранного отсчета цифрового сигнала. Операторы представляют собой линейные фильтры предсказания вперед и назад, а их АФЧХ выбираются таким образом, чтобы сигналы ошибки операторов были равны и противоположны по знаку. Основной и дополнительный операторы вместе образуют интерполирующий фильтр. Поэтому при обработке сигнала без искажения («чистого» сигнала) уровень сигнала на выходе фильтра, представляющего полусумму ошибок предсказания операторов, будет мал. Если же в сигнале появится локальное искажение, то, благодаря сдвигу во времени последовательностей отсчетов, используемых операторами, отсчет с локальным искажением вначале попадает только в окно обработки основного оператора, а окно обработки дополнительного оператора будет без локального искажения. Поэтому ошибка предсказания основного оператора $e_o(k)$ значительно возрастет, а ошибка предсказания дополнительного оператора $e_d(k)$ останется на уровне предсказания отсчета «чистого» сигнала. Это приводит к резкому повышению уровня сигнала на выходе фильтра

$$w(k) = \frac{1}{2} [e_o(k) + e_d(k)], \quad (19)$$

что будет свидетельствовать о наличии локального искажения на текущем отсчете $x(k)$.

В качестве операторов линейного предсказания могут использоваться полиномиальные интерполяционные фильтры и заграждающие фильтры.

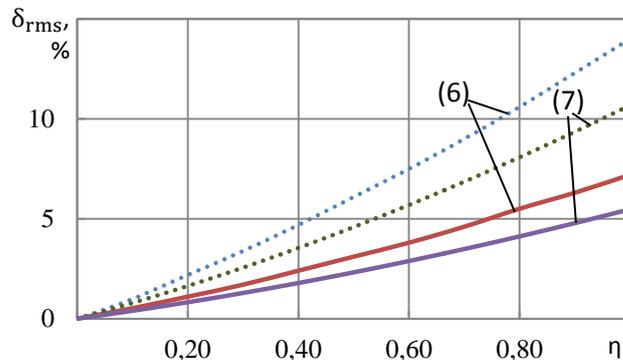


Рис. 11. Зависимость относительной погрешности оценки действующего значения синусоидального напряжения от относительной величины локального искажения $\eta = b/U_m$ при различной частоте дискретизации f_s , где b – величина локального искажения, U_m – амплитуда синусоиды. \cdots – $f_s = 1000$ Гц, $—$ – $f_s = 2000$ Гц

Поясним работу предлагаемого способа при использовании операторов линейного предсказания на основе полиномов второго порядка. Операторы используют разные последовательности отсчетов, причем их сдвиг относительно друг друга может осуществляться по-разному. Одним из вариантов такого сдвига последовательностей является случай, когда основной оператор использует предыдущие отсчеты, включая и текущий k -ый отсчет, а дополнительный оператор – со сдвигом назад на шаг, начиная с $(k - 1)$ -го отсчета. Пусть оба оператора предсказывают $(k - 2)$ -ой отсчет. Основной оператор предсказывает упомянутый отсчет по лидирующим отсчетам:

$$\hat{u}_o(k - 2) = \frac{1}{3}u(k - 3) + u(k - 1) - \frac{1}{3}u(k),$$

а дополнительный оператор по отсчетам, взятым со сдвигом по времени на один шаг:

$$\hat{u}_d(k - 2) = -\frac{1}{3}u(k - 4) + u(k - 3) + \frac{1}{3}u(k - 1).$$

Невязку операторов будем определять как ошибку предсказания отсчета $x(k - 2)$. Несложно видеть, что в текущий k -ый момент невязка дополнительного оператора

$$e_d(k) = u(k - 2) - \hat{u}_d(k - 2) = \frac{1}{3}u(k - 4) - u(k - 3) + u(k - 2) - \frac{1}{3}u(k - 1) \quad (20)$$

представляет собой инвертированную по знаку невязку основного оператора

$$e_o(k) = u(k - 2) - \hat{u}_o(k - 2) = -\frac{1}{3}u(k - 3) + u(k - 2) - u(k - 1) + \frac{1}{3}u(k), \quad (21)$$

вычисленную по последовательности отсчетов со сдвигом на шаг назад. Поэтому АФЧХ невязок основного

$$\underline{H}_o(j\alpha) = \frac{1}{3}(1 - e^{-j\alpha})^3 = \frac{8}{3}\sin^3\left(\frac{\alpha}{2}\right)e^{-j\left(\frac{\pi}{2} + \frac{3}{2}\alpha\right)} \quad (22)$$

и дополнительного

$$\underline{H}_d(j\alpha) = -\frac{1}{3}(1 - e^{-j\alpha})^3 e^{-j\alpha} = -\underline{H}_o(j\alpha)e^{-j\alpha} \quad (23)$$

операторов будут противоположны по знаку и сдвинуты на угол $\alpha = \omega T_s$, равный угловому расстоянию между отсчетами на частоте ω .

Тогда итоговый фильтр

$$w(k) = \frac{1}{6}u(k - 4) - \frac{4}{6}u(k - 3) + u(k - 2) - \frac{4}{6}u(k - 1) + \frac{1}{6}u(k) \quad (24)$$

будет иметь следующую АФЧХ:

$$W(j\alpha) = \frac{1}{2}\underline{H}_o(j\alpha)(1 - e^{-j\alpha}) = \frac{1}{6}(1 - e^{-j\alpha})^4 = \frac{8}{3}\sin^4\left(\frac{\alpha}{2}\right)e^{-j2\alpha}. \quad (25)$$

Рабочая область частот АФЧХ итогового фильтра (24), предназначенного для обработки чистого сигнала, должна располагаться в низкочастотной области – области значительного подавления входного сигнала (рис. 12). Тогда сигнал на выходе итогового фильтра при чистом входном сигнале будет иметь невысокий уровень небаланса. Это важно, поскольку уровень небаланса влияет на выбор порога, а значит, и на чувствительность фильтра (24) к локальному искажению.

Поскольку небаланс зависит от смещения аргументов АФЧХ невязок операторов (22) и (23), а именно от α , то желательно, чтобы последовательности отсчетов, используемые операторами, были сдвинуты относительно друг друга как можно меньше.

Покажем работу способа при синусоидальном сигнале $u(t)$ частоты ω , содержащем локальное искажение. Положим, что после ее преобразования в цифровой сигнал $u(k)$ локальное искажение оказалось в отсчете с номером r . Учитывая это, цифровой сигнал $u(k)$ можно представить в виде суммы двух сигналов: чистой синусоиды

$$u_s(k) = U_m \sin(\omega T_s k) \quad (26)$$

и сигнала $u_b(k)$, состоящего только из локального искажения величиной $b = \eta U_m$ в дискретный момент $k = r$:

$$u_b(k) = \eta U_m \delta(k - r), \quad (27)$$

где η – относительная величина локального искажения,

$$\delta(k) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases} - \text{функция Кронекера.}$$

Удобно рассматривать определение локального искажения как результат реакции линейного фильтра (24) с АФЧХ (25) на цифровой сигнал $u(k) = u_s(k) + u_b(k)$. В этом случае выходной сигнал фильтра $w(k) = w_s(k) + w_b(k)$ будет состоять из реакции на синусоидальный сигнал (26)

$$w_s(k) = U_m W(\omega T_s) \sin[\omega T_s(k - 2)] \quad (28)$$

и реакции $w_b(k)$ на сигнал с локальным искажением (27). Реакцию $w_b(k)$ удобно рассматривать во временной области. До отсчета с локальным искажением (при $k < r$) реакция на локальное искажение $w_b(k) = 0$ и выходной сигнал итогового фильтра (24) будет полностью определяться синусоидальной составляющей (28), являющейся по сути фоновой составляющей реакции фильтра. Именно с учетом его амплитуды выбирается порог h для выходного сигнала фильтра (24), полагая, что

$$h = \zeta U_m W(\omega T_s), \quad (29)$$

где $\zeta \geq 1$ – коэффициент чувствительности порога. При $k = r$ отсчет с локальным искажением входит в окно обработки фильтра (24) и в выходном сигнале появляется составляющая реакции на локальное искажение:

$$w_b(r) = \frac{1}{6} b = \frac{1}{6} \eta U_m. \quad (30)$$

Локальное искажение в отсчете $u(r)$ будет обнаружено, если выходной сигнал фильтра (24) превысит порог h , т.е.

$$|w(r)| = |w_s(r) + w_b(r)| > h. \quad (31)$$

С учетом выражений (28) – (31) мера чувствительности способа к локальному искажению будет представлена неравенством

$$\eta > 6(\zeta + 1)W(\omega T_s). \quad (32)$$

Как видно из (32), чем выше подавление фильтра (24) на частоте чистого сигнала [чем ниже коэффициент передачи $W(\omega T_s)$], тем выше чувствительность способа.

Чувствительность способа может быть усилена, если вместо выходного сигнала фильтра (24) использовать полуразность между полусуммой невязок основ-

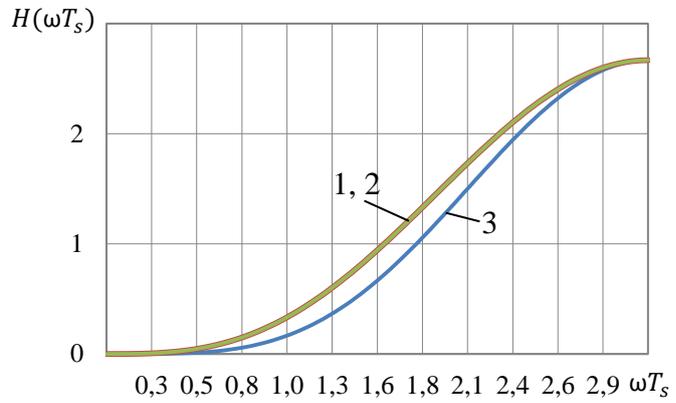


Рис. 12. АЧХ фильтров: (21) – 1, (20) – 2, (24) – 3

ного и дополнительного операторов линейного предсказания (19) на текущем k -ом отсчете и аналогичной полусуммой на предыдущем $(k-1)$ -ом отсчете.

Дальнейшее повышение чувствительности способа к локальным искажениям возможно при более скрупулёзном учете свойств сигнала на выходе итогового фильтра. Анализ показывает, что уровень составляющей реакции на локальное искажение вначале, по мере продвижения локального искажения вглубь окна фильтра, растёт, а затем – уменьшается. Эта особенность в поведении сигнала и положена в основу дальнейшего развития способа. После выполнения условия (31) анализируют отношения разностей $\theta(k) = \Delta w(k)/\Delta w(k-1)$, где $\Delta w(k) = w(k) - w(k-1)$, $k = \overline{r+1, r+4}$.

С учетом (24) эти отношения будут следующими: $\theta(r+1) = 5$; $\theta(r+2) = -2$; $\theta(r+3) = -1$; $\theta(r+4) = -\frac{1}{2}$. Видно, что отношения разностей не зависят от величины локального искажения b . После выполнения условия срабатывания (31) каждое из отношений может служить индикатором отсчета с локальным искажением. Достаточно задаться порогом для отношений h_θ и сравнивать с ним абсолютные значения отношений $\theta(k)$:

$$|\theta(k)| < \zeta_\theta h_\theta, \quad (33)$$

где $\zeta_\theta \geq 1$ – коэффициент чувствительности порога h_θ . Например, если принять $\zeta_\theta = 1$ и $h_\theta = 1,5$, то способ сработает на $(r+3)$ -ем отсчете, когда $|\theta(r+3)| = 1 < 1,5$. Способ определит, что локальное искажение находится на отсчете, отстоящем на три отсчета назад с момента срабатывания условия (33). После определения места локального искажения в окне фильтра отсчет с локальным искажением $u(r)$ заменяется оценкой $\hat{u}_s(r) = u(r) - \frac{1}{c(r)}w(r+3)$, где $c(r)$ – взвешенный коэффициент отсчета чистого сигнала $u_s(r)$.

Специальные исследования показали, что при отсутствии шума способ может определить и устранить локальное искажение величиной 5% от максимального значения в сигнале параметрического резонанса.

В пятой главе рассматриваются вопросы практической реализации положений диссертации в новой цифровой системе АОПН на серийной линейке многофункциональных терминалов ЭКРА 200 производства ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары. Разработанная цифровая система АОПН подготовлена к серийному выпуску. Рассмотрены режимные и технологические требования к разрабатываемой цифровой системе АОПН, предложена ее функционально-логическая схема (рис. 13). Приведены результаты испытаний на RTDS (программно-аппаратный комплекс испытаний в реальном масштабе времени).

Конструктивно терминалы с цифровой системой АОПН выполняются в виде блочного каркаса и изготавливаются для установки в шкаф, а также как самостоятельное устройство (рис. 14). Устройство соответствует стандартам «ФСК ЕЭС», «СО ЕЭС», а также требованиям ПУЭ.

Цифровая система АОПН имеет в своем составе измерительный орган контроля величины и направления реактивной мощности и величины активной мощности, позволяющий выявить линию-источник повышения напряжения, функции блокировки при неисправности цепей напряжения и при включении линии, функцию УРОВ АОПН, а также логику управления техническими мероприятиями.

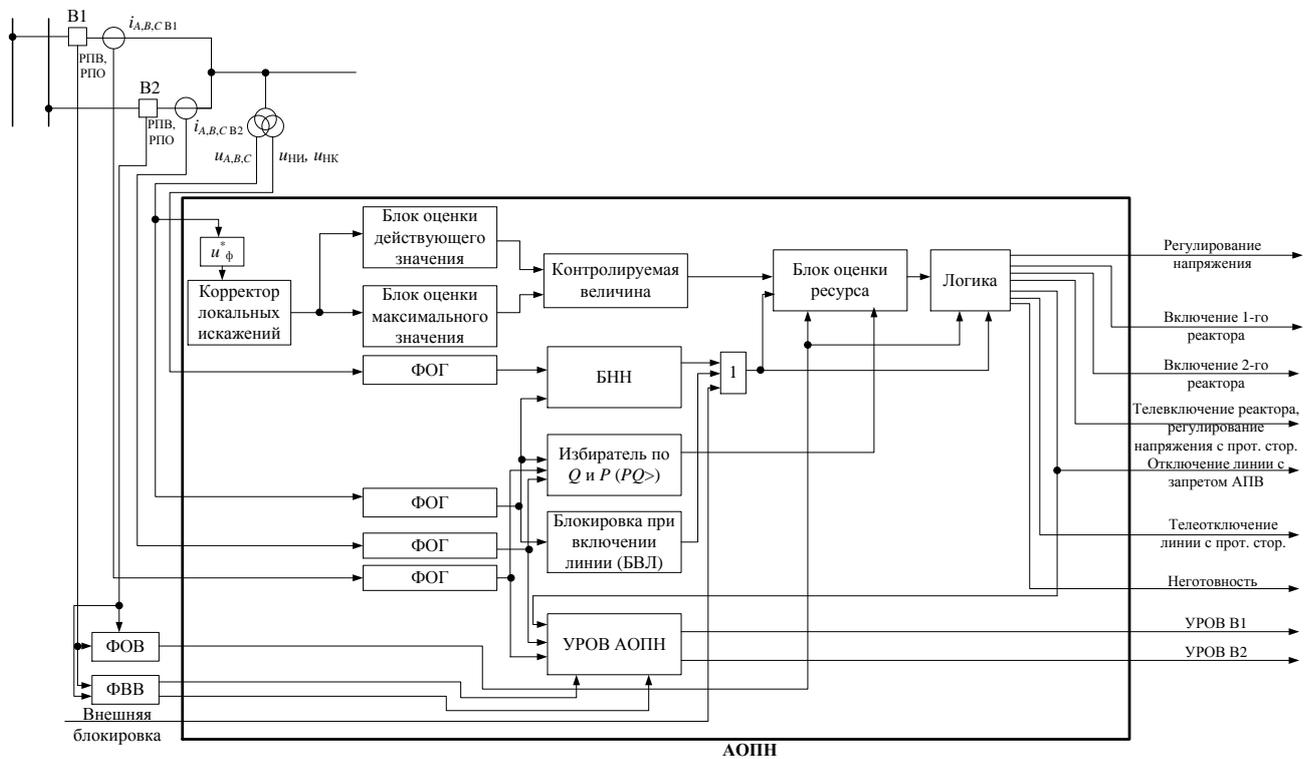


Рис. 13. Функционально-логическая схема новой цифровой системы АОПН и схема ее подключения

Цифровая система АОПН успешно прошла испытания на программно-аппаратном комплексе RTDS. В качестве примера на рис. 15 показана работа цифровой системы АОПН в режиме повышения напряжения вследствие отключения линии с противоположной стороны. В опыте уровень напряжения $u^* = 1,25$ соответствует работе II ступени, которая реагирует на действующее значение. В эксперименте цифровая система АОПН сработала верно, выдав сигнал на ввод технического мероприятия для снижения напряжения (включение реактора в момент $t = 5,74$ с, сигнал 1). Моделировался отказ технического мероприятия, поэтому цифровая система АОПН в момент $t = 18,69$ с по факту снижения остаточного ресурса электрической изоляции R до пороговой величины R_{II}^{Tn} , выявила отказ и ввела в действие технические мероприятия III ступени – отключение линии (сигнал 2). Цифровая система АОПН выдала сигнал на отключение высоковольтного оборудования до момента исчерпания ресурса электрической изоляции R , исключив его повреждение. После исчезновения перенапряжения (при $t > 19$ с) цифровая система АОПН начинает вести учет восстановления ресурса электрической изоляции по (18).



Рис. 14. Фото цифровой системы АОПН в терминале серии ЭКРА 200

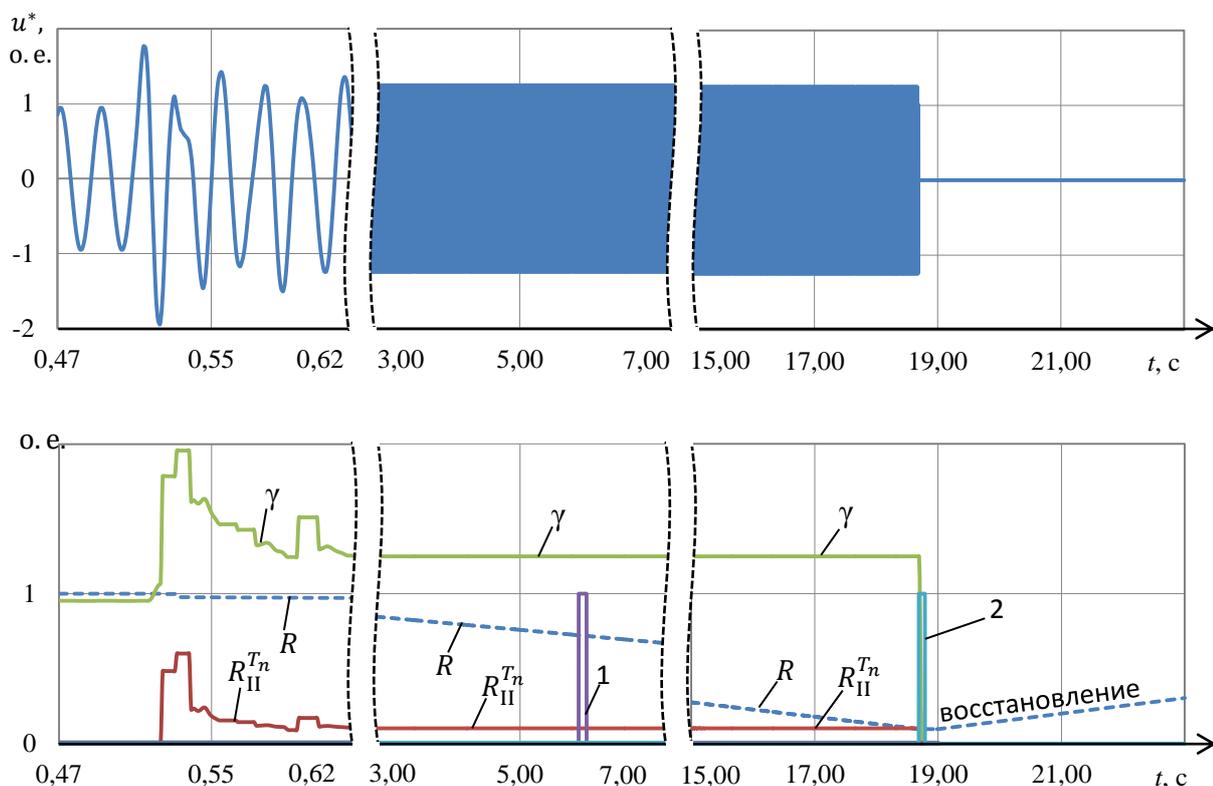


Рис. 15. Работа новой цифровой системы АОПН в режиме повышения напряжения при отключении ЛЭП с противоположной стороны: u^* – относительная величина напряжения, 1 – введение в действие технического мероприятия II степени (включение реактора), 2 – фиксация отказа технического мероприятия II степени и введение в действие технического мероприятия III степени (отключение линии)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные теоретические и практические результаты, полученные в работе, заключаются в следующем:

1. Предложены способы повышения точности оценки контролируемой величины (способы оценки максимального и действующего значения напряжения), обладающие повышенной точностью измерения при отклонении частоты сети от номинального значения, а также при наличии в сигнале высших гармоник. Предложенные в работе способы защищены патентами РФ № 2525832 и 2521745.

2. Разработаны новые алгоритмы цифровой системы АОПН на основе предложенного в работе способа учета восполнения ресурса электрической изоляции контролируемого электрооборудования и способа формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения. Предложенные способы исключают преждевременное отключение электрооборудования и его эксплуатацию при исчерпанном ресурсе электрической изоляции.

3. Сформулировано новое понятие диаграммы расхода остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования. Диаграмма упрощает реализацию контроля остаточного ресурса и обеспечивает своевременность реализации технических мероприятий по ликвидации перенапряжения.

4. Предложен способ повышения устойчивости функционирования цифровой системы АОПН в условиях локального искажения входного сигнала за счет выяв-

ления и коррекции искажений. Способ обладает повышенной чувствительностью к локальным искажениям и высокой точностью восстановления отсчета сигнала.

5. Результаты исследований диссертационной работы реализованы в разработке современной цифровой системы АОПН на линейке многофункциональных терминалов серии ЭКРА 200 производства ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары. Разработка подготовлена к серийному производству.

6. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

7. Основные теоретические и практические положения диссертации могут быть использованы при разработке новых цифровых систем РЗ и А.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. **Петров, В.С.** 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. (0,25 п.л. / 0,19 п.л.).

2. **Петров, В.С.** Совершенствование защиты от повышения напряжения для сетей 500 кВ и выше / А.Ф. Бондаренко, А.М. Наумов, В.А. Наумов, В.С. Петров, А.И. Левиуш, А.К. Лоханин, Г.Г. Фокин // Электричество. – 2012. – № 2. – С. 11-14. (0,25 п.л. / 0,19 п.л.).

Публикации в других изданиях:

3. **Петров, В.С.** 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. (0,38 п.л. / 0,31 п.л.).

4. **Петров, В.С.** Особенности учета процессов расхода и восстановления ресурса изоляции в автоматике ограничения повышения напряжения / В.И. Антонов, В.А. Наумов, В.С. Петров // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – С. 245-247. (0,19 п.л. / 0,13 п.л.).

5. **Петров, В.С.** Цифровая автоматика ограничения повышения напряжения: алгоритмы и практическая реализация / В.И. Антонов, В.А. Наумов, Ю.Н. Алимов, В.С. Петров // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: материалы 4-ой Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2013. – С. 109. (0,06 п.л. / 0,06 п.л.).

6. **Петров, В.С.** Оценка эффективного значения входного сигнала цифровой релейной защиты / В.И. Антонов, В.А. Наумов, В.С. Петров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы X-ой Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 278-280. (0,19 п.л. / 0,13 п.л.).

7. **Петров, В.С.** Измерение электрического напряжения в условиях импульсных помех для целей автоматики ограничения повышения напряжения / В.С. Петров // Тинчуринские чтения: материалы докладов VIII Международной молодежной научной конференции. – Казань, 2013. – С. 98–99. (0,13 п.л. / 0,13 п.л.).

8. **Петров, В.С.** Способ определения абсолютного максимального значения электрического напряжения в устройстве автоматики ограничения повышения напряжения / В.С. Петров // Тинчуринские чтения: материалы докладов VIII Международной молодежной научной конференции. – Казань, 2013. – С. 99–100. (0,13 п.л. / 0,13 п.л.).

9. **Петров, В.С.** Испытания современной автоматики ограничения повышения напряжения / В.С. Петров // Тинчуринские чтения: материалы докладов VII Международной молодежной научной конференции. – Казань, 2012. – С. 86-87. (0,13 п.л. / 0,13 п.л.).

10. **Петров, В.С.** Учёт кумулятивного эффекта при выполнении устройства автоматики ограничения повышения напряжения / В.С. Петров // Энергетика и энергоэффективные технологии: сборник докладов V Международной научно-практической заочной конференции. – Липецк, 2012. – С. 142-143. (0,13 п.л. / 0,13 п.л.).

11. **Петров, В.С.** Особенности выполнения современного микропроцессорного устройства автоматики ограничения перенапряжений / В.С. Петров // Диспетчеризация в электроэнергетике: проблемы и перспективы: материалы докладов VI открытой молодежной научно-практической конференции. – Казань, 2011. – С. 108–111. (0,25 п.л. / 0,25 п.л.).

Патенты:

12. Пат. на изобретение 2525832 РФ, МПК H02H 9/04. Способ мониторинга ресурса изоляции высоковольтного оборудования переменного тока / Антонов В.И., Наумов В.А., **Петров В.С.**; патентообладатель ООО НПП «ЭКРА». - № 2013105426/07; заявл. 08.02.2013; опубл. 20.08.2014. Бюл. № 23.

13. Пат. на изобретение 2521745 РФ, МПК H02H 9/04. Способ мониторинга ресурса изоляции высоковольтного оборудования переменного тока / Антонов В.И., Наумов В.А., **Петров В.С.**; патентообладатель ООО НПП «ЭКРА». - № 2013120876/07; заявл. 06.05.2013; опубл. 10.07.2014. Бюл. № 19.

14. Пат. на изобретение 2422966 РФ, МПК H02H 9/04. Способ контроля ресурса изоляции / Левиуш А.И., Наумов А.М., Наумов В.А., **Петров В.С.**, Стрелков В.М., Фокин Г.Г.; патентообладатель ООО НПП «ЭКРА». - № 2010112951/07; заявл. 05.04.2010; опубл. 27.06.2011. Бюл. № 18.

15. Пат. на полезную модель 96448 РФ, МПК H02H 9/04. Устройство для контроля ресурса изоляции / Левиуш А.И., Наумов А.М., Наумов В.А., **Петров В.С.**, Стрелков В.М., Фокин Г.Г.; патентообладатель ООО НПП «ЭКРА». - № 2010112950/22; заявл. 05.04.2010; опубл. 27.07.2010. Бюл. № 21.

Личный вклад автора в опубликованных работах:

[1, 3, 5, 6, 7, 8, 12, 13] – разработка алгоритмов оценки действующего и максимального значений напряжения, эффективного алгоритма коррекции локальных искажений, [2, 10, 11, 14, 15] – разработка алгоритма оценки ресурса электрической изоляции, [4] – разработка алгоритма учета процессов восполнения ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования, [9] – разработка методики испытаний цифровой системы АОПН.

ПЕТРОВ Владимир Сергеевич

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТЕЙ 110-750 КВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 17.04.2015 г. Формат 60×84 1/16. Печ. л. 1,25.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 409.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии

ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»

428015, г. Чебоксары, пр. Московский, д. 15