

На правах рукописи



Обалин Михаил Дмитриевич

**ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АДАПТАЦИИ
АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПО ПАРАМЕТРАМ
АВАРИЙНОГО РЕЖИМА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород
2016

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГОУ ВО) «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

Научный руководитель: **Куликов Александр Леонидович**
доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (г. Н. Новгород)

Официальные оппоненты: **Шуин Владимир Александрович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Автоматическое управление электроэнергетическими системами" ФГБОУ ВО Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина (г. Иваново)

Исаков Руслан Геннадьевич
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электрооборудование» ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (г. Казань)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Защита состоится 14.10.2016 г. в 14:00, в аудитории 1315 на заседании диссертационного совета Д212.165.02 при Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950 г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д212.165.02 по адресу: 603950, ГСП-41, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 28Б, (831) 4-36-17-34) и на сайте <http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>.

Автореферат диссертации размещен на сайте НГТУ им. Р. Е. Алексеева: <http://www.nntu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.165.02, к.т.н., доцент

Плехов
Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Электротехнические комплексы (ЭТК) включают в себя устройства и системы генерации, передачи, распределения и потребления электрической энергии. Несмотря на постоянное совершенствование конструкции ЭТК, в данных системах неизбежно происходят аварийные повреждения. Важной задачей эксплуатирующих организаций является определение места повреждения (ОМП). Наиболее повреждаемым элементом комплексов электротехнического оборудования являются линии электропередачи (ЛЭП), поэтому им в диссертационной работе уделяется наибольшее внимание.

ОМП ЛЭП реализуется как программными, так и аппаратными средствами. В России наибольшее распространение получили следующие отечественные и зарубежные аппаратные решения: ИМФ-ЗР, Сируис-2-ОМП (ЗАО «Радиус Автоматика»), БМРЗ-156-Д-ОМП-01 (ООО «НТЦ «Механотроника»), Парма РП 4.06 (ООО «Парма»), АУРА (ООО «СВЕИ»), БЭ2704 (ООО «НПП «ЭКРА»), ТОР 300, ТОР 100 ЛОК (ООО ИЦ «Бреслер»), Бреслер-0107.010 (ООО «НПП «Бреслер»), Multilin D60, Multilin L90 (General Electric), REL5 и REL6 (ABB), Siprotec 4 7SD52/53 (Siemens); программные комплексы АРМ СРЗА (ООО «ПК Бриз») и WinBres (ООО «НПП «Бреслер»).

Анализ показывает, что каждое из средств использует собственный единственный алгоритм для расчета расстояния до места повреждения ЛЭП. Для верификации показаний приходится использовать одновременно несколько средств, что затягивает время ликвидации повреждения и экономически нецелесообразно. В диссертационной работе впервые предлагаются групповые алгоритмы, комбинирующие в одном устройстве одновременно несколько алгоритмов ОМП ЛЭП.

Важнейшим ресурсом повышения точности ОМП является имитационное моделирование, посредством которого предлагается формировать адаптивные алгоритмы расчета расстояния до повреждения и зоны обхода ЛЭП.

Согласно требованиям эксплуатирующих организаций (ПАО «Российские сети» и ПАО «ФСК ЕЭС»), при повреждениях ЛЭП подлежит обходу вся зона осмотра предполагаемого места повреждения, составляющая 5-15% от длины линии. Именно на эту операцию затрачивается максимальное время при ликвидации повреждений. В отдельных случаях время поиска составляет от 5-6 часов до нескольких суток. Поэтому целесообразно использовать процедуру адаптации и результаты расчета по нескольким алгоритмам ОМП для сокращения зоны обхода ЛЭП.

Существенный вклад в развитие теории и техники ОМП внесли российские и зарубежные ученые: А.И. Айзенфельд, Е.А. Аржанников, Я.Л. Арцишевский, Ю. С. Беляков, В.А. Борухман, А.Н. Висящев, А.П. Кузнецов, А.Л. Куликов, В. Ф. Лачугин, Д.Р. Любарский, Ю.Я. Лямец, А.С. Малый, М.Ш. Мисриханов, Р. Г. Минуллин, В.И. Нагай, В.Г. Наровлянский, Г.С.

Нудельман, В.А. Попов, Г.М. Шалыт, В.А. Шуин, R. Agarval, C.Christopoulous, L. Ericsson, P.F. Gale, J.G Gilbert, A.A Girgis., I.F. Morrison, J. Izykowski, A.T. Johns, M. Kezunovic, B.J. Mann, D. Novosel, A.G. Phadke, G.D. Rockefeller, E. Rosolowski, M.S. Sachdev, M. M. Saha, A. Sauhats, E. O. Schweitzer, T. Takagi, J.S. Thorp, A. Wiszniewski, и др.

Несмотря на широкие исследования в области ОМП ЛЭП, проводимые в России и за рубежом, научный поиск точных алгоритмов оценки расстояния до повреждения продолжает оставаться актуальным. Это связано, прежде всего, с множеством влияющих на точность случайных и неслучайных факторов и необходимостью адаптации к ним.

Цель работы: Разработка и исследование новых методов и технических решений адаптивного ОМП ЛЭП на основе имитационных моделей электротехнических комплексов.

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертации реализован следующий комплекс задач:

1. Анализ факторов, влияющих на точность ОМП ЛЭП, и методов адаптации на основе оценки параметров аварийного режима.
2. Разработка статистических имитационных моделей электротехнических комплексов как инструмента адаптации.
3. Формирование групповых адаптивных алгоритмов ОМП ЛЭП на основе данных имитационного моделирования электротехнических комплексов.
4. Определение принципов задания сокращенной зоны обхода ЛЭП за счет сочетания нескольких алгоритмов ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР).
5. Апробация разработанных адаптивных алгоритмов ОМП на осциллограммах реальных повреждений ЛЭП.
6. Формулировка требований, предъявляемых к программному обеспечению ОМП ЛЭП для эксплуатирующих организаций, и разработка рекомендаций по его совершенствованию.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» в диссертационной работе **объектом** исследования являются линии электропередачи, как составная часть электротехнических комплексов, **предметом** исследования являются методы повышения точности алгоритмов ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима.

Соответствие диссертации области исследования специальности: представленные в диссертационной работе результаты, отвечают следующим пунктам паспорта специальности:

- п. 1 Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение

системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем;

- п. 2 Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем;

- п. 4 Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Методы научных исследований. Разработанные в диссертации научные положения основываются на комплексе теоретических и экспериментальных достижений в области теоретических основ электротехники, теории электромагнитных и электромеханических переходных процессов, имитационного моделирования, теории вероятности и используют системный подход к анализу повреждений ЛЭП.

Научная новизна.

1. Впервые предложено одновременное, а также поэтапное применение нескольких различных методов ОМП ЛЭП с целью повышения результирующей точности. Вклад каждого метода в конечной оценке расстояния зависит от ошибки ОМП на поврежденном участке ЛЭП.

2. Разработаны алгоритмы адаптации методов ОМП к особенностям ЛЭП, отличающиеся повышенной точностью за счет применения имитационных моделей. В результате адаптации формируется индивидуальный метод ОМП для каждого участка ЛЭП.

3. Разработана методика сокращения зоны обхода ЛЭП, отличающаяся от нормативов ПАО «Российские сети» и основанная на данных имитационного моделирования электротехнических комплексов.

4. Сформулированы требования, предъявляемые к программному обеспечению ОМП ЛЭП эксплуатирующими организациями, а также разработаны и внедрены рекомендации по совершенствованию данного программного обеспечения. Особенностью разработанного программного обеспечения является поддержка принятия решений при ликвидации аварийных ситуаций с отключением ЛЭП, в отличие от стандартной процедуры расчета расстояния до повреждения.

Практическая значимость работы.

1. Адаптация алгоритмов к особенностям ЛЭП и сокращение зоны осмотра позволяют существенно повысить точность ОМП и сократить временные и финансовые затраты на поиск места повреждения. По результатам моделирования уменьшение зоны осмотра ЛЭП достигает 15% от нормируемой величины, что экономит 2-5 часов времени обхода бригадой зоны предполагаемого повреждения (в зависимости от типа местности).

2. Разработанные адаптивные методы ОМП могут быть внедрены в функционирующие средства ОМП ЛЭП без внесения изменений в аппаратные решения.

3. Представленные требования к программному обеспечению ОМП, а также рекомендации по совершенствованию программных продуктов учитывают практические аспекты поиска повреждения на ЛЭП и позволяют сократить время, затрачиваемое на организацию аварийно-восстановительных работ. Данные требования полностью учтены при разработке программного комплекса «ПК ОМП».

4. Материалы исследований используются в учебном процессе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; реализованы в прикладном научном исследовании (ПНИ) «Разработка интеллектуальной релейной защиты с характеристиками, не зависящими от режимов работы активно - адаптивной электрической сети» и программном обеспечении (ПО) поддержки принятия решений при ликвидации повреждений на ЛЭП - программном комплексе «ПК ОМП». Предложения и выводы диссертационной работы использованы при разработке терминала защиты ЛЭП 110-220 кВ ОАО «НИПОМ» (г. Дзержинск, Нижегородская область).

Достоверность результатов исследования подтверждается результатами моделирования и испытаниями методов ОМП по данным реальных отключений ЛЭП Нижегородской энергосистемы. Результаты экспериментов, испытаний и моделирования сопоставлялись с известными результатами, полученными в этой области другими авторами.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Анализ методов ОМП ЛЭП, а также варианты применения алгоритмов адаптации для повышения точности расчета расстояния до повреждения.

2. Применение имитационных моделей ЭТК для адаптации и компенсации погрешностей алгоритмов ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима.

3. Параллельные и последовательные групповые адаптивные алгоритмы ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима.

4. Новый метод формирования зоны обхода ЛЭП с использованием данных имитационных экспериментов.

5. Рекомендации по адаптации и совершенствованию программного обеспечения ОМП ЛЭП для соответствия требованиям эксплуатации.

Личный вклад аспиранта. Постановка и формализация задач, разработка теоретических и методических положений, математических моделей и методов, проведение имитационного моделирования повреждений линий электропередачи, анализ результатов, а также практические рекомендации.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях: III, IV, V Международная научно-техническая

конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» XVI, XVII (г. Екатеринбург, 2012 г.; г. Новочеркасск, 2013 г., г. Иваново, 2015 г.), международная научно-техническая конференция Бенардосовские чтения XVI, XVII, XVIII (г. Иваново, 2011, 2013, 2015 г.), научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электроэнергетики», (г. Н. Новгород, 2010, 2013 г.), всероссийская научно-техническая конференция «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (г. Чебоксары, 2011 г.), международная конференция «Релейная защита и автоматика энергосистем» (г. Москва, 2014 г.), X открытая молодежная научно-технической конференция «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике - 2015» (г. Казань, 2015 г.), 4-я, 5-я международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (РНК СИГРЭ, г. Екатеринбург, 2013 г.; г. Сочи, 2015 г.).

Опубликованные работы. По теме диссертации опубликовано 28 работ, из них 7 в рецензируемых изданиях по списку ВАК, 3 патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 206 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 148 страницах основного текста, иллюстрирована 73 рисунками и 17 таблицами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.577.21.0124 о предоставлении субсидии от 20.10.2014г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0124).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, отмечен вклад отечественных и зарубежных ученых по теме диссертации, сформулирована цель работы и поставлены задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, перечислены методы исследования и основные положения, выносимые на защиту, раскрыта структура диссертации.

В первой главе приведен анализ и классификация методов адаптации определения места повреждения линий электропередачи. Проводится сопоставительное сравнение основных отечественных и зарубежных разработок в области ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима. Структурируются и анализируются факторы, влияющие на точность ОМП.

Под системой адаптивного определения места повреждения ЛЭП понимается набор методов и средств оценки расстояния до места повреждения и зоны обхода, которые приспособляются к изменениям ЭТК и окружающей среды, с целью сохранения или достижения требуемого уровня точности вдоль всей ЛЭП. Классификация методов адаптации ОМП ЛЭП по ПАР представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Классификация методов адаптации ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима

Наиболее перспективным способом адаптации алгоритмов ОМП представляются многоэтапные итерационные процедуры, с использованием статистических имитационных моделей электротехнических комплексов, а также осциллограмм аварийных событий реальных повреждений ЛЭП.

В таблице 1 приведен сопоставительный анализ широко распространенных односторонних алгоритмов ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима. Существует большое количество методов ОМП и множество факторов, влияющих на точность расчета расстояния до повреждения. Место повреждения, как и параметры его характеризующие, являются случайными величинами. Поэтому целесообразно использование статистического подхода для адаптации и повышения точности ОМП ЛЭП. Характерным примером использования адаптации в релейной защите и ОМП ЛЭП является учет доаварийного режима (таблица 1), позволяющий исключить влияние изменений параметров нагрузки и источников на точность расчета расстояния.

Факторы, влияющие на точность ОМП ЛЭП можно условно разделить на: проектный, производственный и эксплуатационный. Проектный фактор обусловлен методической погрешностью метода, возникшей на этапе разработки устройства, например, из-за невозможности учета или компенсации влияющих на расчет параметров электротехнического комплекса или повреждения. Производственный фактор связан с техническими характеристиками реализации устройства ОМП ЛЭП и его исправностью. Эксплуатационный фактор обусловлен ошибками в задании параметров ЭТК и ошибками при передаче данных диспетчеру.

Таблица 1 – Сопоставительный анализ односторонних алгоритмов ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима

Название алгоритма ОМП	Вид КЗ	Доаварийная информация	Переходное сопротивление (R_f)	Взаимоиндукция	Токораспределение	Нагрузка	Неоднородность линии	Учет емкостной проводимости	Транспонирование	Сопротивление систем
Методы на основе замера сопротивления										
Без учета сопротивления источников										
Замер реактивного сопротивления	X	*	X	X	X	X	X	X	X	X
Расчет дистанции до места повреждения ведется только по реактивному сопротивлению. Активное сопротивление не учитывается.										
Алгоритм Takagi	X	X	X	X	X	*	X	X	X	X
Допущение: Ток в месте повреждения I_f сонаправлен с током передающего конца линии ΔI_S . Для идеальной однородной системы данное допущение верно, однако в общем случае различие фаз токов I_f и ΔI_S влияет на точность расчета. Величина угла зависит от переходного сопротивления R_f и комплексного коэффициента токораспределения d_S . Данный метод компенсирует погрешность обусловленную током нагрузки n_S .										
Модифицированный алгоритм Takagi	X	*	X	X	**	*	X	X	X	X
Метод предполагает адаптацию к изменению угла β из-за неоднородности участков ЛЭП. Однако корректировка угла возможна лишь для одного участка линии.										
Алгоритм Ericsson	X	*	X	X	**	*	X	X	X	X
Для повышения точности ток нулевой последовательности и комплексный коэффициент токораспределения нулевой последовательности исключаются из расчета. Коэффициент токораспределения рассчитывается только для прямой и обратной последовательности.										
Алгоритм Аржанникова	X	*	X	X	**	*	X	X	X	X
Допущение: Ток в месте повреждения I_f совпадает по фазе с током нулевой последовательности в месте повреждения I_{f0} и месте установки прибора I_{S0} . Основной недостаток данного алгоритма - неучёт коэффициента токораспределения в схеме нулевой последовательности (d_{S0}). Корректировка угла β_0 возможна лишь для одного участка линии.										
Алгоритм Wiszniewski	X	*	X	X	**	*	X	X	X	X
Для повышения точности расчета предлагается в качестве тока совпадающего по фазе с током I_f использовать сумму токов прямой и обратной последовательности. Метод не учитывает изменения фазы коэффициентов токораспределения данных последовательностей вдоль линии.										
Комплексный алгоритм на основе закона Ома	X	*	X	*	**	*	X	X	X	X
Алгоритм является полным аналогом замера реактивного сопротивления, однако позволяет учитывать взаимоиндукцию от параллельных ЛЭП и отвлечения. Корректировка угла β возможна лишь для одного участка линии.										
Итерационный алгоритм ИМФ – 3Р	X	*	X	*	*	*	*	*	*	X
Расчет предполагает «мысленный перенос» прибора с участка на участок, начиная с ближайшего к месту установки прибора. Компенсация угла комплексного коэффициента токораспределения осуществляется путем поворота вектора опорного тока на соответствующий угол β_i на каждом участке. Возможен учет транспозиции проводов, емкостной проводимости, а также ответвлений и взаимоиндукции параллельной ЛЭП.										
С учетом сопротивления источников										
Алгоритм Novosel	*	*	X	*	*	*	X	X	X	X
Для прямой, обратной и нулевой последовательности составляются и совместно решаются матричные уравнения. Метод не требует регистрации доаварийного режима и определения поврежденных фаз.										
Методы на основе использования потокораспределения мощностей различных последовательностей										
Алгоритм Лямеца	*	*	**	*	*	*	*	*	*	**
Допущение: Реактивная мощность в месте повреждения равняется нулю $Q_F = 0$. Алгоритм не требует определения поврежденных фаз позволяет частично компенсировать погрешность вносимую переходным сопротивлением. Однако для данного алгоритма необходимо использование параметров удаленной системы, которые не всегда могут быть точно заданы.										
ОМП по соотношению токов обратной и нулевой последовательности	X	*	X	X	X	*	X	X	X	*
Примечание: X – означает, что алгоритм не учитывает ошибку от данного параметра, * - ошибка скомпенсирована, ** - ошибка частично скомпенсирована.										

Во второй главе приведены особенности статистический имитационных моделей электротехнических комплексов, применяемых для адаптации алгоритмов ОМП ЛЭП. В качестве информационной базы для адаптации алгоритмов ОМП применялись имитационные модели, учитывающие специфику каждой конкретной линии и особенности режимов ее функционирования. Именно с использованием адекватных имитационных моделей электротехнического оборудования возможен сопоставительный анализ точности отдельных алгоритмов ОМП ЛЭП и обоснование преимуществ новых адаптивных методов.

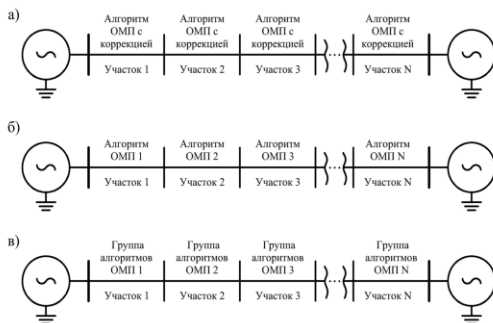


Рисунок 2 – Структурная схема работы алгоритма ОМП вдоль ЛЭП: а) обычный алгоритм; б) адаптивный алгоритм; в) групповой адаптивный алгоритм

Неоднородности приводят к ошибкам ОМП и требуют коррекции алгоритмов с учетом их специфического сочетания по трассе линии (рисунок 2а). В качестве одного из вариантов построения адаптивного алгоритма ОМП применяется комбинирование отдельных алгоритмов на соответствующих участках ЛЭП (рисунок 2б).

Однако более целесообразно использование для адаптации групповых алгоритмов ОМП, сформированных с учетом взвешенного суммирования оценок расстояния до повреждения по каждому из входящих в группу (рисунок 2в). Усложненный адаптивный (групповой) алгоритм основывается на опыте предыдущих имитационных экспериментов и аварийных отключений ЛЭП. При этом обеспечивается компенсация систематических погрешностей частных и результирующего алгоритмов, а также достигается высокая точность оценки расстояния до повреждения.

При адаптации учитывалась информация, характеризующая неоднородность линии: различные типы опор, количество фаз на отдельных участках; марку провода, грозотроса; стрелы провеса, габариты, геометрию линии; тип грунта, удельное сопротивление земли; пересечения, сближения со смежными линиями; наличие нескольких источников, ответвлений и др. Для имитации переходного процесса использовались возможности программного продукта MATLAB и его приложения Simulink. В качестве примера на рисунке 3 приведена имитационная модель электротехнического комплекса 220 кВ и регистратора аварийных событий с функцией ОМП ЛЭП.

Имитационная модель (рисунок 3) работает следующим образом: сначала рассчиты-

вается доаварийный (нагрузочный) режим, в момент времени $t = 0.1$ сек. происходит короткое замыкание, а также фиксация токов и напряжений всех фаз. После завершения расчета данные поступают в рабочее пространство MATLAB для дальнейшей обработки. Изменяются параметры электротехнического комплекса и моделирование запускается заново. Для каждой модели ЭТК проводится от 30 до 100 тыс. опытов для обеспечения репрезентативности выборки. По аналогичным принципам работают другие имитационные модели электротехнических комплексов Нижегородской энергосистемы.

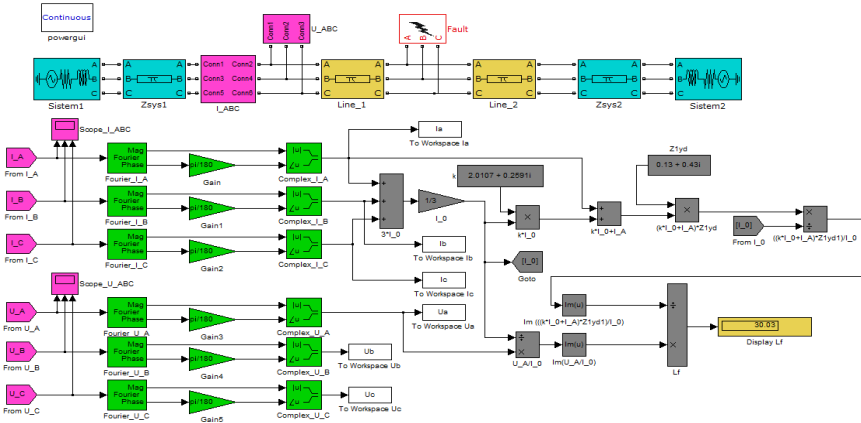


Рисунок 3 – Пример имитационной модели электротехнического комплекса 220 кВ и регистратора аварийных событий с функцией ОМП ЛЭП

Для определения объема выборки N , обеспечивающим заданную точность и достоверность полученного результата, использовалась центральная предельная теорема теории вероятности. При большом числе реализаций N полученные результаты имитационного моделирования приобретают статистическую устойчивость и с достаточной степенью точности могут быть приняты в качестве искомым характеристик функционирования рассматриваемого ЭТК. Для электрического параметра x вероятность его нахождения P в пределах доверительного интервала $[a, b]$ при большом объеме выборки N определяется выражением:

$$\lim_{PN \rightarrow \infty} \left\{ a < \left(\frac{\sum_{i=1}^N u_i - N \cdot M[u]}{\sqrt{N} \cdot \sigma_u} \right) < b \right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \Phi^*(b) - \Phi^*(a) \quad ; \quad (1)$$

где $u_i = \frac{x_i - M[x]}{\sigma_x}$ - приведенная случайная величина x_i рассматриваемого объема выборки

N со значениями математического ожидания $M[x]$ и среднеквадратического отклонения σ_x , $M[u]$, σ_u – приведенное математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины x_i , $\Phi^*(x)$ – интегральная функция Лапласа.

Проверка адекватности моделей производилась посредством сравнения результатов моделирования и данных реальных отключений ЛЭП в электротехнических комплексах. Среднеквадратическое приближение между сигналами тока, напряжения аварийного режима при моделировании и реальном повреждении ВЛ осуществлялось с ошибкой не превышающей 3%.

В третьей главе представлены групповые адаптивные алгоритмы ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима.

Поскольку задача ОМП ЛЭП решается в условиях воздействия случайных факторов различной природы, то оценки расстояния до повреждения можно считать случайными величинами, распределенными по некоторому статистическому закону. Композиция законов распределения изменяемых случайных факторов, входящих в оценку расстояния l до повреждения, позволяют ввести приближенную аппроксимацию последних нормальными распределениями с различными значениями первых и вторых центральных моментов (математического ожидания и дисперсии).

Реализация группового параллельного адаптивного алгоритма ОМП ЛЭП обеспечивается достаточно простыми и физически понятными соотношениями:

$$l_p = \frac{\sum_{i=1}^k (l_i / D_i)}{D_p}; \quad (2) \quad \frac{1}{D_p} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{D_i}\right); \quad (3)$$

где l_p – результирующая оценка расстояния при ОМП ЛЭП; l_i – оценка расстояния (показания i -го прибора ОМП ЛЭП); D_p – дисперсия результирующей оценки расстояния; D_i – дисперсия ошибок оценки расстояния i -го прибора (алгоритма) ОМП ЛЭП.

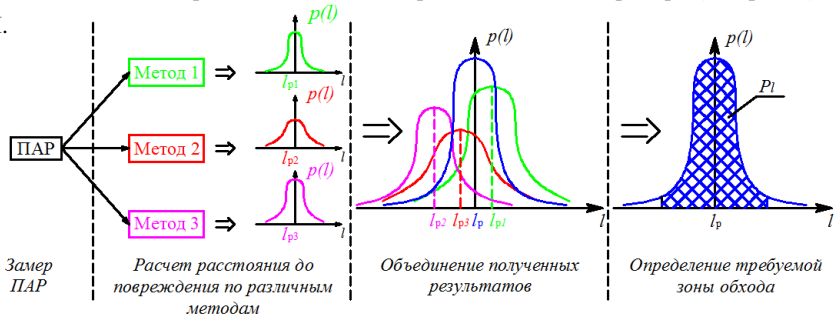


Рисунок 4 – Иллюстрация методики объединения различных методов ОМП

На рисунке 4: $p(l)$ – плотность распределения вероятности нахождения повреждения на заданном участке обхода ЛЭП; l_p – математическое ожидание нахождения повреждения на заданном участке; P_l – вероятность нахождения повреждения в зоне обхода ЛЭП.

Согласно последним равенствам (2, 3), результирующая оценка расстояния l_p определяется как средневзвешенная из результатов измерений с весами, обратными

дисперсиям последних, а при одинаковых дисперсиях – как среднее арифметическое результатов измерений. Результирующая дисперсия D_p последовательно уменьшается с увеличением числа используемых методов, в частности при одинаковых дисперсиях методов – обратно пропорциональна их числу k . При использовании достаточно большого количества разнородных алгоритмов ОМП ЛЭП можно минимизировать ошибку оценки расстояния (рисунок 4).

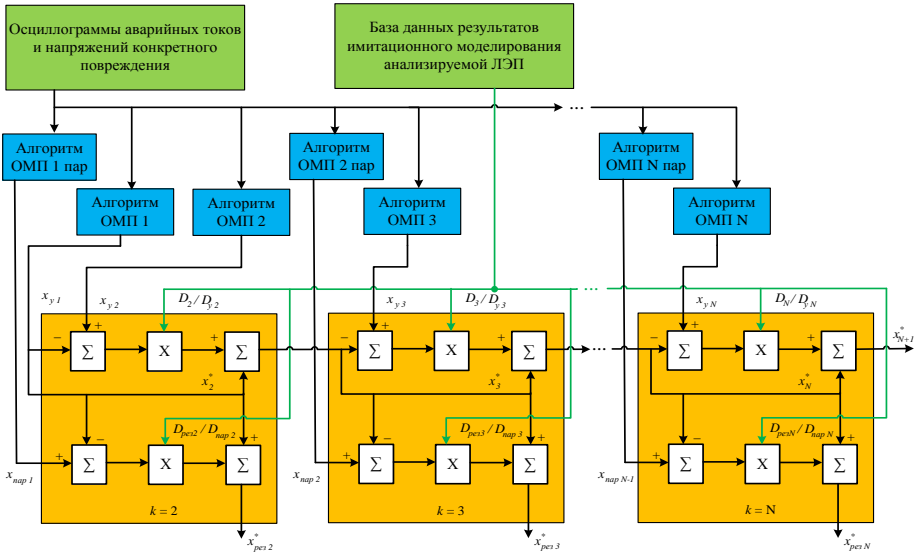


Рисунок 5 – Структурная схема последовательно-параллельного адаптивного алгоритма ОМП ЛЭП

Общая итерационная процедура последовательной адаптации ОМП ЛЭП сводится к следующему:

1. По результатам k предыдущих реализаций алгоритмов ОМП ЛЭП вырабатывается результирующая оценка расстояния до повреждения x_k^* .
2. Эта оценка прогнозируется на $(k+1)$ шаг, в результате формируется доопытная оценка $x_0^*_{(k+1)}$.
3. На $(k+1)$ шаге реализуется очередной алгоритм ОМП ЛЭП, выходной эффект которого состоит в получении текущей оценки расстояния до повреждения.
4. На основе оценок $x_0^*_{(k+1)}$ и $x_{y,(k+1)}$ вычисляется результирующая оценка расстояния до повреждения ЭТК на $(k+1)$ шаге.

На рисунке 5 представлена структурная схема одного из вариантов последовательно-параллельного адаптивного алгоритма ОМП ЛЭП, реализующего итерационное уточнение результатов расчета расстояния и параллельное (обратно дисперсии ошибки) объединение результатов расчета в результирующую оценку.

При статистическом подходе зона обхода ЛЭП (I_β) формируется на основе доверительных интервалов нахождения случайной величины (места повреждения) в заданном диапазоне с определенной вероятностью β

$$I_\beta = (l_p - t_\beta \cdot \sigma_p; l_p + t_\beta \cdot \sigma_p). \quad (4)$$

Величина t_β (выражение 4) определяет для нормального закона распределения число среднеквадратических отклонений, которое необходимо отложить слева и справа от центра рассеивания для того, чтобы вероятность попадания в полученный участок была равна β . Таким образом, появляется возможность одновременного использования как априорных данных о вероятной зоне обхода ЛЭП (по информации имитационного моделирования), так и данных текущих оценок дисперсии расстояния до места повреждения (по результатам последовательной реализации алгоритмов ОМП ЛЭП).

При использовании предложенного подхода зона обхода линии получается в среднем на 10-15 % меньше нормируемого значения, что существенно сокращает время поиска повреждения. Пример определения зоны обхода при повреждении транзита ВЛ 220 кВ Семенов-Рыжково-Мантурово (отпайка на ПС 220 кВ Рыжково) произошедшего 15.06.2015 г. в Нижегородской энергосистеме приведен на рисунке 6.

При использовании адаптированного для данной ЛЭП алгоритма с компенсацией ошибок расчетная точка повреждения составила 105.48 км (рисунок 7), зона обхода с 98.3 до 110.6 км линии со стороны ПС Семеновская. Оценка расстояния, полученная на основе адаптированных для данной линии алгоритмов, оказалась точнее, а зона обхода меньше на 3.3 км первичной зоны осмотра, на 11.7 км меньше фактически пройденного участка ВЛ. При этом экономия времени на поиск повреждения составляет от 2 до 6 часов.

Стоит отметить о возможности применения накопленной при адаптации статистической информации для компенсации погрешностей уже установленных на подстанциях устройств ОМП ЛЭП. Например, на рисунке 7 представлены пред-

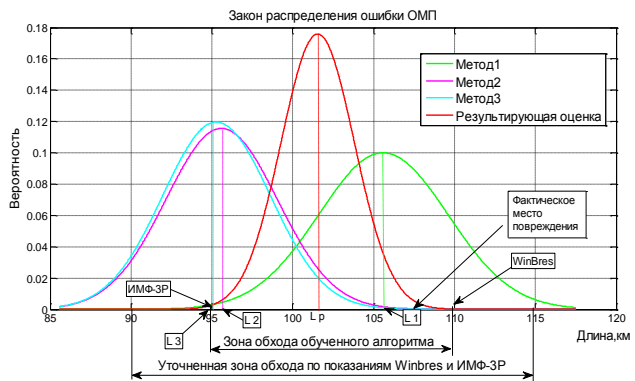


Рисунок 6 – Иллюстрация применения адаптивного алгоритма при формировании зоны обхода ЛЭП по данным аварийного отключения транзита ВЛ 220 кВ Семенов-Рыжково-Мантурово

полагаемые точки повреждения (расчитанные при помощи ИМФ-3Р, АРМ СРЗА, WinBres) на ВЛ 220 кВ Арзамаская–Сасово с отпайкой на Саровскую ТЭЦ (отключение 23.02.16).

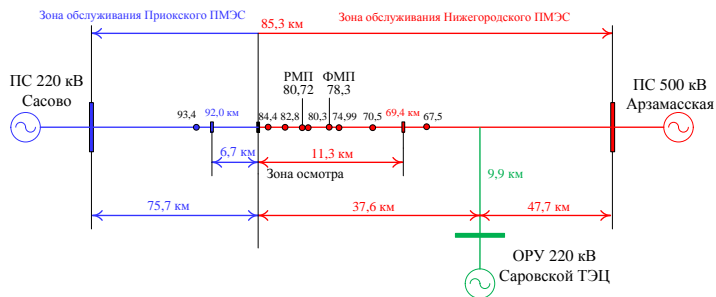


Рисунок 7 – Расчетные точки повреждения при автоматическом отключении ВЛ 220 кВ Арзамаская - Сасово с отпайкой на

Показания ИМФ-3Р были уточнены на 1,8 км, WinBres - 4,5 км. По адаптивному алгоритму расчетная точка повреждения (РМП, рисунок 7) составила 80.72 км. Фактическое повреждение (ФМП, рисунок 7) ВЛ 220 кВ Арзамаская – Сасово с отпайкой на Саровскую ТЭЦ было обнаружено на 78,3 км от ПС 500 кВ Арзамаская.

Разработанные адаптивные алгоритмы ОМП ЛЭП внедрены в шкаф микропроцессорной защиты ЛЭП 110 – 220 кВ ОАО «НИПОМ» (рисунок 8), а также экспериментальный образец интеллектуальной релейной защиты с характеристиками, не зависящими от режимов работы активно - адаптивной электрической сети.

В четвертой главе выполнен анализ программных и аппаратных средств поддержки принятия решений при ликвидации повреждений ЛЭП. Разработаны требования эксплуатирующих организаций к программному обеспечению ОМП ЛЭП, определен объем сбора необходимой информации для организации аварийно-восстановительных работ.

Для соответствия программного обеспечения поддержки принятия решения при ликвидации повреждения ЛЭП требованиям «практики» предложена доработка имеющегося ПО или разработка нового перспективного программного обеспечения. К перспективному ПО можно отнести разработанный программный комплекс «ПК ОМП».

К задачам, решаемым «ПК ОМП», относятся:

- сокращение времени аварийно-восстановительных работ;



Рисунок 8 – Внешний вид шкафа защиты ЛЭП 110-220 кВ ОАО «НИПОМ»

- повышение информационной оснащенности персонала электрических сетей, задействованного в ликвидации аварий;

- обеспечения персонала технологической информацией для анализа, оптимизации и планирования работы ремонтно-восстановительных бригад;

- прозрачность хода аварийно-восстановительных работ и возможность контроля действий подчиненного персонала;

- использование высокоточных адаптивных алгоритмов ОМП ЛЭП.

Программный комплекс «ПК ОМП» использует геоинформационную систему (ГИС) с отображением топологии расположения оборудования подстанций и линий электропередачи. В качестве примера на рисунке 9 представлена экранная форма «ПК ОМП». В нормальном режиме ПО отображает карту-схему предприятия электрических сетей, границы раздела между смежными предприятиями. При выборе линии комплекс предоставляет всю необходимую техническую информацию (паспорт линии, поопорная схема, пересечения с другими ВЛ, ж/д и автодорогами, и др.). По запросу пользователь может получить данные об аварийном

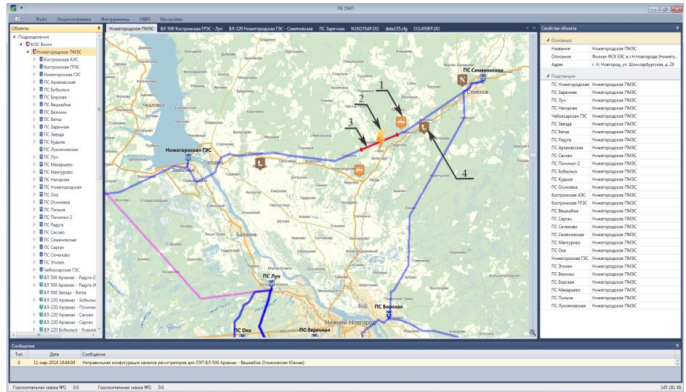


Рисунок 9 – Пример ликвидации повреждения ВЛ 220 кВ Нижегородская ГЭС – Семеновская. На рисунке 9: 1 – движение линейной ремонтной бригады к месту предполагаемого повреждения (с контролем по GPS), 2 – предполагаемое место повреждения, 3 – требуемая для обхода зона ЛЭП, 4 – ближайшая к месту повреждения точка захода на ВЛ



Рисунок 10 – Принципы сокращения времени ликвидации повреждения на ЛЭП

резерве предприятий, а также о местах складирования оборудования.

На рисунке 10 приведена иллюстрация сокращения времени при ликвидации повреждения ЛЭП с использованием «ПК ОМП». Разработанный программный комплекс применялся для определения места повреждения и организации аварийно-восстановительных работ при отключении ЛЭП 220-500 кВ Нижегородской энергосистемы (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты применения адаптивных алгоритмов ОМП в «ПК ОМП» при автоматических отключениях ЛЭП Нижегородской энергосистемы

Наименование ВЛ	Длина ВЛ, км	Со стороны ПС	Расчетное место повреждения, км			Фактич. место повреждения, км
			Микропроцессорный прибор ОМП	ПК «WinBres»	Адаптивный алгоритм	
ВЛ 500 кВ Костромская ГРЭС-Луч	206.9	Луч	49.4	51.648	55.118	54.7
ВЛ 500 кВ Вешкайма – Арзамасская	241,19	Арзамасская	27.1	24.738	26.457	25.77
ВЛ 500 кВ Арзамасская - Радуга Южная	121.71	Арзамасская	101.3	97.5	98.418	99.754
ВЛ 220 Семенов-Рыжково-Мантурово	183,04	Семенов	62,2	61,4	57,4	57,2
ВЛ 220 кВ Борская - Семеновская	61.3	Семеновская	26.4	25.067	25.744	25.8
ВЛ 220 Нижегородская ГЭС - Семенов	81,5	НиГЭС	19,1	19,679	18,4	17,0
ВЛ 220 Ока-Заречная	20,1	Ока	20,1	17,8	18,3	18,9

Анализ таблицы 2 показывает, что применение разработанного «ПК ОМП» и адаптивных алгоритмов ОМП позволяют повысить точность расчета расстояния до повреждения ЛЭП на 3-7%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа более 70 различных способов ОМП ЛЭП, известных в отечественной и зарубежной практике, предложена классификация методов их адаптации. Введено определение термина адаптации, обобщающее существующие подходы к повышению точности расчета расстояния до места повреждения в условиях изменения параметров ЭТК.

2. Обосновано и исследовано применение имитационного моделирования в сочетании с осциллограммами реальных аварийных событий для формирования алгоритмов ОМП, адаптированных к каждой конкретной ЛЭП. Для адекватной статистической обработки определен объем требуемой репрезентативности выборки, составляющий 30 – 100 тыс. испытаний и зависящий от особенностей ЭТК и требуемой точности ОМП.

3. Разработаны и запатентованы новые алгоритмы адаптации методов ОМП на основе имитационного моделирования ЭТК и статистической обработки данных,

обеспечивающий до 12% более точную оценку расстояния до повреждения, по сравнению с существующими аналогами. В частности, предложены новые групповые адаптивные алгоритмы по параметрам аварийного режима, в которых реализуется объединение различных алгоритмов ОМП ЛЭП обратно дисперсии ошибки расчета расстояния. Применение групповых алгоритмов устраняет необходимость установки нескольких устройств на подстанциях для верификации показаний.

4. Предложен новый метод формирования зоны обхода ЛЭП на основе данных имитационного моделирования и текущих оценок дисперсии расстояния до места повреждения. Зона обхода формируется путем расчета доверительных интервалов нахождения места повреждения в заданном диапазоне с определенной доверительной вероятностью. Полученная таким образом зона обхода оказывается индивидуальной для каждого участка ЛЭП и может быть снижена на 5-15% от нормируемой величины.

5. Сформированы требования, предъявляемые к программному обеспечению поддержки принятия решений при ОМП, со стороны эксплуатирующих организаций (ПАО «Российские сети», ПАО «ФСК ЕЭС»). Требования учтены при разработке специального программного комплекса ОМП с адаптивными алгоритмами, позволяющего в зависимости от особенностей и топологии сократить время обхода ЛЭП на 2-5 часов.

6. Произведены проверка работоспособности и экспериментальные исследования предложенных адаптивных алгоритмов, а также программного комплекса «ПК ОМП» на основе осциллограмм токов и напряжений, зафиксированных при реальных отключениях ЛЭП 220-500 кВ Нижегородской энергосистемы. Результаты расчета расстояния до места повреждения ЛЭП показали в среднем на 3-7% более высокую точность, что обосновывает перспективность применения разработанных алгоритмов в существующих и перспективных устройствах.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Куликов, А. Л. Комплексные алгоритмы ОМП ЛЭП на базе статистических методов/ А.Л. Куликов, **М.Д. Обалин**, П.А. Колобанов // Энергетик – 2012. - №1. – С 7-9.
2. Куликов, А. Л. Анализ и повышение точности при определении места повреждения линий электропередачи/ А. Л. Куликов, **М. Д. Обалин**, П. А. Колобанов // Известия вузов. Электромеханика. – 2013 г. - №5. – С 57-62.
3. **Обалин, М. Д.** Применение адаптивных процедур в алгоритмах определения места повреждения ЛЭП/ М. Д. Обалин, А. Л. Куликов // Промышленная энергетика. – 2013. - №12. – С 35-39.
4. Куликов, А. Л. Применение методов ОМП в цифровой дистанционной защите ЛЭП / А. Л. Куликов, **М. Д. Обалин**, П. А. Колобанов // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. - №1. – С. 83-87.

5. Куликов, А. Л. Развитие программного обеспечения для поддержки принятия решения при ликвидации повреждения на ЛЭП/ А. Л. Куликов, **М. Д. Обалин** // Известия вузов. Электромеханика. – 2015.- № 2. – С 70-75.

6. Лачугин, В. Ф. Принципы построения интеллектуальной релейной защиты электрических сетей/ В. Ф. Лачугин, Д. И. Панфилов, А. Л. Куликов, А. А. Рывкин, **М. Д. Обалин** // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2015 г. - №4 – С 28-37.

7. Куликов, А. Л. Применение цифровой обработки сигналов в задаче повышения точности ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима / А. Л. Куликов, **М. Д. Обалин**, В.А. Петрова // Электрические станции. – 2016.- № 4. – С 42-47.

В изданиях, индексируемых в Web of Science:

8. The Lachugin, V. F. Design concept of power system intelligent relay protection / V. F. Lachugin, D. I. Panfilov, A. L. Kulikov, A. A. Ryvkin, **M. D. Obalin** // Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika. – 2015 г. - №4 –28-37 p.

9. Kulikov, A. L. Software development for decision-making in the elimination of damage on power lines/ A. L. Kulikov, **M. D. Obalin** // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Electromechanika (Russian Electromechanics). – 2015.- № 2. –70-75 p.

Патенты:

10. Патент на изобретение № 2548666 Рос. Федерации: МПК H02H3/40, G01R31/08 Способ дистанционной защиты линии электропередачи/ Куликов А.Л., **Обалин М.Д.**, Колобанов П. А. – Оpubл. 20.04.2015. – Бюл. № 11.

11. Патент на изобретение № 2552388 Рос. Федерации: МПК G01R31/00 Способ определения места повреждения линии электропередачи/ Куликов А.Л., **Обалин М.Д.**, – Оpubл. 10.06.2015. – Бюл. № 16.

12. Патент на изобретение № 2584268 Рос. Федерации: МПК G01R31/08 Способ адаптации дистанционной защиты и определителя места повреждения линии электропередачи с использованием ее модели/ Куликов А.Л., Колобанов П. А., **Обалин М.Д.**, – Оpubл. 20.05.2016. – Бюл. № 14.

Прочие опубликованные научные работы:

13. Куликов, А. Л. Объединение алгоритмов определения места повреждения ЛЭП для повышения точности расчета расстояния/ А. Л. Куликов, **М. Д. Обалин** // Актуальные проблемы электроэнергетики: Материалы научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2010. – С 115 - 118.

14. Куликов, А. Л. Объединение алгоритмов ОМП ЛЭП на основе статистической информации аварийных режимов/ А.Л. Куликов, **М.Д. Обалин**, П.А. Колобанов // Состояния и перспективы развития электротехнологии: Сборник научных трудов XVI международной научно-технической конференции. Бенардосовские чтения. – Иваново, 2011. – С. 263-266.

15. Куликов, А. Л. Повышение точности ОМП ЛЭП на основе стохастического имитационного моделирования/ А.Л. Куликов, **М.Д. Обалин** // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары, 2011. – С 247-250.

16. Куликов, А. Л. Совершенствование алгоритмов определения мест повреждения ЛЭП на основе имитационного моделирования/ А.Л. Куликов, **М.Д. Обалин** // Электроэнергетика глазами молодежи: Материалы III международной научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2012. – С. 214-220.

17. Куликов, А. Л. Адаптивные алгоритмы ОМП ЛЭП на основе имитационного моделирования/ А.Л. Куликов, **М.Д. Обалин** // Материалы конференции РНК СИГРЭ: 4-я Международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Екатеринбург, 2013.

18. Куликов, А. Л. Формирование зоны обхода ЛЭП на основе точностных характеристик алгоритмов ОМП / А.Л. Куликов, **М.Д. Обалин**// Состояния и перспективы развития электротехнологии: Сборник научных трудов XVII международной научно-технической конференции. Бенардосовские чтения. – Иваново, 2013. – С. 154-156.

19. Куликов, А. Л. Использование имитационных моделей для совершенствования алгоритмов определения места повреждения линий электропередачи / А.Л. Куликов, **М.Д. Обалин**, П.А. Колобанов // Электроэнергетика глазами молодежи: Материалы IV международной научно-технической конференции.– Новочеркасск, 2013. – С. 222-225.

20. Куликов, А.Л. Адаптация алгоритмов ОМП к особенностям линий электропередач / А.Л. Куликов, **М.Д. Обалин** //Релейщик. – 2013. – № 12. – С. 8-12.

21. Куликов, А. Л. Синтез алгоритмов ОМП с использованием моделей ЛЭП / А. Л. Куликов, **М. Д. Обалин**, П.А. Колобанов // Актуальные проблемы электроэнергетики: Материалы научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2013. – С. 32 - 37.

22. Куликов, А.Л. Совершенствование программного обеспечения ОМП для ускоренной ликвидации аварийной ситуации на ЛЭП /А.Л. Куликов, **М. Д. Обалин** //XXII конференции Релейная защита и автоматика энергосистем: Сборник докладов. – Москва, 2014. – С. 128-135.

23. Куликов, А.Л. Совершенствование программного обеспечения ОМП для сокращения времени аварийно-восстановительных работ на ЛЭП / А.Л. Куликов, **М.Д. Обалин** //Релейщик. – 2014. – № 3. – С. 44-48.

24. Куликов, А. Л. Повышение точности ОМП ЛЭП в цикле АПВ / А.Л. Куликов, **М.Д. Обалин**// Состояния и перспективы развития электротехнологии: Сборник научных трудов XVIII международной научно-технической конференции. Бенардосовские чтения. – Иваново, 2015. – С. 464-467.

25. Куликов, А. Л. Волновое определение места повреждения на линиях с ответвлениями / А.Л. Куликов, В.В. Ананьев, **М.Д. Обалин** // Материалы конференции РНК СИГРЭ: 5-я Международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматике энергосистем». – Сочи, 2015.

26. Куликов, А. Л. Повышение точности ОМП ЛЭП за счет использования цифровой обработки сигналов аварийных осциллограмм / А.Л. Куликов, **М.Д. Обалин**, В. А. Петрова // Электроэнергетика глазами молодежи: Материалы IV международной научно-технической конференции.– Иваново, 2015. – С. 464-467.

27. **Обалин, М. Д.** Сокращение зоны обхода ЛЭП за счет применения нескольких методов ОМП // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике - 2015: Материалы X открытой молодежной научно-технической конференции.– Казань, 2015.

28. Kulikov A.L. Adapting and Improving the Accuracy of Fault Location Algorithms on Power Transmission Lines on the basis of Statistical Simulation/ A.L. Kulikov, **M.D. Obalin**, V.Y. Vukolov, D.I. Bezdushniy // Materials of 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)». – Chelyabinsk, 2016.

Подписано в печать 01.09.2016. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 130 экз. Заказ 584.

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:

603950, г. Нижний Новгород, ул. К. Минина, 24