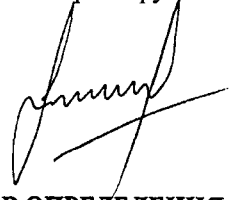


На правах рукописи

Устинов Алексей Александрович



**РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ТРЕХФАЗНЫХ И ЧЕТЫРЕХФАЗНЫХ ВОЗ-
ДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

Автореферат на соискание ученой степени
кандидата технических наук

- 2 СЕН 2015

Иркутск - 2015



005561799

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Научный руководитель: **Кандидат технических наук, профессор,
Висящев Александр Никандрович**

Официальные оппоненты: **Гусев Александр Сергеевич**
Доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Энергетический институт, кафедра «Электроэнергетические системы», профессор кафедры

Савина Наталья Викторовна
Доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Амурский государственный университет», проректор по учебной работе, заведующий кафедрой энергетики

Ведущая организация: **ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск**

Защита состоится «27» октября 2015 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 003.017.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН, по адресу: г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте <http://sei.irk.ru/dissert/case/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу диссертационного совета Д 003.017.01: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя учебного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «18» августа 2015г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 003.017.01,
доктор технических наук,
профессор

Клер
Александр Матвеевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время согласно статистике ОАО «Федеральная сетевая компания» физический износ электрических сетей напряжением 330 кВ и выше достигает 50%, что является предпосылкой для возникновения аварийных ситуаций, перерывов в электроснабжении крупных потребителей и нарушения межсистемных связей. В данных условиях высокие требования предъявляются к устройствам автоматики, защиты и диагностики, в том числе к устройствам определения места повреждения (ОМП) на воздушных линиях (ВЛ) электропередачи. Уменьшение погрешности ОМП, позволит службам эксплуатации снизить время, необходимое на поиск места повреждения и устранение причины неисправности, как следствие, уменьшится ущерб, причиняемый энергосистеме и потребителям электрической энергии.

Существенный вклад в развитие теории и техники ОМП внесли такие российские и зарубежные ученые, как А.И. Айзенфельд, Е.А. Аржанников, Я.Л. Арцишевский, Г.И. Атабеков, Б.В. Борзинец, В.А. Борухман, А.Н. Висящев, А.Ф. Дьяков, А.П. Кузнецов, А.Л. Куликов, Д.Р. Любарский, Ю.Я. Лямец, А.С. Малый, М.Ш. Мисриханов, В.Г. Наровлянский, Г.С. Нудельман, М.П. Розенкноп, А.С. Саухатас, С.А. Ульянов, А.М. Федосеев, Г.М. Шалыт, Э.М. Шнеерсон, В.А. Шуин, L. Eriksson, G.D. Rockefeller, T. Takagi, G. Ziegler.

Несмотря на широко проводимые исследования, связанные с ОМП, данная область продолжает представлять значительный интерес, основными причинами которого являются следующие:

- ОМП зависит от большого количества изменяющихся факторов (параметры сети, параметры режима, вид повреждения, переходное сопротивление, сопротивление грунта и др.), погрешность в определении которых вносит методическую погрешность в ОМП.
- Продолжающееся распространение микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) и ОМП позволяет использовать новые виды алгоритмов, требовательных к хранению и быстрой обработке больших объемов цифровой информации, но в то же время уменьшающих погрешность ОМП.

Таким образом, разработка и совершенствование методов ОМП с целью уменьшения погрешности является актуальной задачей.

Существующие в настоящее время методы ОМП применимы к трехфазным воздушным линиям электропередачи.

В последние годы опубликован ряд работ, посвященных четырехфазным ВЛ и их использованию не только в области сверхвысоких напряжений и сверхдлинных линий, но также на уровне высоких и средних напряжений для ВЛ протяженностью от 100 км и выше.

Эффективность применения одноцепной четырехфазной ВЛ зависит от многих факторов, таких как класс напряжения, протяженность, конструкция опор и т.п. Однако, в целом, позволяет добиться пропускной способности сопоставимой в аварийных режимах с двумя одноцепными трехфазными ВЛ при значительно меньшей занимаемой площади, меньших затратах, обладая при этом большей надежностью и пропускной способностью, чем одноцепная трехфазная ВЛ. Особенно это важно в условиях

плотной застройки и прохождения трассы ВЛ в тяжелых климатических условиях, что характерно в том числе и для России.

Одной из задач, которую необходимо решить для полноценного внедрения и возможности последующей эксплуатации четырехфазных ВЛ, является разработка новых либо адаптация существующих (разработанных для трехфазных систем) алгоритмов РЗА и ОМП.

В известной зарубежной и отечественной литературе вопрос ОМП на четырехфазных ВЛ не освещен, поэтому с учетом нарастающего интереса и возможности внедрения четырехфазных ВЛ в среднесрочной перспективе разработку алгоритмов ОМП следует признать актуальной задачей.

Цель работы. Исследование, анализ, совершенствование существующих методов ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР) и разработка новых методов ОМП по ПАР для трехфазных и четырехфазных ВЛ электропередачи высокого напряжения.

Для достижения поставленной цели решен следующий комплекс задач:

1. Выполнен анализ величин погрешностей существующих методов ОМП по ПАР на одноцепных и двухцепных трехфазных ВЛ в зависимости от параметров сети, параметров нормального и аварийного режимов, удаленности короткого замыкания (КЗ) и др.
2. Разработаны новые и усовершенствованы существующие методы ОМП по ПАР на одноцепных и двухцепных трехфазных ВЛ. Выполнен анализ влияния параметров сети, параметров нормального и аварийного режимов, удаленности КЗ и других факторов на погрешность ОМП посредством математического моделирования.
3. Выполнен анализ погрешности разработанных и усовершенствованных методов ОМП по ПАР на основании обработки осциллограмм коротких замыканий на трехфазных ВЛ Иркутской энергосистемы.
4. Разработаны методы ОМП по ПАР для одноцепных четырехфазных ВЛ. Выполнен анализ влияния параметров сети, параметров нормального и аварийного режимов, удаленности КЗ и других факторов на погрешность ОМП при помощи математического моделирования.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются трехфазные и четырехфазные ВЛ электропередачи высокого напряжения. Предметом исследования являются разработка и совершенствование методов ОМП по ПАР на трехфазных и четырехфазных ВЛ с целью уменьшения погрешности ОМП.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались: теоретические основы электротехники, математическое моделирование, экспериментальные исследования на основании данных реальных энергетических объектов, теория комплексных чисел, теория графов, теория матриц, теория гиперболических функций, итерационные методы, метод симметричных составляющих.

Научная новизна и значимость полученных результатов работы заключается в следующем:

1. Разработано два односторонних метода ОМП по ПАР для трехфазных ВЛ, основанных на модели ВЛ с распределенными параметрами. Первый метод использует критерий вещественности переходного сопротивления в месте повреждения, второй – свойство вещественности расстояния от начала ВЛ до места повреждения.

Предлагаемые методы имеет меньшую погрешность ОМП по сравнению с методами по ПАР, пренебрегающими углом сдвига между током в месте повреждения и током, подпитывающим место КЗ от системы начала ВЛ, а также с методами, не учитывающими распределенность параметров ВЛ.

2. Усовершенствованы односторонние методы ОМП по ПАР, разработанные на кафедре электрических станций и сетей энергетического факультета ИрГТУ, а именно:

- итерационный метод минимального угла;
- итерационный метод, основанный на теореме синусов;
- итерационный метод, основанный на замере полного сопротивления с учетом переходного сопротивления.

В рамках развития методов разработаны блок-схемы и пошагово описаны алгоритмы функционирования. Выполнена программная реализация предлагаемых методов, проведен анализ влияния факторов (изменения параметров сети, параметров режима, места повреждения, величины переходного сопротивления и др.) на погрешность ОМП посредством математического моделирования и обработки данных реальных коротких замыканий. Предлагаемые методы уменьшают погрешность ОМП по сравнению с методами по ПАР, не учитывающими угол сдвига между током в месте повреждения и током, подпитывающим место КЗ от системы начала ВЛ.

3. Получено аналитическое выражение для определения коэффициента токораспределения для модели двухцепной трехфазной ВЛ с распределенными параметрами, применимое для исследований в области РЗА и ОМП.

4. Предложена методика двухстороннего ОМП на трехфазных ВЛ, позволяющая уменьшить погрешность функции ОМП в микропроцессорных устройствах РЗА, использующих информацию о токах начала и конца ВЛ. Методика рассмотрена на примере микропроцессорного терминала Alstom Grid, выполняющего дифференциальную защиту линии (ДЗЛ). Предлагаемый метод прост в реализации, т.к. не требует изменения аппаратной базы устройства.

5. Получены аналитические выражения для одноцепной четырехфазной ВЛ со средоточенными и распределенными параметрами, связывающие токи и напряжения в начале ВЛ с токами и напряжениями в месте повреждения через симметричные составляющие при различных видах однократной поперечной несимметрии, и представляющие интерес с позиции дальнейшего развития РЗА и ОМП на четырехфазных ВЛ.

6. Впервые разработаны односторонние методы ОМП по ПАР для одноцепной четырехфазной ВЛ со средоточенными и распределенными параметрами.

Практическая ценность работы. Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Реализация предлагаемых методов ОМП по ПАР для трехфазных ВЛ в современных микропроцессорных устройствах ОМП, РЗА и регистрации аварийных событий (РАС) уменьшит погрешность ОМП, по сравнению с методами:

- не учитывающими угол сдвига между током в месте повреждения и током, подпитывающим место КЗ от системы начала ВЛ;

– основанными на модели ВЛ со средоточенными параметрами для случая протяженных ВЛ.

2. Разработанные в ходе работы модели, программы ОМП и аналитические выражения найдут применение в ВУЗах, проектных организациях, научно-исследовательских центрах, конструкторских бюро и других организациях, занимающихся анализом повреждений на ВЛ.

3. Разработанные методы ОМП по ПАР для четырехфазной ВЛ решают проблему отсутствия методик, необходимых для внедрения и введения в эксплуатацию четырехфазных ВЛ. Полученные аналитические выражения для четырехфазной ВЛ перспективны с позиции применения при разработке новых алгоритмов ОМП и РЗА на четырехфазных ВЛ.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы использовались в рамках договора с ОАО «Иркутская электросетевая компания» (ОАО «ИЭСК») №269/11 от 01 декабря 2011 для анализа коротких замыканий на линиях электропередачи и разработки мероприятий в электрических сетях, а также внедрены в учебный процесс в Национальном исследовательском Иркутском государственном техническом университете (НИ ИрГТУ) на кафедре электрических станций, сетей и систем при проведении лекционных занятий по курсу «Определение места повреждения на линиях электропередачи» для студентов, бакалавров и магистрантов.

Методики одно- и двухстороннего ОМП по ПАР, предложенные в работе, имеют возможность применения в устройствах компании Alstom Grid и Alstom Psymetrix, что подтверждается официальным письмом.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Односторонние методы ОМП по ПАР для трехфазных одноцепных и двухцепных ВЛ, основанные на модели ВЛ с распределенными параметрами.

2. Односторонние методы ОМП по ПАР для трехфазных одноцепных и двухцепных ВЛ, основанные на модели ВЛ со средоточенными параметрами.

3. Методика двухстороннего ОМП для микропроцессорных терминалов, выполняющих ДЗЛ.

4. Односторонние методы ОМП по ПАР для четырехфазной ВЛ с распределенными и сосредоточенными параметрами.

5. Результаты исследования ОМП по ПАР на четырехфазных ВЛ, аналитические выражения, связывающие ПАР в месте повреждения с ПАР в начале ВЛ при различных видах однократной поперечной несимметрии.

6. Результаты анализа существующих и предлагаемых методов ОМП по ПАР на ВЛ, полученные при помощи математического моделирования и обработки осциллограмм реальных коротких замыканий.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на международных научно-технических конференциях «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (ИрГТУ, г. Иркутск, 2006- 2008, 2010 гг.), на VI научно-технической конференции «Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий» (г. Мариуполь, 2008 г.) .), на VII международной научно-практической конференции «Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития» (г. Новосибирск, 2014 г.), на

XVII международной научно-практической конференции «Современное состояние естественных и технических наук» (г. Москва, 2014 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 из них - в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования научных результатов диссертаций на соискание степени кандидата технических наук. Получено 2 патента РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка и 8 приложений. Общий объем работы составляет 204 страницы, в том числе 127 страниц основного текста, включая 43 рисунка, 7 таблиц и 11 страниц библиографического списка (118 наименований).

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформированы цель и основные задачи исследований; показаны научная новизна и практическая значимость работы; приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации, внедрении и публикации результатов исследований. Приведены структура и объем диссертации.

В первой главе дано описание классификации методов ОМП. Описываются основные теоретические положения ОМП по ПАР на одноцепных и двухцепных ВЛ. Произведен обзор существующих односторонних и двухсторонних методов ОМП по ПАР, в основе которых лежат модели ВЛ со средоточенными и распределенными параметрами. Выполнен анализ методов ОМП, реализованных в серийно выпускаемых устройствах ОМП, РЗА и РАС как отечественного, так и зарубежного производства.

Суть односторонних методов ОМП по ПАР, использующих модель ВЛ со средоточенными параметрами, сводится к решению уравнения относительно расстояния от начала ВЛ до места повреждения в о.е. n (рисунок 1)

$$\frac{\dot{U}'}{\dot{I}'} = nZ_{1Л} + \frac{\dot{I}'_{Кав}}{\dot{I}' \cdot C'} R_{\Pi}, \quad (1)$$

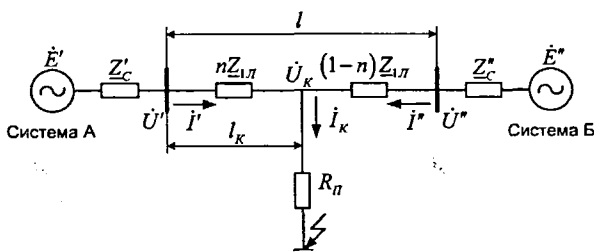


Рисунок 1 - Схема замещения при повреждении на одиночной линии с двухсторонним питанием

где \dot{U}' и \dot{I}' – подводимые к устройству ОМП в начале ВЛ ток и напряжение, соответственно (определяются в зависимости от вида КЗ и количества цепей ВЛ); $Z_{1Л}$ – полное сопротивление прямой последовательности ВЛ, $\dot{I}'_{Кав}$ – аварийная составляющая тока короткого замыкания (КЗ) в месте повреждения

со стороны начала линии; C' – коэффициент токораспределения; R_{Π} – переходное сопротивление в месте повреждения.

Далее за начало ВЛ (ближний конец ВЛ) принимается конец со стороны системы А, за удаленный конец – конец ВЛ со стороны системы Б (рисунок 1). Величины, обозначаемые символом одного штриха, относятся к началу ВЛ, символом двух штрихов – к концу ВЛ.

В уравнении (1) помимо искомой величины расстояния до места повреждения n также неизвестны переходное сопротивление в месте повреждения R_n и коэффициент токораспределения \underline{C}' , определяемый, например, для одноцепной ВЛ, как

$$\underline{C}' = \frac{\dot{I}'_{Kaa}}{\dot{I}'_K} = \frac{(1-n)\underline{Z}_L + \underline{Z}_C''}{\underline{Z}'_C + \underline{Z}_L + \underline{Z}_C''}, \quad (2)$$

где \dot{I}'_K - результирующий ток КЗ в месте повреждения; \underline{Z}_L , \underline{Z}'_C , \underline{Z}_C'' - полное сопротивление ВЛ, сопротивление системы А и сопротивление системы Б, соответственно.

Погрешность в определении сопротивления R_n и коэффициента токораспределения \underline{C}' , зависящего от сопротивления системы Б \underline{Z}_C'' , существенным образом влияют на погрешность ОМП.

Показано, что в зависимости от вида и степени вводимых упрощений односторонние методы ОМП по ПАР разбиваются на 3 группы:

- I. Метод по измерению реактанса, основанный на измерении реактивной составляющей сопротивления от начала ВЛ до места КЗ. Данный метод пренебрегает углом сдвига между током подводимым к прибору ОМП в начале ВЛ \dot{I}' и током в месте повреждения \dot{I}'_K .
- II. Методы, пренебрегающие углом сдвига между аварийной составляющей тока, подпитывающего место повреждения от системы начала ВЛ, \dot{I}'_{Kaa} и током в месте повреждения \dot{I}'_K .
- III. Методы, учитывающие угол сдвига между аварийной составляющей тока, подпитывающего место повреждения от системы начала ВЛ, \dot{I}'_{Kaa} и током в месте повреждения \dot{I}'_K при помощи коэффициента токораспределения.

Приведенная выше классификация используется далее в ходе изложения работы.

Анализ алгоритмов ОМП, реализованных в таких устройствах, как ИМФ-3С, ИМФ-3Р, Сириус-2-ОМП (ЗАО «Радиус Автоматика»), ПУМА 1100 (НПП ЗАО «АСАТ»), Парма РП4.06 (ООО «Парма»), АУРА (ООО «СВЕИ»), Multilin D60, Multilin L90 (General Electric), MiCOM P43x, MiCOM P54x (AREVA, ALSTOM GRID); ТЛ2606.1Х, TOP200-Л, TOP100-ЛОК (ООО «ИЦ «Бреслер»), Бреслер-0107.010 (ООО «НПП «Бреслер»), REL5xx и REL6xx (ABB) и др., показал:

- Наибольшее распространение получили алгоритмы ОМП, принимающие допущение о совпадении фазы тока, подпитывающего место повреждения от системы в начале линии, с фазой тока в месте повреждения, т.е. методы II группы.

- В настоящее время методы III группы не получили широкого распространения. Основным методом III группы, используемым в качестве функции ОМП в устройствах РЗА, ОМП и РАС, является метод по критерию минимума реактив-

ной мощности в месте повреждения (примером подобных устройств являются терминалы производства «Бреслер»).

Поэтому следует признать целесообразным разработку новых алгоритмов ОМП, относящихся к III группе, с целью замены методов II группы, обладающих большей погрешностью.

Рассмотрены двухсторонние методы ОМП по ПАР, позволяющие уменьшить погрешность ОМП за счет использования ПАР удаленного конца ВЛ, но при этом требующие организации дорогостоящих каналов связи, что создает существенные препятствия к распространению данных методов в российских условиях.

Показано, что большинство используемых методов ОМП по ПАР, получены на основе модели ВЛ со средоточенными параметрами. Отсюда вытекает необходимость анализа допустимости использования модели ВЛ со средоточенными параметрами и целесообразности использования методов ОМП, основанных на модели ВЛ с распределенными параметрами для одноцепных и двухцепных протяженных ВЛ.

Во второй главе приведены основные сведения о моделях ВЛ со средоточенными и распределенными параметрами. Предложены три односторонних метода ОМП по ПАР для ВЛ со средоточенными параметрами и два односторонних метода ОМП по ПАР для ВЛ с распределенными параметрами.

С целью развития III группы методов ОМП по ПАР, представлены три итерационных метода, использующие разные подходы к решению уравнения (1):

- Метод минимального угла (рисунок 2а).
- Метод, основанный на теореме синусов (рисунок 2б).
- Метод, основанный на замере полного сопротивления (рисунок 3а).

Метод минимального угла для случая одноцепной ВЛ реализуется следующим образом (рисунок 2а):

1. Для выполнения процедуры ОМП в устройство вводятся уставки: полная длина линии l ; величина, определяющая шаг итерации, δ ; полные продольные сопротивления прямой и нулевой последовательной $Z_{1л}$ и $Z_{0л}$, соответственно; сопротивления прямой и нулевой последовательностей системы ближнего конца ВЛ $Z'_{1с}$, $Z'_{2с}$ и $Z'_{0с}$, соответственно, определяемые устройством ОМП на основании ПАР в зависимости от текущего режима; сопротивления системы удаленного конца ВЛ $Z''_{1с}$, $Z''_{2с}$ и $Z''_{0с}$ вносятся на стадии расчета уставок для характерных режимов с возможностью дальнейшей корректировки по мере накопления эмпирических данных (влияние на погрешность ОМП данного фактора рассматривается в 3-й главе).

2. В качестве начальных условий принимается, что номер итерации $i = 0$, расстояние до МП в о.е. $n_{(i)} = 0$.

3. Выполняется итерационный процесс, в ходе которого уточняется коэффициент токораспределения по выражению

$$C'_{P(i+1)} = \frac{(1 - n_{(i)})Z_{Pл} + Z''_{PC}}{Z'_{PC} + Z_{Pл} + Z''_{PC}}, \quad (3)$$

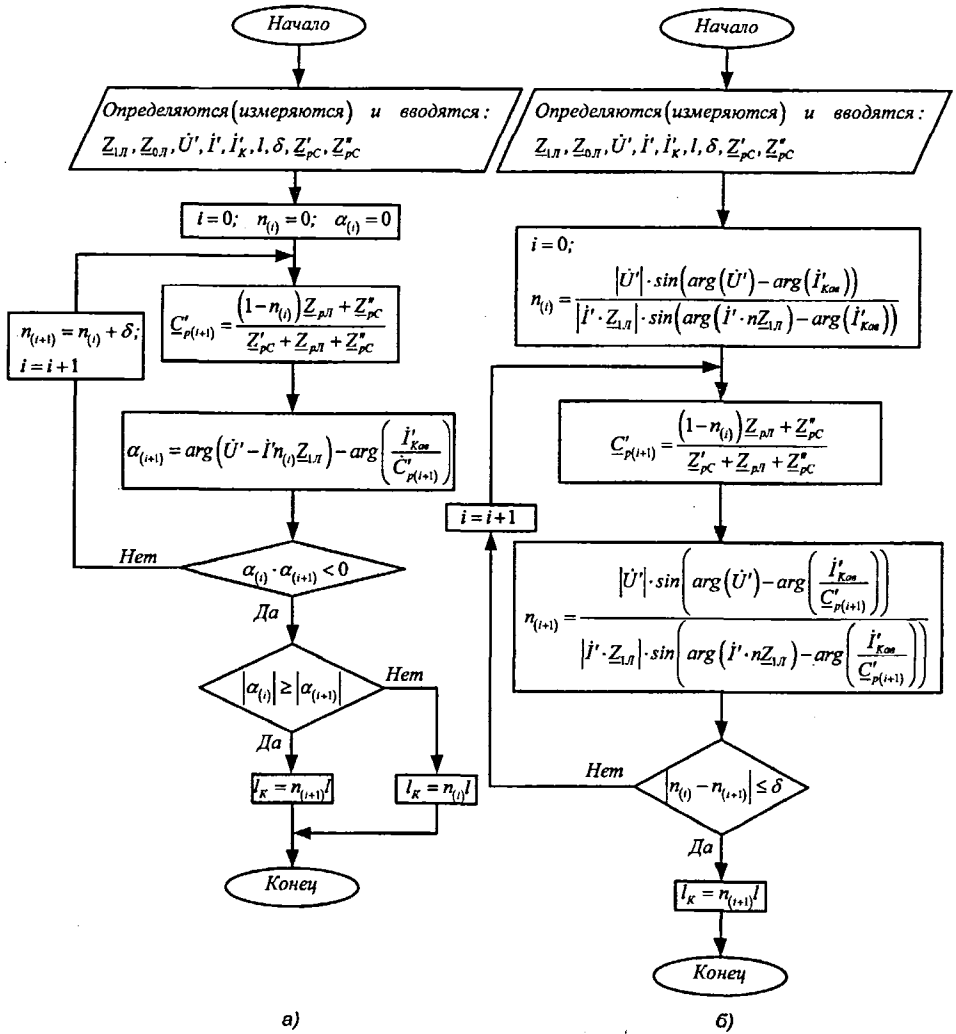


Рисунок 2 – а) Блок-схема алгоритма ОМП методом минимального угла для одноцепной линии; б) Блок-схема алгоритма ОМП методом, основанным на теореме синусов, для одноцепной линии.

и угол между векторами $(\dot{U}' - \dot{I}' \cdot n \underline{Z}_{1л})$ и $\left(\frac{\dot{I}'_{Koa}}{\underline{C}'_p} \cdot R_{л}\right)$ по выражению

$$\alpha_{(i+1)} = \arg(\dot{U}' - \dot{I}' n_{(i)} \underline{Z}_{1л}) - \arg\left(\frac{\dot{I}'_{Koa}}{\underline{C}'_{p(i+1)}}\right), \quad (4)$$

где i - номер итерации, p - номер последовательности симметричных составляющих

4. По окончании каждой итерации проверяется, произошла ли смена знака у величины $\alpha_{(i+1)}$ по отношению к $\alpha_{(i)}$.

Для определения смены знака используется произведение $\alpha_{(i+1)} \cdot \alpha_{(i)}$.

Если $\alpha_{(i+1)} \cdot \alpha_{(i)} > 0$, то смены знака не было, и процесс переходит на следующую итерацию и повторяет п.3, но уже при условии, что $n_{(i+1)} = n_{(i)} + \delta$ и $i = i + 1$.

Если $\alpha_{(i+1)} \cdot \alpha_{(i)} < 0$, то смена знака была, итерационный процесс заканчивается и выполняется сравнение абсолютных значений, полученных по выражению (4) на последней (($i + 1$)-й) и предпоследней ((i)-й) итерациях.

Если $|\alpha_{(i)}| \geq |\alpha_{(i+1)}|$, то расстояние до места повреждения в именованных единицах определяется, как $l_K = n_{(i+1)} l$. Если $|\alpha_{(i)}| < |\alpha_{(i+1)}|$, то расстояние до места повреждения в именованных единицах определяется, как $l_K = n_{(i)} l$.

Расчеты по методу, основанному на теореме синусов (рисунок 2.б), и методу, основанному на замере полного сопротивления (рисунок 3.а), производятся аналогичным образом.

Показано, что предложенные методы применимы при всех видах однократной поперечной несимметрии как на одноцепных, так и двухцепных ВЛ, при этом величины \dot{U}' , \dot{I}' , \dot{I}'_K определяются в зависимости от вида короткого замыкания и количества цепей по выражениям, известным из теории дистанционных защит и ОМП, а коэффициент токораспределения для двухцепной ВЛ по выражению

$$\dot{C}'_p = \frac{(1-n)(\underline{Z}'_{pC} + \underline{Z}_{pл} + \underline{Z}''_{pC}) + \underline{Z}''_{pC}}{2\underline{Z}'_{pC} + \underline{Z}_{pл} + 2\underline{Z}''_{pC}}. \quad (5)$$

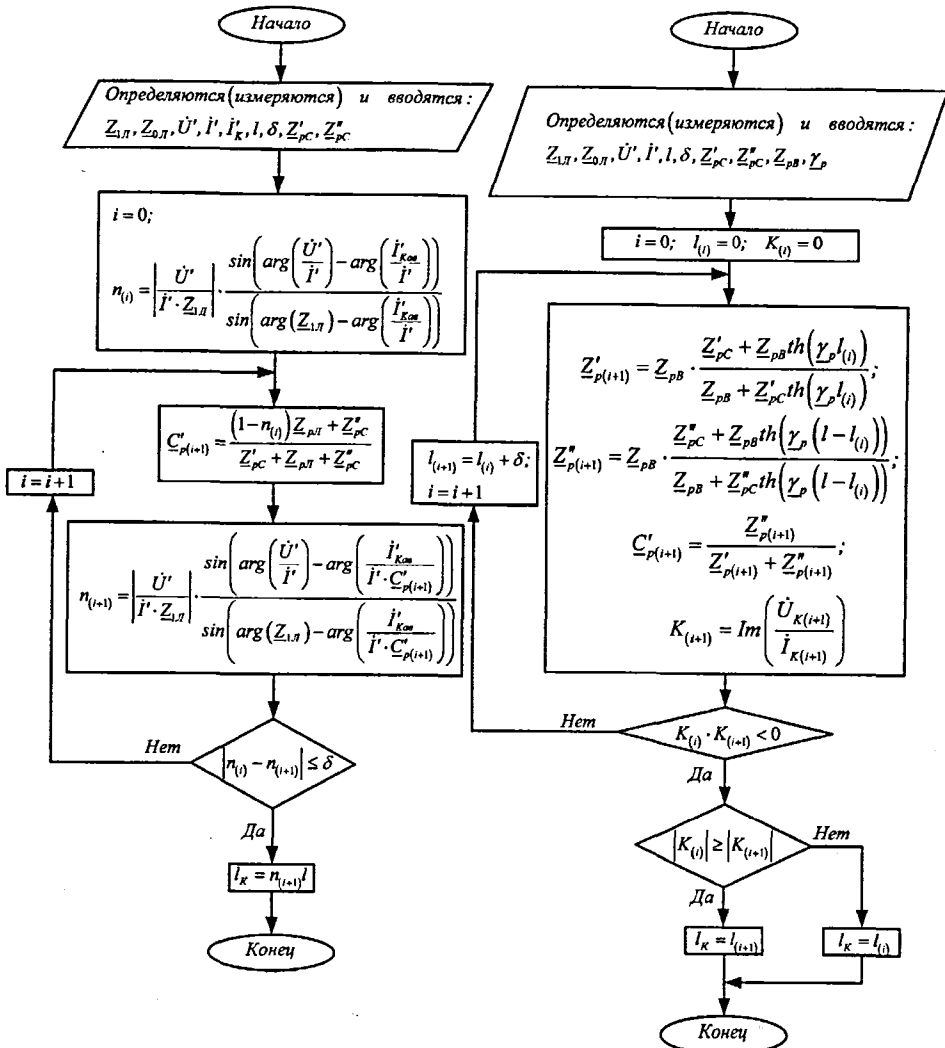


Рисунок 3 – а) Блок-схема алгоритма ОМП метода, основанного на замере полного сопротивления для одноцепной линии; б) Блок-схема алгоритма ОМП метода, основанным на критерии вещественности переходного сопротивления.

При помощи телеграфных уравнений, метода симметричных составляющих, а также с учетом активного характера сопротивления в месте повреждения (что соответствует классической теории электромагнитных переходных процессов и ОМП) разработан метод ОМП для ВЛ с распределенными параметрами.

Получен общий критерий ОМП по вещественности переходного сопротивления

$$K = \operatorname{Im} \left(\frac{\dot{U}_K}{\dot{I}_K} \right) = \operatorname{Im} \left(\frac{\sum_{p=0,1,2} \dot{U}_{pK}}{\sum_{p=0,1,2} \dot{I}_{pK}} \right) = \operatorname{Im} \left(\frac{\sum_{p=0,1,2} \dot{U}'_p \operatorname{ch}(\gamma_p l_K) - \dot{I}'_p Z_{pB} \operatorname{sh}(\gamma_p l_K)}{\sum_{p=0,1,2} \left(\frac{\dot{I}'_p \operatorname{ch}(\gamma_p l_K) - \frac{\dot{U}'_p}{Z_{pB}} \operatorname{sh}(\gamma_p l_K)}{C'_p} \right)} \right) = 0, \quad (6)$$

где p – номер последовательности симметричных составляющих; \dot{U}_K и \dot{I}_K – напряжение и ток в месте повреждения в системе фазных координат, соответственно, определяемые в зависимости от вида повреждения через симметричные составляющие; \dot{U}_{pK} и \dot{I}_{pK} – напряжение и ток в месте повреждения p -й последовательности симметричных составляющих в месте повреждения, соответственно; \dot{U}'_p и \dot{I}'_p – напряжения и токи, подводимые к устройству ОМП в начале ВЛ; Z_{pB} и γ_p – волновое сопротивление и постоянная распространения ВЛ, соответственно; C'_p – коэффициент токораспределения с учетом распределенности параметров ВЛ, определяемый как

$$C'_p = \frac{Z_p''}{Z'_p + Z_p''}. \quad (7)$$

В выражении (7) Z'_p и Z_p'' – входные сопротивления p -й последовательности от начала ВЛ до места повреждения и от конца ВЛ до места повреждения, соответственно.

Метод реализован следующим образом:

1. Для выполнения процедуры ОМП в устройство вводятся уставки: полная длина линии l ; величина δ , определяющая шаг итерации; волновые сопротивления и постоянные распространения каждой из последовательностей симметричных составляющих ВЛ (Z_{pB} , γ_p); сопротивление системы ближнего конца ВЛ для каждой из последовательностей симметричных составляющих Z'_{pC} определяется устройством ОМП на основании ПАР в зависимости от текущего режима; сопротивление удаленного конца ВЛ для каждой из последовательностей симметричных составляющих Z_p'' вносятся на стадии расчета уставок для характерных режимов с возможностью дальнейшей корректировки по мере накопления эмпирических данных (влияние на погрешность ОМП данного фактора рассматривается в 3 главе).

2. В качестве начальных условий принимается, что номер итерации $i = 0$, расстояние до места повреждения $l_{(i)} = 0$ и $K_{(i)} = 0$ (для корректной работы алгоритма при анализе смены знака произведения $K_{(i+1)} \cdot K_{(i)}$ на 1-й итерации).

3. Выполняется итерационный процесс, в ходе которого уточняются входные сопротивления от начала ВЛ до места повреждения и от конца ВЛ до места повреждения, коэффициент токораспределения и величина мнимой части переходного сопротивления:

$$\begin{aligned} Z'_{p(i+1)} &= Z_{pB} \cdot \frac{Z'_{pC} + Z_{pB} \operatorname{th}(\gamma_p l_{(i)})}{Z_{pB} + Z'_{pC} \operatorname{th}(\gamma_p l_{(i)})}; \quad Z''_{p(i+1)} = Z_{pB} \cdot \frac{Z''_{pC} + Z_{pB} \operatorname{th}(\gamma_p (l - l_{(i)}))}{Z_{pB} + Z''_{pC} \operatorname{th}(\gamma_p (l - l_{(i)}))}; \\ C'_{p(i+1)} &= \frac{Z''_{p(i+1)}}{Z'_{p(i+1)} + Z''_{p(i+1)}}; \\ K_{(i+1)} &= \operatorname{Im} \left(\frac{\dot{U}_{K(i+1)}}{\dot{I}_{K(i+1)}} \right). \quad (8) \end{aligned}$$

4. По окончании каждой итерации проверяется, произошла ли смена знака у величины $K_{(i+1)}$ по отношению к $K_{(i)}$ при помощи произведения $K_{(i+1)} \cdot K_{(i)}$.

Если $K_{(i+1)} \cdot K_{(i)} \geq 0$, то смены знака не было, и процесс переходит на следующую итерацию и повторяет п.3, но уже при условии, что $l_{(i+1)} = l_{(i)} + \delta$ и $i = i + 1$.

Если $K_{(i+1)} \cdot K_{(i)} < 0$, то смена знака была, итерационный процесс заканчивается и выполняется сравнение абсолютных значений, полученных по выражению (8) на последней $((i + 1)$ -й) и предпоследней $((i)$ -й) итерациях.

Если $\left| \underline{K}_{(i)} \right| \geq \left| \underline{K}_{(i+1)} \right|$, то расстояние до места повреждения в именованных единицах определяется, как $l_K = l_{(i+1)}$. Если $\left| \underline{K}_{(i)} \right| < \left| \underline{K}_{(i+1)} \right|$, то расстояние до места повреждения в именованных единицах определяется, как $l_K = l_{(i)}$.

Предложен метод по вещественности расстояния от начала ВЛ до места повреждения, который использует свойство равенства нулю мнимой части величины l_K в месте повреждения, и реализуется аналогично методу, основанному на критерии равенства нулю переходного сопротивления в месте повреждения.

Показано, что методы ОМП по ПАР, основанные на модели ВЛ с распределенными параметрами, применимы при всех видах однократной поперечной несимметрии как на одноцепных, так и двухцепных ВЛ. Для двухцепной линии алгоритм выглядит аналогичным образом, с той разницей, что волновые сопротивления, постоянные распространения, параметры режима в месте повреждения и коэффициент токораспределения определяются по выражениям для двухцепной ВЛ.

В третьей главе выполнен анализ влияния факторов (изменения параметров сети, параметров режима, места повреждения, величины переходного сопротивления и др.) на погрешность ОМП разработанных и усовершенствованных методов, описанных в

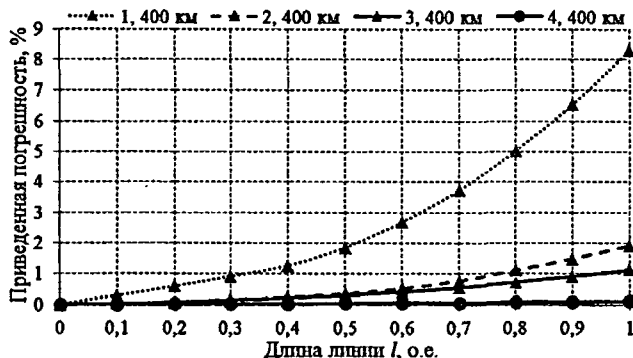


Рисунок 4 - Кривая зависимости приведенной погрешности ОМП от удаленности однофазного КЗ для двухцепной линии длиной 400 км при использовании ПАР начала линии: 1 – метод I группы; 2 – методы II группы; 3 – авторские методы и методы III группы; 4 – авторские методы для линии с распределенными параметрами

первой и второй главах диссертации, с применением математического моделирования. Произведено сравнение предлагаемых методов с существующими, дано заключение о достоинствах и границах применимости разработанных в диссертации методов как на одноцепных, так и двухцепных ВЛ. Выполнена оценка влияния учета распределенности параметров ВЛ на погреш-

ность ОМП.

Для исследования погрешности методов ОМП при составлении компьютерных моделей использовались параметры ВЛ и систем, характерные для напряжения 500 кВ Иркутской энергосистемы.

В качестве факторов, влияющих на погрешность ОМП рассматривались: длина ВЛ; переходное сопротивление в месте повреждения; соотношение сопротивлений систем удаленного и ближнего концов ВЛ; погрешность в определении сопротивления системы удаленного конца ВЛ по модулю и аргументу; угол сдвига между ЭДС систем (Таблица 1).

Для каждого расчетного случая изменялся один из факторов при сохранении неизменными остальных и в зависимости от удаленности короткого замыкания строилась кривая приведенной погрешности (рисунок 4), определяемой как

$$\sigma = \frac{l_{расч} - l_{дейст}}{l} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где $l_{расч}$ - расчетное расстояние от начала ВЛ до места повреждения, полученное при помощи одного из методов ОМП, $l_{дейст}$ - действительное расстояние от начала ВЛ до места повреждения, l - длина ВЛ.

Таблица 1 – Погрешности ОМП в зависимости от изменяемого фактора/параметра

№	Изменяемый фактор/параметр	Диапазон изменения приведенной погрешности ОМП при однофазном КЗ, σ , %	
		начало ВЛ min/max	конец ВЛ min/max
<i>Одноцепная ВЛ</i>			
I группа методов	Длина линии, l , (от 100 до 400 км)	0.41/2.16	4.17/6.05
	Переходное сопротивление, R_n , (от 0 до 30 Ом)	0.00/6.70	0.05/35.90
	Отношение сопротивлений систем, $\frac{Z_c^*}{Z_c}$, (от 0.25 до 20)	0.55/1.12	0.84/10.00
	Погрешность в определении сопротивления системы удаленного конца ВЛ:	-	-
	- по модулю (от $0.05 Z_c^*$ до $100 Z_c^*$)	0.47/1.40	0.55/249.00
	- по аргументу ($arg(Z_c^*)$ от 0° до 90°)	0.85/1.77	2.91/10.16
	Сдвиг между ЭДС систем, δ , (от -60° до 60°)	-0.73/10.73	-20.60/64.60
II группа методов	Длина линии, l , (от 100 до 400 км)	-0.05/-0.12	0.58/0.75
	Переходное сопротивление, R_n , (от 0 до 30 Ом)	0.00/-0.54	0.05/4.10
	Отношение сопротивлений систем, $\frac{Z_c^*}{Z_c}$, (от 1 до 20)	0.00/-0.18	0.10/1.43
	Погрешность в определении сопротивления системы удаленного конца ВЛ:	-	-
	- по модулю (от $0.05 Z_c^*$ до $100 Z_c^*$)	0.00/-0.54	0.05/34.42
	- по аргументу ($arg(Z_c^*)$ от 0° до 90°)	-0.31/1.75	-0.91/7.36
	Сдвиг между ЭДС систем, δ , (от -60° до 60°)	-0.44/-0.55	2.83/4.92
III группа методов	Длина линии, l , (от 100 до 400 км)	Определяется точностью расчета	
	Переходное сопротивление, R_n , (от 0 до 30 Ом)		
	Отношение сопротивлений систем, $\frac{Z_c^*}{Z_c}$, (от 1 до 20)		
	Погрешность в определении сопротивления системы удаленного конца ВЛ:	-	-
	- по модулю (от $0.05 Z_c^*$ до $100 Z_c^*$)	0.07/-0.44	-0.16/21.51
	- по аргументу ($arg(Z_c^*)$ от 0° до 90°)	-0.22/1.82	-1.51/7.17
	Сдвиг между ЭДС систем, δ , (от -60° до 60°)	Определяется точностью расчета	
<i>Двухцепная ВЛ</i>			
I группа методов	Длина линии, l , (от 100 до 400 км)	0.33/1.45	4.50/8.13
	Переходное сопротивление, R_n , (от 0 до 30 Ом)	0.00/4.66	0.05/41.32
	Отношение сопротивлений систем, $\frac{Z_c^*}{Z_c}$, (от 1 до 20)	0.50/0.79	1.57/11.27
	Погрешность в определении сопротивления системы удаленного конца ВЛ:	-	-

	- по модулю (от $0.05 Z_C^*$ до $100 Z_C^*$)	0.47/0.92	1.27/244.00
	- по аргументу ($\arg(Z_C^*)$ от 0° до 90°)	0.62/1.31	3.25/14.27
	Сдвиг между ЭДС систем, δ , (от -60° до 60°)	0.68/6.67	-16.73/70.32
II группа методов	Длина линии, l , (от 100 до 400 км)	-0.03/-0.02	0.46/0.61
	Переходное сопротивление, R_n , (от 0 до 30 Ом)	0.00/-0.37	0.05/4.78
	Отношение сопротивлений систем, $\frac{Z_C^*}{Z_C}$, (от 1 до 20)	0/-0.05	0.09/1.12
	Погрешность в определении сопротивления системы удаленного конца ВЛ:	-	-
	- по модулю (от $0.05 Z_C^*$ до $100 Z_C^*$)	0.00/-0.16	0.06/23.16
	- по аргументу ($\arg(Z_C^*)$ от 0° до 90°)	-0.14/0.95	-1.30/9.03
	Сдвиг между ЭДС систем, δ , (от -60° до 60°)	-0.12/-0.14	2.28/3.45
III группа методов	Длина линии, l , (от 100 до 400 км)	Определяется точностью расчета	
	Переходное сопротивление, R_n , (от 0 до 30 Ом)		
	Отношение сопротивлений систем, $\frac{Z_C^*}{Z_C}$, (от 1 до 20)		
	Погрешность в определении сопротивления системы удаленного конца ВЛ:	-	-
	- по модулю (от $0.05 Z_C^*$ до $100 Z_C^*$)	0.02/-0.13	-0.13/8.94
	- по аргументу ($\arg(Z_C^*)$ от 0° до 90°)	-0.12/0.97	-1.75/8.77
	Сдвиг между ЭДС систем, δ , (от -60° до 60°)	Определяется точностью расчета	

Результаты расчета приведенной погрешности для каждой из трех групп однофазных методов ОМП по ПАР, основанных на модели ВЛ со средоточенными параметрами приведены в Таблице 1.

Анализ результатов математического моделирования выявил следующие закономерности:

1. Методическая погрешность методов III группы определяется точностью расчета и погрешностью в определении сопротивления системы удаленного конца ВЛ. Длина ВЛ, переходное сопротивление в месте повреждения, соотношение сопротивлений систем удаленного и ближнего концов ВЛ, угол сдвига между ЭДС систем не влияют на погрешность ОМП.

2. Методическая погрешность методов II группы в отличие от методов III группы зависит от всех факторов, приведенных в Таблице 1: длины ВЛ, переходного сопротивления в месте повреждения, соотношения сопротивлений систем удаленного и ближнего концов ВЛ, погрешности в определении сопротивления удаленного конца ВЛ по абсолютной величине и аргументу, угла сдвига между ЭДС систем. Приведенная погрешность в зависимости от параметров режима и сети лежит в диапазоне от 0 до 35% (Таблице 1) и объясняется пренебрежением углом сдвига между аварийной составляющей тока, подпитывающего место повреждения от системы начала ВЛ, $i'_{K_{ав}}$ и током в месте повреждения i'_K .

3. При погрешности в определении сопротивления системы удаленного конца ВЛ, обусловленной оперативными переключениями в энергосистемах или изменением режимов «зимний/летний» наименьшей погрешность обладают методы III группы (приведенная погрешность достигает 5%).

4. Наибольшей погрешностью обладают методы I группы.

5. Погрешность ОМП меньше со стороны использования ПАР более мощной (с меньшим сопротивлением) системы.

Анализ результатов компьютерного моделирования и построенных кривых приведенных погрешностей методов, основанных на модели ВЛ с распределенными параметрами, показал, что в начале линии погрешность методов для линии со сосредоточенными параметрами незначительно отличается от методов с распределенными параметрами (рисунок 4). Однако по мере удаления от начала линии погрешность всех методов, разработанных для линии со сосредоточенными параметрами, растет. Погрешность предлагаемого метода для линии с распределенными параметрами практически отсутствует и определяется точностью расчета. Минимальной погрешностью из методов без учета распределенных параметров обладают методы III группы. Погрешность при удаленных КЗ на ВЛ длиной 400 км достигает 2% (рисунок 4).

Таким образом, разработанные в ходе работы методы ОМП, основанные на модели ВЛ с распределенными параметрами, имеют меньшую погрешность по сравнению с методами, основанными на модели ВЛ, со средоточенными параметрами. На длинных ВЛ, достигающих 400 км, при удаленных КЗ абсолютная погрешность уменьшается на 4-8 км.

В четвертой главе описаны результаты практической апробации разработанных методов. Производится сравнение предлагаемых и существующих методов на основании обработки данных реальных коротких замыканий на ВЛ 500 кВ Иркутской энергосистемы. Также предложен метод двухстороннего ОМП по ПАР, использование которого возможно в микропроцессорных терминалах РЗА, использующих токи ближнего и удаленного концов ВЛ.

Таблица 2 – Результаты обработки данных реальных КЗ

Поврежденная ВЛ, дата	№ ВЛ		Фактиче- ское рас- стояние до МП	Метод ОМП			Предлагае- мые методы (с учетом распреде- ленности пар-ров ВЛ)	Длина ВЛ
				Модель со средоточен- ными пар-ми ВЛ				
				I гр.	II гр.	III гр.		
ВЛ-570 (БГЭС - БПП), 07.06.2003	569, 570	l_K , км	28,4	24,13	29,05	28,91	28,76	68,4
		σ , %	-	-6,2	1	0,7	0,5	-
ВЛ-570 (БГЭС- БПП), 19.05.2003	569, 570	l_K , км	21,4	19,23	22,03	21,91	21,83	68,4
		σ , %	-	-3,2	0,9	0,7	0,6	-
ВЛ-561 (БГЭС- Тулун), 03.05.2007	561, 562	l_K , км	162,4	173,93	165,91	164,32	163,51	242
		σ , %	-	4,8	1,5	0,8	0,5	-
ВЛ-562 (БГЭС- Тулун), 03.05.2007	561, 562	l_K , км	169,9	149,69	172,93	172,13	170,78	242
		σ , %	-	-8,4	1,3	0,9	0,4	-
ВЛ-562 (БГЭС- Тулун), 24.07.2006	561, 562	l_K , км	175,2	158,05	178,76	178,31	176,71	242
		σ , %	-	-7,1	1,5	1,3	0,6	-
ВЛ-562 (БГЭС-	561,	l_K , км	16,8	10,95	17,23	17,15	17,1	242

Тулун), 26.05.2003	562	$\sigma, \%$	-	-2,4	0,2	0,1	0,1	-
ВЛ-502, (БПП-Тайшет), 05.05.2007	501,	$I_{K, KM}$	71	69,49	73,12	72,89	72,03	211,5
	502	$\sigma, \%$	-	-0,7	1	0,9	0,5	-
ВЛ-501 (БПП-Тайшет), 24.04.2007	501,	$I_{K, KM}$	116,9	100,12	118,1	117,9	117,86	211,5
	502	$\sigma, \%$	-	-7,9	0,6	0,5	0,5	-
ВЛ-566 (Иркутская-Тырьеть), 06.05.2007	565,	$I_{K, KM}$	30,5	21,02	31,21	31,09	31,03	179
	566	$\sigma, \%$	-	-5,3	0,4	0,3	0,3	-
ВЛ-565 (Иркутская-Тырьеть), 05.05.2007	565,	$I_{K, KM}$	35,6	31,04	35,97	35,91	35,74	179
	566	$\sigma, \%$	-	-2,5	0,2	0,2	0,1	-
ВЛ-565 (Иркутская-Тырьеть), 05.05.2007	565,	$I_{K, KM}$	36,6	31,97	38,93	38,72	38,11	179
	566	$\sigma, \%$	-	-2,6	1,3	1,2	0,8	-
ВЛ-565 (Иркутская-Тырьеть), 05.05.2007	565,	$I_{K, KM}$	36,9	29,51	38,29	37,98	37,26	179
	566	$\sigma, \%$	-	-4,1	0,8	0,6	0,2	-
ВЛ-566 (Иркутская-Тырьеть), 27.05.2006	565,	$I_{K, KM}$	144	160,71	148,31	147,73	146,81	179
	566	$\sigma, \%$	-	9,3	2,4	2,1	1,6	-
ВЛ-565 (Иркутская-Тырьеть), 27.05.2006	565,	$I_{K, KM}$	5,1	1,86	5,71	5,31	5,25	179
	566	$\sigma, \%$	-	-1,8	0,3	0,1	0,1	-
ВЛ-566 (Иркутская-Тырьеть), 27.05.06	565,	$I_{K, KM}$	149	168,35	154,58	154,17	153,84	179
	566	$\sigma, \%$	-	10,8	3,1	2,9	2,7	-
ВЛ-502 (Тайшет-БПП), 05.05.2007	501,	$I_{K, KM}$	140,5	132,87	145,48	145,13	144,61	211,5
	502	$\sigma, \%$	-	-3,6	2,4	2,2	1,9	-
ВЛ-501, (Тайшет-БПП), 24.04.2007	501,	$I_{K, KM}$	94,6	95,33	96,47	96,13	95,97	211,5
	502	$\sigma, \%$	-	0,3	0,9	0,7	0,6	-
ВЛ-562 (Тулун-БГЭС), 24.07.06	561,	$I_{K, KM}$	12	14,91	13,91	13,83	13,61	242
	562	$\sigma, \%$	-	1,2	0,8	0,8	0,7	-
ВЛ-566 (Тырьеть-Иркутская), 6.05.07	565,	$I_{K, KM}$	148,5	123,1	156,02	154,32	154,11	179
	566	$\sigma, \%$	-	-14,2	4,2	3,3	3,1	-
ВЛ-565 (Тырьеть-Иркутская), 5.05.07	565,	$I_{K, KM}$	143,4	115,37	147,1	146,89	145,15	179
	566	$\sigma, \%$	-	-15,7	2,1	1,9	1	-
ВЛ-565 (Тырьеть-Иркутская), 5.05.07	565,	$I_{K, KM}$	142,4	115,27	145,73	145,21	144,12	179
	566	$\sigma, \%$	-	-15,2	1,9	1,6	1	-
ВЛ-565 (Тырьеть-Иркутская), 5.05.07	565,	$I_{K, KM}$	142,1	128,92	147,35	146,78	145,9	179
	566	$\sigma, \%$	-	-7,4	2,9	2,6	2,1	-
ВЛ-566 (Тырьеть-Иркутская), 7.05.06	565,	$I_{K, KM}$	30	37,64	31,18	30,93	30,73	179
	566	$\sigma, \%$	-	4,3	0,7	0,5	0,4	-
ВЛ-572 (УИГЭС-БПП), 24.10.06	571,	$I_{K, KM}$	34	42,27	37,28	36,93	36,17	256
	572	$\sigma, \%$	-	3,2	1,3	1,1	0,8	-
ВЛ-572 (УИГЭС-БПП), 24.10.06	571,	$I_{K, KM}$	44,7	59,53	49,17	48,76	48,13	256
	572	$\sigma, \%$	-	5,8	1,7	1,6	1,3	-

Результаты обработки осциллограмм реальных коротких замыканий на ВЛ 500 кВ позволяют сделать следующие выводы (таблица 2):

1. Приведенная погрешность, предлагаемых методов ОМП с учетом распределенности параметров ВЛ достигает 3,1%, методов III группы – 3,3%, методов II группы – 4,2%, методов I группы – 15,7%. Данное распределение величин погрешности в зависимости от метода ОМП соответствует результатам, полученным при помощи математического моделирования в 3 главе диссертационной работы.
2. Методы I группы с учетом погрешности до 15,7% нецелесообразно использовать, особенно на длинных ВЛ.
3. При удаленных КЗ на длинных ВЛ наименьшую погрешность имеет метод с учетом распределенности параметров ВЛ. По сравнению с методами II и III групп

приведенная и абсолютная погрешности меньше на 0,2-1,1% и на 0,5-2 км, соответственно. Поэтому методы ОМП по ПАР, учитывающие распределенность параметров ВЛ целесообразны для случая удаленных КЗ на ВЛ протяженностью 200 км и больше, особенно в труднодоступных районах.

4. Приведенная погрешность методов II группы больше погрешности методов III группы на 0-0,6% в зависимости от ВЛ и удаленности КЗ. С учетом меньшей приведенной погрешности, а также меньшей зависимости от погрешности в определении сопротивления удаленного конца ВЛ, методы III группы являются предпочтительным для ВЛ средней и большой протяженности особенно для районов, где есть сложности при перемещении вдоль линии при поиске места и причины повреждения.

5. В целом, величины приведенных погрешностей, определенных на практике, оказались выше значений приведенных погрешностей соответствующих методов ОМП в теории. Увеличение погрешности на практике объясняется следующими факторами:

- неоднородность ВЛ (использование различных видов опор, проводов, расхождение цепей в коридоре, неравномерный рельеф, различное сопротивление грунта на протяжении ВЛ и т.п.);
- разные заходы цепей ВЛ на ПС, прохождение в одном коридоре на отдельных участках с другими ВЛ;
- погрешность в определении фактического места повреждения службами эксплуатации (определение только до пролета, сложность определения точного места повреждения после больших пожаров);
- изменение сопротивления дуги переходного сопротивления и другие факторы, имеющие случайный характер.

Таким образом, с учетом перечисленных факторов, использование предлагаемых методов позволяет уменьшить погрешность ОМП, как следствие, сократить время на поиск и ликвидацию повреждения.

Также в диссертационной работе получена и проверена при помощи компьютерного моделирования методика двухстороннего ОМП. Данный метод имеет возможность использования в микропроцессорных терминалах, реализующих ДЗЛ, и обладает следующими достоинствами:

1. Отсутствие передачи по каналам связи информации о векторах напряжений начала и конца линии. Достаточно передавать и принимать информацию только о векторных величинах токов удаленного конца линии;
2. Отсутствие итерационного процесса освобождает ресурсы микропроцессорного устройства для иных задач (функций РЗА, регистрации и др.);
3. Простота реализации в существующих микропроцессорных устройствах продольной дифференциальной защиты линии, т.к. отсутствует необходимость изменения аппаратной базы.
4. Отсутствие методической погрешности при изменении сопротивления системы удаленного конца.

В пятой главе предложены методы ОМП по ПАР для четырехфазных ВЛ.

Таблица 3 – Расчетные выражения для ОМП на четырехфазной ВЛ в зависимости от вида повреждения

Вид КЗ	Фазы с КЗ	Фазные величины ПАР, используемые при ОМП									
		\dot{U}'	\dot{U}'_{ϕ}	A		B		C		D	
K1	A, B, C, D	\dot{I}'	$\dot{I}'_{\phi} + k4\dot{I}'_0$								
		\dot{I}'_K		$\frac{4\dot{I}'_3}{C'_3}$		$\frac{4a\dot{I}'_3}{C'_3}$		$\frac{4a^2\dot{I}'_3}{C'_3}$		$\frac{4a^3\dot{I}'_3}{C'_3}$	
K2	A-B, C-D, A-C, B-D, A-D, B-C	\dot{U}'	$\dot{U}'_{\phi_1} - \dot{U}'_{\phi_2}$	A-B		C-D		A-C		B-D	
		\dot{I}'	$\dot{I}'_{\phi_1} - \dot{I}'_{\phi_2}$								
		\dot{I}'_K		$\frac{2(1-a)\dot{I}'_3}{C'_3}$		$\frac{2(a-1)\dot{I}'_3}{C'_3}$		$\frac{2\dot{I}'_3}{C'_3}$		$\frac{2(a+1)\dot{I}'_3}{C'_3}$	
K11	A-B-G, C-D-G, A-C-G, B-D-G, A-D-G, B-C-G	\dot{U}'	$\dot{U}'_{\phi_1} - \dot{U}'_{\phi_2}$	A-B		C-D		A-C		B-D	
		\dot{I}'	$\dot{I}'_{\phi_1} - \dot{I}'_{\phi_2}$								
		\dot{I}'_K		$\frac{4\dot{I}'_0}{C'_0}$		$\frac{4\dot{I}'_0}{C'_0}$		$\frac{4\dot{I}'_0}{C'_0}$		$\frac{4\dot{I}'_0}{C'_0}$	
K3	A-C-D, C-D-B, D-B-A, B-A-C	\dot{U}'	$\dot{U}'_{\phi_1} - \dot{U}'_{\phi_2}$	A-C		B-D		B-D		A-C	
		\dot{I}'	$\dot{I}'_{\phi_1} - \dot{I}'_{\phi_2}$								
		\dot{I}'_K		$\frac{2\left(\frac{\dot{I}'_{1os}}{C'_1} + \frac{\dot{I}'_3}{C'_3}\right)}{3}$		$\frac{2a^3\left(\frac{\dot{I}'_{1os}}{C'_1} - \frac{\dot{I}'_3}{C'_3}\right)}{3}$		$\frac{2a^3\left(\frac{\dot{I}'_{1os}}{C'_1} - \frac{\dot{I}'_3}{C'_3}\right)}{3}$		$\frac{2\left(\frac{\dot{I}'_{1os}}{C'_1} + \frac{\dot{I}'_3}{C'_3}\right)}{3}$	
K111	A-C-D-G, C-D-B-G, D-B-A-G, B-A-C-G	\dot{U}'	$\dot{U}'_{\phi_1} - \dot{U}'_{\phi_2}$	A-C		C-D		B-D		A-C	
		\dot{I}'	$\dot{I}'_{\phi_1} - \dot{I}'_{\phi_2}$								
		\dot{I}'_K		$\frac{4\dot{I}'_0}{C'_0}$		$\frac{4\dot{I}'_0}{C'_0}$		$\frac{4\dot{I}'_0}{C'_0}$		$\frac{4\dot{I}'_0}{C'_0}$	
K4	A-B-C-D, A-B-C-D-G	\dot{U}'	$\dot{U}'_{\phi_1} - \dot{U}'_{\phi_2}$	A-B							
		\dot{I}'	$\dot{I}'_{\phi_1} - \dot{I}'_{\phi_2}$								
		\dot{I}'_K		$\frac{(1-a^3)\dot{I}'_{1os}}{C'_1}$							

\dot{U}' и \dot{I}' - основная гармоника напряжения и тока в начале линии, подводимого к устройству ОМП, соответственно; \dot{I}'_K - ток в месте повреждения; $a = e^{j\frac{\pi}{2}}$ - поворотный множитель;

$k = \frac{Z_{Л_прод_0} - Z_{Л_прод_1}}{4Z_{Л_прод_1}}$ - коэффициент компенсации для четырехфазной ВЛ; в случае необходимости ток \dot{I}'_K может быть выражен через токи других последовательностей.

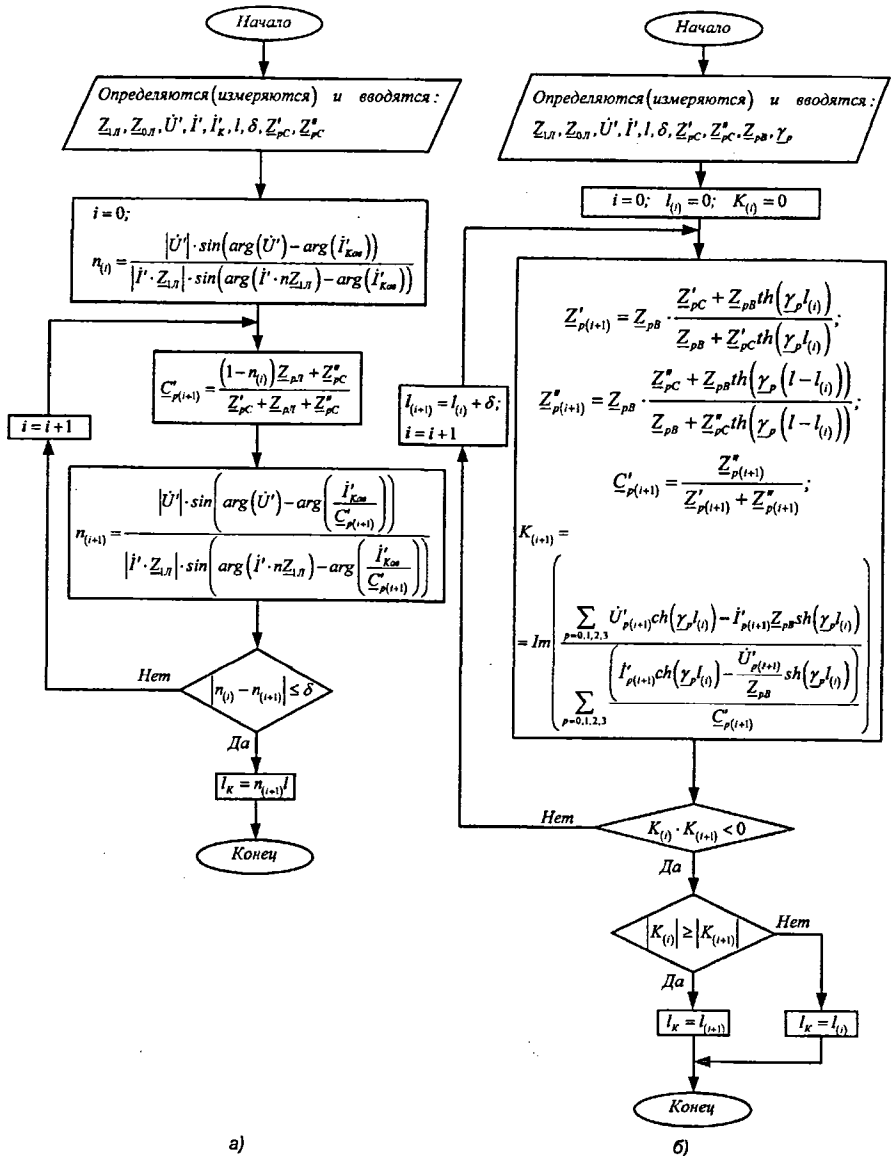


Рисунок 5 - Блок-схема алгоритма ОП: а) метода полного сопротивления для четырехфазной ВЛ со средоточенными параметрами; б) метода, основанного на критерии вещественности переходного сопротивления, для четырехфазной ВЛ с распределенными параметрами

В ходе диссертационной работы выявлено, что в последние годы четырехфазные линии начали рассматривать не только в области сверхвысоких напряжений и сверхдлинных линий, но также на уровне высоких и средних напряжений для ВЛ протяженностью от 100 км и выше, что является актуальным не только для стран Европейского Союза и Тихоокеанского региона, но также и России, особенно в районах плотной застройки и тяжелых климатических условий.

Одной из задач, которую необходимо решить для полноценного внедрения и последующей эксплуатации четырехфазных ВЛ, является разработка новых либо адаптация существующих (разработанных для трехфазных систем) алгоритмов определения места повреждения.

Посредством использования метода симметричных составляющих для случая четырехфазной системы и с учетом граничных условий для различных видов КЗ через переходное сопротивление в месте повреждения, впервые получены расчетные выражения, необходимые для ОМП на четырехфазной ВЛ, позволяющие связать ПАР в начале линии с ПАР в месте повреждения (Таблица 3).

Показано, что критерий вещественности переходного сопротивления для четырехфазной ВЛ может быть записан, как

$$K = \operatorname{Im} \left(\frac{\dot{U}_K}{\dot{I}_K} \right) = \operatorname{Im} \left(\frac{\sum_{p=0,1,2,3} \dot{U}_{pK}}{\sum_{p=0,1,2,3} \dot{I}_{pK}} \right) = \operatorname{Im} \left(\frac{\sum_{p=0,1,2,3} \dot{U}'_p \operatorname{ch}(\gamma_p l_K) - \dot{I}'_p Z_{pB} \operatorname{sh}(\gamma_p l_K)}{\sum_{p=0,1,2,3} \frac{\left(\dot{I}'_p \operatorname{ch}(\gamma_p l_K) - \frac{\dot{U}'_p}{Z_{pB}} \operatorname{sh}(\gamma_p l_K) \right)}{Z'_p}} \right) = 0, \quad (10)$$

где p – это номер последовательности симметричных составляющих.

На основании критерия (10) и при помощи выражений таблицы 3, метод по критерию вещественности переходного сопротивления распространен на случай четырехфазной ВЛ (рисунок 5б).

Показано, что в случае использования модели ВЛ со средоточенными параметрами применимы предложенные для трехфазной ВЛ метод минимального угла, метод, основанный на теореме синусов, и метод, основанный на замере полного сопротивления. Однако существенным отличием является тот факт, что при определении величин \dot{U}' , \dot{I}' и \dot{I}_K , в зависимости от вида короткого замыкания, должны использоваться полученные в работе выражения таблицы 3.

Анализ результатов компьютерного моделирования и кривых приведенной погрешности показал, что в начале линии погрешность методов со средоточенными параметрами незначительно отличается от методов с распределенными параметрами. Однако по мере удаления от начала линии погрешность методов, разработанных для линии со средоточенными параметрами, растет, достигая 1-2%, что является сопоставимым с погрешностями, полученными для трехфазной ВЛ.

Таким образом, методы, разработанные в ходе работы для линии с распределенными параметрами имеют меньшую погрешность и являются предпочтительными для реализации функции ОМП на длинных ВЛ высокого напряжения.

Заключение

Основные теоретические и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Произведен сравнительный анализ односторонних методов ОМП по ПАР, используемых в настоящее время в устройствах ОМП, на основании которого выделены 3 группы по величине погрешности:

I. Метод по измерению реактанса, пренебрегающий углом сдвига между током, подводимым к прибору ОМП в начале ВЛ, и током в месте повреждения.

II. Методы, пренебрегающие углом сдвига между аварийной составляющей тока, подпитывающего место повреждения от системы начала ВЛ, и током в месте повреждения.

III. Методы, учитывающие угол сдвига между аварийной составляющей тока, подпитывающего место повреждения от системы начала ВЛ, и током в месте повреждения при помощи коэффициента токораспределения.

2. Усовершенствованы односторонние методы ОМП по ПАР, разработанные на кафедре электрических станций и сетей энергетического факультета ИрГТУ:

- итерационный метод минимального угла;
- итерационный метод, основанный на теореме синусов;
- итерационный метод, основанный на замере полного сопротивления с учетом переходного сопротивления.

В рамках развития методов разработаны блок-схемы и пошагово описаны алгоритмы функционирования. Выполнена программная реализация предлагаемых методов, проведен анализ влияния факторов (изменения параметров сети, параметров режима, места повреждения, величины переходного сопротивления и др.) на погрешность ОМП посредством математического моделирования и обработки данных реальных коротких замыканий. Предлагаемые методы уменьшают погрешность ОМП по сравнению с методами по ПАР, не учитывающими угол сдвига между током в месте повреждения и током, подпитывающим место КЗ от системы начала ВЛ.

3. Разработано два односторонних метода ОМП по ПАР для трехфазной ВЛ с учетом распределенности параметров. Первый метод основан на критерии вещественности переходного сопротивления в месте повреждения. Второй использует свойство вещественности расстояния от начала ВЛ до места повреждения. Для второго метода получен патент РФ.

4. Выполнена оценка погрешности предлагаемых методов ОМП по ПАР на одноцепных и двухцепных трехфазных ВЛ со средоточенными параметрами в зависимости от таких факторов, как длина ВЛ, величина переходного сопротивления в месте повреждения, сопротивление системы ближнего и удаленного конца ВЛ, по-

грешность в определении сопротивления системы удаленного конца ВЛ, угол сдвига между ЭДС систем и др. Показано, что предлагаемые методы по величине погрешности относятся к III группе и обладают меньшей погрешностью, чем методы I и II групп.

5. Выполнена оценка погрешности предлагаемых методов ОМП по ПАР на одноцепных и двухцепных трехфазных ВЛ с распределенными параметрами. Показано, что методы с учетом распределенности параметров ВЛ имеют меньшую погрешность чем методы I-III групп. Учет распределенности параметров ВЛ при ОМП по ПАР целесообразен при удаленных КЗ на ВЛ протяженностью от 200 км и более в труднодоступных районах.

6. Проанализированы результаты одностороннего ОМП по ПАР существующими и предлагаемыми методами на основании данных осциллограмм коротких замыканий на ВЛ 500 кВ Иркутской энергосистемы. Результаты, полученные при помощи информации о реальных коротких замыканиях, подтвердили распределение методов по величине приведенной погрешности, полученное посредством математического моделирования.

7. Предложена методика двухстороннего ОМП на трехфазных ВЛ, позволяющая уменьшить погрешность ОМП в микропроцессорных терминалах, реализующих ДЗЛ, без изменения аппаратной базы устройства. Для данной методики получен патент РФ и подтверждение о возможности реализации в терминалах компании Alstom Grid.

8. Разработаны односторонние методы ОМП по ПАР для одноцепной четырехфазной ВЛ со средоточенными и распределенными параметрами, получены аналитические выражения связывающие ПАР в начале ВЛ с ПАР в месте повреждения при различных видах однократной поперечной несимметрии. Предложенные методы решают проблему отсутствия методов ОМП по ПАР для четырехфазных ВЛ. Представленные в работе аналитические выражения применимы для дальнейшего развития методов ОМП и РЗА на четырехфазных ВЛ.

9. Основные результаты работы использованы в рамках договора с ОАО «ИЭСК» №269/11 от 01 декабря 2011 для анализа коротких замыканий на линиях электропередачи и разработки мероприятий в электрических сетях, а также внедрены в учебный процесс в НИ ИргТУ на кафедре электрических станций, сетей и систем при проведении лекционных занятий по курсу «Определение места повреждения на линиях электропередачи» для студентов, бакалавров и магистрантов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Устинов, А.А. Определение места повреждения на четырехфазных воздушных линиях электропередачи высокого напряжения по параметрам аварийного режима при одностороннем замере / А.А. Устинов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – №12. – С. 274-280.
2. Устинов, А.А. Влияние погрешности в задании сопротивления системы удаленного на точность определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи / А.А. Устинов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – №4. – С. 118-124.
3. Устинов, А.А. Итерационные методы определения места повреждения по параметрам аварийного режима при односторонних измерениях на воздушных линиях электропередачи / А.А. Устинов, А.Н. Висящев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2010. – №5. – С. 260-266.

Патенты

4. Патент №2526095 Российской Федерации, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи (варианты) / Висящев А.Н., Устинов А.А. – Оpubл. 20.08.2014, Бюл. №23.
5. Патент №2426998 Российской Федерации, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи / Висящев А.Н., Устинов А.А. – Оpubл. 20.08.2011, Бюл. №23.

Публикации в других изданиях

6. Устинов, А.А. Определение места повреждения на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения Иркутской энергосистемы / А.А. Устинов // Сборник материалов XVII международной научно-практической конференции «Современное состояние естественных и технических наук». – Москва: Спутник+, 2014. – С. 117-122.
7. Устинов, А.А. Определение места повреждения на четырехфазных воздушных линиях электропередачи высокого напряжения / А.А. Устинов // Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции «Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития». – Новосибирск: НГТУ, 2014. – С. 120-127.
8. Устинов, А.А. Одностороннее определение места повреждения по параметрам аварийного режима на одноцепных воздушных линиях электропередачи с распределенными параметрами / А.Н. Висящев, А.А. Устинов // Повышение эффективности производств и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск: ИрГТУ, 2010. – С. 258-261.
9. Устинов, А.А. Определение места повреждения на линиях электропередачи высокого напряжения с учетом волновых процессов / А.А. Устинов // Сборник док-

- ладов выставки «Энергосбережение: «Технологии, приборы, оборудование». – Иркутск: ИрГУПС, 2009. – С. 79-83.
10. Устинов, А.А. Определение места повреждения на линиях электропередачи высокого напряжения с учетом волновых процессов / А.А. Устинов // Сборник конкурсных работ Всероссийского смотра-конкурса научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика-2008» – Новочеркасск: Юж.-Рос. Гос. Техн. Ун-т. (НПИ), 2008. – С. 478-480.
 11. Устинов, А.А. Определение места повреждения на линиях электропередачи большой протяженности и высокого напряжения с учетом волновых процессов / А.Н. Висящев, А.А. Устинов // Эффективність та якість електропостачання промислових підприємств: VI міжнародна науково-технічна конф.: зб. праць. – Маріуполь: ПДТУ, 2008. – С. 319-322.
 12. Устинов, А.А., Федосов Д.С. Определение места повреждения на линиях электропередачи большой протяженности и высокого напряжения с учетом волновых процессов / А.Н. Висящев, А.А. Устинов, Д.С. Федосов // Проблемы теплофизики и теплоэнергетики: материалы семинара вузов Сибири и Дальнего Востока. Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск: ИрГТУ, 2008. – С. 381-386.
 13. Устинов, А.А. Определение места повреждения на основе волнового сопротивления / А.Н. Висящев, А.А. Устинов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск: ИрГТУ, 2007. – С. 329-334.
 14. Устинов, А.А. Определение места повреждения на линиях электропередачи с учетом волновых процессов / А.Н. Висящев, А.А. Устинов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск: ИрГТУ, 2006. – С. 311-322.

Отпечатано в ИСЭМ СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
Заказ №103, тираж 130 экз.