

На правах рукописи



Абрамочкина Людмила Владимировна

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА
ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПО
ПАРАМЕТРАМ ПРЕДАВАРИЙНОГО И АВАРИЙНОГО РЕЖИМОВ**

**Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель **Хрущев Юрий Васильевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Сальников Василий Герасимович,**
доктор технических наук, профессор
кафедры «Электроэнергетические системы
и электротехника» ФГОУ ВПО
«Новосибирская государственная академия
водного транспорта»

Мусин Агзам Хамитович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Электрификация производства и
быта» ФГБОУ ВПО «Алтайский
государственный технический университет
им. И. И. Ползунова»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Омский государственный
технический университет»

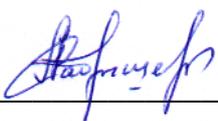
Защита состоится «3» декабря 2014 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте:

<http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан «15» октября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор


_____ **А.В. Кабышев**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. На воздушных линиях (ВЛ) электропередачи довольно часто возникают повреждения различного вида, в результате которых линия выходит из строя, что приводит к недоотпуску электроэнергии, снижению надежности и качества электроснабжения. Очевидно, одной из важнейших задач ремонтных служб предприятий электросетей является быстрое определение места повреждения (ОМП) и организация ремонтно-восстановительных работ.

Разнообразие структуры и условий работы электрических сетей привело к развитию большого количества методов ОМП. Импульсные методы ОМП (локационные и волновые) дают более точные результаты по сравнению с другими методами, однако требуют больших финансовых вложений, при этом они малоэффективны на неоднородных линиях за счет появления «паразитных» отражений импульсов. Наибольшее распространение получила группа методов ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР) по причине их экономической целесообразности, обусловленной возможностями использования алгоритмов и аппаратуры, применяемых в практике реализации устройств релейной защиты и автоматики электрических сетей.

Совершенствованием методов и средств ОМП по ПАР активно занимаются ученые Г.М. Шалыт, А.И. Айзенфельд, М.П. Розенкноп, Я.Л. Арцишевский, коллективы предприятий ООО «НПП Бреслер», ООО «НТЦ «Механотроника» и другие. В результате погрешность ОМП по ПАР непрерывно уменьшается. Однако по настоящее время она ещё достаточно велика из-за сложностей учёта ряда факторов, влияющих, в том числе, и на точность используемых алгоритмов.

Существующие методы ОМП по ПАР позволяют определять место повреждения с погрешностью не ниже 2% от длины линии, и дальнейший поиск приходится осуществлять путем поиска по трассе, что приводит к значительным временным, трудовым и материальным затратам. Кроме того, место повреждения иногда плохо различимо даже с близкого расстояния, поскольку на гирлянде изоляторов после перекрытия часто не остается заметных следов обгорания.

Вышесказанное позволяет утверждать, что вопрос повышения точности ОМП является весьма актуальным. Качественные изменения, произошедшие в области измерительных средств, а именно переход от аналоговых устройств к цифровым, выполненным на базе электронно-вычислительных машин, дают возможность совершенствования методов ОМП по ПАР.

В данной диссертационной работе рассматриваются возможности повышения точности ОМП воздушных линий электропередачи по ПАР на основе уточнения их математических моделей по параметрам предаварийного режима и применения более совершенных алгоритмов.

Целью диссертационной работы является разработка методов ОМП ВЛ повышенной точности, основанных на использовании в качестве первичной информации массивов мгновенных значений токов и напряжений, получаемых с помощью регистраторов аварийных процессов.

Для достижения указанной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Изучить существующие способы и устройства ОМП ВЛ и произвести систематизацию и анализ основных причин возникновения погрешностей при ОМП. В результате чего сформулировать пути снижения влияния факторов на точность ОМП.

2. Разработать способы и алгоритмы ОМП повышенной точности за счёт учёта пространственной распределённости параметров линии.

3. Разработать способ и алгоритмы идентификации погонных параметров ВЛ повышенной точности по параметрам предшествующих аварии режимов с целью их использования в алгоритмах ОМП.

4. Произвести апробацию разработанных алгоритмов.

5. Оценить чувствительность алгоритмов идентификации погонных параметров ВЛ к присутствию высших гармонических составляющих в токах и напряжениях.

6. Оценить чувствительность алгоритмов идентификации погонных параметров к погрешностям синхронизации измерений по концам ВЛ.

Методы исследований. Для решения задач, поставленных в настоящей работе, использовались: теория электромагнитных переходных процессов, математическое описание режимов линии произвольной протяженности по уравнениям длинных линий в форме гиперболических функций, математическое моделирование, вычислительные и физические эксперименты.

Научная новизна и основные результаты, выносимые на защиту.

При решении поставленных задач были получены следующие результаты, определяющие научную новизну работы и выносимые на защиту:

- способы определения мест короткого замыкания и обрывов линии, обладающие повышенной точностью за счет учета пространственной распределенности параметров линии посредством применения уравнений длинной линии;

- способ идентификации погонных параметров линии повышенной точности, используемый для определения этих параметров по данным предшествующих аварии нормальных режимов с целью их применения в разработанных алгоритмах ОМП;

- алгоритм идентификации погонных параметров по двум режимам линии с использованием только местных скалярных режимных параметров, исключая отрицательное влияние погрешностей синхронизации сигналов, получаемых по концам линии, на точность определения этих параметров.

Практическая ценность.

1. Точность определения мест повреждения методами, применяющимися в настоящий момент на практике, может быть повышена за счет использования вместо справочных параметров линии их реальных значений, определяемых по разработанным в данной работе алгоритмам идентификации погонных параметров.

2. Алгоритм идентификации погонных параметров по двум режимам линии, основанный на использовании местных скалярных параметров режима по концам линии, может стать средством синхронизации сигналов, используемых в алгоритмах ОМП, что также повысит их точность.

3. Способы ОМП повышенной точности, разработанные в данной работе, позволят повысить точность определения мест повреждения и сократить временные и финансовые затраты на поиски места повреждения и организацию ремонтно-восстановительных работ.

В целом результаты, полученные в процессе исследований, представляют интерес для практики технического обслуживания воздушных линий электропередачи и линейных ремонтных служб предприятий электросетей.

Апробация. Основные результаты проведенных исследований обсуждались на научных семинарах кафедры «Электрические сети и электротехника» Томского политехнического университета (ТПУ) и на следующих конференциях:

- XVI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2010 г.)
- Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2010 г.)
- X Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Екатеринбург, 2010 г.)
- Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Томск, 2011 г.)
- XVIII Международная научно-практическая конференция студентов «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2012 г.)

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 15 работ, в том числе 3 по списку ВАК, получено 2 патента РФ на изобретения.

Реализация результатов работы. По результатам технического совещания в филиале ОАО "ФСК ЕЭС" – Томское ПМЭС принято решение о проведении производственных испытаний и постановки в опытную эксплуатацию разработанные способы и алгоритмы определения места короткого замыкания и обрывов линии и также идентификации ее погонных параметров.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 167 страницах машинописного

текста, содержит 86 рисунков, 45 таблиц. Список литературы включает 58 наименований, представленных в порядке упоминания в тексте. Номера формул/рисунков/таблиц состоят из двух цифр: первая – номер главы, вторая – порядковый номер формулы/рисунка/таблицы. Список сокращений находится после заключения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и дана общая характеристика выполненной работы. Сформулированы цель работы, научная новизна и практические результаты.

В первой главе приводятся общие сведения о существующих методах ОМП и производится их сравнительный анализ с обозначением достоинств и недостатков. При этом выделяется группа способов ОМП по ПАР, представляющих наибольший интерес соответственно теме диссертации. Дается подробное описание этих способов и реализованных на них устройств.

Производится систематизация и анализ основных причин возникновения погрешностей ОМП по ПАР, которые заключаются в следующем:

- Погрешности работы измерительных трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН). В наибольшей мере эти погрешности сказываются в начальной стадии переходного процесса, наиболее важной для ОМП.

- Неопределенность и неустойчивость переходного сопротивления короткого замыкания (КЗ), приводящая к неточности измерения параметров аварийного режима. Используемые в настоящее время математические модели позволяют частично компенсировать неопределенность переходного сопротивления КЗ, однако, как показывают практические результаты, используемые расчетные методы несовершенны.

- Неточность принимаемых по справочным данным параметров ВЛ.

- Неточность учета взаимной индуктивности между параллельно проходящими ВЛ, которая также обусловлена отсутствием надлежащей идентификации параметров схем замещения по фактическим данным.

- Упрощенный подход к моделированию переходных процессов в линиях электропередачи при КЗ, заключающийся в том, что в общем случае не учитывается влияние активных сопротивлений, фазовых сдвигов между векторами напряжений по концам линий и других факторов.

- Погрешности, связанные с отклонениями в сигналах напряжения и тока: нарушения синусоидальности, отклонения частоты в энергосистеме, наличие апериодических составляющих токов в аварийных режимах, а также влияние пофазной несимметрии ВЛ.

- Погрешности, связанные с невозможностью точной синхронизации результатов измерения токов и напряжений.

Исходя из анализа возможных путей минимизации указанных погрешностей принимается решение о разработке путей увеличения точности ОМП за счет использования уточнённых, посредством идентификации, параметров схемы замещения ВЛ, а также разработке

нового подхода к построению алгоритмов ОМП, основанного на уравнениях длинной линии, и использования, в качестве первичной информации, массивов мгновенных значений (ММЗ) токов и напряжений по концам ВЛ.

Во второй главе излагаются результаты разработки способов и алгоритмов ОМП, основанных на использовании уравнений длинной линии.

Последовательность вывода расчётного выражения для случая определения места КЗ произвольного вида поясняется с помощью рисунка 1.

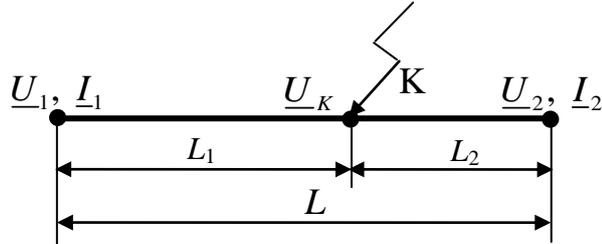


Рисунок 1

Напряжение в точке КЗ определяется относительно начала и конца по известным уравнениям длинной линии:

$$\underline{U}_K = \underline{U}_1 \operatorname{ch}(\gamma_0 L_1) - \underline{I}_1 \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma_0 L_1); \quad (1)$$

$$\underline{U}_K = \underline{U}_2 \operatorname{ch}(\gamma_0 L_2) + \underline{I}_2 \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma_0 L_2). \quad (2)$$

При несимметричном КЗ данные уравнения записываются для составляющих прямой последовательности (ПП) «особой» фазы (например, для фазы А). С учетом того, что $L_2 = L - L_1$, эти уравнения приобретают вид

$$\underline{U}_{A1,K} = \underline{U}_{A1,1} \operatorname{ch}(\gamma_0 L_1) - \underline{I}_{A1,1} \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma_0 L_1); \quad (3)$$

$$\underline{U}_{A1,K} = \underline{U}_{A1,2} \operatorname{ch}(\gamma_0 (L - L_1)) + \underline{I}_{A1,2} \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma_0 (L - L_1)), \quad (4)$$

где $\underline{U}_{A1,1} / \underline{I}_{A1,1}$ – напряжение / ток ПП фазы А в начале линии; $\underline{U}_{A1,2} / \underline{I}_{A1,2}$ – напряжение / ток ПП фазы А в конце линии; $\underline{U}_{A1,K}$ – напряжение ПП фазы А в точке КЗ; $\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{\underline{z}_0}{\underline{y}_0}}$ – волновое сопротивление; $\gamma_0 = \sqrt{\underline{z}_0 \underline{y}_0}$ –

коэффициент распространения электромагнитной волны по линии.

Приравняв правые части уравнений (3) и (4), и решив их относительно L_1 , получаем выражение, позволяющее определять расстояние до места КЗ:

$$L_1 = \frac{1}{\gamma_0} \operatorname{arth} \left(\frac{\underline{U}_{A1,1} - \underline{U}_{A1,2} \operatorname{ch}(\gamma_0 L) - \underline{I}_{A1,2} \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma_0 L)}{\underline{I}_{A1,1} \underline{Z}_B - \underline{U}_{A1,2} \operatorname{sh}(\gamma_0 L) - \underline{I}_{A1,2} \underline{Z}_B \operatorname{ch}(\gamma_0 L)} \right). \quad (5)$$

Отметим, что выражение (5) является инвариантным по отношению к виду КЗ. При любом однократном несимметричном КЗ расстояние L_1 определяется через параметры прямой последовательности. При

трехфазном КЗ используются фазные напряжения и токи, которые также можно считать параметрами прямой последовательности.

Вывод расчётного выражения для определения места обрыва ВЛ поясняется с помощью рисунка 2, на котором схематично представлен обрыв на расстоянии L_1 от ее начала. В данном случае ток будет протекать по здоровым фазам/фазе в том же направлении, что и в доаварийном режиме.

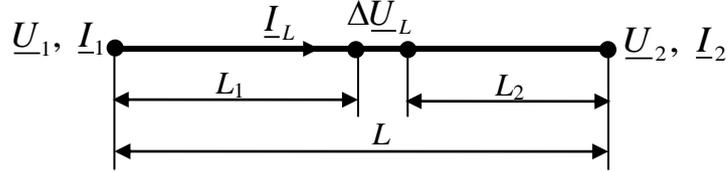


Рисунок 2

Ток в месте обрыва выражается относительно начала и конца линии с использованием уравнений длинной линии:

$$\underline{I}_L = -\frac{1}{\underline{Z}_B} \underline{U}_1 \operatorname{sh}(\gamma_0 L_1) + \underline{I}_1 \operatorname{ch}(\gamma_0 L_1); \quad (6)$$

$$\underline{I}_L = \frac{1}{\underline{Z}_B} \underline{U}_2 \operatorname{sh}(\gamma_0 L_2) + \underline{I}_2 \operatorname{ch}(\gamma_0 L_2). \quad (7)$$

Для составляющих ПП «особой» фазы (например, для фазы А), с учетом того, что $L_2 = L - L_1$, эти уравнения имеют вид:

$$\underline{I}_{A,L} = -\frac{1}{\underline{Z}_B} \underline{U}_{A1,1} \operatorname{sh}(\gamma_0 L_1) + \underline{I}_{A1,1} \operatorname{ch}(\gamma_0 L_1); \quad (8)$$

$$\underline{I}_{A,L} = \frac{1}{\underline{Z}_B} \underline{U}_{A1,2} \operatorname{sh}(\gamma_0 (L - L_1)) + \underline{I}_{A1,2} \operatorname{ch}(\gamma_0 (L - L_1)), \quad (9)$$

где $\underline{U}_{A1,1}$, $\underline{I}_{A1,1}$, $\underline{U}_{A1,2}$, $\underline{I}_{A1,2}$ – соответственно, напряжения и токи прямой последовательности фазы А в начале и конце линии; $\underline{I}_{A,L}$ – ток прямой последовательности фазы А в месте обрыва.

Приравняв правые части уравнений (8) и (9), и решив их относительно L_1 , получаем выражение, позволяющее определять расстояние до места обрыва:

$$L_1 = \frac{1}{\gamma_0} \operatorname{arth} \left(\frac{\underline{I}_{A1,1} \underline{Z}_B - \underline{U}_{A1,2} \operatorname{sh}(\gamma_0 L) - \underline{I}_{A1,2} \underline{Z}_B \operatorname{ch}(\gamma_0 L)}{\underline{U}_{A1,1} - \underline{U}_{A1,2} \operatorname{ch}(\gamma_0 L) - \underline{I}_{A1,2} \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma_0 L)} \right). \quad (10)$$

Векторные значения напряжений и токов прямой последовательности фазы А, используемые в формулах (5) и (10), определяются по ММЗ токов и фазных напряжений, зарегистрированных в начале и конце линии во время аварийного режима. При этом возможны два варианта.

При расчетах первым алгоритмом предварительно осуществляется переход от зафиксированных ММЗ токов и напряжений к векторному представлению с использованием обобщенных векторов \underline{F}_A , \underline{F}_B , \underline{F}_C режимных параметров. Далее по полученным векторным значениям токов и напряжений вычисляют векторные значения токов и напряжений прямой

последовательности фазы А в начале и конце линии с помощью известного способа разложения несимметричной тройки векторов $\underline{F}_A, \underline{F}_B, \underline{F}_C$ на симметричные составляющие прямой \underline{F}_{A1} , обратной \underline{F}_{A2} и нулевой \underline{F}_0 последовательностей, осуществляемого через операторы поворота a, a^2 .

Во втором алгоритме вычисление симметричных составляющих токов и напряжений производится непосредственно по ММЗ. Для этого осуществляется сдвиг данных в массивах токов и напряжений фаз В и С соответственно на углы 120 или 240 градусов, определяемые операторами поворота a, a^2 (рисунок 3, а, б).

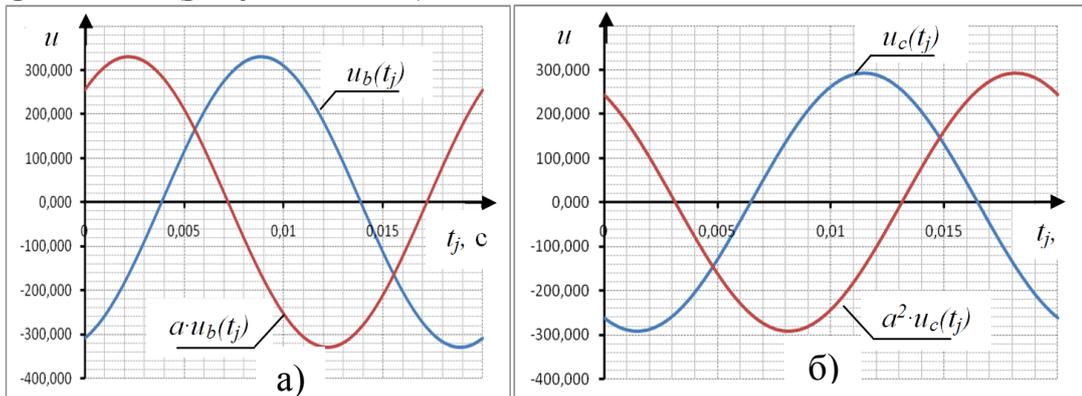


Рисунок 3 – Сдвиг данных в массивах токов и напряжений: а) фазы В, б) фазы С

После выполнения этих процедур вычисляют ММЗ токов и напряжений прямой последовательности фазы А в начале и конце линии:

$$i_{A1,1}(t_j) = \frac{1}{3}(i_{A1}(t_j) + ai_{B1}(t_j) + a^2i_{C1}(t_j)); \quad (11)$$

$$i_{A1,2}(t_j) = \frac{1}{3}(i_{A2}(t_j) + ai_{B2}(t_j) + a^2i_{C2}(t_j)); \quad (12)$$

$$u_{A1,1}(t_j) = \frac{1}{3}(u_{A1}(t_j) + au_{B1}(t_j) + a^2u_{C1}(t_j)); \quad (13)$$

$$u_{A1,2}(t_j) = \frac{1}{3}(u_{A2}(t_j) + au_{B2}(t_j) + a^2u_{C2}(t_j)), \quad (14)$$

и находят соответствующие им векторные значения.

Апробация разработанных алгоритмов ОМП осуществлена с помощью программного комплекса Mathcad на примере двух одноцепных воздушных линий, протяженностью 600 и 8 км, номинальным напряжением 500 кВ. Мощность в конце линии в обоих случаях составляет $\underline{S}_2=250+j105$ МВА.

Идея экспериментальной проверки алгоритмов заключается в следующем: определить, в условиях принятого места повреждения, векторные значения фазных токов и напряжений в начале и в конце линии; найденные значения токов и напряжений представить в виде ММЗ с количеством отсчётов $N=64$ на периоде; далее с помощью полученных ММЗ по алгоритмам, описанным выше, определить расчетное расстояние до места повреждения и сравнить его с принятым расстоянием.

Расчеты проведены для всех видов однократной поперечной и продольной несимметрии на расстоянии 200 и 2 км для линий протяженностью 600 и 8 км соответственно.

Результаты расчета представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты расчета расстояния до места КЗ

	$L=600$ км, $L_I=200$ км		$L=8$ км, $L_I=2$ км	
	L_I , км	Погрешность, %	L_I , км	Погрешность, %
Однофазное КЗ				
Способ 1	200	0	2	0
Способ 2	200	0	2	0
Двухфазное КЗ				
Способ 1	200	0	2	0
Способ 2	200	0	2	0
Двухфазное КЗ на землю				
Способ 1	200	0	2	0
Способ 2	200	0	2	0
Трехфазное				
Способ 1	200	0	2	0
Способ 2	200	0	2	0

Таблица 2 – Результаты расчета места обрыва на ВЛ

	$L=600$ км, $L_I=200$ км		$L=8$ км, $L_I=2$ км	
	L_I , км	Погрешность, %	L_I , км	Погрешность, %
Обрыв одной фазы на линии				
Способ 1	200	0	2	0
Способ 2	200	0	2	0
Обрыв двух фаз на линии				
Способ 1	200	0	2	0
Способ 2	200	0	2	0

Результаты расчетов и анализа показывают, что методическая погрешность рассматриваемых алгоритмов при шаге дискретизации $\Delta t = 0,317$ мс (при $N=64$) находится за пределами сотых долей процента. Таким образом, способы определения места КЗ и обрыва на линии, основанные на использовании уравнений длинной линии, с высокой эффективностью могут использоваться для ОМП на ВЛ произвольной дальности. В этом смысле способы являются универсальными.

Очевидно, что вместо режимных параметров прямой последовательности выражения (5) и (10) могут быть построены на основе режимных параметров обратной последовательности, так как погонные параметры прямой и обратной последовательностей одинаковы. Режимные параметры нулевой последовательности также приемлемы, если известны погонные параметры нулевой последовательности.

Один из разработанных способов определения места КЗ апробирован на реальных данных, зафиксированных при замыкании фазы В на землю на

ВЛ 220 кВ «Чажемто – Парабель» (Томские магистральные сети). ММЗ токов и напряжений зафиксированы с помощью регистраторов типа «Черный ящик». При этом число отсчетов на периоде составляет 32 (на подстанции Чажемто) и 24 (на подстанции Парабель). Полученные по концам линии ММЗ для проведения расчетов трансформированы в программный комплекс Mathcad, где на первом этапе осуществлена их синхронизация.

Далее по синхронизированным массивам с использованием разработанного алгоритма вычислено расстояние до места повреждения. Погрешность вычислений составила 2,01% от длины линии. В то время как погрешность установленных устройств ОМП составила 4,1 % (Индикатор микропроцессорный фиксирующий) и 1,6 % (Черный ящик).

Очевидно, наличие существенной погрешности разработанного алгоритма определения места КЗ в случае использования реальных данных обусловлено влиянием ряда факторов, таких, как малое число отсчетов на периоде (32 и 24), погрешность измерительных трансформаторов, наличие высших гармонических составляющих, погрешность синхронизации сигналов и использование справочных данных о параметрах линии.

В третьей главе показывается актуальность уточнения погонных параметров линии: при использовании в примере расчета двухфазного КЗ на землю на линии 600 км значений погонных параметров с учетом возможных отклонений погрешность ОМП увеличивается до 10.3 %.

В данной главе излагаются элементы разработки уточнённого способа идентификации погонных параметров ВЛ по ММЗ параметров нормальных, в том числе предаварийных, режимов с целью их использования при ОМП.

Разработанный способ базируется на использовании пассивного симметричного четырехполюсника в качестве СЗ ВЛ, коэффициенты которого имеют вид гиперболических зависимостей:

$$\underline{A} = \underline{D} = \text{ch}(\underline{\gamma}_0 L); \quad \underline{B} = \underline{Z}_B \text{sh}(\underline{\gamma}_0 L); \quad \underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_B} \text{sh}(\underline{\gamma}_0 L). \quad (15)$$

Идея способа уточнения погонных параметров линии заключается в том, что сначала определяют постоянные \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} четырехполюсника, затем вычисляют волновые параметры линии по выражениям, полученным путем преобразования соотношений (15),

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\underline{B}/\underline{C}}; \quad \underline{\gamma}_0 = \frac{\text{arch}(\underline{A})}{L}, \quad (16)$$

и по вычисленным волновым параметрам определяют погонные параметры линии:

$$\underline{z}_0 = r_0 + jx_0 = \underline{\gamma}_0 \underline{Z}_B; \quad \underline{y}_0 = g_0 + jb_0 = \underline{\gamma}_0 / \underline{Z}_B. \quad (17)$$

При этом предлагаются два варианта определения параметров четырехполюсника \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} :

1. Напрямую через коэффициенты четырехполюсника (первый алгоритм).

2. Через Π -образную схему замещения (второй алгоритм).

Для построения первого алгоритма используются уравнения четырехполюсника относительно параметров его выхода и входа:

$$\begin{cases} \underline{U}_{\phi 1} = \underline{A}\underline{U}_{\phi 2} + \underline{B}\underline{I}_2; \\ \underline{I}_1 = \underline{C}\underline{U}_{\phi 2} + \underline{D}\underline{I}_2; \\ \underline{U}_{\phi 2} = \underline{D}\underline{U}_{\phi 1} - \underline{B}\underline{I}_1; \\ \underline{I}_2 = -\underline{C}\underline{U}_{\phi 1} + \underline{A}\underline{I}_1, \end{cases} \quad (18)$$

где \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , $\underline{U}_{\phi 1}$, $\underline{U}_{\phi 2}$ – соответственно, векторные значения токов и фазных напряжений входа и выхода.

Искомыми параметрами в уравнениях (18) являются постоянные \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} четырехполюсника. Поскольку $\underline{A} = \underline{D}$, то для решения задачи можно ограничиться тремя любыми уравнениями из группы (18).

Примем для определенности во внимание три первых уравнения из (18) и с учетом равенства $\underline{A} = \underline{D}$ составим требуемую систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{\phi 2} & \underline{I}_2 & 0 \\ \underline{I}_2 & 0 & \underline{U}_{\phi 2} \\ \underline{U}_{\phi 1} & -\underline{I}_1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{A} \\ \underline{B} \\ \underline{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{\phi 1} \\ \underline{I}_1 \\ \underline{U}_{\phi 2} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Решение системы (19) приводит к следующим выражениям:

$$\underline{A} = \frac{\underline{U}_{\phi 2}^2 \underline{I}_2 + \underline{U}_{\phi 1} \underline{U}_{\phi 2} \underline{I}_1}{\underline{U}_{\phi 2}^2 \underline{I}_1 + \underline{U}_{\phi 1} \underline{U}_{\phi 2} \underline{I}_2}; \quad \underline{B} = \frac{\underline{U}_{\phi 1} \underline{U}_{\phi 2} - \underline{U}_{\phi 2}^3}{\underline{U}_{\phi 2}^2 \underline{I}_1 + \underline{U}_{\phi 1} \underline{U}_{\phi 2} \underline{I}_2}; \quad \underline{C} = \frac{\underline{U}_{\phi 2} \underline{I}_1^2 - \underline{U}_{\phi 2} \underline{I}_2^2}{\underline{U}_{\phi 2}^2 \underline{I}_1 + \underline{U}_{\phi 1} \underline{U}_{\phi 2} \underline{I}_2}. \quad (20)$$

Во втором алгоритме используется эквивалентная четырехполюснику промежуточная симметричная Π -образная СЗ (рисунок 4), включающая продольное сопротивление $\underline{Z} = R + jX$ и две равные поперечные проводимости $\underline{Y} = G + jB$. Здесь R , G – вещественные (активные), а X , B – мнимые (реактивные) составляющие комплексных параметров ветвей СЗ.

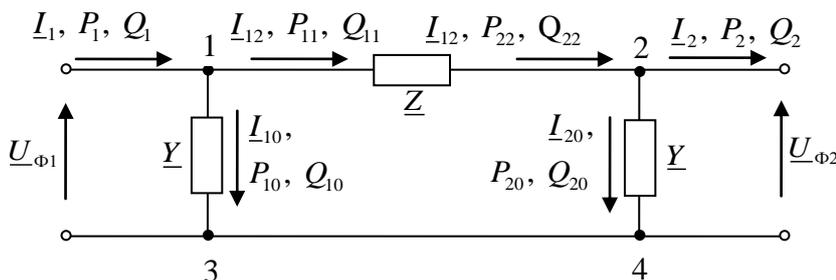


Рисунок 4 – Π -образная СЗ фазы линии

Для Π -образной СЗ (см. рисунок 4) в векторном представлении справедливо равенство

$$\underline{I}_{12} = \underline{I}_1 - \underline{U}_{\phi 1} \underline{Y} = \underline{I}_2 + \underline{U}_{\phi 2} \underline{Y}, \quad (21)$$

из которого следует

$$\underline{Y} = \frac{\underline{I}_1 - \underline{I}_2}{\underline{U}_{\phi 1} + \underline{U}_{\phi 2}} = \frac{\underline{I}_{\Delta 12}}{\underline{U}_{\phi \Sigma 12}}. \quad (22)$$

С целью уменьшения чувствительности алгоритма к высшим гармоникам в напряжениях и токах проводимость \underline{Y} выражается через скалярные параметры. Для этого сумма напряжений $\underline{U}_{\phi\Sigma 12}$ и разность токов $\underline{I}_{\Delta 12}$ вычисляются по ММЗ составляющих их токов и напряжений. Сначала формируются ММЗ этих параметров по законам, известным из курса теоретических основ электротехники, которые справедливы также при операциях с ММЗ:

$$u_{\phi\Sigma 12}(t_j) \Big|_{j=1}^N = u_{\phi 1}(t_j) \Big|_{j=1}^N + u_{\phi 2}(t_j) \Big|_{j=1}^N; \quad i_{\Delta 12}(t_j) \Big|_{j=1}^N = i_1(t_j) \Big|_{j=1}^N - i_2(t_j) \Big|_{j=1}^N. \quad (23)$$

Далее вычисляется действующее значение $I_{\Delta 12}$ разности токов

$$I_{\Delta 12} = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_{\Delta 12}^2(t_j) \Big|_{j=1}^N \right]^{0,5}. \quad (24)$$

По ММЗ токов и напряжений определяются условные активная P_{12} и реактивная Q_{12} мощности (или квазимощности):

$$P_{12} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_{12}(t_j) \Big|_{j=1}^N = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (i_{\Delta 12}(t_j) \cdot u_{\phi\Sigma 12}(t_j)) \Big|_{j=1}^N; \quad (25)$$

$$Q_{12} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N [u_{\phi\Sigma 12}(t_j) - u_{\phi\Sigma 12}(t_{j+1})] \cdot [i_{\Delta 12}(t_j) + i_{\Delta 12}(t_{j+1})] \Big|_{j=1}^N. \quad (26)$$

По полученным скалярным величинам определяется проводимость \underline{Y} :

$$\underline{Y} = G + jB = \frac{I_{\Delta 12}^2}{P_{12} + jQ_{12}}. \quad (27)$$

Следует отметить, что комплексная квазимощность $\underline{S}_{12} = P_{12} + jQ_{12}$ пропорциональна, но не равна потерям мощностей $\Delta \underline{S}_{10} = \Delta P_{10} + j\Delta Q_{10}$, $\Delta \underline{S}_{20} = \Delta P_{20} + j\Delta Q_{20}$ на проводимостях \underline{Y} в СЗ (см. рисунок 4). Последние можно вычислить через квазимощность, используя свойство пропорциональности, по соотношениям:

$$\Delta \underline{S}_{10} = \Delta P_{10} + j\Delta Q_{10} = \underline{S}_{12} \frac{U_{\phi 1}^2}{U_{\phi\Sigma 12}^2}; \quad \Delta \underline{S}_{20} = \Delta P_{20} + j\Delta Q_{20} = \underline{S}_{12} \frac{U_{\phi 2}^2}{U_{\phi\Sigma 12}^2}, \quad (28)$$

где $U_{\phi 1}$, $U_{\phi 2}$ и $U_{\phi\Sigma 12}$ определяются по ММЗ:

$$U_{\phi 1} = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_{\phi 1}^2(t_j) \Big|_{j=1}^N \right]^{0,5}; \quad (29)$$

$$U_{\phi 2} = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_{\phi 2}^2(t_j) \Big|_{j=1}^N \right]^{0,5}; \quad U_{\phi\Sigma 12} = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_{\phi\Sigma 12}^2(t_j) \Big|_{j=1}^N \right]^{0,5}.$$

Определяются фазные значения потоков мощностей на входе и выходе СЗ (см. рисунок 4):

$$P_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_1(t_j) \Big|_{j=1}^N = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (i_1(t_j) \cdot u_{\phi 1}(t_j)) \Big|_{j=1}^N; \quad (30)$$

$$Q_1 = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N [u_{\phi 1}(t_j) - u_{\phi 1}(t_{j+1})] \cdot [i_1(t_j) + i_1(t_{j+1})] \Big|_{j=1}^N; \quad (31)$$

$$P_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_2(t_j) \Big|_{j=1}^N = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (i_2(t_j) \cdot u_{\phi_2}(t_j)) \Big|_{j=1}^N; \quad (32)$$

$$Q_2 = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N [u_{\phi_2}(t_j) - u_{\phi_2}(t_{j+1})] \cdot [i_2(t_j) + i_2(t_{j+1})] \Big|_{j=1}^N. \quad (33)$$

Потери активной и реактивной мощностей в продольной ветви определяются по выражениям:

$$\Delta P_{12} = P_1 - \Delta P_{10} - P_2 - \Delta P_{20}; \quad \Delta Q_{12} = Q_1 - \Delta Q_{10} - Q_2 - \Delta Q_{20}. \quad (34)$$

Формирование ММЗ модуля падения фазного напряжения в продольной ветви выполняется по выражению

$$u_{\phi_{12}}(t_j) \Big|_{j=1}^N = \sum_{j=1}^N (u_{\phi_1}(t_j) - u_{\phi_2}(t_j)) \Big|_{j=1}^N. \quad (35)$$

По полученному ММЗ вычисляется квадрат модуля падения напряжения

$$U_{\phi_{12}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_{\phi_{12}}^2(t_j) \Big|_{j=1}^N \quad (36)$$

и, далее, составляющие R , X сопротивления \underline{Z}

$$\underline{Z} = R + jX = \frac{U_{\phi_{12}}^2}{\Delta P_{12} - j\Delta Q_{12}}. \quad (37)$$

Постоянные \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} четырехполюсника вычисляются по формулам перехода:

$$\underline{A} = \underline{D} = 1 + \underline{Y}\underline{Z}; \quad \underline{B} = \underline{Z}; \quad \underline{C} = \underline{Y}(2 + \underline{Y}\underline{Z}). \quad (38)$$

Разработанные алгоритмы определения погонных параметров ВЛ протестированы с помощью программного комплекса Mathcad на примере одноцепной ВЛ номинальным напряжением 500 кВ, протяженностью 600 км, выполненной с расщеплением фазы на три провода марки АС 500/64.

Идея тестирования алгоритмов заключается в следующем: определить по исходным, принимаемым за эталонные, параметрам ВЛ векторные значения токов и фазных напряжений в начале и конце линии для принятого режима. Найденные значения токов и напряжений представить в виде ММЗ с $N=64$. Далее решить обратную задачу: определить погонные параметры рассматриваемой линии с использованием разработанных алгоритмов.

Рассчитанные и эталонные погонные параметры, а также погрешности расчета приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета погонных параметров

Параметр	Эталонные данные	Алгоритм №1		Алгорит №2	
		Расчетные данные	Погр., %	Расчетные данные	Погр., %
r_0 , Ом/км	0,022	0,022	0	0,022	0
x_0 , Ом/км	0,301	0,301	0	0,301	0
g_0 , 10^{-9} См/км	7,333	7,333	0	7,321	-0.16
b_0 , 10^{-6} См/км	3,694	3,694	0	3,700	-0.16

Из таблицы 3 видно, что погрешность определения погонных параметров линии при числе отсчетов на периоде $N = 64$ близка к нулю, что позволяет утверждать о работоспособности и высокой точности разработанных алгоритмов.

В четвертой главе описывается третий алгоритм идентификации погонных параметров, в котором используются только местные скалярные параметры режима (рисунок 5):

P_1, Q_1, P_2, Q_2 - фазные значения активной и реактивной мощностей по концам линии, определяемые по выражениям (30–33);

$U_{\phi 1}, U_{\phi 2}$ - действующие значения фазных напряжений в начале и конце линии, определяемые по выражениям (29).

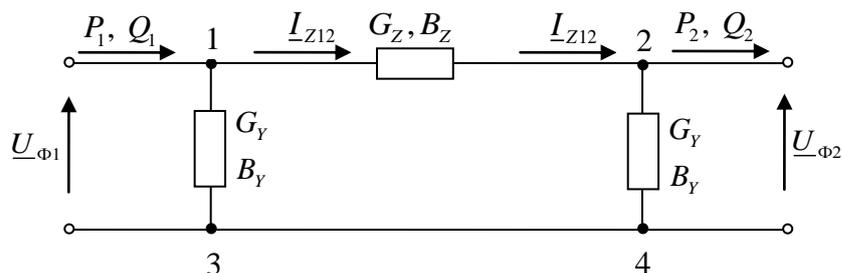


Рисунок 5 – П-образная СЗ фазы линии

Построение алгоритма проводится на базе известных уравнений баланса активной и реактивной мощностей, записанных для начала и конца линии:

$$\varphi_{P_1} = -P_1 + U_{\phi 1}^2(G_Y + G_Z) - U_{\phi 1}U_{\phi 2}(G_Z \cos \delta - B_Z \sin \delta); \quad (39)$$

$$\varphi_{Q_1} = -Q_1 + U_{\phi 1}^2(B_Y + B_Z) - U_{\phi 1}U_{\phi 2}(B_Z \cos \delta + G_Z \sin \delta); \quad (40)$$

$$\varphi_{P_2} = -P_2 - U_{\phi 2}^2(G_Y + G_Z) + U_{\phi 1}U_{\phi 2}(G_Z \cos \delta + B_Z \sin \delta); \quad (41)$$

$$\varphi_{Q_2} = -Q_2 - U_{\phi 2}^2(B_Y + B_Z) + U_{\phi 1}U_{\phi 2}(B_Z \cos \delta - G_Z \sin \delta). \quad (42)$$

Помимо четырех искомым параметров G_Y, B_Y, G_Z, B_Z схемы замещения система уравнений (39-42) содержит искомый угол δ между векторами напряжений на концах линии. Пятое уравнение формируется в виде небаланса квадратов токов в продольной ветви, определяемых по параметрам режима начала и конца линии:

$$\varphi_I = \frac{1}{U_{\phi 1}^2} \left[(P_1 - U_{\phi 1}^2 G_Y)^2 + (Q_1 + U_{\phi 1}^2 B_Y)^2 \right] - \frac{1}{U_{\phi 2}^2} \left[(P_2 + U_{\phi 2}^2 G_Y)^2 + (Q_2 - U_{\phi 2}^2 B_Y)^2 \right]. \quad (43)$$

В пределах одного установившегося режима уравнение (43) является зависимым. Поэтому для него используются параметры второго установившегося режима.

По результатам вычисления составляющих продольной проводимости осуществляется переход к сопротивлениям R, X :

$$R = \frac{G_Z}{G_Z^2 + B_Z^2}; \quad X = \frac{B_Z}{G_Z^2 + B_Z^2}. \quad (44)$$

Далее по найденным параметрам П-образной СЗ вычисляют коэффициентам четырехполюсника и погонные параметры.

Третий алгоритм определения погонных параметров ВЛ протестирован с помощью программного комплекса Mathcad. Результаты расчета представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчета погонных параметров – Алгоритм №3

Параметр	Эталонные данные	Расчетные данные	Погр.,%
r_0 , Ом/км	0,02167	0,02167	0
x_0 , Ом/км	0,3008	0,3008	0
g_0 , 10^{-9} См/км	7,333	7,333	0
b_0 , 10^{-6} См/км	3,69422	3,69422	0

На основе проведенных вычислительных экспериментов выполнен анализ чувствительности алгоритмов идентификации погонных параметров к наличию гармонических составляющих в сигналах токов и напряжений и погрешности синхронизации сигналов, поступающих с концов линии.

Результаты анализа чувствительности алгоритмов к наличию высших гармоник показали:

1. Наибольшие погрешности имеют место при расчете по алгоритму №1. Это объясняется использованием векторных значений параметров режима, определение которых по ММЗ чувствительно к наличию высших гармоник.

2. Меньшие погрешности получены при расчете алгоритмами №2 и №3. Это объясняется частичным или полным использованием скалярных значений режима, определение которых менее чувствительно к наличию высших гармоник.

Анализ чувствительности алгоритмов к погрешностям синхронизации сигналов, поступающих с концов линии, показал:

1. Наибольшие погрешности имеют место при расчете по алгоритму №1. Это связано с тем, что в алгоритме №1 используются только векторные значения, определение которых чувствительно к сдвигу сигналов.

2. Меньшие, но заметные погрешности получены при расчете по алгоритму №2. Это связано с тем, что в алгоритме №2 используются взаимные скалярные режимные параметры, для определения которых требуется высокое качество синхронизации.

3. Отсутствие погрешностей получено при расчете по алгоритму №3. Это связано с тем, что в алгоритме №3 используются только местные скалярные параметры режима по концам линии, определение которых нечувствительно к сдвигу сигналов.

Заключение. Основные результаты работы сводятся к следующим положениям.

1. Наиболее существенным недостатком существующих способов и устройств ОМП ВЛ по ПАР является высокий уровень погрешностей, обусловленных известным рядом факторов, из которых для исследования и ослабления влияния приняты недостаточная точность используемых

алгоритмов ОМП и применение справочных данных по погонным параметрам линий.

2. Разработанные способы и соответствующие алгоритмы ОМП по всем видам однократной продольной и поперечной несимметрии линий электропередачи имеют близкую к нулю методическую погрешность, получаемую для строго синусоидальных параметров аварийного режима за счёт учёта распределённости параметров линий произвольной протяжённости.

3. Разработан способ и три алгоритма идентификации погонных параметров линии электропередачи по параметрам предшествующего аварии режима с целью их использования при ОМП вместо справочных данных. Разработанные алгоритмы имеют близкую к нулю методическую погрешность за счёт учёта распределённости параметров линий.

4. На основе вычислительных экспериментов произведена оценка чувствительности алгоритмов идентификации определения погонных параметров ВЛ к присутствию высших гармонических составляющих в токах и напряжениях. Получено, что алгоритмы, в которых используются только векторные значения параметров режима, имеют повышенную чувствительность к присутствию высших гармонических в этих параметрах.

5. Проанализирована чувствительность алгоритмов определения погонных параметров ВЛ к погрешностям синхронизации сигналов, снимаемых по её концам. Получено, что алгоритм, в котором используются только интегральное (скалярные) значения параметров режима по концам линии электропередачи, нечувствительны к погрешностям синхронизации измерений.

Основные положения диссертации и научные результаты отражены в следующих работах:

1. Хрущев Ю.В., Бацева Н.Л., Абрамочкина Л.В. Идентификация погонных параметров протяженной линии электропередачи с использованием регистраторов аварийных сигналов // Известия ТПУ. – 2011. – Т. 318. - № 4 - С. 118-122.

2. Абрамочкина Л. В., Бацева Н. Л. , Хрущев Ю. В. Методика определения места короткого замыкания на линии электропередачи повышенной точности // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2012 - №. 2 (26) - С. 32-35.

3. Абрамочкина Л. В. , Бацева Н. Л. , Хрущев Ю. В. Метод определения места обрыва одной фазы воздушной линии электропередачи // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2012 - №. 4 (28) - С. 1-4.

4. Способ определения параметров Т-образной схемы замещения воздушной линии электропередачи Пат. 2434235 Российская Федерация МПК51 G01R25/00. Заявитель и патентообладатель ТПУ.– № 2010134559; заявл. 18.08.2010; опубл.20.11.2011.

5. Способ определения места короткого замыкания на воздушной линии электропередачи по массивам мгновенных значений токов и напряжений Пат. 2504792 Российская Федерация МПК51 G01R31/01. Заявитель и патентообладатель ТПУ.– № 2012130729; заявл. 17.07.2012; опубл.20.04.2014.

6. Способ определения места обрыва на воздушной линии электропередачи. Регистрационный № 2013134213. Заявка находится на рассмотрении.

7. Гольдштейн Е.И., Хрущев Ю.В., Сулайманов А.О., Джумик Д.В., Кац И.М., Панкратов А.В., Радаев Е.В., Абрамочкина Л.В. Функциональный контроль и диагностирование электроэнергетических систем и их элементов. Сборник материалов международного научно-технического семинара «Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии». – Томск: изд-во ТПУ. – 2006. – С. 98-108.

8. Khrushchev Y. V. , Batseva N. L. , Abramochkina L. V. Methodological aspects of identification of two-phase open-fault location on overhead power line // Вестник науки Сибири. - 2013 - №. 2 (8). - С. 1-5.

9. Khrushchev Y. V. , Batseva N. L. , Abramochkina L. V. The method of identifying of overhead power line attenuation parameters in prefault conditions // Predni vedecki novinki-2012: VIII Mezinarodni vedecko-prakticka konference, Praha, 27 August-5 September 2012. - Прага: Praha Publishing House «Education and Science», 2012 - Vol. 11 - p. 52-56.

10. Абрамочкина Л.В. Методы и устройства определения мест повреждения линий электропередачи переменного тока //Современные техника и технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск, 12-16 апреля 2010. - Томск: ТПУ, 2010 - т. 1. - с. 7-8.

11. Абрамочкина Л.В. Определение параметров схем замещения протяженных воздушных линий электропередачи //Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 т. - Новосибирск, НГТУ, 3-5 дек. 2010. - Новосибирск: НГТУ, 2010. - с. 35-36.

12. Хрущев Ю.В., Бацева Н.Л., Абрамочкина Л.В. Идентификация параметров схем замещения воздушных линий электропередачи по данным регистраторов электрических сигналов //Электроэнергетика глазами молодежи: Научные труды Всероссийской научно-технической конференции - Екатеринбург, 17-19 ноября 2010. - Екатеринбург: УрФУ, 2010 - т. 1. - с. 108-113.

13. Абрамочкина Л.В., Елесина Т.Д. Состояние и перспективы развития средств определения мест повреждения линий электропередач // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск, 18-22 апреля 2011. - Томск: ТПУ, 2011 - т. 1. - с. 51-52.

14. Абрамочкина Л.В. Идентификация погонных параметров протяженных линий электропередач // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Труды Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск, 6-8 октября 2011. – Томск: ТПУ, 2011 - т. 1 - с. 237-241.

15. Абрамочкина Л.В. Анализ путей совершенствования методов и средств определения мест повреждения на линиях электропередачи напряжением 110-220 кВ // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Труды Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск, 6-8 октября 2011. – Томск: ТПУ, 2011 - т. 1 - с. 228.

16. Абрамочкина Л. В. Анализ путей совершенствования методов и средств определения мест повреждения на линиях электропередачи напряжением 110, 220 кВ // Электроэнергетика, Электротехника, электромеханика и электротехнологии: каталог заявленных работ VII Всероссийских конкурсов выпускных квалификационных работ, Томск, 20 Октября-18 Ноября 2010. - Томск: СПБ Графикс, 2011 - С. 13.

17. Абрамочкина Л. В. Определение места короткого замыкания на воздушной линии электропередачи по уравнениям длинной линии // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 9-13 Апреля 2012. - Томск: ТПУ, 2012 - Т. 1 - С. 5-6.

18. Abramochkina L.V. Defining fault location on overhead lines on the base of emergency signals recorder data // XVIII Modern Technique and Technologies: Proceedings of the 18th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists: Tomsk, 9-13 Of April 2012. - Tomsk: TPU, 2012 - С. 5-6.

Личный вклад автора диссертации в разработку темы составляет не менее 50 процентов. Его доленое участие в работах, опубликованных в соавторстве, составляет от 30 до 50 процентов.