

Современный взгляд на ОМП по параметрам аварийного режима

В настоящее время появляется все больше приложений для функции ОМП в задачах автоматического повторного включения, автоматического восстановления нормальной схемы сети и других видах автоматики. Наибольшее распространение нашли методы ОМП по параметрам аварийного режима, в которых удаленность замыкания определяется с использованием составляющих основной гармоники аварийного и, возможно, доаварийного процессов.

Авторы:

Подшивалин А.Н.,
Исмуков Г.Н.

Большая часть установленных на подстанциях устройств с функцией ОМП оценивает расстояние по одностороннему замеру, что продиктовано простотой применения таких устройств и отсутствием требований к наличию связи между подстанциями. Вопрос о размещении функции ОМП не закрыт: реализация функции возможна в любом цифровом устройстве, подключенном к измерительным цепям РЗА. Существуют варианты применения специализированных терминалов ОМП и успешной интеграции функции ОМП в рамках современных устройств линейных защит и регистрации аварийных сигналов (РАС). Второй вариант, как правило, предусматривает определенное упрощение модели сети и такие важные составляющие, как ответвления и параллельные линии, оказываются не учтены. Есть успешный опыт применения и специализированного программного обеспечения [1], выполняющего расчет на основе цифровых записей электрических сигналов, выполненных терминалами РЗА. Ведущие производители предоставляют полный спектр устройств с функцией ОМП для удовлетворения организационных и технических требований эксплуатации.

В настоящей статье собран опыт разработки и применения функции ОМП в компании «Исследовательский центр «Бреслер», последние достижения которой реализованы в составе платформы TOP 300.

АЛГОРИТМ ПРИМЕНЕНИЯ ФУНКЦИИ ОМП

Применение ОМП, как правило сводится к следующим предварительным этапам:

- выбор места установки устройства ОМП или замера информационных составляющих;
- расчет параметров схемы замещения для функции ОМП;

- задание условий пуска функции ОМП, характеризующих короткое замыкание.

Измерение информационных составляющих короткого замыкания имеет важнейшее значение для последующего определения места повреждения. Функция ОМП должна получать информацию от измерительных трансформаторов тока (ИТТ) для релейной защиты с нормированной погрешностью в диапазоне аварийных токов на контролируемой линии электропередачи. Насыщение ИТТ, проявляющееся в виде искажения формы тока или изменения его амплитуды или фазы, приводит к значительному увеличению погрешности ОМП. Существует положительная практика объединения измерительных цепей линейных защит и устройств ОМП.

Параметры схемы замещения могут быть рассчитаны с использованием программных комплексов (например, Служба РЗА), принимающих в качестве исходных данных поопорные ведомости линий электропередачи или другие паспортные данные первичной схемы: типы опор линии, марки проводов и тросов и другие. Результатом расчета служат электрические параметры, которые будут положены в основу алгоритмической модели метода ОМП. Именно на этом этапе устройство ОМП получает привязку к заданному электроэнергетическому объекту. Практика показывает, что линии, на которых требуется функция ОМП, имеют большую протяженность или характеризуются высокой степенью неоднородности. К осложняющим факторам относятся структурные особенности (наличие ответвлений, переключающих пунктов), неоднородность параметров по длине, внешние влияющие факторы (взаимная индукция с другими линиями и проводниками). Для выполнения наиболее точ-

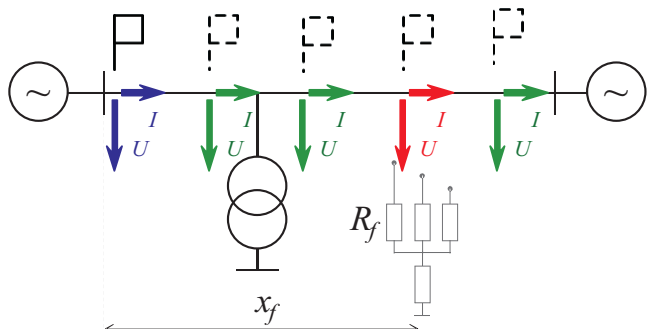


Рис. 1. Пересчет места повреждения в точку КЗ

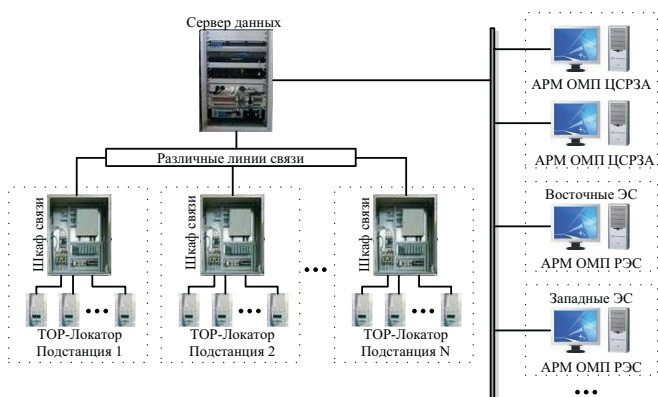


Рис. 2. Структурная схема системы «ОМП Бреслер»

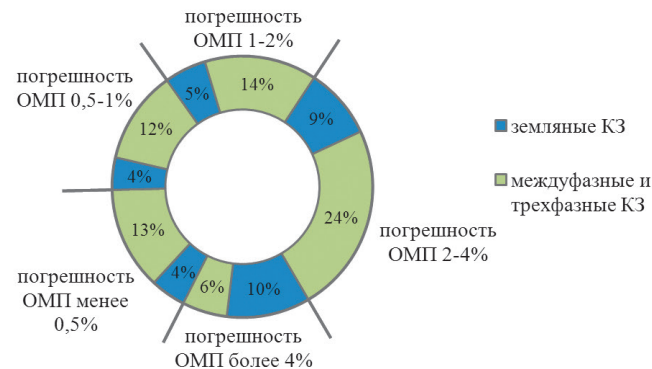


Рис. 3. Показатели погрешности ОМП при различных видах короткого замыкания

ной оценки расстояния до места повреждения необходимо принимать во внимание все эти влияющие факторы и задавать их в качестве входной информации для функции ОМП.

Правильные условия пуска устройства ОМП важны для выделения информационных составляющих аварийного процесса. Чаще всего применяется контроль фазных токов или их комбинации, что гарантирует реакцию на начальный момент КЗ. Опыт расчета уставок показал, что на некоторых линиях применение пусковых органов по уровню токов не удовлетворяет условиям чувствительности. Это связано с большой величиной токов нагрузки и малой кратностью токов внутренних коротких замыканий. Применение пусковых органов по приращению токов обе-

спечивает срабатывание устройства при КЗ по всей длине линии (в том числе через переходное сопротивление). Выполнение функции ОМП с линейными защитами серии TOP 300 исключает необходимость в дополнительной настройке пусковых условий.

Последующие операции выполняются устройствами ОМП в автоматическом режиме при срабатывании пусковых условий:

- выделение информационных составляющих;
- построение алгоритмической модели линии электропередачи;
- оценка расстояния до места повреждения;
- предоставление информации о КЗ пользователю.

Алгоритмическая модель решает обратную задачу имитационного моделирования – выполняет пересчет электрических величин из наблюдаемой точки (места установки реле) в любую точку линии [2]. Тем самым удается наблюдать любую заданную точку объекта, как если бы именно в ней и производилось измерение электрических величин (рис. 1). При этом используются общие с имитационной моделью параметры объекта. Принцип ОМП по параметрам аварийного режима заключается в проверке критерия, основанного на резистивной природе повреждения. Если этот критерий подтверждается в некоторой точке линии – она принимается за место повреждения. Итерационный метод расчета оптимизирует время, затрачиваемое на анализ аварийной ситуации.

Ниже будут рассмотрены основные достижения современных средств ОМП по каждой операции, которые в совокупности определяют совершенство выполняемой функции.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОМП ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА

Наибольшая эффективность ОМП для эксплуатации достигается при выполнении централизованных систем сбора информации и управления компонентами системы. Одна из таких систем – программно-технический комплекс «ОМП Бреслер», опыт эксплуатации которого насчитывает более 5 лет. Комплекс представляет собой многоуровневую систему, пользователями которой может являться оперативный и релейный персонал подстанции, сетевого района или региона (рис. 2).

Ключевой компонент системы ОМП – терминалы ТОР-Локаторы, выполняющие сбор информации, автономный расчет места повреждения и индикацию для пользователя. Система обслуживает сотни терминалов одновременно и обеспечивает наблюдаемость не только режимов, но и собственно компонентов самой системы. Тесное сотрудничество с одной из сетевых компаний позволило собрать статистику из 500 срабатываний, для которых было найдено истинное место повреждения. Объемная работа оказалась полезной как для конечного пользователя, так и для разработчиков. С одной стороны, по результатам анализа срабатываний были внесены уточняющие поправки в уставки устройств. С другой, собрана ценная статистика погрешности ОМП и обозначены направления дальнейшего развития системы. Ниже приводятся наиболее значимые факторы, влияющие на погрешность ОМП.

Различные виды КЗ определяются с разной точностью. Как видно на рис. 3, в среднем погрешность ОМП при замыканиях на землю несколько выше, чем при междуфазными и трехфазными замыканиями. Чаще всего это объясняется недостаточной точностью исходных данных о модели по нулевой последовательности,

а также в целом более высокими значениями эквивалентного переходного сопротивления в месте КЗ.

Наиболее важным фактором можно считать **эквивалентное переходное сопротивление** в месте повреждения. В случае металлического замыкания влияние других факторов тем более ослабляется. С величиной переходного сопротивления связано ограничение чувствительности алгоритмов РЗА, выражаемое в явлении нераспознаваемости режимов короткого замыкания [3]. В задаче ОМП переходное сопротивление снижает точность оценки места повреждения, а потому внимание к этому параметру является приоритетным в разработке алгоритмов ОМП [4].

В опубликованных данных отсутствует адекватная оценка эквивалентного переходного сопротивления при различных видах повреждения линий электропередачи. Однако такое исследование необходимо для формирования представления о характере повреждений. Кроме того, сведения о переходном сопротивлении позволяют проводить адекватный анализ эффективности методов ОМП. Авторами выполнена оценка переходного сопротивления в реальных условиях эксплуатации на основе данных о зарегистрированных повреждениях линий электропередачи с известным истинным местом повреждения. Оценка производилась с использованием алгоритмических моделей объекта [2] по соотношениям расчетных токов и напряжений в истинном (известном) месте повреждения.

На рис. 4 приведена статистика переходных сопротивлений R_f при трехфазных, междуфазных и однофазных КЗ. Принятые модели повреждения при различных видах КЗ показаны на рис. 5. Отметим характерные особенности графиков. Наблюдается сходный характер распределения искомого параметра R_f вне зависимости от вида КЗ. Также примечательно, что для большинства повреждений оценка переходного сопротивления лежит в диапазоне до 5 Ом. Условия для определения места повреждения при таких повреждениях благоприятные, отклонение от истинного места удовлетворительное. Как следует из рис. 4, при однофазных КЗ немалая доля случаев приходится на сравнительно большие значения сопротивлений. При других видах замыканий этот процент значительно ниже. Этот факт объясняет, в частности, в среднем более низкую точность ОМП при земляных замыканиях.

Рассмотрена точность ОМП на линиях разной длины (рис. 6). Основная доля срабатываний приходится на линии длиной от 10 до 50 км. Статистика показывает, что соотношение погрешностей на линиях разной длины в целом остается постоянным. Это значит, что относительная погрешность ОМП не зависит от длины линии.

К системе «ОМП Бреслер» подключено около **100 линий с ответвлениями**. На этих объектах алгоритм терминалов производит поиск места повреждения как на основной линии, так и на ответвлении. Однако с теоретической точки зрения ОМП на разветвленных линиях модель определена неполностью. Сравнение распределения погрешностей на линиях с ответвлениями и без них (рис. 7) показывает, что ответвления не вносят существенную дополнительную погрешность в ОМП. Это достигается учетом в алгоритме полной модели электропередачи, включающей эквивалентную схему ответвительных подстанций.

На линиях с двухсторонним питанием приходится иметь дело с искажением картины повреждения из-за подпитки места повреждения от удаленной системы. Этот эффект проявляется при наличии переходного сопротивления в месте повреждения и

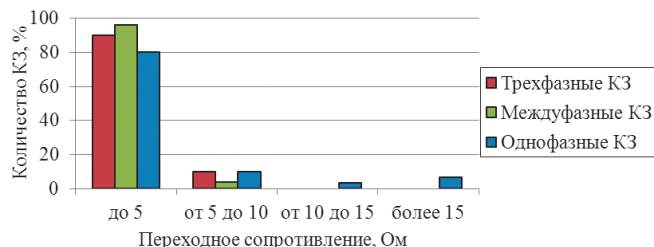
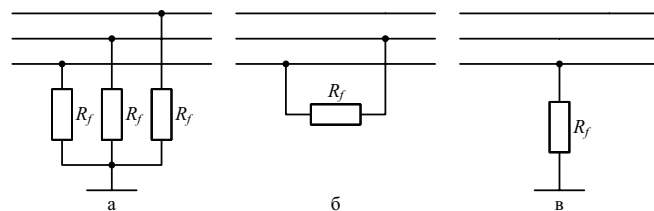


Рис. 4. Переходное сопротивление в месте повреждения



а – трехфазное замыкание
б – междуфазное замыкание
в – однофазное замыкание

Рис. 5. Модели повреждения при различных видах КЗ

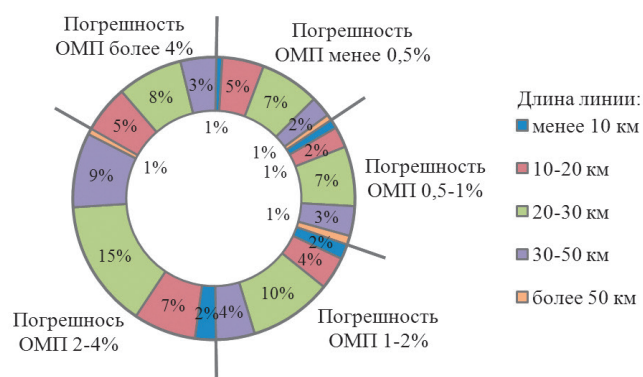


Рис. 6. Показатели погрешности ОМП на линиях разной длины

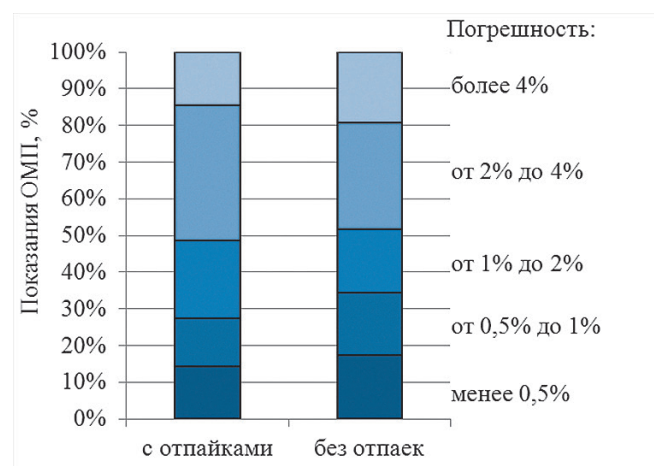


Рис. 7. Показатели погрешности ОМП в зависимости от конфигурации ЛЭП

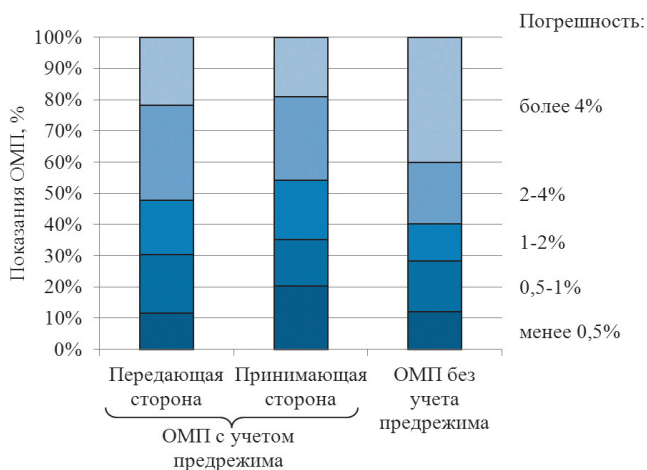


Рис. 8. Показатели погрешности ОМП в зависимости от направления передачи мощности

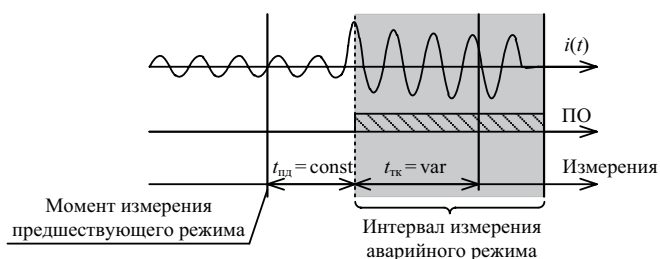


Рис. 9. Фиксация аварийных и предаварийных величин

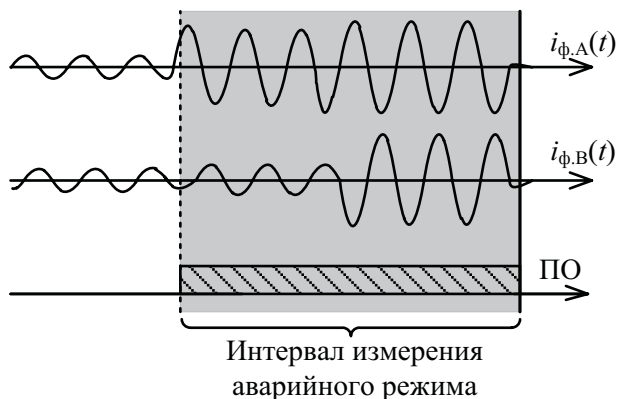


Рис. 10. Фиксация аварийных и предаварийных величин

хорошо известен в теории дистанционных защит. Наличие двухстороннего питания, в частности, приводит к проблеме нераспознаваемости повреждений через переходное сопротивление в некоторых точках или даже зонах линии в определенных режимах электропередачи [3]. Для ОМП этот эффект означает многовариантность решения задачи или относительно широкий диапазон решений. Результатом становится недопустимо большая зона обхода линии электропередачи.

Оценка расстояния только по замеру сопротивления поврежденного контура здесь не представляется возможной из-за высокой погрешности. Удовлетворительный результат могут обе-

спечить только те алгоритмы ОМП, которые учитывают влияние удаленной системы и снижают зависимость результата расчета от ее параметров, принимаемых варьируемыми. Для этого требуется оценка состояния и параметров удаленного конца линии в момент повреждения. Такая оценка возможна на основе измерений (при их наличии), выполненных на удаленном конце линии в момент КЗ, или информации о нагрузочном режиме, предшествующем КЗ. Первый способ не может быть реализован локально и требует установки приборов на обоих концах линии и наладки связи между ними. Второй способ может быть воплощен в одном локальном устройстве, производящем одностороннее наблюдение КЗ.

Собрана статистика срабатываний одиночного устройства ОМП (рис. 8) [5]. Известно, что на замеры токов влияют направление и величина передаваемой мощности в предаварийном режиме. При обратном направлении мощности условия ОМП значительно ухудшаются по сравнению с прямой передачей. Поэтому в качестве основного критерия оценки алгоритмов было выбрано направление активной мощности до аварии. Проведен анализ более 450 срабатываний на линиях напряжением 35–220 кВ с известным местом повреждения. Доля срабатываний с погрешностью ОМП не более 4 % от длины линии практически одинакова. Таким образом, статистика показывает высокую степень адаптации выбранного алгоритма к режиму работы линии в момент возникновения аварии.

Существует **тенденция к укорочению длительности аварийного процесса** при его отключении быстродействующими защитами и столь же быстродействующими выключателями. В ближайшем будущем можно ожидать длительность процесса КЗ до 20–25 мс. Этого времени может оказаться недостаточно для выделения информационных составляющих токов и напряжений традиционными способами. Требуется применять инновационные подходы [6] для выделения наиболее информативной части процесса, а также для анализа периодической составляющей аварийного процесса с высокой точностью. Терминалы ТОР-Локатор, реализованные на современной вычислительной платформе, позволяют отслеживать процессы КЗ по нескольким линиям одновременно. При этом оценка места повреждения производится для каждого процесса, имеющего признаки КЗ.

Измерение предаварийных величин, как правило, не встречается значительных затруднений. Нормальный режим чаще всего имеет однородный синусоидальный характер. Если имеет место опробование присоединения, то токи или напряжения доаварийного режима могут отсутствовать. В других случаях их величина может быть оценена с достаточной степенью точности. Фиксация значений предаварийного режима производится непосредственно перед срабатыванием чувствительных пусковых органов, как показано на рис. 9. В качестве пусковых органов целесообразно использование реле векторного приращения токов фаз или их симметричных составляющих. Тогда запаздывание момента срабатывания ИО по отношению к началу аварийного процесса составляет не более 10 мс, в среднем – 5 мс. В итоге оказывается возможным разделить аварийный процесс на нагрузочную составляющую и чисто аварийную составляющую, последняя непосредственно связана с коротким замыканием и его местоположением в электрической сети.

Замер токов и напряжений аварийного процесса сразу после срабатывания пусковых органов может не обеспечить высокую точность ОМП, например, по причине искажения

электрических величин за счет свободных составляющих электромагнитных переходных процессов в первичной сети или из-за погрешностей измерительных преобразователей. Требуется интеллектуальный выбор момента замера на интервале аварийного процесса (рис. 10). На основе анализа 20 тысяч аварийных осциллограмм, зафиксированных цифровыми регистраторами на линиях среднего и высокого напряжения, были выделены наиболее распространенные сценарии развития аварийных процессов:

- 83 % – классические повреждения линии. К ним отнесены повреждения на фоне нагрузки или без тока до КЗ, при которых не изменяется вид КЗ, схема сети остается постоянной, а величина эквивалентного переходного сопротивления изменяется незначительно;

- 6 % – неуспешные АПВ. Для процесса характерно отсутствие предаварийного режима, постоянство параметров аварийного режима в течение всей длительности процесса. Должна обеспечиваться готовность алгоритма ОМП к повторному действию после обработки первоначального КЗ;

- 6 % – процессы малой длительности, неоднородные по структуре процессы, режимы с каскадным отключением линии. Особенность обработки таких режимов заключается в применении специализированных фильтров для выделения информационных составляющих на уменьшенном (по сравнению с периодом промышленной частоты) интервале. К этой категории отнесены и развивающиеся КЗ;

- 4 % – КЗ на фоне внешних возмущений в сети, приводящих к преждевременному срабатыванию пусковых органов. Анализ затруднен тем, что не все части зафиксированного процесса относятся к одному КЗ. Замеры в предаварийном и аварийном режимах могут относиться к разным схемам сети, а потому их совместное использование невозможно;

- 1% – КЗ на ответвлении от магистральной линии, сопровождающееся включением короткозамыкателя. Процессы имеют относительно большую длительность. Предаварийный режим, как правило, не может быть использован для расширения информационной базы функции ОМП. Наблюдается малое эквивалентное переходное сопротивление.

Каждый сценарий устанавливает собственные требования к способу фиксации параметров режима. Авторами был разработан и применен алгоритм адаптации измерительного модуля к различным ситуациям. Параметры аварийного режима фиксируются на разных этапах развития аварии. Далее применяется двухступенчатая схема отбора замеров по результатам ОМП. На первом этапе исключаются те интервалы, которым соответствуют повреждения вне наблюдаемой линии. Из оставшихся замеров выбирается интервал с наибольшим индексом надежности результата ОМП. Таким образом, алгоритм использует всю доступную информацию, содержащуюся в записи аварийного процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейшее развитие систем ОМП связано с развитием методов многостороннего наблюдения линий электропередачи. Для этого используются методы с явной и неявной синхронизацией замеров по концам объекта [7–11]. Результатом применения сначала односторонних, а затем, по мере поступления новой информации, многосторонних методов ОМП становится поэтапное повышение точности ОМП и сокращение зоны возможной неопределенности для линейных служб.

Кроме того, дистанционные методы с высокой степенью достоверности оценивают еще и переходное сопротивление в месте КЗ, величина которого может быть использована при принятии решения о проведении АПВ или его задержке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лямец Ю.Я., Ильин В.А., Подшивалин Н.В. Программный комплекс анализа аварийных процессов и определения места повреждения линий электропередачи // *Электричество*. – 1996. – № 12. – С. 2–7.
2. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. Алгоритмические модели электрических систем // *Труды Академии электротехнических наук Чувашской республики*. – 1999. – № 1. С. 42–49.
3. Лямец Ю.Я., Иванов С.В., Подшивалин А.Н. Абсолютная нераспознаваемость однофазного короткого замыкания // *Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы IV Всероссийской научно-технической конференции*. – Чебоксары, 2002. С. 308–311.
4. Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. – М.: Энергоатомиздат, 2003.
5. Подшивалин А.Н., Исмоков Г.Н., Жарков А.В. Опыт применения системы ОМП исследовательского центра «Бреслер» // *Релейная защита и автоматика энергосистем: материалы XXI Всероссийской научно-практической конференции*. – М., 2012. С. 303–309.
6. Подшивалин А.Н., Исмоков Г.Н. Адаптация методов определения места повреждения к современным требованиям эксплуатации линий электропередачи // *Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики: Материалы IV международной научно-технической конференции*. – Екатеринбург, 2013, С. 1–6 (секция 1.2-14)
7. Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Воронов П.И., Исмоков Г.Н. Способ определения места повреждения многопроводной электрической сети при двухстороннем наблюдении // *Патент РФ на изобретение № 2492493*. – БИ № 15.
8. Лямец Ю.Я., Воронов П.И. Способ определения места повреждения линии электропередачи при двухстороннем наблюдении // *Патент РФ на изобретение № 2492565*. – 2013. – БИ № 25.
9. Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Воронов П.И., Исмоков Г.Н. Способ определения мест двойного замыкания многопроводной электрической сети // *Патент РФ на изобретение № 2505825*. – 2014. – БИ № 24.
10. Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Воронов П.И., Исмоков Г.Н. // *Способ определения места и характера повреждения многопроводной электрической сети // Патент РФ на изобретение № 2505826*. – 2014. – БИ № 3.
11. Лямец Ю.Я., Воронов П.И. Локация повреждений многопроводной сети при двухстороннем наблюдении // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. – 2013. – № 3. – С. 96–107.