

БЫЧКОВ Юрий Владимирович

**РАЗВИТИЕ И ПРИЛОЖЕНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО МЕТОДА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Специальность 05.14.02

Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и в ООО «НПП Бреслер».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Лямец Юрий Яковлевич.

Официальные оппоненты доктор технических наук
Куликов Александр Леонидович,
директор филиала ОАО «ФСК ЕЭС» –
Нижегородского ПМЭС

кандидат технических наук, доцент
Арцишевский Ян Леонардович,
заместитель заведующего кафедрой релейной
защиты и автоматизации энергосистем
НИУ «Московский энергетический институт»

Ведущая организация **ОАО «ВНИИР», г. Чебоксары**

Защита состоится 14 декабря 2012 года в 15⁰⁰ в зале Учёного совета на заседании диссертационного совета Д 212.301.02 при ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус, третий этаж).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус, (8352) 45-02-07, library@chuvsu.ru).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2012 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д212.301.02

д.т.н., профессор

Г.П. Охоткин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Задача определения места повреждения (ОМП) всегда была и остаётся актуальной, поскольку её решение направлено на повышение надёжности энергоснабжения. Развитие и усложнение электрических сетей, рост числа потребителей, не допускающих длительного отключения, приводят к повышению спроса на средства ОМП. Вместе с тем становятся жёстче и требования к ним, которые касаются как точности, так и оперативности получения результата.

Задача определения места повреждения в разные годы решалась в Московском и Ивановском энергетических институтах, ВНИИЭ, в Рижском политехническом институте, Чувашском государственном университете. Среди зарубежных авторов, занимавшихся этой темой, можно выделить Ц. Такаги (Tsuyoshi Takagi, Нагойский университет) и М.М. Саху (Murari Mohan Saha, АВВ).

Существующие одно- и двухсторонние методы ОМП не были рассчитаны на электропередачи с тремя и большим числом узлов питания и не приспособлены к локации повреждений на линиях ответвительных подстанций. Эти недостатки, а также наличие многоконцевых линий электропередачи (ЛЭП) 110-500 кВ, делают актуальной задачу развития дистанционных способов ОМП.

Важную роль в современных методах определения места повреждения играет моделирование линий электропередачи. Построение модели ЛЭП, от адекватности которой реальному объекту зависит точность методов ОМП, является первоочередной задачей, предполагающей как совершенствование методики формирования моделей линий электропередачи, так и её реализацию в программных средствах.

На всех этапах работы автор пользовался консультациями к.т.н. А.О. Павлова.

Цель работы заключается в развитии способа дистанционного определения места повреждения применительно к линиям с многосторонним питанием и многоконцевым сетям, совершенствовании методики построения моделей линий электропередачи, ориентированной на задачу ОМП, а также в разработке и внедрении программных и аппаратных средств ОМП.

Методы исследования. Исследования проводились с использованием теоретических основ электротехники, теоретических основ релейной защиты, методов математического моделирования и программных вычислительных комплексов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата, программных вычислительных комплексов, многочисленной и продолжительной экспериментальной проверкой разработанных средств ОМП в условиях эксплуатации.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Модификация дистанционного метода ОМП при многостороннем наблюдении линии электропередачи.
2. Дистанционный способ ОМП на линиях ответвительных подстанций.
3. Учёт реальной несимметрии линий электропередачи и вида повреждения при формировании моделей ЛЭП.

Научная новизна работы.

1. Разработанный в работе метод дистанционного определения места повреждения в отличие от существующих создал основу алгоритмизации ОМП при многостороннем наблюдении линии электропередачи. Метод характеризуется предварительной идентификацией повреждённого участка ЛЭП с последующим его анализом. В этом методе в более полной мере, чем ранее, используется инструментальный алгоритмического моделирования и идея объединения всей информации, доступной при наблюдении линии электропередачи.

2. Представленный в диссертации способ дистанционного ОМП отличается от известных способностью идентифицировать повреждение на ответвлении и локализовать его по замерам на концах основной линии электропередачи.

3. Предложенный в работе способ учёта реальной несимметрии линии электропередачи отличается от известных тем, что позволяет, оставаясь в базисе симметричных составляющих, формировать модели ЛЭП, учитывающие фактическое расположение проводов и вид замыкания.

Практическая ценность работы.

1. Разработанные в работе модификации метода дистанционного определения места повреждения позволили решить задачу локализации на линиях с

многосторонним питанием, а также на линиях ответвительных подстанций.

2. Предложенный способ учёта несимметрии линии электропередачи и вида замыкания позволил повысить точность метода дистанционного определения места повреждения без перехода к базису фазных координат и связанного с этим значительного усложнения методики построения моделей ЛЭП.

3. Разработанные программные и аппаратные средства определения места повреждения «WinBres» и «Бреслер-0107.ОМП» серийно производятся и эксплуатируются почти на полутора тысячах линий ФСК ЕЭС.

4. Представленная в диссертационной работе методика построения и корректировки моделей линий электропередачи применена в учебном процессе на кафедре ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных конференциях: «Релейная защита и автоматика энергосистем» (Москва, ВВЦ, 2008, 2010, 2012), «Электротехника, электроэнергетика и электромеханика» (Чебоксары, АЭН ЧР, ВНИИР, 2005, 2007), «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС)» (Чебоксары, ЧГУ, 2005, 2007), «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ)» (Чебоксары, ЧГУ, 2006), «Обмен опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики» (Екатеринбург, 2007), «Математические методы в технике и технологиях» (Саратов, СГТУ, 2008).

Реализация результатов работы. Результаты исследований были использованы при разработке программного комплекса ОМП «WinBres» и терминала определения места повреждения «Бреслер-0107.ОМП».

Публикации. Содержание диссертационной работы нашло отражение в 14 научных работах, включая три статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК. Получен патент на изобретение.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (101 наименование) и пяти приложений. Общий объём составляет 160 стр., в том числе основного текста 138 стр., 90 рисунков, 39

таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая ценность результатов работы, раскрыта структура диссертации.

В первой главе даётся обзор дистанционных способов определения места повреждения линий электропередачи, применяемых в настоящее время в энергетике. Выделены основные группы: импульсные и методы распознавания по параметрам аварийного режима. Очередной этап их развития совпал с переходом устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) на микропроцессорную базу, что позволило решить ряд как технических, так и алгоритмических проблем.

Главное преимущество микропроцессорной РЗА заключается в существенном расширении информационной базы и, что не менее важно, в способности воспользоваться этим объёмом данных при помощи алгоритмических моделей электроэнергетических объектов. Вышесказанное в полной мере справедливо и применительно к задаче определения места повреждения. Наибольшее распространение получили методы ОМП по параметрам аварийного режима, и достичь наилучших результатов позволяют те из них, что надлежащим образом используют алгоритмические модели.

Во второй главе рассмотрено применение алгоритмических моделей для решения задачи локации повреждений и изложен способ многостороннего ОМП, который заключается в объединении всей информации, доступной при наблюдении линии электропередачи, и позволяет решать задачу локации в сетях с тремя и более узлами питания.

Алгоритмическая модель объекта (АМО) представляет собой систему обработки информации, которая по измеряемым электрическим величинам \underline{U}_s и \underline{I}_s , образующим вектор наблюдения, формирует ток \hat{I}_f и напряжение \hat{U}_f в точке f , недоступной наблюдению (рис. 1). Данная операция в общем случае выражается следующим образом

$$\begin{bmatrix} \hat{\underline{U}}_f \\ \hat{\underline{I}}_f \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{B}} \begin{bmatrix} \underline{U}_s \\ \underline{I}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{B}}_{11} & \underline{\mathbf{B}}_{12} \\ \underline{\mathbf{B}}_{21} & \underline{\mathbf{B}}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_s \\ \underline{I}_s \end{bmatrix},$$

где $\underline{\mathbf{B}}$ – матрица преобразования АМО. Алгоритмическое моделирование, таким

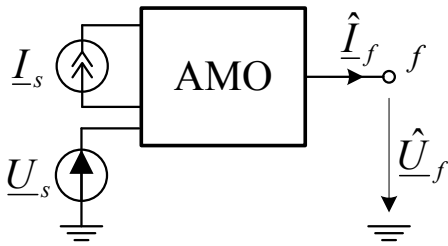


Рис. 1 Алгоритмическая модель объекта

образом, заключается в синтезе матрицы $\underline{\mathbf{B}}$ и предполагает определение эквивалентной пассивной структуры $\Pi_{\text{ЭКВ}}$, связывающей точку f с местом наблюдения s . При этом разделяют преобразование в ветвь предполагаемого повреждения и в конец участка ЛЭП (табл. 1).

Линия, разделённая относительно точки f на передающую и приёмную части, и система противоположного конца представляются своими пассивными структурами Π_1 , Π_2 и Π_r соответственно. При пересчёте наблюдаемых величин в ветвь предполагаемого повреждения учитываются все перечисленные элементы схемы. Во втором типе преобразования эквивалентная структура $\Pi_{\text{ЭКВ}}$ определяется лишь передающей частью ЛЭП.

Типы преобразований

Таблица 1

| Искомые величины | Определение пассивных структур элементов | Определение эквивалентной структуры |
|--|--|-------------------------------------|
| Преобразование в ветвь предполагаемого повреждения | | |
| | | |
| Преобразование в конец участка ЛЭП | | |
| | | |

Алгоритмической модели доступны параметры линии электропередачи и векторы наблюдения предшествующего, текущего и, как следствие, чисто аварийного режимов (рис. 2). В модели чисто аварийного режима действуют аварийные составляющие токов и напряжений

$$\underline{U}^{ab} = \underline{U}^{TK} - \underline{U}^{пд} ; \underline{I}^{ab} = \underline{I}^{TK} - \underline{I}^{пд} .$$

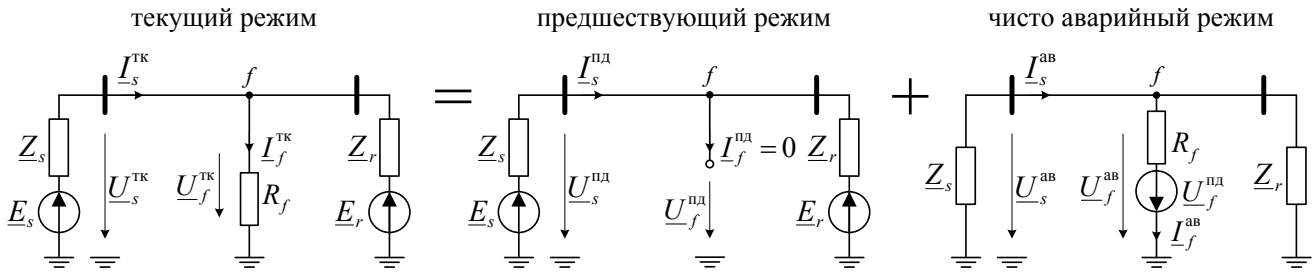


Рис. 2 Интерпретация текущего режима

Поочерёдно оперируя векторами наблюдения предшествующего $\begin{bmatrix} \underline{U}_s^{пд} & \underline{I}_s^{пд} \end{bmatrix}^T$ и чисто аварийного $\begin{bmatrix} \underline{U}_s^{ab} & \underline{I}_s^{ab} \end{bmatrix}^T$ режимов, алгоритмическая модель оценивает электрические величины в предполагаемом месте повреждения. Напряжения и токи текущего режима в точке f определяются наложением полученных оценок. В задаче ОМП найденные величины используются для определения целевой функции, к которой в дальнейшем применяется критерий повреждения.

В зависимости от объёма информации, используемой для оценивания аварийных параметров – координаты места повреждения x_f и переходного сопротивления R_f , – различаются одно- и двухсторонние методы ОМП (табл. 2). При одностороннем расчёте вектор $\begin{bmatrix} \underline{U}_s & \underline{I}_s \end{bmatrix}^T$, измеряемый на одном из концов ЛЭП, преобразуется в величину реактивной мощности Q_f ветви предполагаемого повреждения

$$Q_f = \text{Im} \left(\underline{\hat{U}}_f^{TK} \underline{\hat{I}}_f^{TK*} \right), \quad (1)$$

к которой применяется критерий резистивности дуги в месте замыкания.

При двухстороннем ОМП используется также замер с противоположной стороны линии $\begin{bmatrix} \underline{U}_r & \underline{I}_r \end{bmatrix}^T$. Оба вектора преобразуются в оценки напряжений $\underline{\hat{U}}_{f,s}$

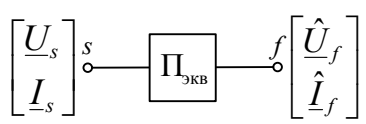
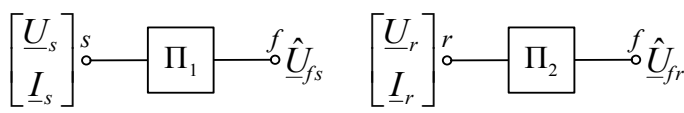
и \hat{U}_{fr} в точке f линии электропередачи. В качестве целевой функции при двухстороннем ОМП используется разность модулей полученных величин

$$\Delta U_f = \hat{U}_{fs}^{ab} - \hat{U}_{fr}^{ab}. \quad (2)$$

Равенство её нулю в месте повреждения объясняется наличием в точке f схемы чисто аварийного режима поперечной ветви с источником аварийной мощности (рис. 2).

Одно- и двухсторонние методы ОМП

Таблица 2

| Реализуемое преобразование | Критерий повреждения |
|--|---|
| Одностороннее ОМП | |
| <p>В ветвь предполагаемого повреждения</p>  | $Q_f = \text{Im} \left(\hat{U}_f^{\text{TK}} \hat{I}_f^{\text{TK}*} \right) = 0$ |
| Двухстороннее ОМП | |
| <p>В конец участка</p>  | $\Delta U_f = \hat{U}_{fs}^{ab} - \hat{U}_{fr}^{ab} = 0$ |

Применимость данных методов ограничивается двухконцевыми сетями – при наличии трёх и более узлов питания они не дают приемлемого результата. Таким

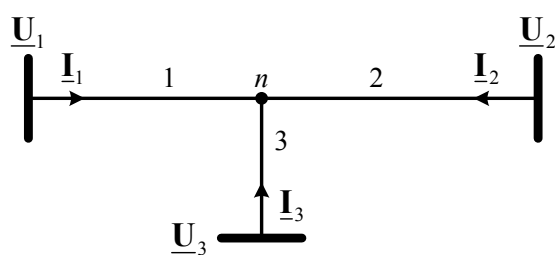


Рис. 3 Пример схемы с трёхсторонним питанием

образом, встаёт вопрос о разработке способа многостороннего определения места повреждения. На рис. 3 представлена линия с трёхсторонним питанием, где буквой n обозначена точка соединения лучей питания, а цифрами – их номера k .

Исходными данными являются параметры ЛЭП, а также векторы замеров напряжений $\underline{U}_k = [\underline{U}_{Ak} \quad \underline{U}_{Bk} \quad \underline{U}_{Ck}]^T$ на концах лучей и токов $\underline{I}_k = [\underline{I}_{Ak} \quad \underline{I}_{Bk} \quad \underline{I}_{Ck}]^T$, текущих от шин в линию, как в предшествующем, так и в текущем режимах работы сети.

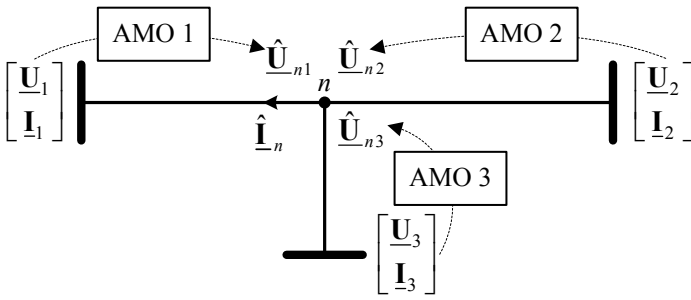


Рис. 4 Получение контрольных замеров напряжения

С наличием дополнительной подпитки связана задача предварительной идентификации повреждённого участка линии. Для её решения используются контрольные замеры напряжения текущего режима, которые

получаются при переходе от электрических величин по концам лучей питания к точке n посредством соответствующих АМО (рис. 4). Контрольные замеры со стороны неповреждённых лучей будут одинаковыми, поскольку на этих участках нет непредусмотренных элементов.

Диаграммы контрольных напряжений

Таблица 3

| $K^{(3)}$ | $K_A^{(1)}$ |
|-----------|-------------|
| | |

В табл. 3 приведены векторные диаграммы напряжений \hat{U}_{nk}^{TK} при трёхфазном $K^{(3)}$ и однофазном $K_A^{(1)}$ коротких замыканиях (КЗ) на первом участке. Анализ показал, что при всех видах замыканий однозначно указывает на два неповреждённых участка из трёх результат сравнения модулей трёх разностных напряжений и определения наименьшего из них

$$\left(\left| \hat{U}_{\lambda n1}^{TK} - \hat{U}_{\lambda n2}^{TK} \right|; \left| \hat{U}_{\lambda n1}^{TK} - \hat{U}_{\lambda n3}^{TK} \right|; \left| \hat{U}_{\lambda n2}^{TK} - \hat{U}_{\lambda n3}^{TK} \right| \right) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где λ – обозначение контрольной фазы. Например, при замыкании на втором луче питания минимальной окажется разность $\left| \hat{U}_{\lambda n1}^{TK} - \hat{U}_{\lambda n3}^{TK} \right|$. Выбор контрольной фазы λ зависит от вида повреждения (табл. 4).

| | Вид короткого замыкания | |
|----------------|-------------------------|-------------------------------------|
| | $K^{(1)}$ | $K^{(2)}$, $K^{(1,1)}$ и $K^{(3)}$ |
| Фаза λ | Повреждённая фаза | Любая из повреждённых фаз |

Векторы наблюдения по концам неповреждённых участков преобразуются соответствующими алгоритмическими моделями в виртуальный замер. Он объединяет напряжения \underline{U}_n в месте соединения лучей и токи \underline{I}_n , текущие от точки n в повреждённую линию, как показано на рис. 4.

Алгоритмические модели неповреждённых участков позволяют найти оценки токов в конце своих лучей. В случае замыкания на первом участке это векторы $\hat{\underline{I}}_{n2}$ и $\hat{\underline{I}}_{n3}$. Как видно из рис. 5, их сумма представляет собой искомый ток

$$\hat{\underline{I}}_n = \hat{\underline{I}}_{n2} + \hat{\underline{I}}_{n3}.$$

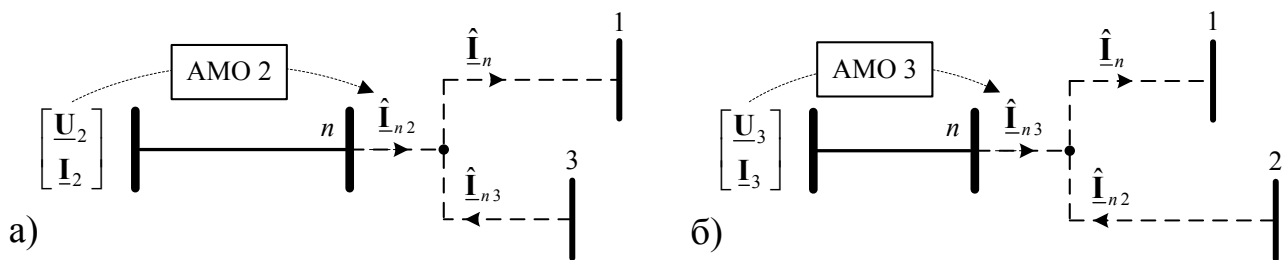


Рис. 5 Алгоритмические модели
а – второго; б – третьего участков

Напряжение \underline{U}_n находится усреднением векторов контрольных замеров, формируемых алгоритмическими моделями неповреждённых участков.

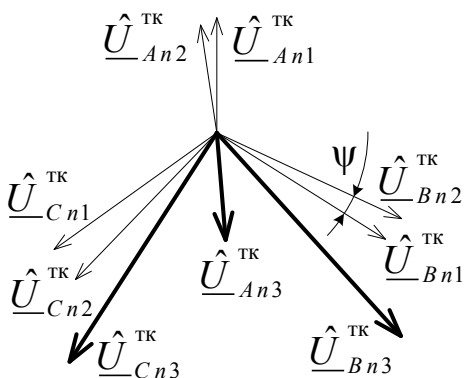


Рис. 6 Диаграмма напряжений в случае несинхронизированных замеров

Величины напряжений и токов, фиксируемых по концам питания, обычно между собой не синхронизированы, т.е. каждая из систем $[\underline{U}_k \quad \underline{I}_k]^T$ построена относительно своего базового вектора, поэтому напрямую использовать их для получения виртуальных замеров нельзя. На рис. 6 приведена диаграмма для случая $K_A^{(1)}$ на третьем луче, построенная при пересчёте несинхронизированных замеров к точке n . Выбирая одну из двух систем

оценок \hat{U}_n , полученных со сторон неповреждённых участков, за базовую и доворачивая вторую на требуемый угол ψ , добиваемся их совпадения. На такой же угол необходимо повернуть и соответствующие выбранному участку наблюдаемые токи и напряжения, синхронизируя тем самым регистрируемые величины.

В общем случае (рис. 7) рассматриваются участки двух типов: питающие и

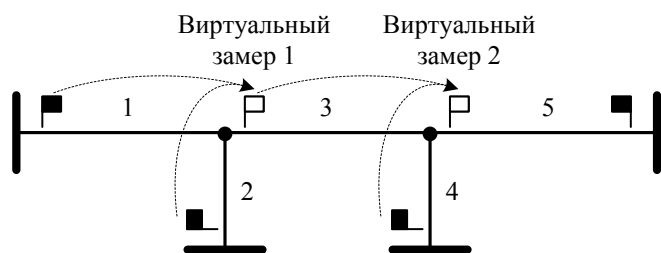


Рис. 7 Схема с многосторонним питанием

Попарным объединением векторов наблюдения (как реальных, так и виртуальных) определяются виртуальные замеры на концах всех участков схемы. Далее линия разделяется относительно своих узлов на трёхлучевые фрагменты. Критерий (3), применённый к замерам по концам каждого из них, позволяет найти повреждённый участок. Информация об аварии при пересчёте переносится в виртуальные замеры, поэтому для выявления истинно повреждённого элемента схемы применяются следующие правила:

- 1) при возникновении аварии на питающем участке только один из трёхлучевых фрагментов укажет на него;
- 2) при возникновении аварии на внутреннем участке на него укажут два смежных трёхлучевых фрагмента.

Далее выполняется процедура двухстороннего ОМП на найденном отрезке модели. При этом используются алгоритмическая модель повреждённого участка и векторы наблюдения на его концах.

Описанный способ многостороннего ОМП может быть применён для

решения задачи локации на линиях с ответвлениями. Сторона тупиковой подстанции, как правило, наблюдением не охвачена (рис. 8), что создаёт проблему определения места повреждения на ответвлении. В диссертации представлен способ, позволяющий ощутимо смягчить проблему.

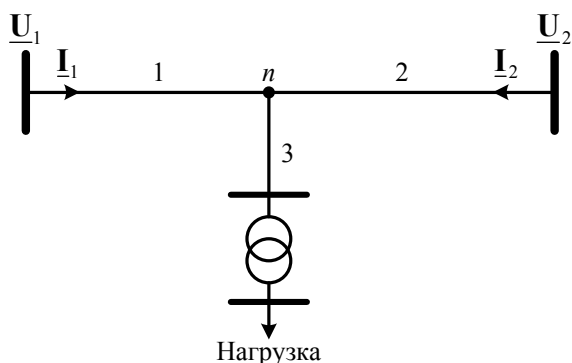


Рис. 8 Пример линии с ответвлением

Идентификация повреждённого участка заключается в разграничении режимов замыкания на основной линии и на линии ответвления. В качестве информационной базы для решения данной задачи выбран виртуальный замер \underline{U}_n^{ab} , получаемый в процессе преобразования наблюдаемых на концах ЛЭП

электрических величин к точке n .

Используя векторы наблюдения $[\underline{U}_1^{ab} \quad \underline{I}_1^{ab}]^T$ и $[\underline{U}_2^{ab} \quad \underline{I}_2^{ab}]^T$ чисто аварийного режима, можно определить параметры систем по концам ЛЭП и вид замыкания, что позволяет по результатам обучения локатора на имитационной модели в

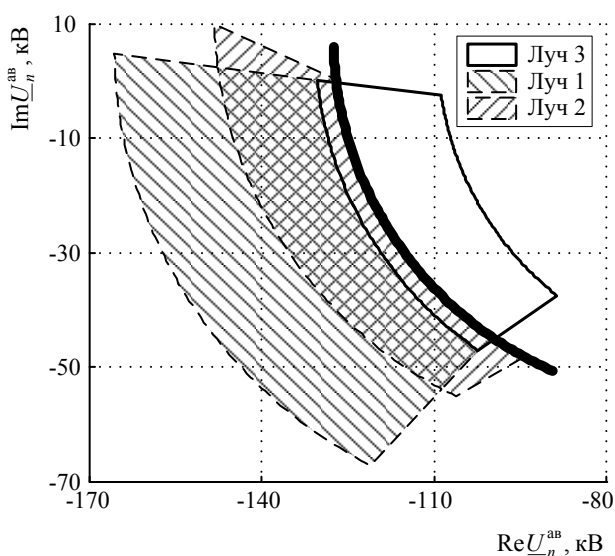


Рис. 9 Построение характеристики срабатывания

режимах замыканий на всех трёх участках схемы построить характеристику срабатывания, используемую для идентификации повреждений на линиях ответвления (рис. 9).

Величина области нераспознавания замыканий около узла n определяется параметрами и структурой линии. Оценить её величину при различных видах КЗ позволяют объектные

характеристики $R_f(x_f)$ (рис. 10), где значение переходного сопротивления при замыкании в месте x_f линии ответвления определяется минимумом расстояния между областью замыканий на третьем луче и областью замыканий на основной

ЛЭП (первом и втором лучах).

При замыкании на основной линии выполняется двухстороннее определение места повреждения относительно всей ЛЭП с использованием замеров на её концах. В случае выявления повреждения на ответвлении осуществляется одностороннее ОМП по виртуальному замеру $[\underline{U}_n \quad \underline{I}_n]^T$.

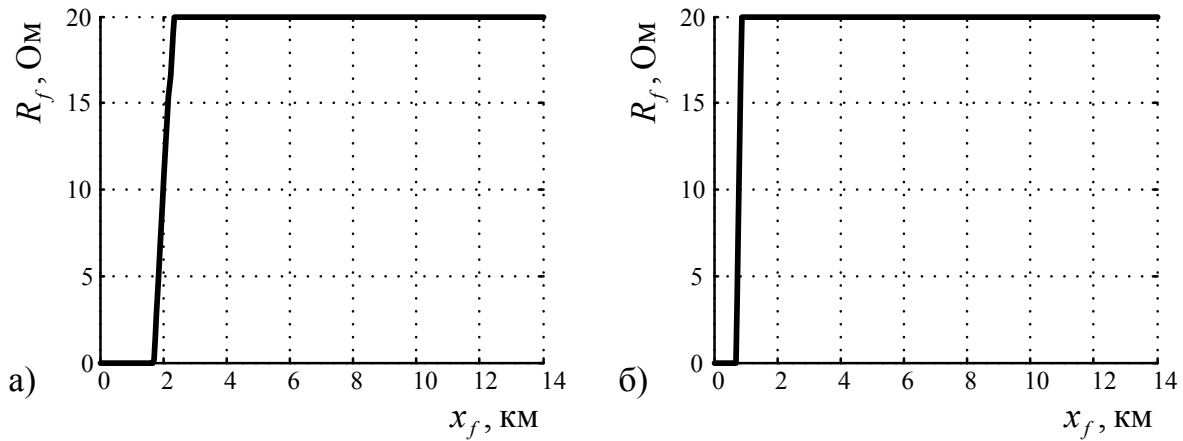


Рис. 10 Объектные характеристики распознавания замыканий на линии ответвления
а – при однофазном замыкании; б – при междуфазном замыкании.

В третьей главе представлена методика построения моделей линий электропередачи и изложен способ учёта реальной несимметрии ЛЭП в базисе симметричных составляющих.

Линия разделяется на участки однородности (секции), на протяжении которых удельные параметры ЛЭП остаются неизменными. Секция описывается типом проводов и опор, расположенных на соответствующем участке, типом и режимом заземления грозозащитных тросов, наличием взаимной связи с другими линиями и вносится в общую модель своей П-образной схемой замещения. В зависимости от конструктивных и функциональных особенностей различаются

участки шести типов, представленные в табл. 5.

Ключевой фактор в достижении высокой точности дистанционных методов ОМП – построение модели, адекватной контролируемой линии электропередачи. Это итерационная

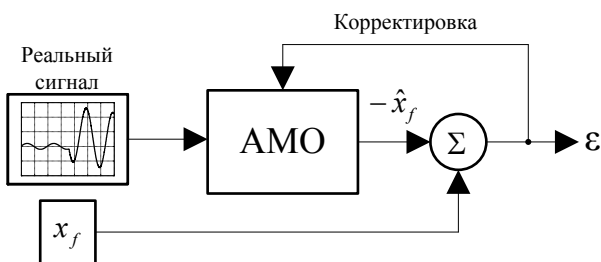


Рис. 11 Схема корректировки алгоритмической модели ЛЭП

процедура, продолжающаяся в процессе эксплуатации локатора. Она заключается в корректировке структуры АМО в зависимости от невязки ε между фактическим местом повреждения x_f и оценкой места повреждения \hat{x}_f , определяемой по реальным сигналам (рис. 11).

Типы участков однородности

Таблица 5

| | Описание | Схема | Внесение в модель |
|-------------------------|---|-------|-------------------|
| Основные участки | Одноцепный участок ВЛ, кабельная вставка | | |
| | Двухцепный участок ВЛ | | |
| | Двухцепный участок, цепи которого принадлежат разным линиям | | |
| | Двухцепный участок по схеме «заход-выход» | | |
| Вспомогательные участки | Переход от одноцепного участка к двухцепному | | |
| | Переход от двухцепного участка к одноцепному | | |

Моделирование осуществляется в базе симметричных составляющих, что

объясняется относительной простотой реализации и тем, что информация, необходимая для формирования моделей ЛЭП в данном базисе, доступна и в случае необходимости может быть оперативно уточнена. Однако метод симметричных составляющих не позволяет учесть реальную геометрию опор, что может негативно сказаться на результатах ОМП, особенно в линиях 500-750 кВ, для которых характерно горизонтальное расположение проводов.

Применительно к данной ситуации разработан метод разделения базисов

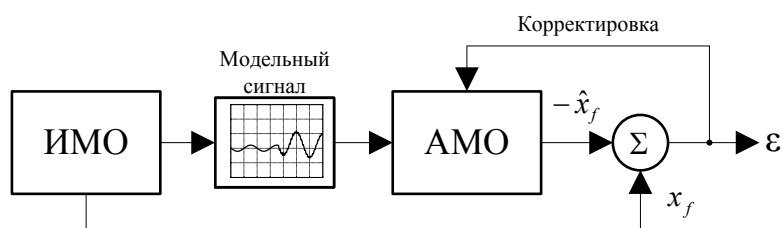


Рис. 12 Схема определения корректирующих коэффициентов K

имитационной и алгоритмической моделей. Имитационная модель объекта (ИМО) строится в базисе фазных координат, что позволяет учесть геометрию опор ЛЭП, и используется для формирования векторов наблюдения, соответствующих замыканию в произвольной точке x_f . Алгоритмическая модель, построенная в базисе симметричных составляющих, по модельному сигналу находит оценку аварийных параметров. Корректировка структуры АМО заключается в изменении удельных индуктивных сопротивлений участков однородности по закону (рис. 12)

$$X^0(x) = X_{исх}^0 \cdot K(x, \varepsilon),$$

где $K(x, \varepsilon)$ – корректирующий коэффициент, $X_{исх}^0$ – исходное значение сопротивления в базисе симметричных составляющих. Корректировка производится до тех пор, пока невязка ε не будет удовлетворять требуемой

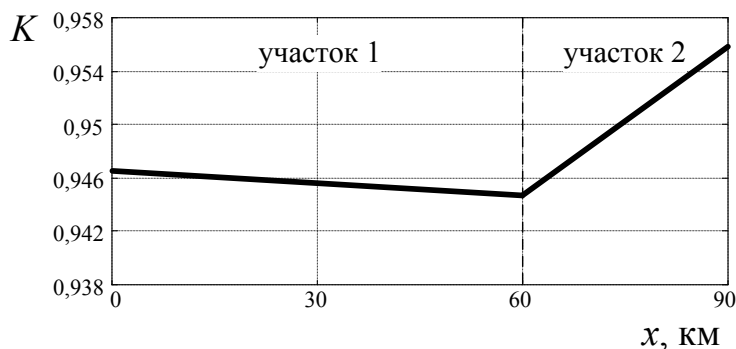


Рис. 13 Корректирующие коэффициенты

точности. Корректирующий коэффициент изменяется в зависимости от координаты x (рис. 13) и используется в дальнейшем для корректировки алгоритмической модели перед процедурой преобразования

векторов наблюдения в предполагаемое место повреждения.

При эксплуатации средств ОМП важно иметь возможность не только формировать модели линий электропередачи, но и просматривать параметры ЛЭП, и в случае необходимости самостоятельно и оперативно их корректировать. Данные цели преследовались при создании программного комплекса «FPDEdit», в основе которого лежит описанная в работе методика моделирования. Помимо этого программа позволяет рассчитывать нормальные и аварийные режимы работы сети и содержит обширную справочную информацию по опорам ЛЭП, проводам, грозозащитным тросам и силовым трансформаторам. Комплекс «FPDEdit» используется для обучения пользователей, а также в учебном процессе.

В четвёртой главе представлена реализация описанных в диссертации способов определения места повреждения в серийно выпускаемом микропроцессорном устройстве «Бреслер-0107.ОМП» и программном комплексе «WinBres». При непосредственном участии автора были разработаны алгоритмы ОМП, подготовлена резидентная программа терминала, составлена конструкторская документация на устройство ОМП (рис. 14).

Измеряемыми величинами являются фазные напряжения \underline{U}_v на сборных

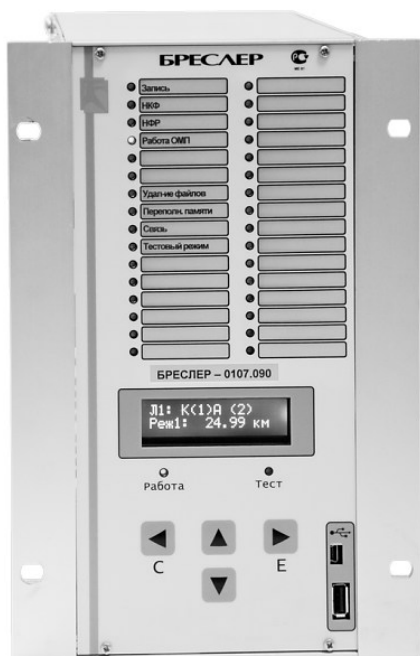


Рис. 14 Терминал «Бреслер-0107.ОМП»

шинах и фазные токи \underline{I}_v в отходящих от них линиях электропередачи (v – общее обозначение фаз А, В, С). На рис. 15 представлена структурная схема алгоритма одностороннего определения места повреждения.

На основании обработки сигналов, измеренных в предшествующем и текущем режимах, фазовый селектор определяет вид повреждения, особую фазу и относительно неё рассчитывает симметричные составляющие $[\underline{U}_s \ \underline{I}_s]^T$ напряжений и токов (s – обозначение последовательностей 1, 2, 0). Алгоритмическая

модель линии электропередачи находит оценки симметричных составляющих

$[\hat{\underline{U}}_{sf} \quad \hat{\underline{I}}_{sf}]^T$ напряжений $\hat{\underline{U}}_f$ и токов $\hat{\underline{I}}_f$ в предполагаемого месте повреждения f .

Эти величины подаются на вход модуля целевой функции. Координата x_f , при которой величина целевой функции (1) обращается в ноль, полагается местом замыкания.

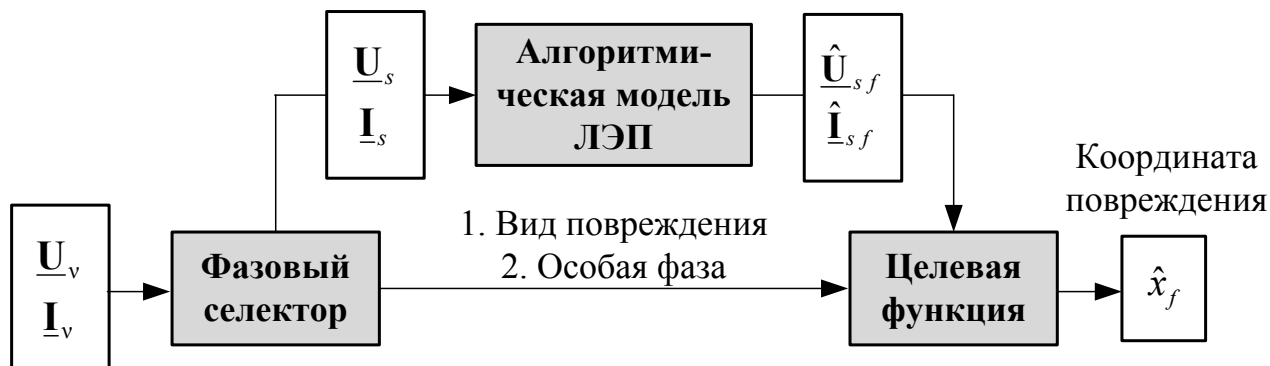


Рис. 15 Структурная схема алгоритма одностороннего ОМП

При двухстороннем определении места повреждения дополнительно привлекается вектор с противоположной стороны линии, а по результату алгоритмического моделирования строится и анализируется целевая функция (2).

На рис. 16 изображена упрощенная схема логики функции ОМП. Пусковые органы реагируют на отношение k_z модулей фазного сопротивления в текущий момент времени и за период до того. Контроль уровня текущего тока I^{TK} позволяет избежать излишнего срабатывания при незначительных изменениях режима.

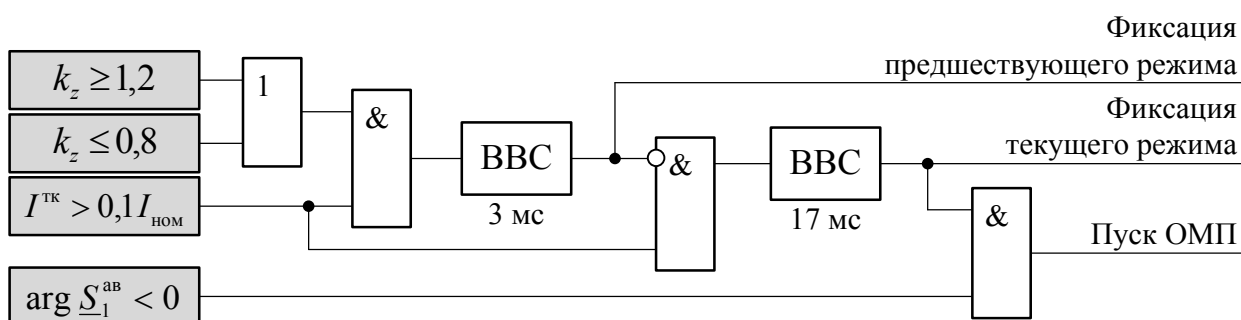


Рис. 16 Упрощенная схема логики запуска функции ОМП
BVC – выдержка времени на срабатывание

Для определения замыканий в линии и селективной работы функции ОМП используется измерительный орган по аргументу мощности \underline{S}_1^{ab} аварийных составляющих прямой последовательности

$$\underline{S}_1^{ab} = \underline{U}_1^{ab} \underline{I}_1^{ab*}.$$

Выдержки времени на срабатывание в 3 и 17 мс формируют команды на фиксацию величин предшествующего и текущего режимов соответственно.

Способ многостороннего определения места повреждения реализован в программном комплексе «WinBres». Моделирование многоконцевых линий заключается в формировании отдельных моделей каждого из питающих и внутренних участков линии и дальнейшего соединения их между собой в программе. Для этого предназначена специальная форма построения многомодульных моделей.

Точность определения места повреждения определяется адекватностью используемой модели и объёмом информации, доступной при наблюдении линии электропередачи. При одностороннем замере погрешность расчёта не превышает 3% длины ЛЭП, а при многостороннем – 1%.

В настоящее время программный комплекс «WinBres» обслуживает почти 1500 линий напряжением 110-750 кВ ФСК ЕЭС. Внедрение осуществлялось на

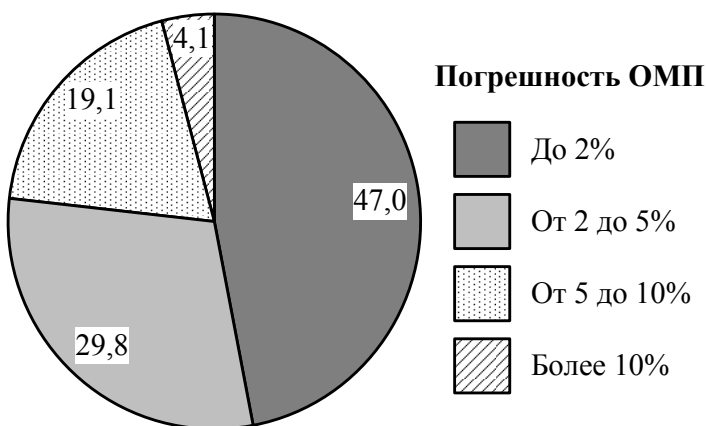


Рис. 17 Статистика точности ОМП по программе WinBres за 2011 год

протяжении четырёх лет. В результате проделанной за это время работы были скорректированы модели половины от общего числа обслуживаемых ЛЭП. За 2011 год на ЛЭП ФСК ЕЭС произошло 758 случаев ОМП. Статистика по ним (процент случаев) приведена на рис. 17.

Погрешность более 5% чаще всего объясняется отсутствием достоверных параметров ЛЭП, невозможностью получения векторов наблюдения со всех сторон линий и незавершённостью процедуры коррекции модулей программы ОМП в данных конкретных случаях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертации дано развитие дистанционного метода определения места повреждения по параметрам аварийного режима. Разработан способ многостороннего ОМП, позволяющий найти место повреждения в сетях с тремя и более узлами питания. Его отличительная черта – обработка всей доступной при наблюдении ЛЭП информации с использованием инструментария алгоритмического моделирования. Основные операции – идентификация повреждённого участка, получение и синхронизация виртуальных замеров на его концах и дальнейшее двухстороннее ОМП относительно выбранного отрезка линии.

2. Предложен способ дистанционного ОМП, позволяющий при отсутствии информации со стороны ответвительных подстанций определить место повреждения на линиях ответвлений. Решение основано на использовании алгоритмических моделей для преобразования наблюдаемых на концах ЛЭП величин к началу рассматриваемого ответвления и решению относительно него задачи одностороннего ОМП.

3. Разработан способ учёта реальной несимметрии линии электропередачи, по которому имитационная и алгоритмическая модели выполняются в разных базисах – фазных координатах и симметричных составляющих, а соответствие моделей обеспечивается корректирующими коэффициентами индуктивных сопротивлений участков однородности.

4. Созданная методика моделирования линий электропередачи, реализованная в программном комплексе «FPDEdit», позволяет автоматизировать процесс создания, анализа и корректировки моделей ЛЭП, используемых при решении задачи ОМП.

5. Алгоритмы, разработанные на основе предложенных способов, реализованы в серийно выпускаемом микропроцессорном устройстве определения места повреждения «Бреслер-0107.ОМП» и программном комплексе «WinBres», который в настоящее время установлен и используется почти на 2000 ЛЭП России, в том числе и на 1500 воздушных линиях 110-750 кВ ФСК ЕЭС.

6. Результаты диссертационных исследований использованы в учебном

процессе на кафедре ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях перечня ВАК:

1. Бычков Ю.В. Способ учёта аperiodической составляющей при определении места повреждения // Изв. вузов. Электромеханика. – 2008. – Спец. выпуск «Диагностика энергооборудования». – С. 80-81.

2. Бычков Ю.В. Алгоритмические модели на примере защиты дальнего резервирования и определения места повреждения / Ю.В. Бычков, Д.С. Васильев, А.О. Павлов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – № 6. – С. 63-67.

3. Бычков Ю.В. Определение места повреждения в сетях с многосторонним питанием / Ю.В. Бычков, А.О. Павлов // Энергетика Татарстана. – 2011. – № 2. – С. 33-38.

Публикации в других изданиях:

4. Бычков Ю.В. Имитационное и алгоритмическое моделирование на примере защиты дальнего резервирования / Ю.В. Бычков, Д.Г. Еремеев // ДНДС: материалы VI Всерос. научн.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2005. – С. 164-166.

5. Бычков Ю.В. Имитационное и алгоритмическое моделирование повреждения трансформатора ответственной подстанции / Ю.В. Бычков, Д.Г. Еремеев // Труды академии электротехнических наук Чувашской республики (АЭН ЧР). – 2005. – №2. – С. 8-10.

6. Бычков Ю.В. Определение места повреждения в распределительных сетях // ИТЭЭ: материалы VI Всерос. научн.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2006. – С. 277-280.

7. Бычков Ю.В. «Формульные» и «модельные» методы определения места повреждения / Ю.В. Бычков, В.Н. Козлов // ДНДС: материалы VII Всерос. научн.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2007. – С. 226-228.

8. Бычков Ю.В. Реализация алгоритма определения места повреждения в микропроцессорном терминале «Бреслер-0107.5X» / Ю.В. Бычков, А.О. Павлов // Труды АЭН ЧР. – 2007. – №2. – С. 78-81.

9. Бычков Ю.В. Определитель места повреждения «Бреслер-0107.09» /

Ю.В. Бычков, В.Н. Козлов // Обмен опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики: сб. тезисов XV Уральской научн.-техн. конф. – Екатеринбург. – 2007. – С. 84-86.

10. Бычков Ю.В. Применение алгоритмических моделей для решения задач определения места повреждения // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXI междунар. научн. конф. / Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та. – Саратов. – 2008. – С. 156-158.

11. Бычков Ю.В. Способ учёта аperiodической составляющей при определении места повреждения // Труды АЭН ЧР. – 2009. – № 1. – С. 28-33.

12. Бычков Ю.В. Аппаратный комплекс двухстороннего ОМП ВЛ / Ю.В. Бычков, В.Н. Козлов, А.О. Павлов // Релейная защита и автоматика энергосистем. Сб. докладов XX конф. – М. – 2010. – С. 291-295.

13. Бычков Ю.В. Многостороннее ОМП: проблемы и решения / Ю.В. Бычков, А.О. Павлов // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1. – С. 20-24.

14. Бычков Ю.В. Алгоритмические модели в релейной защите / Ю.В. Бычков, Д.С. Васильев, А.О. Павлов // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1. – С. 26-31.

Патенты:

15. Бычков Ю.В. Патент на изобретение № 2464582 Российской Федерации, МПК G01R31/08. Способ определения места повреждения разветвлённой линии электропередачи с несколькими источниками питания / В.Н. Козлов, А.О. Павлов, Ю.В. Бычков // Опубл. 20.10.2012, Бюл. № 29.

Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве:

[2, 14] – приложение алгоритмических моделей линий электропередачи в задаче определения места повреждения, [3, 13] – разработка способа многостороннего определения места повреждения, [7] – сравнительный анализ явных и неявных методов определения места повреждения, [8, 9, 12] – разработка резидентной программы микропроцессорного терминала определения места повреждения «Бреслер-0107.ОМП», [4, 5] – построение имитационных и алгоритмических моделей объектов энергосистемы.

БЫЧКОВ Юрий Владимирович

**РАЗВИТИЕ И ПРИЛОЖЕНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО МЕТОДА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 08.11.2012 г. Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 2,0.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 1506.

Отпечатано в типографии «Принт-Люкс»
428000, г. Чебоксары, пр. М. Горького, д. 26