

*На правах рукописи*



БЕЛЯНИН Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ И ЛОКАЦИИ  
ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ФИДЕРА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Чебоксары 2015

Работа выполнена на кафедре теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары).

Научный руководитель:

**Лямец Юрий Яковлевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Официальные оппоненты:

**Шуин Владимир Александрович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

**Павлов Александр Олегович**

кандидат технических наук, главный инженер общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «Бреслер» (ООО «НПП «Бреслер», г. Чебоксары)

Ведущая организация:

**Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством» (ОАО «ВНИИР», г. Чебоксары)**

Защита состоится 4 декабря 2015 г. в 12<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д212.301.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» в зале заседания Ученого совета (г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус (корпус № 3), третий этаж, к. 301).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять на имя учёного секретаря диссертационного совета по адресу: 428015, г. Чебоксары, Московский проспект, д. 15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус, (8352) 45-02-07, library@chuvsu.ru) и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «19» октября 2015 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.301.02, к.т.н.



Серебрянников  
Александр Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы работы.** Значительную часть в инфраструктуре передачи и распределения электроэнергии занимают распределительные сети 6-35 кВ, эксплуатация которых сопряжена со значительными издержками, обусловленными аварийными перебоjami в энергоснабжении и необходимостью проведения профилактических и ремонтных работ. Основным видом повреждения таких сетей является однофазное замыкание на землю (ОЗЗ), составляющее по разной информации от 70 до 90 % от общего числа электрических повреждений. В отличие от сетей с эффективно заземленной нейтралью замыкание одной фазы на землю в рассматриваемых сетях не является коротким замыканием и не требует немедленного отключения. В то же время замыкание фазы на землю ведет к нежелательным последствиям: возникновению перенапряжений в сети, вследствие чего может произойти пробой неповрежденных фаз и переход ОЗЗ в более серьезный вид повреждения – двойное замыкание на землю; проявлению феррорезонансных процессов, вредных для трансформаторов напряжения; попаданию людей и животных под шаговое напряжение; разрушению опор.

Разработкам новых, более совершенных алгоритмов защит от ОЗЗ уделяется большое внимание. Но проблема ОЗЗ всё ещё остаётся в повестке дня. Кроме того, требуют совершенствования методы локации повреждений, что представляет собой отдельную и несравненно более сложную задачу. Значительный вклад в развитие алгоритмов защит от замыканий на землю внесли отечественные научные школы, сложившиеся в Москве (ЭНИН им. Кржижановского, ВНИИЭ), Иванове (энергетический университет), Томске (политехнический университет), Новочеркасске (ЮРГПУ).

В диссертации представлены результаты исследований, выполненных в Чебоксарах (ЧГУ и исследовательский центр (ИЦ) «Бреслер») совместно с к.т.н. В.Ф. Лачугиным (ЭНИН). Особое внимание уделялось новым методам распознавания поврежденного присоединения и поиска места замыкания на землю. Результаты теоретических исследований использованы в разработках устройств РЗА, выполненных при участии автора. В ИЦ «Бреслер» автора консультировал к.т.н. С.В. Иванов.

**Целью диссертации** является разработка способов и средств защиты от однофазных замыканий на землю и определения места однофазного замыкания фидера на землю.

**Основные задачи, решаемые в работе.** Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. Анализ существующих методов и средств защиты и локации однофазных замыканий на землю.
2. Подготовка имитационной и алгоритмической моделей электрической сети, позволяющих воспроизводить переходные процессы при ОЗЗ и определять токи и напряжения в месте предполагаемого замыкания.
3. Разработка независящих от режима нейтрали сети способов определения повреждённого присоединения при ОЗЗ.

4. Разработка независимых от режима нейтрали сети способов определения мест однофазных и двойных замыканий на землю в распределительных сетях.

**Основные методы научных исследований.** Для решения поставленных задач применялись методы теоретических основ электротехники, теоретических основ релейной защиты, математического моделирования с использованием программного комплекса MATLAB.

**Достоверность** полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием обоснованных методов исследования, обсуждением основных результатов работы со специалистами, совпадением результатов математического и экспериментально-го моделирования, опытом эксплуатации разработанного устройства.

**Соответствие паспорту специальности.** *Соответствие диссертации формуле специальности:* в соответствии с формулой специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» (технические науки): в диссертационной работе целью исследования является разработка средств защиты и локации замыканий на землю фидера распределительной сети, предметом исследований является алгоритмическая модель фидера в переходном режиме, алгоритмы определения поврежденного присоединения, способы определения места однофазного замыкания на землю.

*Соответствие диссертации области исследования специальности:* отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.02, а именно:

- к п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 относятся разработанные принципы построения дискретно-аналоговой модели объекта, методика построения модели объекта в локальном режиме, несущем информацию о токе повреждения;

- к п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» относятся методы определения поврежденного присоединения при замыканиях на землю, способы определения мест однофазных и двойных замыканий на землю в распределительной сети.

- к п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» относится построение дискретно-аналоговых алгоритмических моделей объекта при помощи среды MatLab/Simulink.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритмические модели фидера распределительной сети и понятие локального процесса в полностью наблюдаемой электрической сети.

2. Способы определения поврежденного фидера с использованием алгоритмического моделирования и способы определения мест однофазных и двойных замыканий на землю в распределительной сети.

3. Приложение теоретических результатов к разработке селективной защиты от замыканий на землю в распределительной сети; обобщение результатов эксплуатации защиты.

4. Апробация разработанного алгоритма определения поврежденного фидера на реальных осциллограммах замыканий на землю.

**Научную новизну** работы представляют:

1. Разработанные алгоритмические модели фидера, преобразующие наблюдаемые токи и напряжения в токи и напряжения произвольного места фидера, отличаются от известных используемым математическим аппаратом и позволяют работать в базисе мгновенных значений.

2. Выделение из полностью наблюдаемого процесса ранее неизвестного локального процесса, несущего информацию о поврежденном участке сети и месте повреждения.

3. Разработанные способы определения поврежденного присоединения, основанные на контроле сопротивления фидера по нулевой последовательности и позволяющие селективно определять поврежденное присоединение независимо от режима нейтрали, отличаются от известных применением критериев исправного состояния фидера и обнаруженных нормальных и локальных компонент.

4. Разработанные способы определения мест однофазных и двойных замыканий на землю с использованием алгоритмического моделирования и энергетического критерия, а также с использованием локальных токов отличаются от известных отсутствием методической погрешности

**Практическую ценность диссертации** представляют разработанные в ней:

1. Класс алгоритмических моделей, способных в непрерывном времени обрабатывать информацию, задаваемую в дискретном времени, открывает новые перспективы использования алгоритмического моделирования для построения алгоритмов релейной защиты.

2. Методика построения модели локального режима и разработанный метод переноса шунтов в локальной модели контролируемого элемента сети, позволяющий определять место замыкания путем перемещения шунтов в место предполагаемого повреждения, могут применяться для решения задачи локации повреждений линий электропередачи различного уровня напряжения.

3. Способы определения поврежденного присоединения, основанные на использовании алгоритмических моделей, могут быть применены в цифровых устройствах селективной защиты от замыканий на землю.

4. Способы определения мест однофазных и двойных замыканий на землю в распределительной сети могут быть использованы при разработке цифровых устройств поиска мест повреждений.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты выполненных исследований и разработок использованы в научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе ИЦ «Бреслер» и внедрены или приняты к внедрению:

1. Принят к внедрению алгоритм определения места ОЗЗ фидера по критерию знака мгновенной мощности.

2. Принят к внедрению алгоритм определения места ОЗЗ по методу локализации.

3. Алгоритм отстройки от предшествующих пробоев и анализа первых волн переходного процесса при вводе линии в работу внедрены в устройстве селективной защиты воздушных и кабельных линий сетей 6-35 кВ «ТОР 110-ИЗН».

**Личный вклад автора заключается** в выделении подкласса дискретно–аналоговых алгоритмических моделей, в развитии методики построения алгоритмических моделей, основывающихся на разностных уравнениях длинной линии, в участии в разработке способов определения мест замыканий на землю фидера распределительной сети, в участии в разработке методики построения модели локального режима фидера, в обнаружении способа устранения методической погрешности при определении мест двойных замыканий на землю.

**Апробация результатов исследований.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и республиканских конференциях: «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (СИГРЭ, г. Екатеринбург, 2013 г.), II Международная научно-практическая конференция и выставка «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (РЕЛАВЭКСПО, г. Чебоксары, 2013 г.), Международная выставка и XXII конференция «Релейная защита и автоматика энергосистем» (г. Москва, 2014 г.), III международная молодёжная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Екатеринбург, 2012 г.), V международная молодёжная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Томск, 2014 г.), «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (ДНДС, г. Чебоксары, 2013 г., 2015 г.), «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (ИТЭЭ, г. Чебоксары, 2012 г., 2014 г.), Республиканская научно-техническая конференция молодых специалистов (г. Чебоксары, 2012 г.), Региональный фестиваль студентов и молодежи «Человек. Гражданин. Учёный» (Ч.Г.У., г. Чебоксары, 2011 г., 2012 г.), 46-ая научная студенческая (региональная) конференция (г. Чебоксары, 2012 г.), 47-ая научная студенческая (региональная) конференция (г. Чебоксары, 2013 г.).

**Публикации.** Содержание диссертационной работы нашло отражение в 35 научных работах, среди которых 4 статьи в изданиях из перечня ВАК, 2 статьи в издании, индексируемом в SCOPUS, и 5 патентов на изобретения.

**Структура и объём работы.** Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (100 наименований) и 2 приложений. Общий объём составляет 110 стр., в том числе основного текста 90 стр., 56 рисунков, 5 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, изложено состояние проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, представлена структура диссертации.

**В первой главе** рассмотрена проблема защиты и локации замыканий на землю в распределительной сети, приведен обзор источников и обоснован выбор направления исследований.

Наиболее перспективный способ определения поврежденного присоединения связан с анализом переходного процесса, возникающего при замыкании фазы фидера на землю. Рассмотрены имитационные модели сети, способные с достаточной точностью воспроизводить процессы, протекающие при замыканиях на землю, а также алгоритмические модели, предназначенные для преобразования наблюдаемых токов и напряжений. Показано, что подходящим методом анализа переходных процессов в фидере является описание процессов функциями дискретного и непрерывного времени. В этом случае система описывается разностными уравнениями по дискретному аргументу и алгебраическими или дифференциальными – по локальному непрерывному.

Построена разностная алгоритмическая модель фидера. Симметричный фидер моделируется в системе нулевой и безнулевых составляющих двумя двухпроводными моделями (рис. 1а и 1б). Двухпроводный отрезок цепи с распределёнными параметрами длиной  $l$  моделируется участком линии без потерь с удельными параметрами  $L^0, C^0$  и сосредоточенными на краях участка активными сопротивлениями  $R^0l/2$  (рис. 1). Участок описывается парой разностных уравнений

$$\begin{aligned} u_1(t) - ai_1(t) &= u_2(t - \tau) - bi_2(t - \tau), \\ u_2(t) + ai_2(t) &= u_1(t - \tau) + bi_1(t - \tau), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a = R_b + R^0l/2$ ,  $b = R_b - R^0l/2$ ,  $R_b = \sqrt{L^0/C^0}$  – волновое сопротивление линии,  $\tau = l\sqrt{L^0C^0}$  – время пробега волны вдоль отрезка линии. Безнулевая составляющая получается из фазной величины путем устранения составляющей нулевой последовательности  $u'_\nu = u_\nu - u_0$ ,  $i'_\nu = i_\nu - i_0$ , где  $\nu = A, B, C$  – обозначение произвольной фазы.

Из уравнений (1) следуют выражения обратной передачи, описывающие участок линии как элемент алгоритмической модели

$$\begin{aligned} u_2(t) &= (1/2R_b) \left[ au_1(t + \tau) + bu_1(t - \tau) - a^2i_1(t + \tau) + b^2i_1(t - \tau) \right], \\ i_2(t) &= (1/2R_b) \left[ -u_1(t + \tau) + u_1(t - \tau) + ai_1(t + \tau) + bi_1(t - \tau) \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Алгоритмическая модель трехфазного симметричного фидера работает по двухканальной схеме и каждый канал описывается уравнениями (2) с соответствующими параметрами  $R_b$ ,  $a$ ,  $b$  и  $\tau$ . Для более точного учета потерь линия может быть разделена на несколько равных участков, например, на два (рис. 2). С точки зрения алгоритмических моделей разбиение на равные участки длиной  $l$  означает всего лишь повторение преобразова-

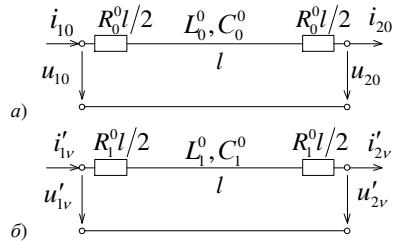


Рис. 1. Модели отрезка симметричного фидера: а – для составляющих нулевой последовательности, б – для безнулевых составляющих произвольной фазы  $\nu$

ний (2) на каждом участке. То же положение справедливо и для неоднородного фидера, состоящего из каскадно соединенных однородных участков. В этом случае в формулах (2) для разных участков будут различаться параметры  $R_B$ ,  $a$ ,  $b$  и  $\tau$ .

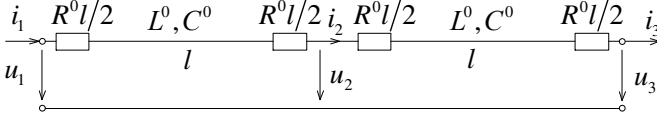


Рис. 2. Модель отрезка линии длиной  $2l$

Более общее решение для реализации алгоритмической модели фидера даёт метод наложения в сочетании с интегралом Дюамеля. Одна из наблюдаемых величин рассматривается как наложение реакций на вторую наблюдаемую величину и на одну из выходных величин. Модификации моделей различаются тем, какой из двух наблюдаемых величин отводится роль источника. В первой модификации роль источника отведена напряжению (рис. 3а), и искомые величины описываются следующими интегральными уравнениями

$$u_2(0)y(t) + \int_0^t \frac{du_2(\xi)}{d\xi} y(t-\xi) d\xi = i_1(t) - i_{1K3}(t), \quad (3)$$

$$i_2(0)h_i(t) + \int_0^t \frac{di_2(\xi)}{d\xi} h_i(t-\xi) d\xi = i_1(t) - i_{1XX}(t). \quad (4)$$

Во второй модификации действует источник наблюдаемого тока (рис. 3б). Соответствующие уравнения

$$u_2(0)h_u(t) + \int_0^t \frac{du_2(\xi)}{d\xi} h_u(t-\xi) d\xi = u_1(t) - u_{1K3}(t), \quad (5)$$

$$i_2(0)z(t) + \int_0^t \frac{di_2(\xi)}{d\xi} z(t-\xi) d\xi = u_1(t) - u_{1XX}(t), \quad (6)$$

где  $y(t)$ ,  $h_i(t)$ ,  $h_u(t)$ ,  $z(t)$  – переходные характеристики пассивного четырехполюсника П при различных режимах его входа и выхода.

На рис. 3 схематично представлены операции, выполняемые с моделями: определение реакций на одну из наблюдаемых величин, определение переходных характеристик и, наконец, определение искомых величин. Искомое напряжение на конце участка  $u_2(t)$  описывается в равной мере уравнением (3) или же уравнением (5). Аналогично, неизвестный ток  $i_2(t)$  описывается либо уравнением (4), либо (6). Какому из уравнений каждой пары следует отдать предпочтение, зависит от поведения переходной характеристики. Желательно располагать переходной характеристикой с резко возрастающей начальной частью. В отличие от разностной модели интегральная модель фидера не ограничена значениями его первичных параметров, что делает её более общей. К тому же она позволяет учесть



свойства земли как токопровода, имеющего собственную модель, резистивно-ёмкостную или резистивно-индуктивную.

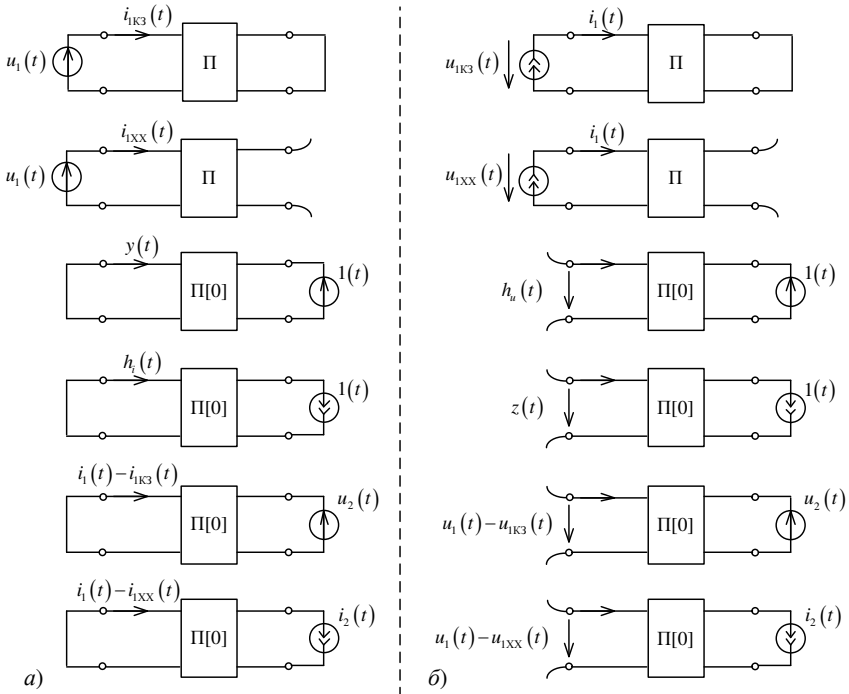


Рис. 3. Две модификации алгоритмических моделей двухпроводной системы

Алгоритмические модели функционируют в непрерывном времени  $t$ , в то время как реальный объект или его имитационная модель наблюдаются в дискретном времени  $k = \text{ent}(f_d t)$  с частотой дискретизации  $f_d$ . Выделен подкласс дискретно-аналоговых алгоритмических моделей, продолжающих работать во времени  $t$ , но способных воспринимать воздействия, определённые во времени  $k$ .

Введено понятие о функционально определённых алгоритмических моделях, режимы которых вполне определяются при задании пассивных параметров и введении источников в

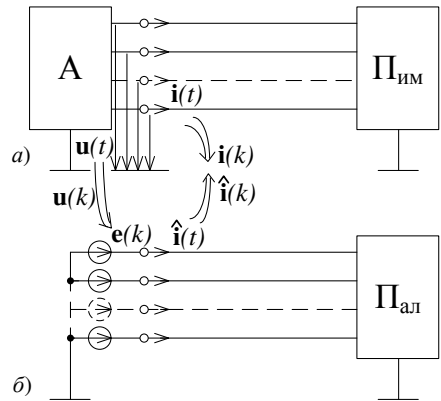


Рис. 4. Модели электропередачи с одно-сторонним питанием: а – имитационная; б – дискретно-аналоговая алгоритмическая.

виде некоторого числа наблюдаемых величин, скажем, только напряжений (рис. 4) или, быть может, только токов.

В данной модификации метода алгоритмических моделей результаты наблюдения имитационной модели оказываются разделенными пополам. Если наблюдаемые напряжения вводятся в алгоритмическую модель, то наблюдаемые токи используются только для проверки адекватности многополюсника  $\Pi_{ал}$  многополюснику  $\Pi_{им}$  и наоборот. Многополюсник  $\Pi_{ал}$  может строиться как для неповрежденного состояния объекта, так и для поврежденного в зависимости от решаемой в конкретном случае задачи. Например, для целей локализации повреждений строится модель поврежденного объекта и рассчитывается целевая функция, в качестве которой может быть взято, например, среднеквадратическое отклонение векторов токов  $\mathbf{i}(k)$  и  $\hat{\mathbf{i}}(k)$  на окне наблюдения:

$$\sigma^2(\hat{x}_f, \hat{R}_f) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (\mathbf{i}(k) - \hat{\mathbf{i}}(k))^T (\mathbf{i}(k) - \hat{\mathbf{i}}(k)) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $k=0$  – начальный момент наблюдения аварийного процесса;  $k=N-1$  – конечный момент.

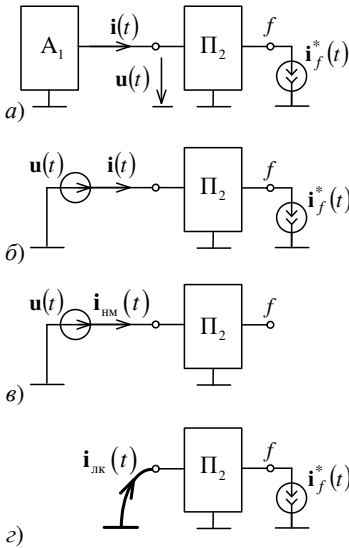


Рис. 5. Наблюдаемый, нормальный и локальный режимы в пассивной части цепи:  
 а, б – наблюдаемый режим; в – нормальный режим; г – локальный режим

$\mathbf{u}(t)$  представлено в виде ЭДС (рис. 5б), затем применён метод наложения: действие каждого из двух источников  $\mathbf{u}(t)$  и  $\mathbf{i}_f^*(t)$  рассмотрено в отдельности. Режим, создаваемый

Дальнейшее развитие идей дискретно-аналогового моделирования привело к обнаружению (совместно с Вороновым П.И.) новых информационных составляющих, названных локальными, и, соответственно, локального режима наблюдаемого объекта. Физический смысл этих понятий поясняет рис. 5, где  $\mathbf{i}(t)$  и  $\mathbf{u}(t)$  – векторы наблюдаемых величин,  $\Pi_2$  – пассивный многополюсник, в месте  $f$  которого в момент  $t=0$  произошло замыкание. В обобщённой модели сети (рис. 5а) вектор неизвестных токов замыкания представлен скачкообразной функцией

$$\mathbf{i}_f^*(t) = \mathbf{i}_f(t) \mathbf{1}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \mathbf{i}_f(t), & t \geq 0. \end{cases} \quad (8)$$

В соответствии с принципом компенсации наблюдаемое напряжение

источником  $\mathbf{u}(t)$ , назван нормальным (рис. 5б), а источником  $\mathbf{i}_f^*(t)$  – локальным (рис. 5з). Соответственно, реакция пассивной модели  $\Pi_2$  на действие ЭДС  $\mathbf{u}(t)$  будет вектором нормальных токов  $\mathbf{i}_{\text{нм}}(t)$ , а реакция на действие источника тока  $\mathbf{i}_f^*(t)$  – вектором локальных токов  $\mathbf{i}_{\text{лк}}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_{\text{нм}}(t)$ . Из определения (8) вытекают следующие свойства этих составляющих при  $t < 0$ :  $\mathbf{i}_{\text{лк}}(t) \equiv 0$ ,  $\mathbf{i}_{\text{нм}}(t) \equiv \mathbf{i}_{\text{пд}}(t)$ : до момента замыкания нормальный ток совпадает с током предшествующего режима. После замыкания ( $t > 0$ ) нормальный ток оригинален. Модель локального режима (рис. 5з) имеет нулевые начальные условия, так как внутреннее состояние модели учитывается в нормальном режиме при определении реакции на действие источника  $\mathbf{u}(t)$  (рис. 5б). Локальный режим интересен своей физической природой: он создаётся в зашунтированной модели неизвестными источниками тока, действующими из неизвестного места замыкания. Обоснована возможность перемещения шунтов внутри модели локального режима, что открывает определённые перспективы использования локального режима для решения задачи локации повреждений.

**Вторая глава** посвящена алгоритмам определения повреждённого присоединения при замыкании на землю в распределительной сети. Рассмотрены критерии исправного состояния фидера. Если электромагнитная связь между фидерами незначительна, то имеется возможность контролировать исправность каждого фидера в отдельности, определяя его собственное сопротивление нулевой последовательности. Для этого используются дискретно-аналоговые алгоритмические модели неповреждённого фидера для составляющих нулевой последовательности. Критерием исправного состояния фидера служит уровень тока нулевой последовательности в конце фидера, определяемый при помощи алгоритмической модели по наблюдаемым в начале присоединения току и напряжению нулевой последовательности.

Обнаруженные нормальный и локальный режимы наблюдаемого объекта позволили по-новому взглянуть на проблему определения повреждённого фидера. О состоянии каждого фидера можно судить, сопоставляя наблюдаемый ток нулевой последовательности в начале фидера и нормальный ток, определяемый в модели нулевой последовательности. В случае, если фидер не поврежден, будет иметь место небольшое различие токов, обусловленное погрешностями интерполяции и неадекватностью модели объекта. В случае, если фидер поврежден, между токами будет наблюдаться принципиальное различие.

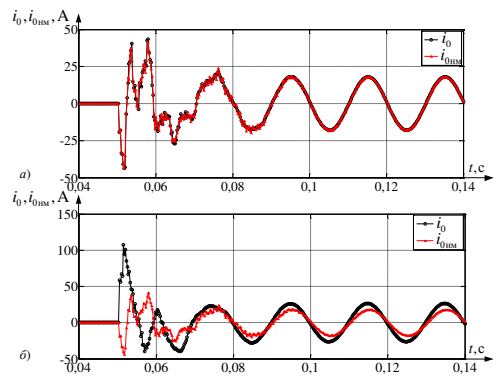


Рис. 6. Результат оценки тока нулевой последовательности для неповреждённого (а) и повреждённого (б) фидера

В сети с изолированной нейтралью сравнимые токи отличаются как по уровню, так и по фазе. В сети с компенсацией тока замыкания на землю ситуация несколько сложнее: так, в режиме перекомпенсации может наблюдаться полное совпадение токов в установившемся режиме, однако в переходном также будет наблюдаться принципиальное различие. Пример реализации такого критерия для сети с перекомпенсацией представлен на рис. 6.

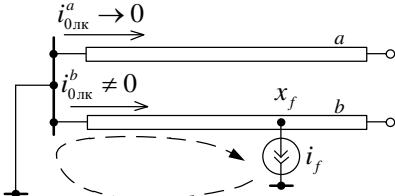


Рис. 7. Алгоритмическая модель исследуемой сети в локальном режиме

Наиболее общий подход к определению повреждённого присоединения несут в себе модели локальных режимов. В случае одностороннего наблюдения можно построить модель локального режима для нулевой последовательности и по локальным токам распознать замыкание на фидере. В модели локального режима (рис. 7) шунт в месте наблюдения освобождает неповрежденный фидер *a* от влияния источника тока *i<sub>f</sub>* в месте повре-

ждения. Тот же подход при многостороннем наблюдении позволяет решить более общую задачу – определение поврежденного участка разветвленной сети. Процесс поиска участка с повреждением производится поэтапно с постепенным исключением неповрежденных частей и укорочением модели сети. Критерием неповрежденности участка выступает отсутствие локальных токов по его сторонам. На рис. 8 это разветвлённый верхний фидер, состоящий из частей *a*, *c* и *d*. На первом шаге он будет устранён из модели сети. Далее рассматривается только нижний фидер. Шунт перемещается в ближайший узел, рассчитывается новый локальный режим. После анализа локальных токов модель вновь разделяется на неповрежденную и поврежденную части. Неповрежденная часть отбрасывается, а для поврежденной процесс локализации вновь повторяется вплоть до распознавания повреждённой ветви.

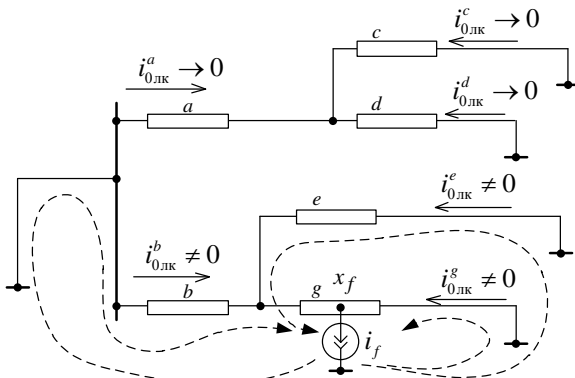


Рис. 8. Алгоритмическая модель разветвленной сети в локальном режиме

**Третья глава** посвящена задаче локации ОЗЗ в

фидере распределительной сети. Разработанные подходы к определению поврежденного присоединения при дальнейшем развитии и расширении информационной базы позволяют решать и эту более сложную задачу. Метод дискретно-аналогового алгоритмического моделирования представляет локацию повреждения как поиск минимума невязки (7). Более общим подходом является использование критериев повреждения, которые исходят из принципа резистивности замыкания. В этом случае алгоритмическая модель представляет

собой соединении трех отдельных частей (рис. 9): модели  $\Pi_1$  неповрежденного участка до места предполагаемого замыкания, модели замыкания  $З$  и модели неповрежденного участка  $\Pi_2$  после места замыкания. Так как модель замыкания неизвестна, то алгоритм локализации нацелен на определение электрических величин по обе стороны повреждения и оценку по данным величинам характера повреждения. В табл. 1 приведены этапы поиска места замыкания на землю.

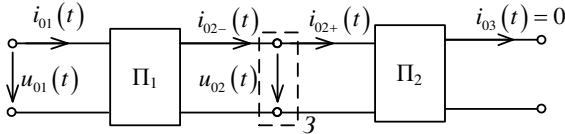


Рис. 9. Алгоритмическая модель поврежденного фидера по нулевой последовательности

Таблица 1  
Процедура поиска места замыкания

Модель	Исходная информация	Выполняемые операции
Неповреждённый участок $\Pi_1$ до повреждения	Наблюдаемые токи и напряжения в начале фидера	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Определение напряжения нулевой последовательности в месте предполагаемого повреждения:  <math display="block">u_{02}(t) = (1/2R_{в01})[a_{01}u_{01}(t + \tau_{01}) + b_{01}u_{01}(t - \tau_{01}) - a_{01}^2i_{01}(t + \tau_{01}) + b_{01}^2i_{01}(t - \tau_{01})];</math> </li> <li>2. Определение тока нулевой последовательности, втекающего в модель повреждения:  <math display="block">i_{02-}(t) = (1/2R_{в01})[-u_{01}(t + \tau_{01}) + u_{01}(t - \tau_{01}) + a_{01}i_{01}(t + \tau_{01}) + b_{01}i_{01}(t - \tau_{01})];</math> </li> <li>3. Определение по безнулевым составляющим наблюдаемых величин безнулевой составляющей напряжения повреждённой фазы в месте предполагаемого повреждения:  <math display="block">u'_{n2}(t) = (1/2R_{в1})[a_1u'_{n1}(t + \tau_1) + b_1u'_{n1}(t - \tau_1) - a_1^2i'_{n1}(t + \tau_1) + b_1^2i'_{n1}(t - \tau_1)];</math> </li> <li>4. Определение фазного напряжения повреждённой фазы в месте предполагаемого повреждения:  <math display="block">u_{n2}(t) = u_{02}(t) + u'_{n2}(t);</math> </li> </ol>

Модель	Исходная информация	Выполняемые операции
Неповрежденный участок П <sub>2</sub> после повреждения	$u_2(t)$ , учитывается, что $i_3(t) = 0$	<p>5. Определение тока нулевой последовательности, отходящего от модели повреждения:</p> $i_{02+}(t) = \frac{1}{a_{02}} \left[ u_{02}(t) - \frac{a_{02} - b_{02}}{a_{02}} u_{02}(t - \tau_{02}) - \frac{b_{02}}{a_{02}} u_{02}(t - 2\tau_{02}) \right] + \left( \frac{1}{a_{02}} \right)^2 \left[ \frac{1}{2} (a_{02} - b_{02})^2 i_{02+}(t - \tau_{02}) - b_{02}^2 i_{02+}(t - 2\tau_{02}) \right];$
Модель замыкания З	$u_{n2}(t)$ , $i_{02-}(t)$ , $i_{02+}(t)$	<p>6. Определение тока предполагаемого замыкания:</p> $i_{n2}(t) = 3(i_{02-}(t) - i_{02+}(t));$ <p>7. Определение мгновенной мощности ветви однофазного замыкания</p> $p(t) = u_{n2}(t) i_{n2}(t);$ <p>8. По характеру изменения мгновенной мощности делается вывод о наличии повреждения в проверяемом месте.</p>

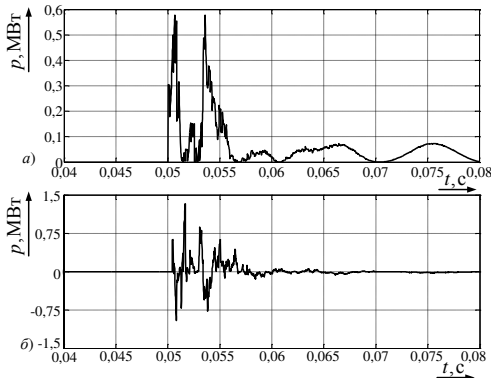


Рис. 10. Мгновенная мощность повреждения:  
а – истинного; б – предполагаемого

Если известны параметры нагрузки удаленного конца, то для локации достаточно результатов одностороннего замера. О приходе шунта в место повреждения будет свидетельствовать исчезновение локальных токов в неповрежденных фазах. Это свойство позволяет не только определить место повреждения, но и решить задачу фазовой селекции. Пример реализации такого подхода для ОЗЗ на расстоянии 20 км от начала линии приведен на рис. 12. Значительный уровень тока фазы В свидетельствует о наличии повреждения в этой фазе. Равенство локальных токов фаз А и С нулю на расстоянии 20 км определяет место повреждения.

На рис. 10 представлены результаты вычисления мгновенной мощности по описанному алгоритму для случая совпадения места предполагаемого замыкания на землю с реальным местом замыкания на землю (рис. 10а) и для несовпадения этих мест (рис. 10б).

Показано, что метод локализации эффективно решает задачу локации повреждения при полном двухстороннем наблюдении объекта. Перемещаясь вдоль длины фидера, шунты приходят в место замыкания, вследствие чего исчезают локальные токи всех ветвей, кроме одной – шунта, замкнувшего источник тока в месте повреждения (рис. 11).

Тот же подход решает задачу определения мест двойных замыканий на землю для случая, когда замыкания находятся на разных фидерах. Если же места замыканий располагаются на одном фидере, то метод локализации дополняется критерием резистивности повреждения: в месте реального замыкания реактивный параметр повреждения равен нулю. В качестве такого параметра используется реактивная мощность, реактивное сопротивление или разность фаз между фазным напряжением и током предполагаемого замыкания. На первом этапе по уровню локальных токов определяются поврежденные фазы. На втором этапе важная роль отводится свойству локальных моделей улавливать токи повреждений, шунтируя их.

Если модель локального режима строится по двухстороннему замеру (рис. 13), то токи повреждений определяются упрощенно:

$$\underline{I}_{fB} = \underline{I}'_{Влк} + \underline{I}''_{Влк},$$

$$\underline{I}_{fC} = \underline{I}'_{Слк} + \underline{I}''_{Слк}.$$
 Если участок фидера однородный, то места повреждений можно определить из соотношения токов в установленном режиме. Расстояние от начала фидера до места замыкания определяется как

$x_{fv} = l / (k_v + 1),$  где  $l$  – длина фидера,  $k_v = \underline{I}'_{влк} / \underline{I}''_{влк}$  – отношение комплексных значений локальных токов слева и справа,  $v = B, C$  – поврежденные фазы. Если же фидер неоднородный, то в каждом месте предполагаемого повреждения проверяется равенство реактивного параметра нулю.

При известных параметрах нагрузки локация двойных замыканий на землю может быть выполнена по результатам одностороннего наблюдения. Поиск токов замыкания выполняется по методу локализации. Наличие связи между источниками через нагрузку обу-

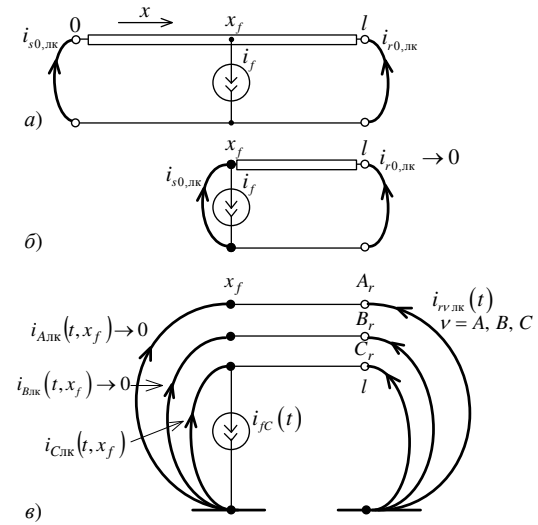


Рис. 11. Локальные токи в моделях нулевой последовательности (а, б) и при полном наблюдении фазных величин (в): а – исходной модели; б, в – при перемещении шунта в место замыкания

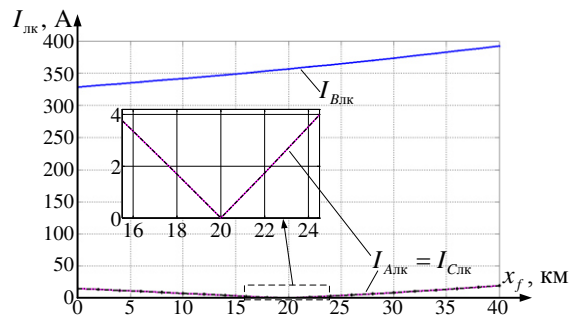


Рис. 12. Локальные фазные токи

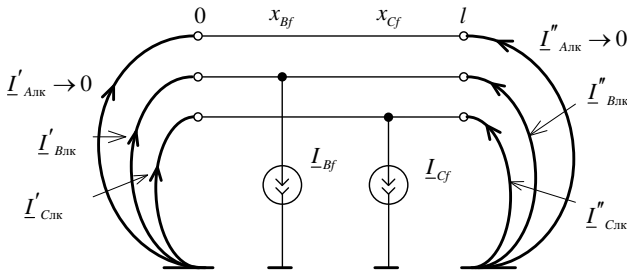


Рис. 13. Модель локального режима фидера при двойном замыкании на землю

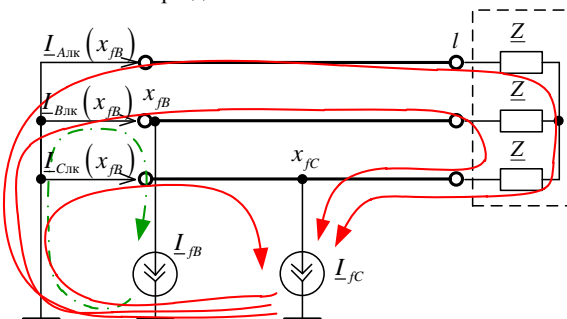


Рис. 14. Токораспределение источников повреждения в локальной модели

сравнивает различия между током повреждения и током в шунте при попадании шунта в место реального замыкания. Учет токораспределения источников, приведенный на рис. 14, позволяет определить ток в месте первого повреждения, в данном случае в фазе В:

$$I_{fB} = I_{Влк}(x_{fB}) - I_{Алк}(x_{fB}).$$

С учётом указанной закономерности в каждой точке  $x$  предполагаемого повреждения определяются локальные токи

$$\hat{I}_{fB}(x) = I_{Влк}(x) - I_{Алк}(x),$$

$$\hat{I}_{fC}(x) = I_{Слк}(x) - I_{Алк}(x).$$

Полученные оценки токов предполагаемых повреждений совместно с фазными напряжениями используются в критерии повреждения.

Первая точка, в которой критерий выполняется, определяет координату и фазу ближайшего повреждения (рис. 15). С учётом полученной координаты и значения тока первого места замыкания для поиска второго места строится модель локального режима части фидера за первым замыканием. Таким образом, задача поиска второй точки двойного замыкания сводится к определению координаты ОЗЗ в модели локального режима.

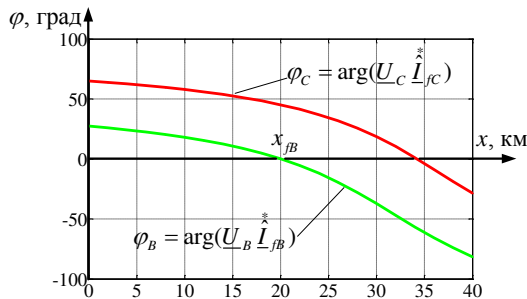


Рис. 15. Поиск первой точки двойного замыкания

разработке микропроцессорной селективной защиты воздушных и кабельных линий электропередачи 6-35 кВ с любым режимом нейтрали (по заданию и при участии ОАО «Тюменьэнерго»). В этой же главе представлена апробация разработанных, принятых к внедрению способов определения повреждённого фидера. В 2012 году на базе исследовательского центра «Бреслер» совместно с ЭНИН при непосредственном участии автора разработано устройство защиты воздушных и

**Четвёртая глава** посвящена разработке микропроцессорной селективной защиты воздушных и кабельных линий электропередачи 6-35 кВ с любым режимом нейтрали (по заданию и при участии ОАО «Тюменьэнерго»). В этой же главе представлена апробация разработанных, принятых к внедрению способов определения повреждённого фидера. В 2012 году на базе исследовательского центра «Бреслер» совместно с ЭНИН при непосредственном участии автора разработано устройство защиты воздушных и



кабельных линий 6-35 кВ «ТОР 110-ИЗН». Устройство реализует в себе волновой алгоритм определения поврежденного присоединения, реле направления мощности нулевой последовательности по основной гармонике, токовую отсечку по нулевой последовательности. Помимо функций защиты в устройстве предусмотрены функции индикации измеряемых величин, регистрации событий и осциллографирования с частотой дискретизации 16 кГц. В том же году при участии автора на подстанции «Ханты-Мансийская» проведены натурные испытания устройства, доказавшие работоспособность реализованных алгоритмов. По результатам натурных испытаний устройства были установлены в опытную эксплуатацию. В 2013 году автором установлены в опытную эксплуатацию устройства на подстанциях «Новошешминская» (г. Чистополь), «Олимпийская» (г. Волгоград), «Рубин» и «Туменская» (г. Коломна). С 2013 года устройство внедрено в серийное производство. Опытная эксплуатация устройств показала, что процессы возникновения и развития ОЗЗ носят разнообразный характер. На сегодняшний день накоплено более 1000 осциллограмм реальных замыканий на землю, большинство из которых (около 90 %) носило самоустраняющийся характер. Отличительной чертой данной категории замыканий является достаточно быстрый пробой с последующим восстановлением изоляции (рис. 16а). Менее частым видом замыкания (порядка 9 %) являются устойчивые замыкания, которые можно разделить на две группы: медленноразвивающиеся замыкания (рис. 16б), характер которых соответствует процессу пробоя воздушного промежутка, и мгновенно возникшие замыкания (рис. 16в). При этом до момента возникновения устойчивого ОЗЗ также фиксируются кратковременные пробой изоляции в месте замыкания.

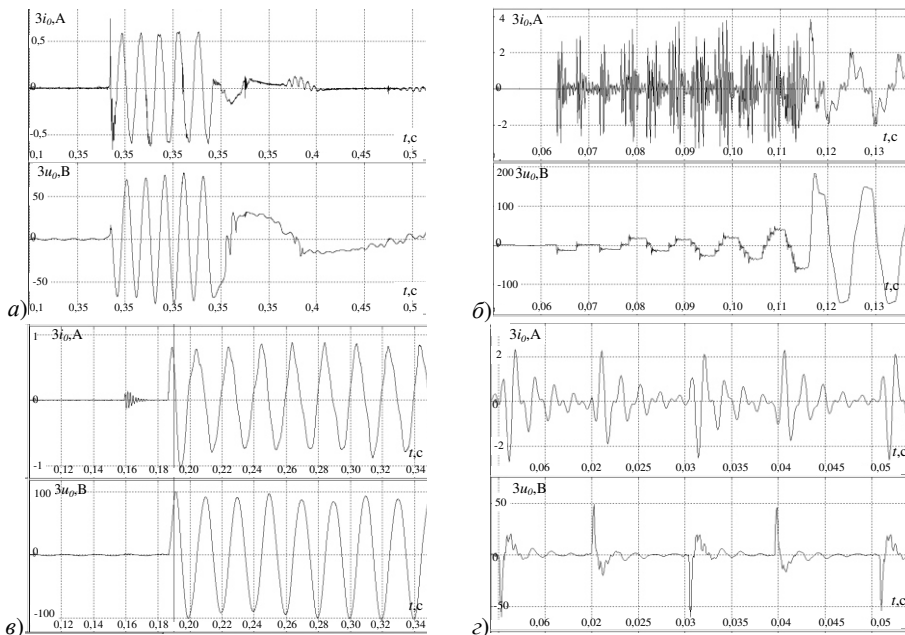


Рис. 16. Разновидности процессов при ОЗЗ

Намного реже (менее 1 %) были зафиксированы не менее интересные перемежающиеся замыкания (рис. 16з). Среди замыканий с предшествующими пробоями наблюдались случаи, в которых предварительный пробой происходил на смежной линии, тем самым провоцируя неправильное действие устройства.

В качестве меры преодоления обнаружившейся проблемы предложено ввести цифровую фильтрацию тока и напряжения нулевой последовательности. Применён фильтр нижних частот Баттерворта 4 порядка с частотой среза 2 кГц, обеспечивший подавление сигнала предшествующего пробоя при сохранении сигнала основного пробоя, необходимого для распознавания замыкания. По результатам проведенных испытаний алгоритм волнового органа направления мощности был доработан блоком фильтрации, позволяющим избежать неселективного срабатывания устройства при наличии предшествующих частичных пробоев.

Важным вопросом для организации работы направленных защит является обеспечение правильной полярности подключения измерительных цепей. Более остро этот вопрос стоит для защит, использующих величины обратной и нулевой последовательностей, которые отсутствуют в нормальном режиме работы. С использованием теоретических положений, приведённых в первой главе, построена имитационная модель для анализа кратковременного переходного процесса, возникающего при вводе присоединения в работу из-за одновременности замыкания контактов выключателя. Проведенное исследование указанных процессов в сетях различной конфигурации с различным режимом заземления нейтрали показало, что для всех сетей характерна разнонаправленность первых полуволн тока и напряжения нулевой последовательности. На основе этого явления был разработан алгоритм определения правильности подключения устройства на волновом принципе. Данный модуль контроля фазировки реагирует на первые волны переходного процесса. Для отстройки от небаланса токов и напряжений используются аварийные составляющие тока и напряжения нулевой последовательности, определяемые как  $v_{ав}(t) = v(t) - v(t - T)$ . В ходе опытной эксплуатации на указанных выше подстанциях работоспособность данного алгоритма была подтверждена.



Рис. 17. Устройство TOP 110-ИЗН

Алгоритмы отстройки от предшествующих разрядов и определения направленности подключения устройства из анализа переходного процесса при вводе контролируемого присоединения в работу реализованы в устройстве импульсной защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных линий 6-35 кВ «ТОР 110-ИЗН» (рис. 17) производства ИЦ «Бреслер», разработанном при непосредственном участии автора.

Благодаря натурным испытаниям устройства «ТОР 110-ИЗН» проведены испытания алгоритма определения поврежденного присоединения с использованием теории локальных режимов. Для фидера РП-12-2 подстанции «Ханты-Мансийская» построена дискретно-

аналоговая алгоритмическая модель по нулевой последовательности (рис. 18), при помощи которой производилось распознавание повреждения на присоединении для каждой записанной осциллограммы. В случае неповрежденного состояния фидера наблюдалось сходство тока из осциллограммы и нормального тока (рис. 19а), в то время

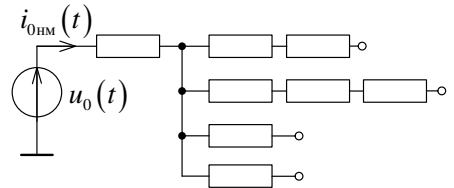


Рис. 18. Алгоритмическая модель фидера РП-12-2

как для поврежденного состояния наблюдается принципиальное несоответствие токов, как по уровню, так и по фазе (рис. 19б). Основываясь на этом признаке, можно построить плоскость замеров, позволяющую разделить замеры неповрежденного и поврежденного фидера (рис. 20). В качестве её координат выступают текущие среднеквадратические величины наблюдаемого тока (по оси ординат) и локального тока (по оси абсцисс). На плоскости представлены замеры для различных осциллограмм, а также проведена линия (черным цветом), разделяющая замеры, полученные при замыкании на фидере, и замеры, полученные при замыкании в остальной части сети.

Алгоритмы поиска земляных замыканий на основе локальных режимов приняты к внедрению в ИЦ «Бреслер».

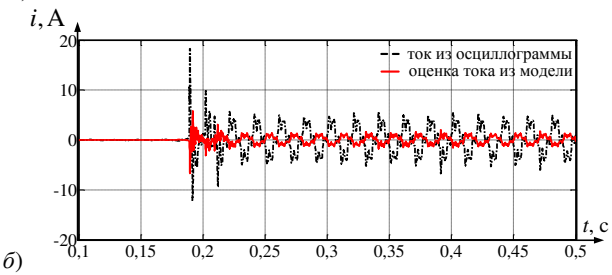
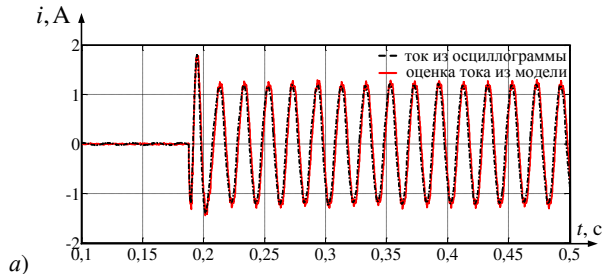


Рис. 19. Результаты анализа осциллограмм  
а – повреждение в сети; б – повреждение на фидере

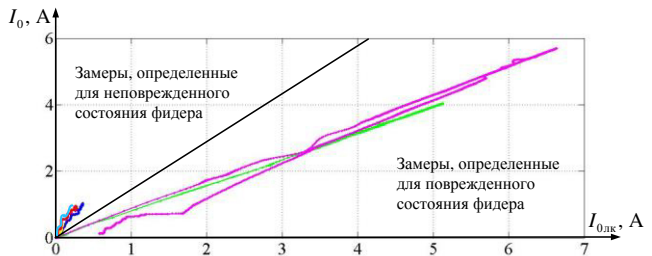


Рис. 20. Плоскость замеров защиты

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны алгоритмические модели фидера распределительной сети в переходном режиме, позволяющие преобразовывать мгновенные значения наблюдаемых величин.
2. Раскрыта физическая сущность локального режима полностью наблюдаемой сети (регистрация и токов, и напряжений) и разработана методика построения модели объекта в локальном режиме.
3. Разработаны способы определения поврежденного присоединения, основанные на контроле сопротивления фидера по нулевой последовательности и позволяющие селективно определять повреждённое присоединение независимо от режима работы нейтрали.
4. Разработан способ определения поврежденного присоединения с использованием модели фидера в локальном режиме при одностороннем наблюдении.
5. Разработан алгоритм определения поврежденного участка разветвленной сети с использованием её модели в локальном режиме; физический смысл алгоритма заключается в перемещении шунтов вдоль участков сети.
6. Разработан способ определения места замыкания на землю с использованием двух алгоритмических моделей, описывающих фидер до повреждения и после повреждения, с целью определения тока в месте повреждения и определения мгновенной мощности. Способ принят к внедрению.
7. Разработан способ определения места повреждения при земляных замыканиях с использованием модели локального режима фидера, позволяющий определять место каждого замыкания без методической погрешности. Способ принят к внедрению.
8. Алгоритм отстройки от предшествующих частичных пробоев и анализа первых волн переходного процесса в токе и напряжении нулевой последовательности, возникающих при вводе линии в работу, внедрены в терминале «ТОР 110-ИЗН», разработанном при участии автора.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В изданиях из перечня ВАК

1. Белянин, А. А. Анализ переходных процессов в длинной линии в базисе дискретного и непрерывного времени / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин, П. И. Воронов // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 5. – С. 11-16. (0,693 п.л./ 0,231 п.л.).
2. Белянин, А. А. Алгоритмическое моделирование фидера в переходном режиме / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин, П. И. Воронов // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 5. – С. 49-56. (0,924 п.л./0,308 п.л.).
3. Белянин, А. А. Описание линии 6-35 кВ при распознавании замыкания на землю в распределительной сети / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин // Электротехника. – 2014. – № 3. – С. 2-7. (0,693 п.л./0,345 п.л.).
4. Белянин, А. А. Модификации аварийных составляющих наблюдаемых токов и напряжений / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин, П. И. Воронов // Электротехника. – 2015. – № 2. – С. 22-28. (0,8085 п.л./0,270 п.л.).

### **В изданиях, индексируемых в SCOPUS**

5. Belyanin, A. A. Description of 6-35 kV Lines in Recognition of Earth Fault in a Distribution Network / Yu. Ya. Lyamets, A. A. Belyanin // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85. – № 3. – PP. 121-126. (0,693 п.л./0,345 п.л.).

6. Belyanin, A. A. Modifications of Fault Components of Currets and Voltages / Yu. Ya. Lyamets, A. A. Belyanin, P. I. Voronov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – № 2. – PP. 66-71. (0,693 п.л./0,231 п.л.).

### **Публикации в других изданиях**

7. Белянин, А. А. Разработка импульсных защит от замыканий на землю / В. Ф. Лачугин, С. В. Иванов, А. А. Белянин // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 3(8). – С. 50-57. (0,924 п.л./0,308 п.л.).

8. Белянин, А. А. Опыт внедрения селективной защиты от замыканий на землю в сети 6-35 кВ / В. Ф. Лачугин, С. В. Иванов, А. А. Белянин // Релейщик. – 2013. – № 2. – С. 24-27. (0,462 п.л./0,154 п.л.).

9. Белянин, А. А. Опыт внедрения селективной защиты от замыканий на землю в сети 6-35 кВ в ОАО «Тюменьэнерго» / С. В. Иванов, А. А. Белянин, В. Ф. Лачугин, А. В. Буров, В. В. Жуков // Воздушные линии. – 2014. – № 2(15). – С. 73-79. (0,8085 п.л./0,269 п.л.).

10. Белянин, А. А. Селективная защита от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ – Опыт внедрения / В. Ф. Лачугин, С. В. Иванов, А. А. Белянин // Оперативное управление в электроэнергетике. – 2014. – № 5. – С. 49-53. (0,5775 п.л./0,193 п.л.).

11. Белянин, А. А. Алгоритмы релейной защиты с информационной базой произвольного размера / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, Ю. В. Романов, П. И. Воронов, М. В. Мартынов, А. А. Белянин // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013. – С. 1-7. (0,8085 п.л./0,105 п.л.).

12. Белянин, А. А. Опыт внедрения селективной защиты от замыканий на землю в сети 6-35 кВ / В. Ф. Лачугин, С. В. Иванов, А. А. Белянин // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013. – С. 1-6. (0,693 п.л./0,231 п.л.).

13. Белянин, А. А. Анализ переходных процессов в длинной линии в базе дискретного и непрерывного времени / А. А. Белянин // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России (РЕЛАВЭКСПО-2013): Материалы II междунар. науч.-практ. конф. и выст. – Чебоксары, 2013. – С. 99-100. (0,231 п.л.).

14. Белянин, А. А. Адаптивная защита от земляных замыканий в сетях с изолированной нейтралью / В. А. Ефремов, С. А. Алексенко, В. Д. Ластовкин, А. А. Белянин, П. И. Воронов // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России (РЕЛАВЭКСПО-2013): Материалы II междунар. науч.-практ. конф. и выст. – Чебоксары, 2013. – С. 20-21. (0,231 п.л./0,06 п.л.).

15. Белянин, А. А. Теоретические основы релейной защиты: формирующиеся разделы / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, Ю. В. Романов, П. И. Воронов, М. В. Мартынов, А. А. Белянин // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России

(РЕЛАВЭКСПО-2013): Материалы II междунар. науч.-практ. конф. и выст. – Чебоксары, 2013. – С. 92-95. (0,462 п.л./0,093 п.л.).

16. Белянин, А. А. Опыт внедрения селективной защиты от замыканий на землю в сети 6-35 кВ в ОАО «Тюменьэнерго» / С. В. Иванов, А. А. Белянин, В. Ф. Лачугин, А. В. Буров, В. В. Жуков // Электроэнергетика глазами молодежи: Сборник докладов III междунар. науч.-техн. конф. – Т. 2. – Екатеринбург, 2012. – С. 181-185. (0,5775 п.л./0,15 п.л.).

17. Белянин, А. А. Локализация поврежденного участка наблюдаемой разветвленной распределительной сети / А. А. Белянин // Электроэнергетика глазами молодежи: Сборник докладов V междунар. науч.-техн. конф. – Т. 1. – Томск, 2014. – С. 507-510. (0,462 п.л.).

18. Белянин, А. А. Селективная защита от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ – Опыт внедрения / В. Ф. Лачугин, С. В. Иванов, А. А. Белянин // Релейная защита и автоматика энергосистем: Сборник докладов XXII конф. – Москва, 2014. – С. 111-115. (0,5775 п.л./0,193 п.л.).

19. Белянин, А. А. Разностная алгоритмическая модель фидера 6-35 кВ / А. А. Белянин // Релейная защита и автоматика энергосистем: Сборник докладов XXII конф. – Москва, 2014. – С. 601-603. (0,3465 п.л.).

20. Белянин, А. А. Дискретно-аналоговая алгоритмическая модель наблюдаемой сети / А. А. Белянин, Ю. Я. Лямец // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2012. – № 1. – С. 40-44. (0,5775 п.л./0,25 п.л.).

21. Белянин, А. А. Разностный процесс и его энергетика / А. А. Белянин, Ю. Я. Лямец, С. В. Иванов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2012. – № 1. – С. 44-48. (0,5775 п.л./0,21 п.л.).

22. Белянин, А. А. Анализ точности моделирующих комплексов / А. А. Белянин, П. И. Воронов, Ю. Я. Лямец // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2012): Материалы VIII всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2012. – С. 249-252. (0,2302 п.л./0,115 п.л.).

23. Белянин, А. А. Интерполяция процессов в электроэнергетических системах / А. А. Белянин, Ю. Я. Лямец // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2012): Материалы VIII всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2012. – С. 252-254. (0,17265 п.л./0,093 п.л.).

24. Белянин, А. А. Инвариантность форм интегро-дифференциальных уравнений для расчёта режимов в электроэнергетической системе / П. И. Воронов, А. А. Белянин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2013): Материалы X всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2013. – С. 292-295. (0,2302 п.л./0,1151 п.л.).

25. Белянин, А. А. Исследование погрешности алгоритмического моделирования в зависимости от первичных параметров сети / А. А. Белянин, П. И. Воронов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2013): Материалы X всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2013. – С. 296-299. (0,2302 п.л./0,1151 п.л.).

26. Белянин, А. А. Влияние частоты дискретизации на точность моделирования / А. В. Быкова, А. А. Белянин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2013): Материалы X всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2013. – С. 299-302. (0,2302 п.л./0,1151 п.л.).

27. Белянин, А. А. Применение модели реального объекта для определения повреждённого фидера / А. А. Белянин, А. В. Королев // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2014): Материалы IX всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2014. – С. 284-287. (0,2302 п.л. /0,13 п.л.).

28. Белянин, А. А. Метод локализации повреждения электрической сети / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2015): Материалы XI всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 362-364. (0,17625 п.л. /0,09 п.л.).

29. Белянин, А. А. Распознавание однофазных замыканий на землю по методу локализации / А. А. Белянин, Ю. Я. Лямец // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2015): Материалы XI всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 364-366. (0,17625 п.л. /0,09 п.л.).

30. Белянин, А. А. Распознавание двойных замыканий на землю по методу локализации / А. А. Белянин, Ю. Я. Лямец // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2015): Материалы XI всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 366-369. (0,2302 п.л. /0,1 п.л.).

### **Патенты**

31. Пат. на изобретение 2516371 РФ, МПК G01R31/08. Способ определения поврежденного фидера при замыкании на землю в распределительной сети / Лямец Ю. Я., Иванов С. В., **Белянин А. А.**; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2013104863/28; заявл. 05.02.2013; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14. – 10 с.

32. Пат. на изобретение 2519277 РФ, МПК H02H3/00, H02H3/26. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю воздушных и кабельных линий распределительных сетей 6-35 кВ / Лачугин В. Ф., Панфилов Д. И., Иванов С. В., **Белянин А. А.**; патентообладатель ОАО «ЭНИН». – №2013106747/07; заявл. 18.02.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16. – 9 с.

33. Пат. на изобретение 2542331 РФ, МПК H02H3/28, G01R31/08. Способ определения места замыкания линии электропередачи при двухстороннем наблюдении / Лямец Ю. Я., Воронов П. И., **Белянин А. А.**; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2013144358/07; заявл. 02.10.2013; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5. – 14 с.

34. Пат. на изобретение 2542745 РФ, МПК H02H3/40, G01R31/08. Способ определения места однофазного замыкания фидера на землю / Лямец Ю. Я., **Белянин А. А.**; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2013142540/07; заявл. 17.09.2013; опубл. 27.02.2015, Бюл. № 6. – 11 с.

35. Пат. на изобретение 2550348 РФ, МПК H02H3/16. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю воздушных и кабельных линий распределительных сетей 6-35 кВ / Лачугин В. Ф., Иванов С. В., **Белянин А. А.**; патентообладатель ОАО «МРСК Юга». – № 2013141284/07; заявл. 10.09.2013; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13. – 9 с.

### **Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:**

[1-6,20,23-30] – участие в разработке основных теоретических положений, построении алгоритмических моделей и иллюстрации их на примерах; [7-10,11,12,14-16,18,21,22] – участие в разработке теоретических положений, имитационных моделей и иллюстрации положений на примерах; [31-35] – участие в создании изобретений.

**БЕЛЯНИН Андрей Александрович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ И ЛОКАЦИИ ЗАМЫКАНИЙ  
НА ЗЕМЛЮ ФИДЕРА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 02.10.2015 г. Формат 60×84 1/16. Печ. л. 1,25.  
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 1018  
Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии  
ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»  
428015, г. Чебоксары, пр. Московский, д.15