
На правах рукописи

ПЕТРУХИН Андрей Алексеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ
ЛЭП 6-35 кВ НА ОСНОВЕ АКТИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2009

Работа выполнена на кафедре «Автоматическое управление электро-энергетическими системами» ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» и Филиале ОАО «ФСК ЕЭС» - Магистральные электрические сети Центра (МЭС Центра).

Научный руководитель: доктор технических наук
Куликов Александр Леонидович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Слышалов Владимир Константинович

кандидат технических наук, доцент
Арцишевский Ян Леонардович

Ведущая организация: **ОАО «Институт Энергосетьпроект»,
г. Москва**

Защита состоится _____ 2009 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корпус «Б», ауд. 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Автореферат разослан _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

А.В. Мошкарин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Воздушные (ВЛ) и кабельные (КЛ) линии 6–35 кВ составляют основу распределительных сетей и по данным ОАО «ФСК ЕЭС» имеют протяжённость около 1,3 млн. км. Более 600 тыс. км этих линий выработали свой ресурс, что приводит в среднем к восьми отключениям в год на 100км.

Поэтому в настоящее время повышается актуальность более точного и своевременного определения места повреждения (ОМП).

Специфика режимов нейтрали и конструктивного исполнения ЛЭП 6–35 кВ не позволяет средствам релейной защиты и автоматики (РЗА) в полной мере обеспечивать выявление повреждений и особенно селективное определение замыканий на землю.

Большой вклад в исследование методов определений мест повреждений ЛЭП внесли работы российских учёных А.И. Айзенфельда, Е.А. Аржанникова, Я.Л. Арцишевского, Б.В. Борозинца, В.А. Борухмана, Я.С. Гельфанда, А.Н. Висящева, А.Ф. Дьякова, А.П. Кузнецова, Д.Р. Любарского, Ю.Я. Лямеца, М.Ш. Мисриханова, Г.С. Нудельмана, М.П. Розенкопа, Ю.М. Силаева, А.С. Саухатаса, А.И. Таджикибаева, А.М. Федосеева, Э.М. Шнеерсона, В.А. Шуина и зарубежных, таких как: В.М. Aucoin, А.А. Girgis, R. Das, S. Hännien, M. Kezunovic, M. Lehtonen, A.G. Phadke, B. Russell, M.S. Sachdev. Однако проблема ОМП ЛЭП 6 – 35кВ не имеет окончательного решения. Новые методы и средства ОМП разрабатываются в том числе с использованием активного зондирования ВЛ и развиты в работах Г.М. Шалыта, А.Л. Куликова, Г.М. Лебедева, Е.В. Закамского, Д.М. Кудрявцева, но предлагаемые технические решения ориентированы преимущественно на магистральные линии и не учитывают:

- § сильную разветвлённость ВЛ 6–35 кВ и быстрое затухание сигналов зондирования в таких условиях;
- § неоднозначность (неселективность) одностороннего ОМП ВЛ 6–35 кВ при наличии отпаек;
- § ошибки ОМП при активном зондировании сложными широкополосными сигналами, вызванные диспергирующими свойствами линий;
- § возможности по объединению информации, полученной различными средствами при ОМП ЛЭП;
- § интеграцию современных цифровых устройств ОМП ЛЭП на активном зондировании в программно-аппаратный комплекс подстанций, в том числе с использованием протокола МЭК 61850;
- § технико-экономические особенности эксплуатации ЛЭП 6–35 кВ, определяющие эффективность применения методов активного зондирования.

Указанные факторы не только определили формулировку задачи исследования, адаптацию известных технических решений, но и привели к поиску новых инструментов ОМП ЛЭП 6–35 кВ методами активного зондирования.

Цель диссертационной работы заключается в совершенствовании существующих и разработке новых методов и технических средств определения мест повреждений ВЛ 6–35 кВ на основе активного зондирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- § проанализировать особенности применения активного зондирования и уточнить классификацию методов ОМП ЛЭП 6–35 кВ;
- § разработать новые методы ОМП ЛЭП 6–35 кВ с применением сложных зондирующих сигналов, позволяющих: повысить разрешающую способность рефлектограмм; обеспечить селективность одностороннего ОМП при наличии ответвлений; компенсировать ошибки, вызванные диспергирующими свойствами линий;
- § сформулировать требования к опытному образцу и разработать новый автоматический локационный искатель места повреждения;
- § провести натурные испытания на ЛЭП 6–10 кВ новых алгоритмов и технических решений, а также получить точностные характеристики оценок расстояния до повреждения в условиях шумов и помех;
- § разработать методику оценки эффективности применения ОМП ЛЭП в условиях неопределённости и риска.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются методы и технические средства дистанционного определения мест повреждений (ОМП) ВЛ 6–35 кВ. Предметом исследования является обеспечение селективности и повышение точности методов одностороннего ОМП ЛЭП.

Методика исследования. Разработанные в диссертационной работе научные положения используют системный подход к анализу повреждений ВЛ 6–35 кВ и основываются на комплексе теоретических и экспериментальных методов, применяемых в этой области. Решение поставленных задач базируется на достижениях фундаментальных и прикладных наук таких, как математический анализ и математическая статистика, теоретические основы электротехники и радиоэлектроники.

Достоверность и обоснованность результатов работы. Разработанные в диссертационной работе теоретические положения реализованы в новых технических решениях и апробированы экспериментально на ЛЭП 6 – 10 кВ, а также путём имитационного моделирования. Результаты экспериментов не противоречат и дополняют результаты, полученные в исследуемой области другими авторами.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан алгоритм построения дальностно-частотных портретов ВЛ 6–35 кВ, формируемых на основе активного зондирования сложными широкополосными сигналами, позволяющий анализировать частотные свойства локальных участков ЛЭП.

2. Разработаны и апробированы в ходе натурных испытаний и имитационного моделирования новые методы селективного одностороннего ОМП ЛЭП в условиях разветвлённых ВЛ 6–35 кВ.

3. Предложены статистические методы объединения информации от различных технических средств для повышения точности ОМП ЛЭП.

4. Представлена новая методика технико-экономических расчётов эффективности использования ОМП ЛЭП в условиях неопределённости и риска.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

§ предложенные в работе новые алгоритмы обладают более высокими точностными характеристиками и позволяют поднять эффективность и надёжность ОМП ВЛ 6–35 кВ;

§ новый экспериментальный образец автоматического локационного искателя может стать прототипом серийно выпускаемого прибора ОМП ЛЭП;

§ полученные в ходе натурных испытаний результаты найдут применение при изучении характеристик ВЛ 6–10 кВ, а также в задачах диагностики этих линий;

§ разработанные методы объединения информации при ОМП ЛЭП позволят формировать комплексные алгоритмы повышенной точности;

§ использование методики оценки эффективности применения ОМП в условиях неопределённости и риска целесообразно при технико-экономическом обосновании мероприятий по реконструкции и перевооружению распределительных сетей.

Реализация результатов работы. Результаты по исследованию новых методов ОМП ЛЭП 6–10 кВ получены в 2008 году в ходе натурных экспериментов на объектах филиала ОАО «МРСК Центра и Приволжья» – «Нижновэнерго».

Разработанные алгоритмы реализованы в программном обеспечении экспериментального промышленного образца автоматического локационного искателя места повреждения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новые методы селективного ОМП ВЛ 6–35 кВ с применением активного зондирования.

2. Алгоритмы формирования дальностно-частотных портретов ЛЭП, позволяющие устранить неоднозначность (неселективность) при ОМП разветвлённых линий.

3. Результаты экспериментальных исследований и имитационного моделирования ОМП ВЛ 6–10 кВ.

4. Аппаратурная реализация экспериментального автоматического искателя места повреждения.

5. Технико-экономическое обоснование применения приборов ОМП ЛЭП в условиях неопределённости и риска.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на: Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XIV Бенардосовские чтения) (г. Иваново, 2007); Международном научном семинаре «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики». (г. Иркутск, 2008); XVIII-й Всероссийской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и техническая диаг-

ностика». (г. Нижний Новгород, 2008); XXIX сессии Всероссийского научного семинара Академии наук РФ «Кибернетика электрических систем» по тематике «Электроснабжение промышленных предприятий» (г. Новочеркасск, ЮРГТУ, 2007); III-ем международном радиоэлектронном форуме «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008 (г. Харьков, 2008).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка и трех приложений. Общий объем работы составляет 176 страниц, в том числе основного текста 131 страницы, включая 65 рисунков, 5 таблиц и 15 страниц библиографического списка (156 наименований).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформированы цель и основные задачи исследований. Показана научная новизна и практическая значимость работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и внедрении результатов исследований.

В главе 1 выполнен анализ и уточнена классификация существующих методов, алгоритмов и технических средств ОМП распределительных сетей напряжением 6–35 кВ с использованием отечественных и зарубежных источников (рис. 1).



Рис. 1. Классификация методов ОМП ЛЭП сетей 6–35 кВ

Анализ методов выявил, что для повреждений вида межфазных замыканий наиболее распространёнными в существующей практике являются методы, основанные на измерении параметров аварийного режима, а для однофазных замыканий на землю – топографические.

Основное внимание уделено ОМП ЛЭП 6–35 кВ с использованием активного зондирования сложными сигналами. Сформулированы ограничения в применении методов активного зондирования при ОМП ВЛ 6–35 кВ с использованием существующих технических средств. Причинами таких ограничений являются:

§ коэффициент потерь сигнала зондирования в линии, связанный с многочисленными ответвлениями, определяемый выражением

$$a_{\Pi} = \frac{P_{\text{изл}}}{P_{\text{отр}}} = 3^{4M}, \quad (1)$$

где M – количество отпаек, $P_{\text{изл}}$ – мощность излучённого сигнала в линию, $P_{\text{отр}}$ – мощность отражённого (принятого) сигнала;

§ коэффициент потерь распространения сигнала зондирования в линии, связанный со смешанными участками КЛ и ВЛ, значение которого может достигать 36 дБ;

§ высокий уровень наведённых помех в ВЛ, вызванный побочными радиоизлучениями в рабочей полосе частот. На ВЛ 6–35 кВ, особенно в зоне подстанций, уровень помех, наводимых с ЛЭП более высоких напряжений, может достигать среднеквадратичного отклонения на проводниках ВЛ относительно земли до 5 В с дисперсией до 0,053 Вт.

Одним из ограничений применения дистанционных методов ОМП в разветвлённых распределительных сетях является наличие зон неопределённости. В таких зонах нельзя дать однозначного ответа, где произошло повреждение ЛЭП (на каком ответвлении).

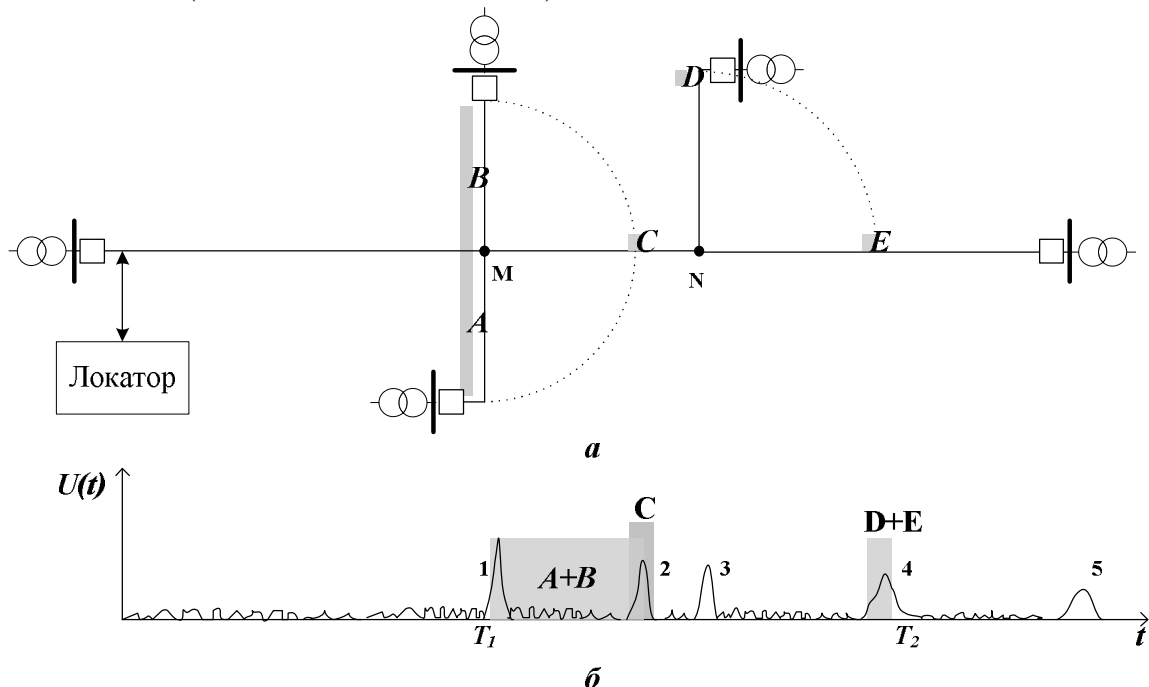


Рис. 2. Разветвлённая ЛЭП с зонами неопределённости

Пример существования зон неопределённости иллюстрирует рис. 2, а. Для методов активного зондирования условием зоны неопределённости ЛЭП ($A+B+C$) является одинаковая удалённость участков от места установки ло-

катора. На рис. 2, б изображен пример эхограммы линии с использованием метода импульсной локации.

Существующие приборы ОМП ЛЭП, в том числе и рефлектометры, не решают задачу отождествления (локализации) участков из зон неопределённости при наличии отпаяк.

Таким образом, ограничения и специфика применения активного зондирования ЛЭП 6–35 кВ требует разработки новых методов и технических средств цифровой обработки сигналов в интересах ОМП.

Глава 2 посвящена разработке и исследованию новых методов активного зондирования (ЛЭП 6–35 кВ) с использованием сложных широкополосных сигналов.

Для решения задачи однозначного определения места повреждения в зонах неопределённости ЛЭП 6–35 кВ в работе предложен метод, основанный на различиях в частотных характеристиках коэффициентов отражения равноудалённых участков ЛЭП. Однако расчёты показали, что распространена ситуация, когда частотные характеристики самих ЛЭП и трансформаторов на концах ответвлений мало отличимы и не разрешаемы в спектральной области отражённых сигналов зондирования. Для обеспечения селективности ОМП предложена установка на концах отпаяк дополнительных частотных меток (фильтров на рис. 3). Фильтры настраиваются на заданные резонансные частоты, обеспечивающие высокий коэффициент отражения. В качестве сигнала зондирования ЛЭП использован сложный широкополосный сигнал с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ). Спектральные составляющие отражённых ЛЧМ импульсов содержат резонансные частоты фильтров и различимы при спектральном анализе. Селекция повреждённого участка осуществляется по уменьшению амплитуды частоты в спектре отражённого сигнала, соответствующей резонансной частоте того фильтра, на ответвлении с которым произошло повреждение ЛЭП.

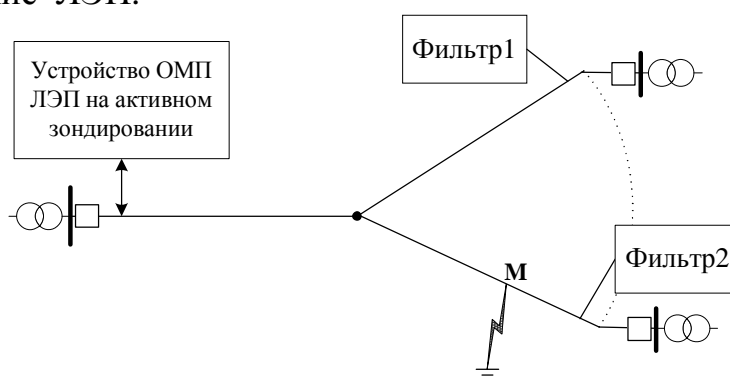


Рис. 3. Использование фильтров на концах ответвлений ЛЭП

В диссертации разработан метод одностороннего ОМП с использованием зондирования сложными сигналами и распределённой согласованной фильтрации. Особенностью метода является применение в качестве зондирующих сигналов набора сложных дискретно-кодированных сигналов, а в качестве меток, расположенных на концах ответвлений – набора фильтров. Устройство ОМП последовательно во времени излучает в ЛЭП дискретно-

кодированные сигналы. Идентификация повреждённого ответвления осуществляется по отсутствию отклика от фильтра, принадлежащего ответвлению и согласованного только лишь с одним из кодированных сигналов. Преимущество предложенного метода связано с обеспечением высоких помехозащищённости и отношения сигнал/шум, однако его реализация требует более сложных технических решений.

Для устройств активного зондирования ЛЭП разработан алгоритм согласованной фильтрации, повышающий разрешение и точность ОМП. Согласованную обработку сложных отражённых сигналов можно реализовать в частотной области с помощью дискретного (быстрого) преобразования Фурье (ДПФ, БПФ) (рис. 4). В разработанном алгоритме спектр ожидаемого сигнала обрабатывается специальным амплитудным фильтром, подчёркивающим неоднородности волнового сопротивления ЛЭП на рефлектограмме.

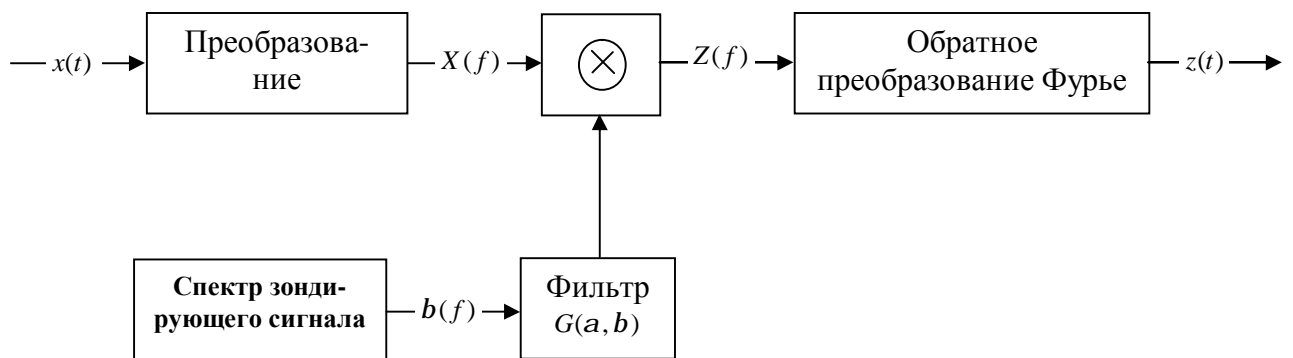


Рис.4. Схема обработки отраженных сигналов от неоднородностей ЛЭП с применением специального фильтра:

$x(t)$ – временная реализация принятого сигнала; $z(t)$ – результат обработки

Амплитудно-частотная характеристика фильтра имеет вид:

$$G(f, a) = \frac{(1 + a^2)b^2(f)}{1 + a^2b^2(f)}, \quad (2)$$

где a - изменяемый параметр, влияющий на разрешающую способность рефлектограммы, $b(f)$ - спектр зондирующего сигнала. В результате преобразования по схеме (рис. 4) реализованы процедуры, приводящие к искусственному расширению спектра сигнала и повышению разрешающей способности устройства ОМП ЛЭП на 27% (при $\alpha = 50$).

Модельные эксперименты проведены на основе рефлектограмм, полученных в ходе натуральных экспериментов на ЛЭП высокого напряжения. Так, на рис. 5 изображены рефлектограммы, связанные с согласованной обработкой ЛЧМ сигналов рис. 5 (1) и с дополнительной фильтрацией рис. 5 (2). Вертикальные линии соответствуют местам установки опор трассы ЛЭП. Из рис. видно, что рефлектограмма с повышенной разрешающей способностью имеет повышенную “изрезанность” и обладает локальными пиками, вершины которых в большей степени характеризуют места установки опор линии.

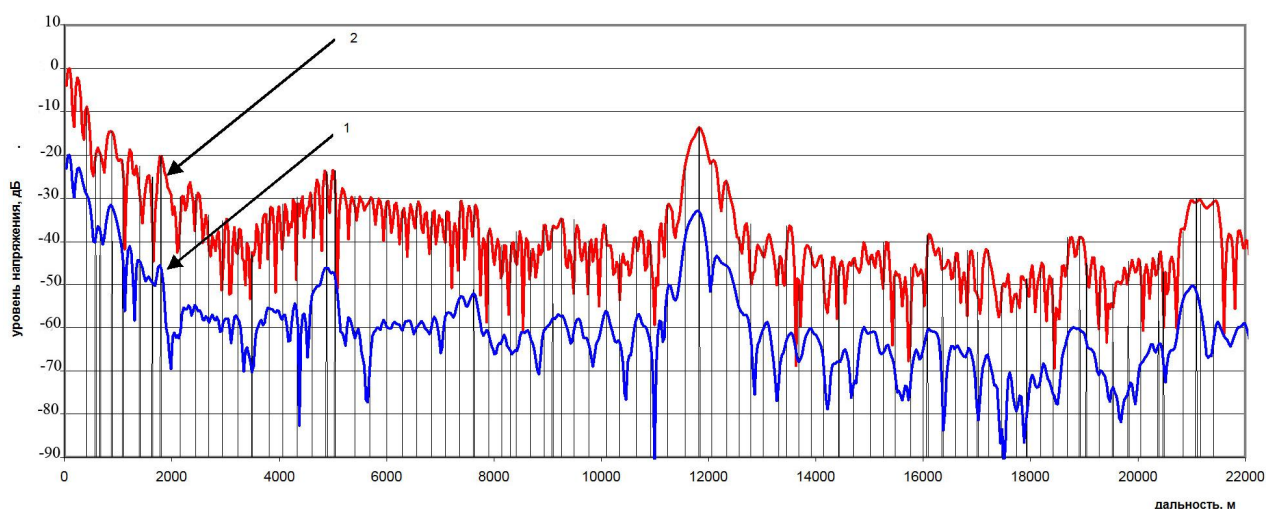


Рис. 5. Примеры рефлектограмм ЛЭП с различной разрешающей способностью:
 1 – рефлектограмма, полученная с применением согласованной обработки,
 2 – рефлектограмма, полученная с применением специального фильтра

Таким образом, применение алгоритма специальной фильтрации в дополнение к согласованной позволяет повысить разрешающую способность метода активного зондирования и проводить более детальный анализ рефлектограмм.

В диссертационной работе предложен метод объединения информации ОМП, полученной различными средствами измерения, с целью повышения точности оценки расстояния до повреждения.

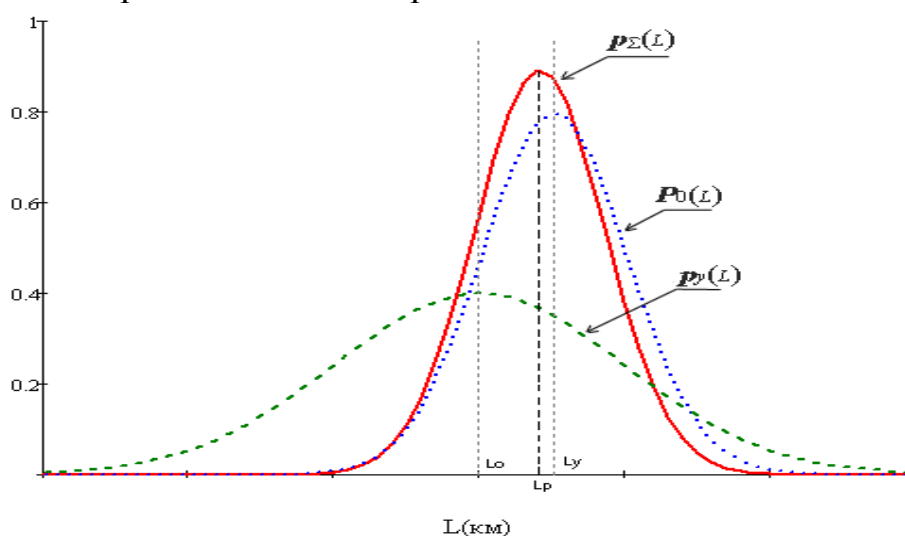


Рис. 6. Зависимость плотностей вероятностей возникновения ошибок измерения расстояния:

$p_0(L)$ - для первого, $p_y(L)$ - для второго прибора, $p_s(L)$ - результирующая

Поскольку задача ОМП ЛЭП решается в условиях воздействия случайных факторов различной природы, то оценки расстояния до повреждения приняты как случайные величины, распределённые по нормальному статистическому закону (рис. 6).

Выражение, характеризующее результирующую оценку расстояния, имеет вид

$$L_p = \frac{D_y}{D_0 + D_y} \times L_0 + \frac{D_0}{D_0 + D_y} \times L_y, \quad (3)$$

где L_0 и L_y – расстояния, D_0 и D_y – дисперсии ошибок измерения, полученные от разных технических средств.

Результирующая дисперсия рассчитывается согласно равенству

$$D_p = \frac{D_0 \times D_y}{D_0 + D_y}. \quad (4)$$

Метод позволяет повышать точность ОМП ЛЭП, используя результаты как параллельных, так и последовательных измерений. В работе приводится практический пример, иллюстрирующий принципы объединения информации и характеризующийся снижением ошибок ОМП.

Таким образом, применение активного зондирования в сочетании с разработанными методами обработки сложных сигналов позволяет существенно повысить точностные характеристики ОМП ЛЭП.

В главе 3 сформулированы технические требования к автоматическому локационному искателю мест повреждений на основе изучения параметров и конструктивных особенностей ВЛ 6–35 кВ. Разработаны новые алгоритмы цифровой обработки сигналов, представлены схемные решения для их аппаратной реализации.

Технические требования классифицированы как внешние и внутренние. К внешним – отнесены: характеристики выходного сигнала (импульсов зондирования); параметры приемной части прибора; интеграция в программно-технический комплекс подстанций; конструктивное исполнение. К основным внутренним требованиям отнесены: алгоритмы обработки сигналов, структурная схема и основные интегральные компоненты. Выполнен количественный расчёт оценочных технических характеристик прибора.

Для селекции ответвлений с повреждениями разработан алгоритм построения дальностно-частотного портрета (ДЧП) ЛЭП 6–35 кВ. Операции цифровой обработки сигналов при формировании ДЧП реализуются в два этапа. На первом этапе формируется матрица с применением скользящего временного окна вдоль рефлектограммы (одномерного дальностного портрета) ЛЭП:

$$X = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \mathbf{K} & x_{1,K} \\ \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ x_{N-K,1} & \mathbf{L} & x_{N-K,K} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где K – размер временного окна, а N – общее число дискретных отсчётов рефлектограммы. При этом размер временного окна K выбран равным длительности зондирующего сигнала.

На втором этапе осуществляется переход в частотную область посредством реализации ДПФ каждой строки матрицы X .

Таким образом, для каждого элементарного разрешаемого дальностно-участка ЛЭП получены его спектральные характеристики. Изложенный подход является новым и обеспечивает формирование перспективных методов анализа ЛЭП, базирующихся на модели линии с распределёнными параметрами и использующих многомерные аналитические конструкции.

Пример ДЧП, полученный на основе экспериментальных данных, приведён на рис. 7. Имитация повреждения ЛЭП в виде подключения дополнительной ёмкости приводит к существенным частотным изменениям в спектре на соответствующем участке дальности. Такие изменения приведены на рис. 7, 8, где **а** – ДЧП ЛЭП без повреждения, **б** – повреждение в виде ёмкости 300пФ, **в** – дифференциальный ДЧП. Для анализа неоднородности преимущество имеет дифференциальный ДЧП (рис. 7в, рис. 8в).

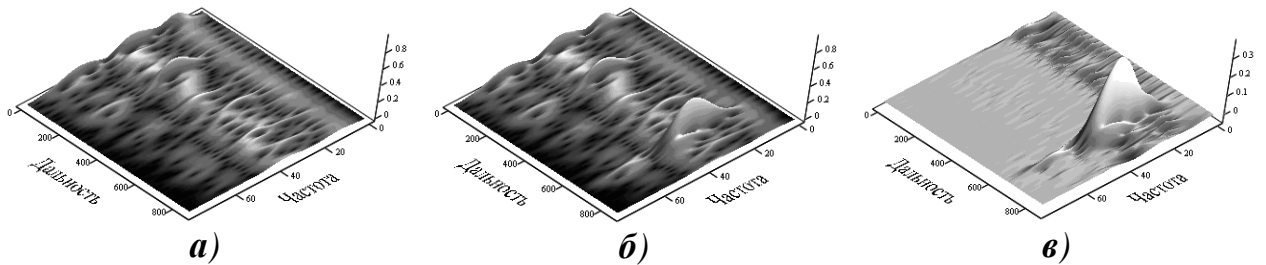


Рис.7. Дальностно-частотные портреты ЛЭП:

а – ЛЭП без повреждений; **б** – ЛЭП с емкостной неоднородностью 300пФ; **в** – дифференциальный портрет ЛЭП с неоднородностью 300пФ

На рис. 8 показаны аналогичные портреты в фотографическом виде, где уровень амплитуды пропорционален яркости изображения.

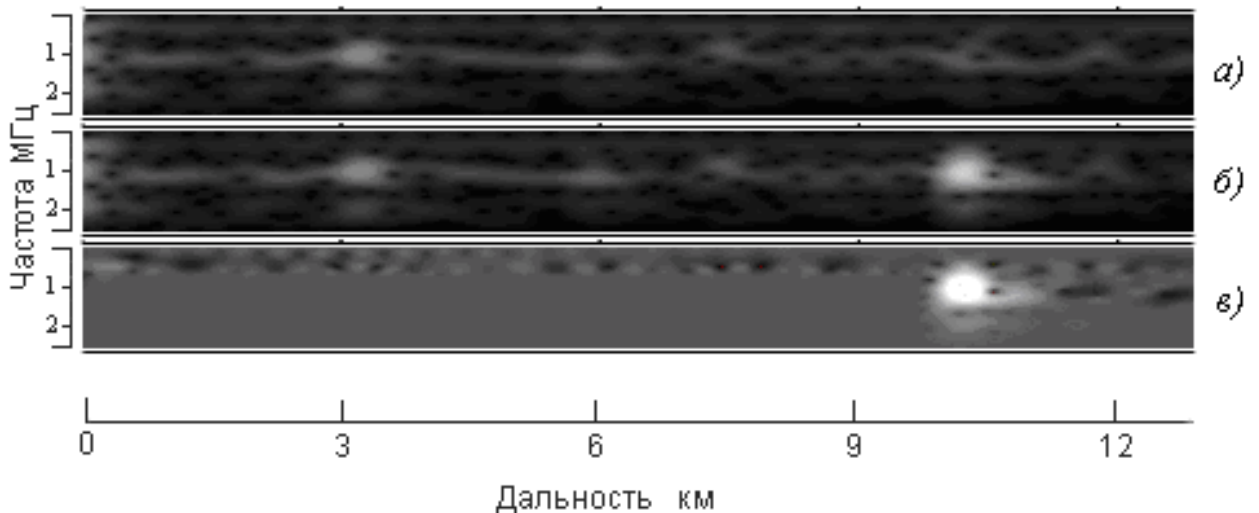


Рис. 8. Дальностно-частотные портреты ЛЭП:

а – ЛЭП без повреждений; **б** – ЛЭП с емкостной неоднородностью 300пФ; **в** – дифференциальный портрет ЛЭП с неоднородностью 300пФ

Для повышения разрешения по частоте ДЧП в работе предлагается использовать в качестве сигналов зондирования квазипериодические длинные пакеты импульсов. Периоды следования импульсов в пакетах **T** выбраны про-

порционально целым числам (преимущественно взаимно-простым), так чтобы спектральные составляющие пачек не перекрывались друг с другом. Пример таких пачек изображён на рис. 9.

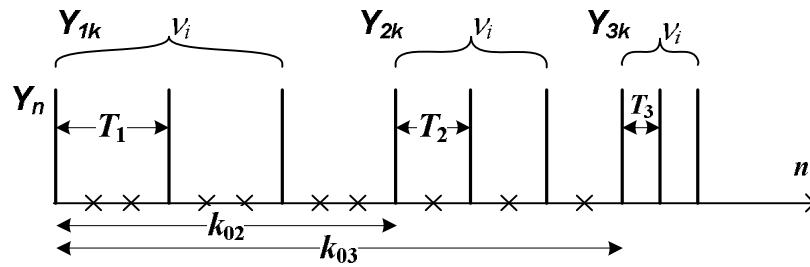


Рис. 9. Квазипериодическая пачка сигналов

На рис. 9 показаны коэффициенты разряжения $k_i = 3, 2, 1$ и число импульсов в элементах $n_i = 3$. Число импульсов в элементе пачки, коэффициенты разряжения и число таких элементов по сравнению с реальным зондированием ЛЭП уменьшено. Для каждого из элементов пачки применима процедура, аналогичная ДПФ, которая в данном случае проводится на большом интервале и при указанной на рисунке дискретизации.

Если импульсы (рис. 9) не перекрываются по времени, то спектр пачки равен сумме спектров её элементов с учётом временных сдвигов, выраженных числами $k_{02}, k_{03} \dots$ имеет вид

$$G_m = \sum_{i=0}^{l-1} G_{mi} \cdot \exp\left(\frac{-j2\pi m \cdot k_{0i}}{n}\right), \quad (6)$$

где

$$G_{mi} = \sum_{c_i=0}^{n_i-1} Y_{c_i} \cdot \exp\left(\frac{-j2\pi m \cdot k_i \cdot c_i}{n}\right) = \sum_{c_i=0}^{n_i-1} Y_{c_i} \cdot \exp\left(\frac{-j2\pi m \cdot c_i}{n_i}\right) \quad (7)$$

– спектры элементов последовательности.

При этом ДПФ элементов последовательности на интервале n с учётом коэффициентов разряжения k_i заменяет ДПФ на интервале n_i без учёта разряжения.

Таким образом, на основании выражений (6, 7) производится повторное ДПФ от ДПФ элементов квазипериодической последовательности. При этом разрешающая способность по частоте увеличивается в число раз, приблизительно равное числу элементов последовательности (на рис. 9 приблизительно в 3 раза), что при формировании ДЧП ЛЭП является существенным.

Возможность более тонкого спектрального анализа представлена за счёт повышенной разрешающей способности. Область практически однозначного спектрального анализа ограничена полосой частот, соответствующей минимальной частоте следования импульсов. Однако такая область достаточна для анализа ряда спектральных компонентов, характеризующих повреждения отдельных участков ЛЭП.

Применение сложных ЛЧМ зондирующих сигналов перспективно для повышения точности ОМП ЛЭП. Однако дисперсионные свойства ЛЭП сказываются на характере распространения широкополосных сигналов по линии, а также процессе и результатах их цифровой обработки. Новый адап-

тивный алгоритм, предложенный в работе, компенсирует влияние характеристик ЛЭП на локацию повреждений при время-частотной зависимости зондирующих сигналов.

Характеристики время-частотной зависимости зондирующих сигналов связывают сечениями двумерной автокорреляционной функции («телом неопределённости»). Для рассматриваемого ЛЧМ сигнала с колокольной огибающей функция определяется, например, следующим соотношением

$$r_x(t, \omega) = \frac{1}{p} \exp \left[\frac{i}{\hat{1}} - a(t - t_0) - \frac{(\omega - b(t - t_0) - \omega_0)^2}{\hat{1}} \right] \frac{\ddot{y}}{\hat{p}}. \quad (8)$$

где a – параметр, характеризующий ширину колокольной огибающей; b – скорость нарастания частоты ω .

Эта функция определяет временные искажения при распространении широкополосных сигналов, таких как ЛЧМ. Высокоточное ОМП ЛЭП невозможно осуществить без учёта этой зависимости. В частности, ограничения в полосе пропускания ЛЭП на высоких частотах сказываются на характеристиках согласованной фильтрации рефлектометра. Рис. 10 отображает сечение автокорреляционной функции («тела неопределённости») и иллюстрирует процесс возникновения временной ошибки dt из-за искажения ЛЧМ сигнала при распространении его по ЛЭП.

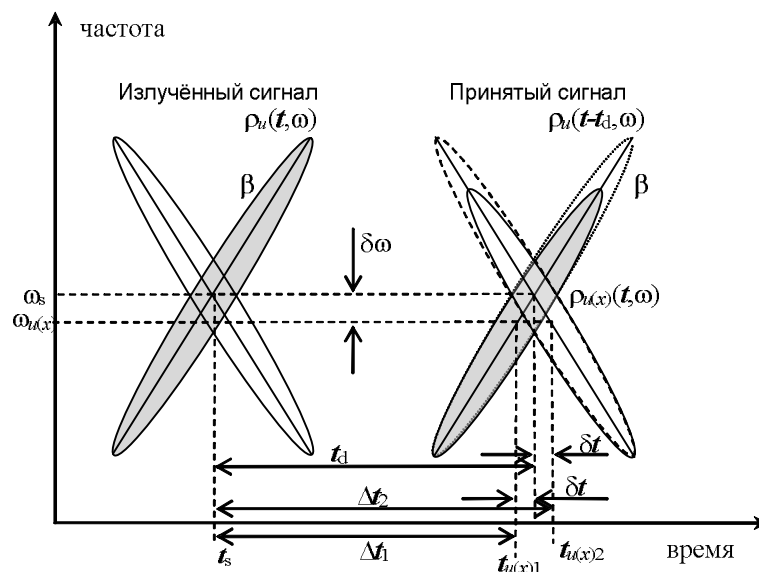


Рис. 10. Время-частотные зависимости при распространении двух ЛЧМ сигналов с разным наклоном модуляционной характеристики

В предлагаемом способе компенсации ошибки dt производится излучение ЛЧМ сигналов с взаимно противоположной девиацией (наклоном модуляционной характеристики). При этом для одного из сигналов ошибка имеет положительный знак, а для другого – отрицательный. Сумма результатов измерения расстояния до повреждения ЛЭП для двух указанных импульсов приводит к взаимной компенсации ошибок и получению требуемого точного результата.

Таким образом, применение в качестве зондирующих ЛЧМ сигналов с разным наклоном модуляционных характеристик позволяет исключить ошибки ОМП, вызванные диспергирующими свойствами ЛЭП.

Структурная схема опытного образца автоматического локационного искателя мест повреждения (АЛИМП), разработанная автором, представлена на рис. 11.

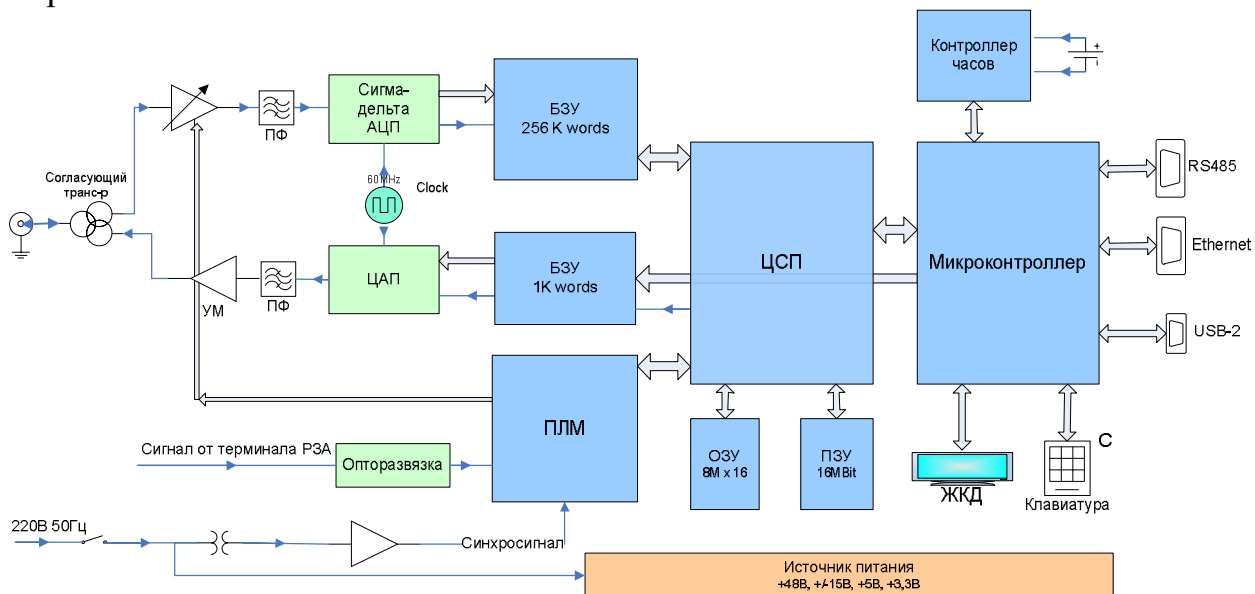


Рис. 11. Общая структурная схема автоматического локационного искателя мест повреждений ЛЭП

Функции преобразования аналоговых входных и выходных сигналов выполняют интегральные преобразователи АЦП и ЦАП. Алгоритмы цифровой обработки сигналов выполняет цифровой сигнальный процессор (ЦСП), построенный по Супер-Гарвардской архитектуре, которая оптимизирована для математических вычислений, таких как БПФ, КИХ фильтрация и др. Организацию временной диаграммы работы прибора осуществляет программируемая логическая матрица (ПЛМ).

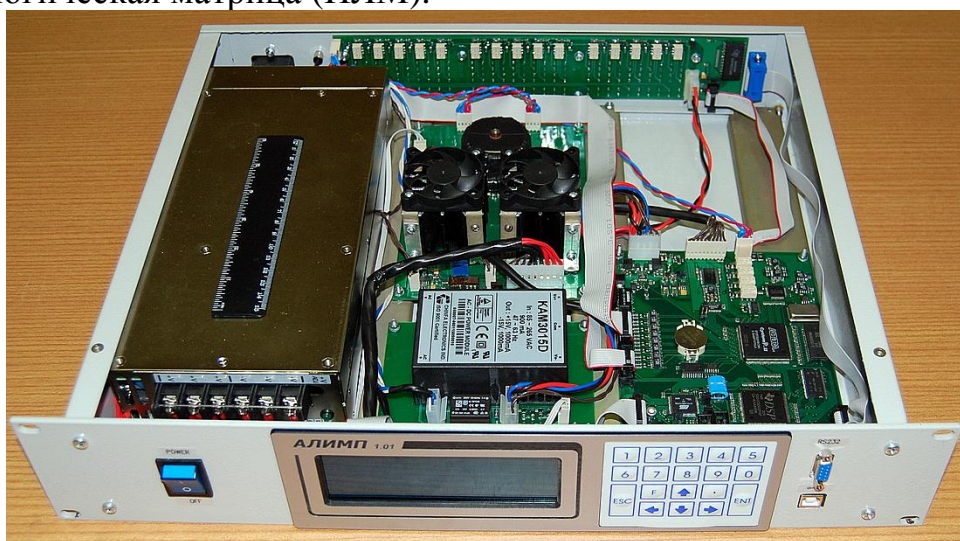


Рис. 12. Экспериментальный образец автоматического локационного искателя мест повреждений ЛЭП

Функцию общего управления прибором и организацию его связи с внешними устройствами выполняет микроконтроллер с RISC архитектурой. В структуре и программном обеспечении прибора заложена возможность, как его работы в составе АСУ ТП подстанций, так и в режиме самостоятельного функционирования. Управление прибором в автономном режиме осуществляется с передней панели, приведённой на рис. 12.

Характеристики и параметры спроектированы с учётом применения устройства не только на разветвлённых ВЛ 6 – 35 кВ, но и на магистральных ВЛ более высокого напряжения.

Таким образом, разработанные технические требования к прибору и новые алгоритмы цифровой обработки сигналов при ОМП ЛЭП позволили реализовать опытный вариант устройства АЛИМП ЛЭП 6 – 35 кВ.

Глава 4 посвящена экспериментальным исследованиям новых методов и алгоритмов на основе АЛИМП, а также оценке эффективности применения ОМП на ВЛ 6 – 10 кВ.

Исследования проведены в 2008г. на ВЛ 10 кВ №1013 ПС-110/35/10 кВ «Княгининская» и на ВЛ 6 кВ №638 ПС-110/6 кВ «Левобережная» – «Льнозавод», находящихся в эксплуатации филиала ОАО «МРСК Центра и Приволжья» – «Нижновэнерго» с привлечением специалистов службы диагностики ОАО «Инженерный центр» (г. Н. Новгород).

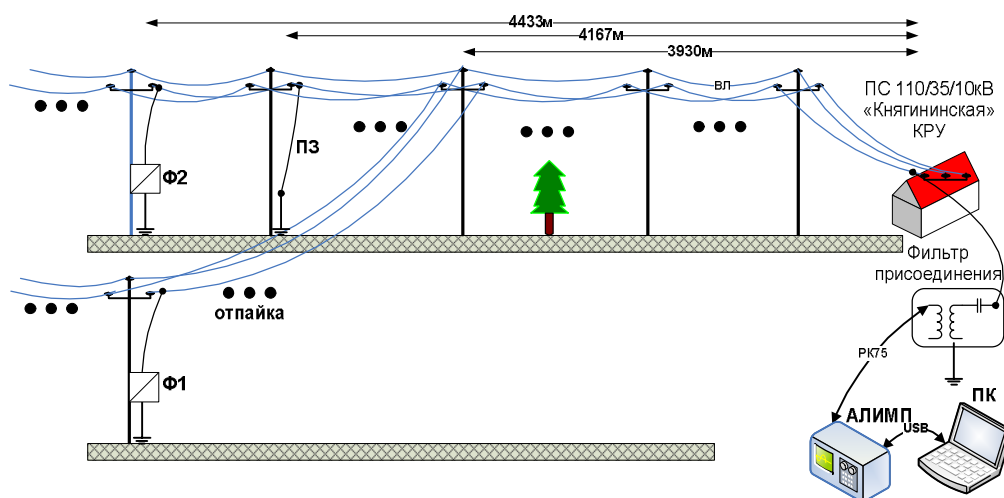


Рис.13. Структура экспериментального комплекса на ВЛ 10кВ с ответвлением

Замыкание на землю имитировалось с помощью установки на фазу «В» переносного заземления (ПЗ) на участке, расположенном за разветвлением (рис. 13). Для выделения (селекции) ответвлений, на которых произошло замыкание на землю, установлены частотные метки в виде резонансных фильтров (Ф1 и Ф2) на равноудалённом расстоянии. Фильтры представляют собой последовательное соединение конденсатора и катушки индуктивности. Резонансные частоты фильтров выбраны 700 кГц и 1400 кГц с максимальной различимостью резонансных кривых в рабочей полосе частот зондирующего сигнала 200 – 2400 кГц.

В результате активного зондирования ВЛ прибором АЛИМП построены рефлектограммы, изображённые на рис. 14.

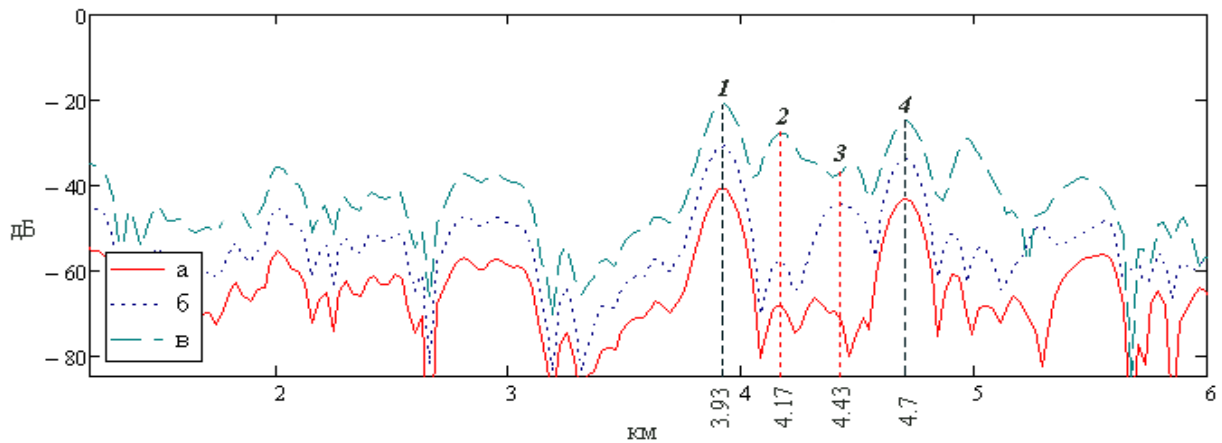


Рис.14. Рефлектограммы ВЛ10 кВ с ответвлениями:
а - ВЛ без замыкания и фильтров, *б* – ВЛ с установленными фильтрами на расстоянии 4433 м, *в* – ВЛ с замыканием на землю на расстоянии 4167 м

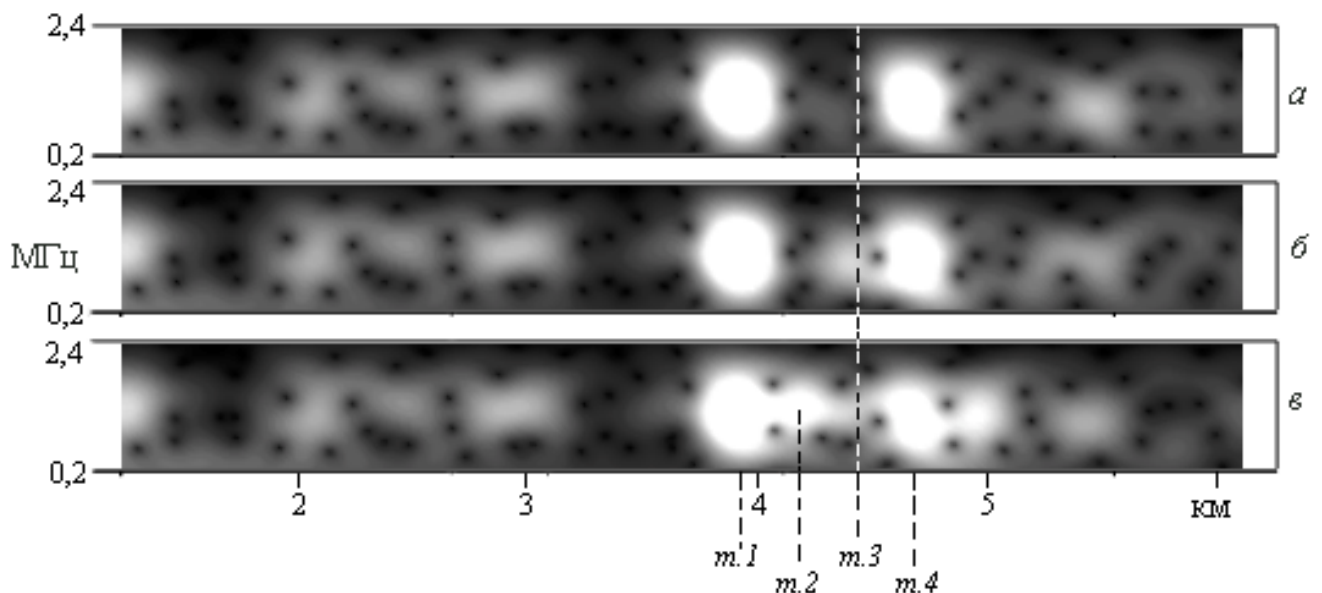


Рис.15. Фотографические дальностно-частотные портреты ВЛ10 кВ с ответвлениями:
а – ВЛ без замыкания и фильтров, *б* – ВЛ с установленными фильтрами на расстоянии 4433 м, *в* – ВЛ с замыканием на землю на расстоянии 4167 м

Вычисленные дальностно-частотные портреты (ДФП) ВЛ с окном анализа, равным длительности ЛЧМ импульса зондирования, представлены в фотографическом виде на рис. 15. По оси абсцисс отложено расстояние в км, по оси ординат – частота в МГц. Увеличению уровня отраженного сигнала соответствует увеличение яркости на изображении. Места на ДФП ВЛ, обозначенные точками 1, 2, 3 и 4 соответствуют одноимённым точкам на рефлектограммах (рис. 14).

Участок длиной 530 м (*m.1* – *m.3*) в изометрии отображён на рис. 16.

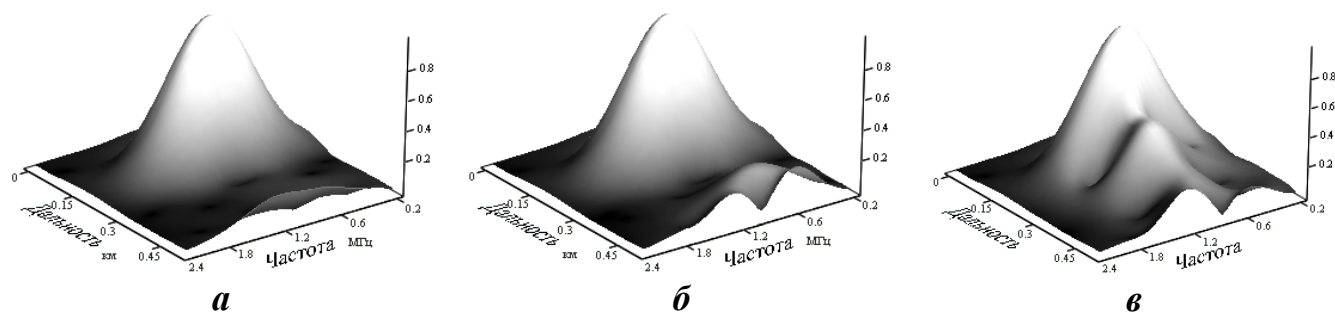


Рис.16. Изометрические дальностно-частотные портреты участка ВЛ 10 кВ:
а – ВЛ без замыкания и фильтров, **б** – ВЛ с установленными фильтрами, **в** – ВЛ с замыканием на землю и установленными фильтрами

Вертикальные сечения всех трёх ДЧП в *m.3* (4,43 км), где установлены резонансные фильтры, представлены на рис. 18.

Выполненный анализ рис. 15 – 17 показал, что при замыкании на землю амплитуда спектральных составляющих вблизи частоты 700 кГц уменьшается приблизительно на 6 дБ, а вблизи частоты 1,4 МГц остаётся практически неизменной. Уменьшение амплитуды отражённого сигнала на резонансной частоте фильтра Ф2 свидетельствует о том, что замыкание на землю произошло на участке с частотной меткой Ф2.

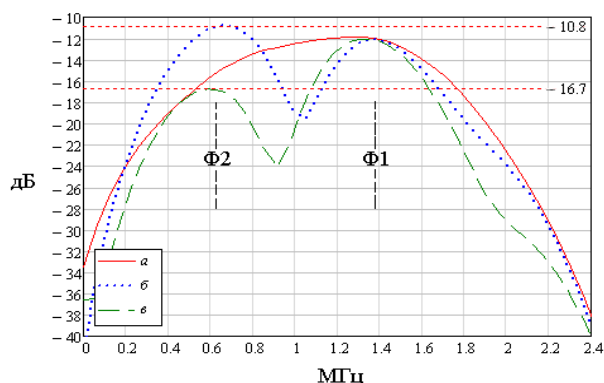


Рис.17. Спектры отражённых сигналов от мест установки резонансных фильтров Ф1 и Ф2:
а – ВЛ без замыкания и фильтров; **б** – ВЛ с установленными фильтрами на расстоянии 4433 м; **в** – ВЛ с замыканием на землю на расстоянии 4167 м

Таким образом, анализ полученных экспериментальным путём дальностно-частотных портретов для ВЛ 10 кВ с разветвлённой структурой позволяет локализовать место повреждения ЛЭП вида однофазного замыкания на землю.

Вторая серия экспериментальных измерений проводилась на ВЛ 6 кВ с изолированной нейтралью без ответвлений длиной 9,6 км. Целью данного эксперимента являлось исследование чувствительности прибора АЛИМП к различным неоднородностям: приближение кустарниковой растительности к токоведущим частям ВЛ на недопустимые расстояния, влияние изменения емкостных и активных сопротивлений на уровень отражённого сигнала.

Рефлектограммы, полученные в ходе эксперимента на ВЛ 6 кВ, приведены на рис. 20.

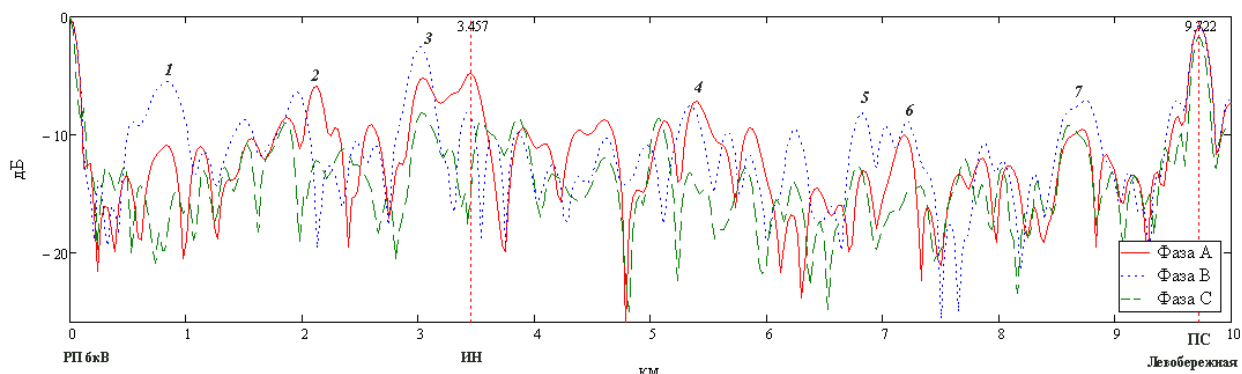


Рис. 20. Рефлектограммы ВЛ 6 кВ

Зондирование проводилось по всем трём фазам. Анализ рефлектограмм выявил семь наиболее критичных участков ВЛ, пронумерованных точками 1 – 7 (рис. 20). В результате обхода ВЛ 6 кВ на местности в точках, отмеченных на рефлектограмме, подтверждено приближение кустарниковой растительности к токоведущим частям ВЛ на недопустимые расстояния.

В следующей части экспериментальных исследований на одной из опор на фазу «А» устанавливалась искусственная неоднородность (ИН) на расстоянии 3457 м от места зондирования. ИН представляла собой набор активных сопротивлений и конденсаторов различных номиналов с возможностью их комбинированного переключения.

Общие характеристики чувствительности прибора при изменениях активного и реактивного сопротивления ЛЭП 6 кВ приведены на рис. 21.

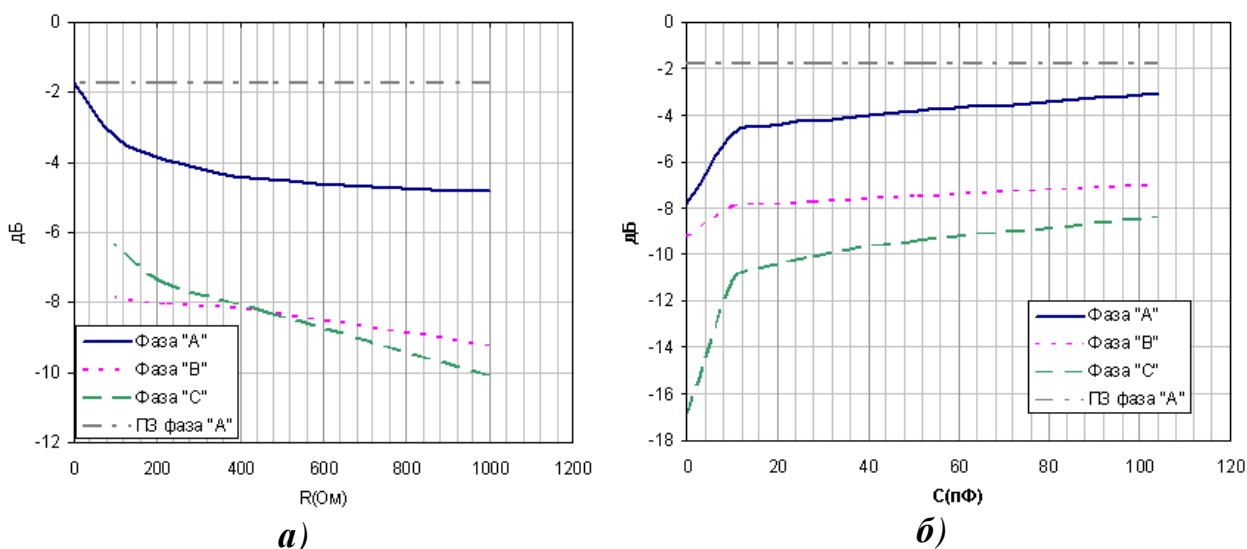


Рис. 21. Изменение амплитуды отражённого сигнала на изменение параметров искусственной неоднородности:

a – изменение активного сопротивления, *б* – изменение ёмкостного сопротивления

Полученные зависимости характеризуют потенциальные возможности АЛИМП по обнаружению повреждений, в том числе наиболее распростра-

нённых самоустраняющихся замыканий на землю, а также выявлению нарушений изоляции для решения задач диагностики ВЛ 6–35 кВ.

В диссертационной работе представлено технико-экономическое обоснование и оценка эффективности применения приборов ОМП ЛЭП. Решение задачи оценки эффективности зависит от структуры электроэнергетической системы, а также от объёмов и характера информации, используемой для расчётов. Такая задача носит вероятностный характер, определяемый стохастическим характером электропотребления, режимов, конфигурации энергосистем и др. Поэтому решение задачи оценки эффективности предложено с помощью вероятностных методов. В зависимости от объёма используемой априорной информации каждой из альтернатив рассмотрены примеры расчётов для одного или несколько исходов:

- один исход предлагает единственную оценку (детерминированный подход с полной определённойностью);
- несколько исходов, каждый из которых имеет определённую вероятность появления. Оценка производится в условиях риска;
- несколько исходов с неопределёнными вероятностями появления и предпочтения. Оценка производится в условиях неопределённости.

Для всех трёх вариантов получены расчётные соотношения не только сроков окупаемости и экономического эффекта, но и зон обхода при заданной точности ОМП ЛЭП.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность селективного ОМП с высокой точностью разветвлённой ЛЭП с применением активного зондирования, при этом оценки эффективности применения таких приборов характеризуются быстрым сроком окупаемости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполненный анализ состояния существующих технических средств и методов показал, что задача ОМП ЛЭП 6–35 кВ не имеет окончательного решения, а в эксплуатирующих организациях отсутствуют приборы дистанционного ОМП таких ЛЭП.

2. Для активного зондирования ВЛ 6–35 кВ предложены новые методы определения принадлежности повреждения к конкретному ответвлению с применением линейно-частотно-модулированных и дискретно-кодированных сигналов, а также специальные фильтры (метки) на концах отпаек ЛЭП.

3. Исследовано применение специальных сложных сигналов и алгоритмов их цифровой обработки (фильтрации) для повышения разрешающей способности и точности ОМП ВЛ. Предложенный вариант алгоритма обработки отражённых сигналов позволяет повысить разрешающую способность по расстоянию на 27%.

4. Разработаны статистические методы объединения информации о месте повреждения ЛЭП, полученной различными средствами и на основе различных физических измерений с целью формирования точных оценок расстояния и сокращения зоны обхода линии. Методы позволяют повышать точ-

ность ОМП ЛЭП, используя результаты как параллельных, так и последовательных измерений.

5. Разработаны селективные алгоритмы идентификации повреждений с учётом ответвлений методами активного зондирования, на основе которых имитационным моделированием получены дальностно-частотные портреты ЛЭП. Предложенный способ применения длинных квазипериодических пакетов импульсов приводит к повышению разрешающей способности АЛИМП по частоте в несколько раз и реализации более информативного анализа ЛЭП.

6. Разработан алгоритм компенсации ошибок ОМП в случае частотно-временной зависимости параметров сложных зондирующих сигналов и ЛЭП. Алгоритм предполагает излучение сигналов с разным (противоположным) наклоном модуляционных характеристик с последующим суммированием результатов зондирования.

7. Сформулированы требования к автоматическому локационному искателю мест повреждений (АЛИМП), которые определяются особенностями конструктивного исполнения и параметрами ЛЭП 6–35 кВ. Предложены варианты интеграции АЛИМП в комплекс АСУ ТП подстанций. Разработаны обоснованные схемотехнические решения АЛИМП, а также аппаратно реализовано экспериментальное устройство на современной элементной базе.

8. Экспериментальные исследования с применением разработанного АЛИМП подтвердили теоретические разработки по определению принадлежности повреждения конкретному ответвлению ВЛ 6–35 кВ методом частотной селекции. Получена высокая чувствительность прибора, которая позволяет регистрировать места пересечения ЛЭП с объектами, находящимися на расстоянии менее допустимых и по анализу рефлектограммы, определять техническое состояние линии с целью предупреждения повреждений.

9. В условиях рыночных отношений, отсутствия полной информации о режимах электроэнергетической системы и потребителях предложены алгоритмы оценки эффективности внедрения устройств ОМП ЛЭП, основанные на вероятностных подходах. Они позволяют получать оценки эффективности в условиях неопределённости и риска.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. *Куликов А.Л., Петрухин А.А., Кудрявцев Д.М.* Диагностический комплекс по исследованию линий электропередач // Изв. Вузов. Проблемы энергетики. – 2007. - № 7-8. – С.17-22.
2. *Куликов А.Л., Петрухин А.А., Кудрявцев Д.М.* Анализ подходов к дистанционному определению нарушений изоляции магистральных линий электропередач // Изв. Вузов. Проблемы энергетики. – 2007. - № 9-10. – С.52-62.
3. *Куликов А.Л., Петрухин А.А., Кудрявцев Д.М.* Аппаратура исследования метода активного зондирования линий электропередач// Научные технологии. – 2008. - №6. – С. 29-33.

4. *Кудрявцев Д.М., Куликов А.Л., Петрухин А.А.* Анализ подходов к дистанционному определению нарушений изоляции.// Научные технологии. – 2008. - №12. – С. 22-27.
5. *Куликов А.Л., Петрухин А.А.* Применение сложных модулированных сигналов в защитах ЛЭП абсолютной селективности // Вестник ИГЭУ. –2008. – Вып. 2. – С. 89-93.
6. *Куликов А.Л., Петрухин А.А., Колчин Д.И.* Вариантный анализ модуляции широкополосной связи по линиям электропередачи высокого напряжения. // Изв. Вузов. Электромеханика. – 2008. - Спец. выпуск. – С.83.

Публикации в других изданиях и патенты

7. *Патент* на полезную модель №66641 Российской Федерации, МПК H04B 3/54. Устройство широкополосной модуляции и передачи данных по электросети / *Куликов А.Л., Куликов Д.А., Петрухин А.А.* – Оpubл. 10.09. 2007, Бюл. № 25.
8. *Патент* на полезную модель № 76139 Российской Федерации, МПК G01R 31/11. Устройство для определения мест повреждения линий электропередач распределительных сетей. / *Куликов А.Л., Петрухин А.А.* – Оpubл. 10.09. 2008, Бюл. № 25.
9. *Куликов А.Л., Кудрявцев Д.М., Петрухин А.А.* Экспериментальные исследования возможности дистанционного контроля подвесной и натяжной изоляции линий электропередач // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XIV Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, - 2007. – Т. 1. – С. 148.
10. *Куликов А.Л., Кудрявцев Д.М., Петрухин А.А.* Анализ чувствительности методов диагностики на активном зондировании к измерениям параметров ЛЭП // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XIV Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, – 2007. – Т. 1. – С. 149.
11. *Мисриханов М.Ш., Куликов А.Л., Кудрявцев Д.М., Петрухин А.А.* Диагностика линий электропередачи с формированием рефлектограмм повышенной разрешающей способности.// Тез. докл. Междунар. научный семинар «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики». – Иркутск ИСЭМ СО РАН, – 2008. – С. __.
12. *Петрухин А.А., Куликов А.Л., Кудрявцев Д.М., Колчин Д.И.* Диагностирование и определение мест однофазных повреждений в электрических сетях 6 – 35 кВ.// Тез. докл. XVIII Всероссийская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». – Нижний Новгород ННГУ, – 2008. – С. 37.
13. *Мисриханов М.Ш., Куликов А.Л., Колчин Д.И., Петрухин А.А., Кудрявцев Д.М.* Экспериментальные исследования характеристик воздушных ЛЭП для создания широкополосных систем обмена информацией с подстанций.// Тез. докл. Междунар. научный семинар «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики». – Иркутск ИСЭМ СО РАН, – 2008. – С. __.

14. Куликов А.Л., Колчин Д.И., Петрухин А.А., Кудрявцев Д.М. Активное зондирование линий электропередачи линейно-частотно-модулированными сигналами.// III-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008. Сборник научных трудов. Том. I. Международная конференция “Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации”. Ч. 1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2008. – 374 с. Стр. 256-259.

ПЕТРУХИН Андрей Алексеевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП 6-35 кВ НА ОСНОВЕ АКТИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Заказ №__ . Формат 60x84 1/16.

Печать офсетная. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 100 экз.