

---

На правах рукописи



**Кудрявцев Дмитрий Михайлович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЛОКАЦИОННЫХ МЕТОДОВ  
ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ  
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110-750 кВ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново – 2007

Работа выполнена на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
**Мисриханов Мисрихан Шапиевич**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
**Назарычев Александр Николаевич**

кандидат технических наук, профессор  
**Белов Владимир Павлович**

Ведущая организация: ОАО "Институт Энергосетьпроект", г. Москва

Защита состоится 9 ноября 2007 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

Отзывы (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.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Автореферат разослан 5 октября 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.064.01,  
доктор технических наук, профессор



**Мошкарин А.В.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Надежное электроснабжение потребителей электрической энергии зависит от работы Единой Национальной Электрической Сети (ЕНЭС), в состав которой входят самые протяженные и одни из наиболее повреждаемых элементов - линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения 110-750 кВ (далее линии электропередач - ЛЭП). Линии электропередачи транспортируют большие потоки мощности (электрической энергии) на десятки и сотни километров, осуществляя электроснабжение удаленных от источников генерации потребителей. Отключения таких ЛЭП может привести к значительным ущербам для потребителей электрической энергии, а также разделению энергосистем. Актуальной является задача не только исключить аварийные режимы работы при коротких замыканиях на ЛЭП с помощью средств релейной защиты и автоматики (РЗА), быстро и точно отыскать место повреждения с помощью средств определения мест повреждения (ОМП), но и предупреждать аварийные режимы работы с помощью дистанционных методов и средств контроля изоляции ЛЭП.

До сих пор, дистанционным способом осуществляли поиск только места повреждения, как правило, короткого замыкания. Также решались задачи контроля изоляции ЛЭП средствами контактного и бесконтактного исполнения. Вышеприведенные средства применяли при осмотрах линий электропередачи выездными бригадами или инженерно-техническим персоналом.

В работе на основе методов активной и пассивной локализации предлагается обеспечить реализацию дистанционного принципа для контроля изоляции ЛЭП, что позволит в режиме реального времени получать информацию об отклонениях изоляции от нормативных уровней с рабочих мест диспетчерского и другого персонала энергосистем.

Существенный вклад в развитие теории и техники контроля изоляции высоковольтных линий электропередачи, дистанционных принципов ОМП и техники высокого напряжения внесли Г.Н. Александров, Е.А. Аржанников, Я.Л. Арцишевский, Г.И. Атабеков, В.В. Базуткин, И.Г. Барг, В.В. Бургсдорф, В.Ф. Быкадоров, А.Н. Висящев, А.И. Долгинов, А.Ф. Дьяков, Н.П. Емельянов, К.П. Кадомская, М.В. Костенко, Г.С. Кучинский, В.В. Ларионов, М.Л. Левинштейн, В.И. Левитов, А.И. Левиуш, Б.К. Максимов, Е.М. Медведев, М.Ш. Мисриханов, В.Ф. Миткевич, Ю.А. Митькин, А.Н. Назарычев, Г.С. Нудельман, Б.В. Папков, Г.Е. Поспелов, Д.В. Разевиг, В.А. Савельев, А.И. Таджикибаев, Н.Н. Тиходеев, Г.М. Шалыт, В.А. Шуин, Н.Н. Щедрин, F. Amarh, R.S. Gorur, G.G. Karady, M.S. Mamis, Z.M. Radojevic, и др. Отдельно необходимо выделить работы Н.Н. Тиходеева, с чьим именем связано обобщение отечественного и зарубежного опыта и развитие работ по исследованию изоляции воздушных линий электропередачи.

Таким образом, актуальность предлагаемых в диссертации методов и средств дистанционного контроля изоляции высоковольтных линий электропередачи обосновывается:

- сокращением числа аварийных отключений, а следовательно снижения количества и длительности перебоев электроснабжения;
- организацией системы мониторинга за техническим состоянием, а следовательно рациональная организация ремонтной кампании и др.

**Цель работы.** Анализ существующих методов контроля и диагностики высоковольтных линий электропередачи 110-750 кВ и разработка предложений по совершенствованию технических средств.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- анализ и разработка классификации методов и средств контроля изоляции воздушных линий электропередачи, обоснование применения дистанционного подхода к определению снижения изоляции;
- разработка новых методов и средств контроля изоляции высоковольтных линий электропередачи на основе пассивной и активной локации с применением быстродействующих микропроцессорных устройств;
- проведение экспериментальных исследований по дистанционному контролю изоляции, выявление диагностических параметров и оценка чувствительности к уровням изоляции высоковольтных линий электропередачи.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются методы и технические средства дистанционного контроля изоляции высоковольтных линий электропередачи. Предметом исследования являются диагностические параметры и оценка чувствительности методов и средств контроля к изменениям изоляции высоковольтных линий электропередачи относительно нормативных уровней.

**Методика исследования.** Разработанные в диссертационной работе научные положения используют нетрадиционные принципы анализа уровней изоляции линий электропередачи. Решение поставленных в работе задач базируется на достижениях фундаментальных наук, таких, как теоретические основы электротехники, техника высоких напряжений, радиотехника, прикладной математический анализ и математическая статистика.

**Достоверность и обоснованность результатов работы.** Разработанные в диссертационной работе теоретические положения реализованы в новых технических решениях и апробированы экспериментально на высоковольтных линиях электропередачи. Результаты экспериментов не противоречат и дополняют результаты, полученные в исследуемой области другими авторами.

**Научная новизна и значимость полученных результатов:**

1. Сформулированы основные требования к разрабатываемым методам и техническим средствам контроля изоляции на основе анализа недостатков существующих методов и характеристик ЛЭП.
2. Разработаны методы и средства контроля изоляции высоковольтных линий электропередачи 110-750 кВ, обеспечивающие возможность дистанционной регистрации мест ее изменений с подстанций.
3. Впервые получены точностные характеристики определения мест снижения изоляции высоковольтных линий электропередачи 110-750 кВ с подстанций дистанционным способом на основе локационных подходов.

4. На основе экспериментальных исследований получены диагностические параметры определения мест снижения изоляции высоковольтных линий электропередачи 110-750 кВ, обладающие более высокой чувствительностью к ее изменениям.

5. Впервые установлены предаварийные уровни изоляции высоковольтных линий электропередачи 110-750 кВ, определяемые с подстанций дистанционным способом.

**Практическая ценность работы:**

1. Результаты натурных испытаний подтвердили теоретические изыскания, доказали возможность регистрации ранней стадии развития повреждения за счет определения мест снижения уровней изоляции на основе локационных подходов дистанционным способом с подстанций.

2. Разработаны и реализованы программы экспериментальных исследований по дистанционному контролю изоляции на действующих высоковольтных линиях электропередачи.

3. Разработаны и апробированы технические средства, которые могут стать прототипами для создания промышленных образцов приборов дистанционного контроля изоляции высоковольтных линий электропередачи 110-750 кВ на основе локационных подходов.

**Реализация результатов работы.** Экспериментальные результаты по дистанционному контролю изоляции высоковольтных линий электропередачи получены в период 2004-2007 гг. в ходе натурных экспериментов на объектах филиала ОАО «ФСК ЕЭС» – Нижегородское предприятие магистральных электрических сетей.

Выводы и результаты экспериментальных исследований разработанных методов и технических средств дистанционного контроля изоляции используются для рациональной эксплуатации и ремонта ЛЭП, а также для создания промышленных приборов для установки на подстанциях магистральных электрических сетей.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Фазовый метод, методы с применением частотно-манипулированных и линейно-частотно-модулированных сигналов и средства контроля изоляции высоковольтных линий электропередачи 110-750 кВ.

2. Применение эхограммы, полученной на основе разработанных методов, в качестве портрета, характеризующего снижения уровня изоляции высоковольтной линии электропередачи 110-750 кВ.

3. Применение коэффициента отражения и отношения сигнал/шум в качестве диагностических параметров для определения уровня изоляции высоковольтных линий электропередачи 110-750 кВ.

4. Стандартизация уровня помех, допустимого уровня изоляции, предаварийного уровня снижения изоляции, аварийного уровня снижения изоляции высоковольтных линий электропередач.

**Личный вклад соискателя.** В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит анализ существующих методов и средств контроля изоляции линий электропередачи, предложения по совершенствованию технических средств, выполнение программ экспериментальных исследований, анализ результатов.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на 4 международных и 2 всероссийских научно-технических конференциях, в том числе на Молодежной научно-технической конференции Нижегородского Государственного Технического Университета (Нижний Новгород, 2004 г.), научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики» (Нижний Новгород, 2004 г.), Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Бенардосовские чтения, г. Иваново, 2005 г.), Международной научно-технической конференции ПЭИПК (Минск, 2004 г.), 77-ом заседании Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем электроэнергетики» (г. Вологда, 2007 г.), II Международном радиоэлектронном форуме «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы» (г. Харьков, 2006 г.).

**Публикации.** По теме диссертации автором опубликовано 9 печатных работ, получен 1 патент на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, библиографического списка и трех приложений. Общий объем работы составляет 214 страниц, в том числе основного текста 152 страниц, включая 64 рисунка, 19 таблиц и 13 страниц библиографического списка (148 наименований).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассматриваются актуальность, цель, основные задачи исследований, научная новизна и практическая ценность диссертации. Приводятся основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и внедрении результатов исследований.

Основные повреждения ЛЭП любого класса напряжения связаны со снижением изоляции ниже нормативных уровней. Наиболее важными задачами являются определение мест снижения изоляции протяженных магистральных ЛЭП.

Технические средства дистанционного контроля изоляции в составе оборудования подстанции на настоящее время отсутствуют, как у нас в стране, так и зарубежом. Поэтому перспективным направлением являются разработка новых методов и средств контроля изоляции высоковольтных линий электропередачи на основе пассивной и активной локации, использующие высокочастотные излучения и измерения. Реализация этого направления обеспечивается стремительным развитием цифровых средств формирования и обработки сигналов, а также достижениями в развитии приборов определения мест повреждений с использованием зондирующих сигналов.

Построение аппаратуры дистанционного контроля изоляции позволит:

- сократить число аварийных отключений;
- организовать контроль за техническим состоянием ЛЭП для рациональной организации ремонтной кампании;
- осуществить контроль за потерями электрической энергии с целью обнаружения мест утечки;
- создать охранную сигнализацию от хищения элементов ЛЭП.

Таким образом, разработка комплекса технических средств и методов дистанционного контроля изоляции ЛЭП является важной перспективной задачей электрических сетей.

В главе 1 проводится анализ и приводится классификация существующих методов и технических средств контроля изоляции высоковольтных линий электропередачи с использованием отечественных и зарубежных источников.

Известно, что в электрических сетях существуют как устойчивые, так и неустойчивые повреждения, которые могут самоустраняться или переходить при определённых условиях в устойчивые. К неустойчивым повреждениям могут приводить набросы на провода, грозовые перекрытия гирлянд подвесных изоляторов, сближение фазных проводов при ветре или «пляске проводов» и т.д. Неустойчивые или так называемые самоустраняющиеся повреждения носят, как правило, повторяющийся и/или кратковременный характер.

Места перечисленных повреждений, как правило не обнаруживается, а их количество значительно превосходит количество устойчивых и по статистике составляет 70-80 %. Такой вид повреждений создает потенциальную угрозу для повреждений ЛЭП, сопровождающихся перебоями электроснабжения и приводящих к разделению энергосистем, посредством отключения линий, сокращению ресурса выключателей и др.

На рис. 1 представлена схема причин повреждений ЛЭП, основанная на модели ЛЭП с распределёнными параметрами (рис. 1).

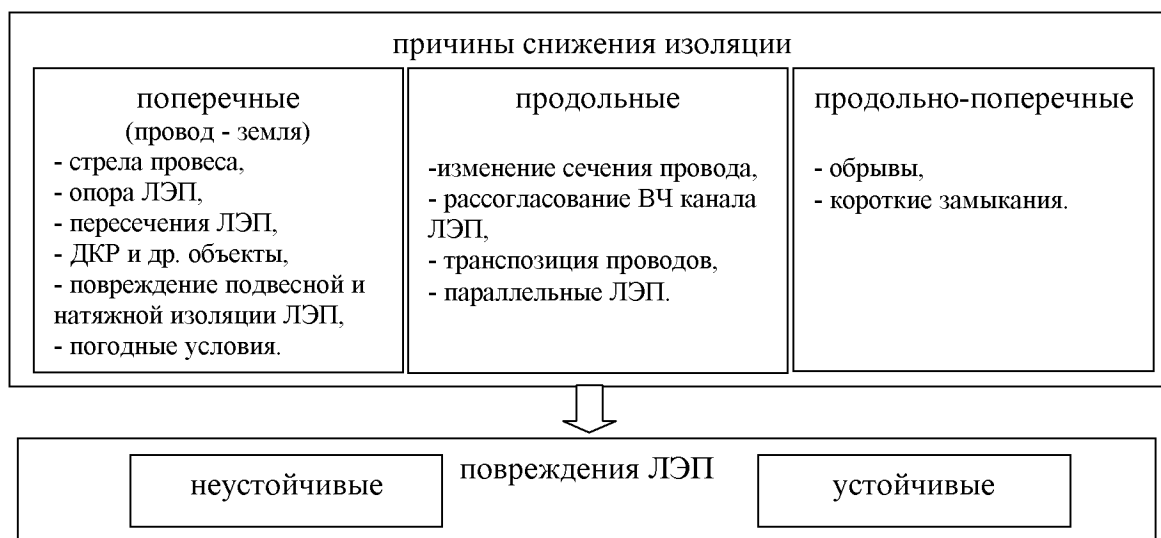


Рис. 1. Схема причин повреждения ЛЭП на основе нарушения изоляции ЛЭП

Разработана классификация методов определения состояния изоляции, представленная на рис. 2.

На основе анализа выявлено, что наиболее распространенными являются акустические методы определения состояния изоляции, используемые при обходах и основанные на фиксации коронных (частичных) разрядов (ЧР) в акустическом диапазоне частот (например, прибор УД-8). Не менее распространены электронно-оптические методы, используемые при обходах и основанные на визуализации ЧР (например, прибор Филин). Радиочастотные методы определения состояния изоляции, основанные на

фиксации частичных разрядов (ЧР) в электромагнитном частотном диапазоне, не нашли применения в виду неселективности и неоднозначности при работе приемника таких устройств.



Рис. 2. Классификация методов определения состояния изоляции ЛЭП

Недостатками существующих дистанционных методов являются:

- затрудненный или невозможный контроль изоляции в труднодоступных для обхода местах и местах пересечений ЛЭП, наличия около исследуемой линии энергетических и других объектов;
- труднодоступные и недоступные для осмотра участки ЛЭП по условию прохождения трассы;
- недостаточная разрешающая способность по расстоянию для определения мест снижения изоляции;
- недостаточная чувствительность по параметрам отношения сигнал/шум для регистрации снижения изоляции ниже нормативного уровня и др.

Выявление недостатков позволило предъявить к новым методам и техническим устройствам основные требования:

- регистрация параметров изоляции ЛЭП в труднодоступных и недоступных для прохождения участков ЛЭП;
- применение широкополосных частотных измерений;
- определение диагностических параметров для регистрации снижения изоляции ЛЭП ниже нормативных уровней;
- увеличение разрешающей способности по расстоянию для определения мест снижения изоляции;
- повышение чувствительности к снижениям изоляции ЛЭП;
- создание эхограмм (портретов) ЛЭП, характеризующих состояние изоляции, основанных на модели ЛЭП с распределенными параметрами и др.

Приведенные требования направлены на повышение надежности эксплуатации электрических сетей с помощью дистанционного контроля воздушной и подвесной изоляции и основаны на радиочастотных (локационных) методах.

Таким образом, разработанная классификация методов определения состояния изоляции ЛЭП включает актуальные технические решения с учетом предлагаемых подходов к дистанционному контролю изоляции.



Анализ существующих методов и средств определения состояния изоляции ЛЭП позволил выявить необходимость дистанционного контроля изоляции и требования к новым методам, предъявляемые электротехнической практикой. Перспективно применение методов дистанционного контроля изоляции ЛЭП с помощью методов локации в сочетании с методами, осуществляющими визуализацию мест ее изменений.

**В главе 2** предложены методы и технические средства контроля изоляции высоковольтных линий электропередачи. Разработка методов базируется на анализе выявленных недостатков существующих методов и технических средств, решениях по оперативному поиску мест снижения изоляции ЛЭП, современных требованиях эксплуатации высоковольтных линий электропередачи, применении высокоточных методов радиодальнометрии.

Перспективно применение высокочастотных (ВЧ) каналов для локационных методов\* определения состояния изоляции ЛЭП. На распространение ВЧ сигналов влияют показатели скорости распространения волн в ЛЭП и кабеле ВЧ присоединения, волновое и входное сопротивление линии, сопротивление грунта, сопротивления заземления опор. Поэтому характеристики распространения (отражения) можно применить для регистрации снижения изоляции ЛЭП.

В работе предлагается реализовать дистанционный контроль изоляции ЛЭП с помощью активных (фазовых и с применением многочастотных сигналов) и пассивных (многосторонние временные измерения) методов локации.

В качестве одного из основных способов определения состояния изоляции предлагается фазовый метод, базирующийся на излучении квазинепрерывных гармонических сигналов и фазовых измерениях, аналогичный фазовым методам дальнометрии. Фазовые методы дальнометрии используются в радиотехнических системах для измерения дальности и основываются на измерении приращения фазы излученного гармонического колебания стабилизированной частоты за время запаздывания отраженного сигнала. Метод представлен выражениями:

$$\varphi_{пер} = 2\pi f_0 t + \varphi_0, \quad (1)$$

$$\varphi_{отр} = 2\pi f_0 (t - t_3) + \varphi_0 + \Delta\varphi \quad (2)$$

$$t_3 = \frac{2D}{c}, \quad (3)$$

$$\theta = \varphi_{пер} - \varphi_{отр} = 2\pi f_0 t_3 - \Delta\varphi = \frac{4\pi f_0 D}{c} - \Delta\varphi,$$

$$D = \frac{(\theta + \Delta\varphi)c}{4\pi f_0}, \quad (4)$$

где  $D$  – дальность до места изменения изоляции;  $\varphi_{пер}$  – фаза синусоидального колебания, излучаемого передатчиком;  $\varphi_{отр}$  – фаза отраженного сигнала, поступающего в приемник;  $f_0$  – частота синусоидального колебания, излучаемого передатчиком;  $\varphi_0$  – начальная фаза синусоидального колебания, излучаемого передатчиком;  $\Delta\varphi$  – сдвиг фазы при отражении (как пра-

---

\* Автор благодарит к.т.н. Александра Леонидовича Куликова за научные консультации по методам радиолокации

вило близок к  $180^\circ$ );  $t_3$  – время запаздывания, однозначно определяющее дальность до отражателя;  $c$  – скорость света,  $\theta$  – фазовый набег отраженного сигнала относительно излучаемого передатчиком.

Существенной особенностью и методическим ограничением фазовых методов является необходимость разнесенного приема – передачи сигналов при излучении непрерывных колебаний (рис. 3 – пунктирная линия). Одновременного излучения и приема гармонических колебаний на фиксированной частоте в ЛЭП реализовать невозможно. Для преодоления указанного ограничения предлагается использование квазинепрерывных импульсных колебаний (рис. 3, непрерывная линия) с последующим восстановлением непрерывного колебания.

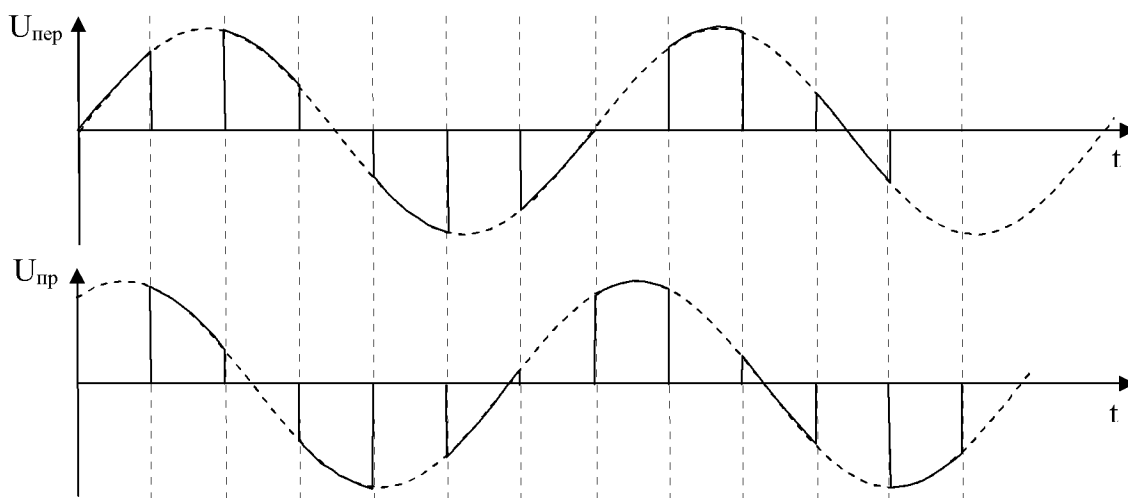


Рис. 3. Квазинепрерывные гармонические сигналы передачи и приема

Упрощенная схема, реализующая фазовый метод измерений с поочередным излучением в ЛЭП и приемом квазинепрерывных гармонических колебаний при соответствующей схеме высокочастотной (ВЧ) обработки сигналов изображена на рис. 4.

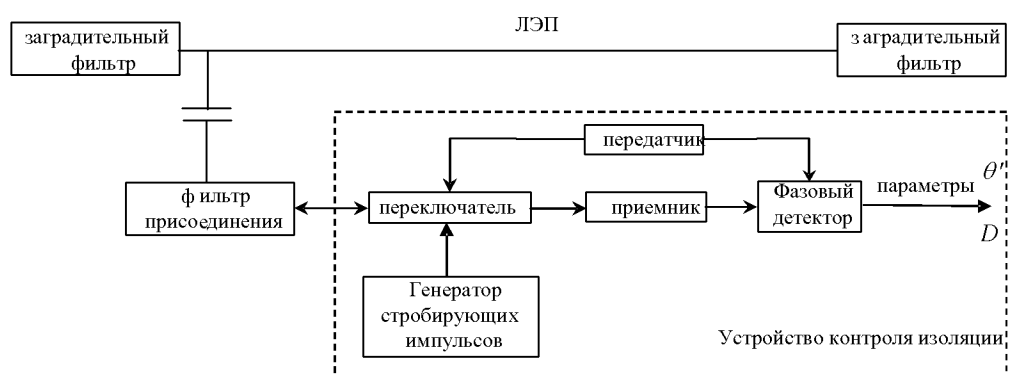


Рис. 4. Схема, реализующая фазовый метод измерений

Недостаток фазового метода заключается в неоднозначности измерения дальности. При нескольких повреждениях на ЛЭП фазовые методы не работоспособны из-за отсутствия разрешения по расстоянию, поэтому целесообразно перейти к методам локации с применением сложных многочастотных сигналов, лишенных этого недостатка.

Для дистанционного контроля изоляции перспективно использование частотно-манипулированных сигналов (ЧМС). ЧМС представляет собой последовательность сомкнутых радиоимпульсов, частоты которых расположены по закону, описываемому выражением:

$$u(t) = \sum_{i=0}^{N-1} U(t - i \cdot \tau_0) \cdot \cos\{2\pi f_i(t - T_i) + \phi_i\}, \quad (5)$$

где  $0 \leq t \leq t_u$ ;  $f_i = f_0 + c_i \cdot \delta f$ ;  $\delta f = f_{i+1} - f_i$  – частотный сдвиг между парциальными (отдельными) радиоимпульсами;  $c_i$  – элемент числовой кодовой последовательности  $c$ , которая характеризует смену частот.

Положительной особенностью ЧМС является устойчивость к воздействию частотно-диспергирующих сред, к которым относятся ЛЭП. При этом частотно-фазовые расхождения общего ЧМС определяются составляющими парциалами (интервалов соответствующих частот). В силу узкополосности последних широкополосный ЧМС искажается несущественно, что и свидетельствует о перспективности его применения для дистанционного контроля изоляции ЛЭП.

При выполнении линейной частотной аппроксимации многочастотного сигнала можно прийти к линейно-частотно-модулированным сигналам (ЛЧМ). Такие сигналы просты в формировании и обработке цифровыми или аналоговыми приборами. Класс ЛЧМ зондирующих сигналов может быть представлен одиночным импульсом:

$$u(t) = U(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \pi \frac{\Delta f}{t_u} \cdot t^2 + \phi_0), \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_u, \quad (6)$$

где  $f_0$  – начальная несущая частота;  $\Delta f$  – изменение частоты;  $t_u$  – длительность импульса;  $\phi_0$  – начальная фаза;  $U(t)$  – закон изменения огибающей сигнала.

Исходя из характеристик ЛЭП и требований по электромагнитной совместимости зондирующий импульс (рис. 5) был сформирован с помощью дискретной линейно частотной модуляции в полосе 400-2400 кГц и огибающей функции  $u(t)$  вида:

$$Geg(u, v) = [u^4(1-u)]^v. \quad (7)$$

В качестве аргумента  $u$  принимались значения функции:

$$u = (t + 1)/(Nt + 1), \quad (8)$$

$t$  – дискретные отсчёты времени,  $Nt = 80$  – количество временных отсчётов в сигнале,  $v = 2$ .

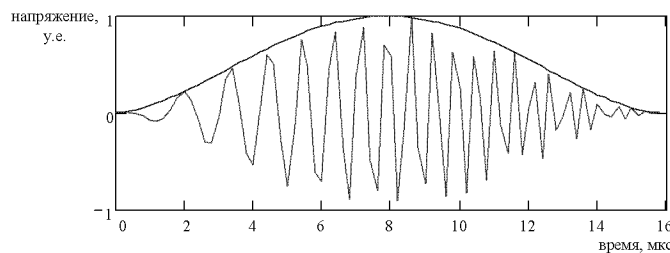


Рис. 5. Временная зависимость напряжения для зондирующего импульса

Предложен исследовательский комплекс (рис. 6), который позволил реализовать разработанные методы и провести серию натурных экспериментов.

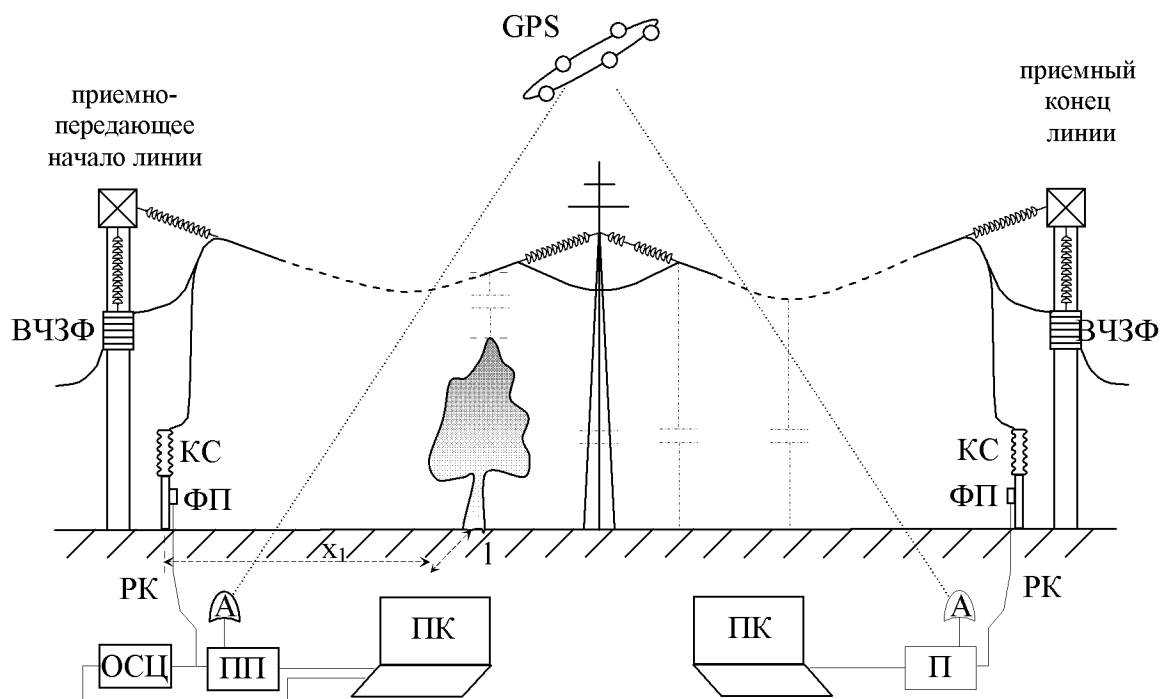


Рис. 6. Исследовательский комплекс методов дистанционного контроля изоляции ЛЭП: ВЧЗ – высокочастотный заградительный фильтр, КС – конденсатор связи, ФП – фильтр присоединения, РК – кабель РК, ОСЦ – осциллограф, ПП – присмопередатчик, П – приемник, ПК – персональный компьютер, А – антенна GPS, ПЗ – переносные заземления, БС – переключаемый блок резисторов и емкостей

Комплекс состоит из двух комплектов приемно-передающих устройств, подключенных к ПЭВМ. Излучение и прием сигналов осуществлялось через стандартные элементы ВЧ – присоединения ЛЭП.

Комплекс обеспечивает два основных режима работы:

- пассивный, при котором система сбора данных подключалась к гирлянде изоляторов и к обоим концам ЛЭП, осуществлялся только прием сигналов с синхронизацией от GPS (в будущем возможно применение ГЛОНАС);
- активный, при котором производилось излучение зондирующих сигналов и работа в режиме «на просвет» и «отражение» с синхронизацией приемно-передающих устройств от GPS.

Разработанные методы и средства дистанционного контроля изоляции позволили:

- производить измерения допустимых габаритных расстояний, воздушных промежутков, подвесной и натяжной изоляции на основе высокочастотных широкополосных методов локации дистанционным способом с учетом характеристик прохождения сигналов высокой частоты через емкостные сопротивления;
- производить косвенные измерения изоляции ЛЭП, основанные на регистрации изменений волнового сопротивления линии на разрешаемом по дистанции участке ЛЭП;
- выбрать коэффициент отражения в качестве диагностического параметра при измерениях изоляции ЛЭП;
- обеспечить точностные характеристики дальности до мест снижения изоляции ЛЭП, определяемые шириной полосы высокочастотного из-

лучения, соизмеримые с длиной пролета ЛЭП;

- обеспечить характеристики чувствительности измерений изоляции ЛЭП, зависящие от значения отношения сигнал/шум на входе прибора контроля при благоприятных условиях, единицы-десятки пкФ.

Таким образом, разработанные методы и средства по дистанционному контролю изоляции позволили определить диагностические параметры и оценить чувствительность к уровням изоляции высоковольтных линий электропередачи.

Чувствительность методов дистанционного контроля изоляции делает возможным регистрацию снижения воздушной, подвесной и натяжной изоляции высоковольтных ЛЭП ниже нормативных уровней, требуемых ПТЭ и ПУЭ, а разрешающая способность достигает определения места снижения изоляции с точностью до одного пролета линии.

**В главе 3** приводятся экспериментальные исследования разработанных методов и технических средств контроля изоляции высоковольтных линий электропередачи. Целью этих исследований являлись: проверка теоретических изысканий и работоспособности комплекса технических средств, определение перспективных направлений.

Апробация методов дистанционного контроля изоляции ЛЭП с использованием ЛЧМ зондирующих сигналов осуществлялась на ЛЭП 220 кВ «Луч-Этилен II» филиала ОАО «ФСК ЕЭС» – Нижегородское ПМЭС в период с 17 по 20 марта 2006 года.

Для зондирования ЛЭП применялся линейно-частотно-модулированный сигнал амплитудой до 140 В и длительностью 16 мкс (рис. 5). Электромагнитная совместимость исследовательского комплекса обеспечивалась более низкой спектральной плотностью мощности излучаемого сигнала (на 10 дБ ниже) относительно уровней сигналов устройств связи, релейной защиты и помех в диапазоне 0-800 кГц.

Для оценки состояния изоляции ЛЭП применялись эхограммы (портреты линии). Эхограмма представляет собой результат накопленной кросс-корреляционной обработки (свертки) излученного и отраженного сигналов. Его можно рассматривать как портрет ЛЭП в координатах, уровень сигнала – длина ЛЭП (рис. 7). Точками на эхограмме нанесены координаты опор ЛЭП 220 кВ «Луч-Этилен II», полученные с помощью уточненной схемы трассы ЛЭП на основе картографирования.

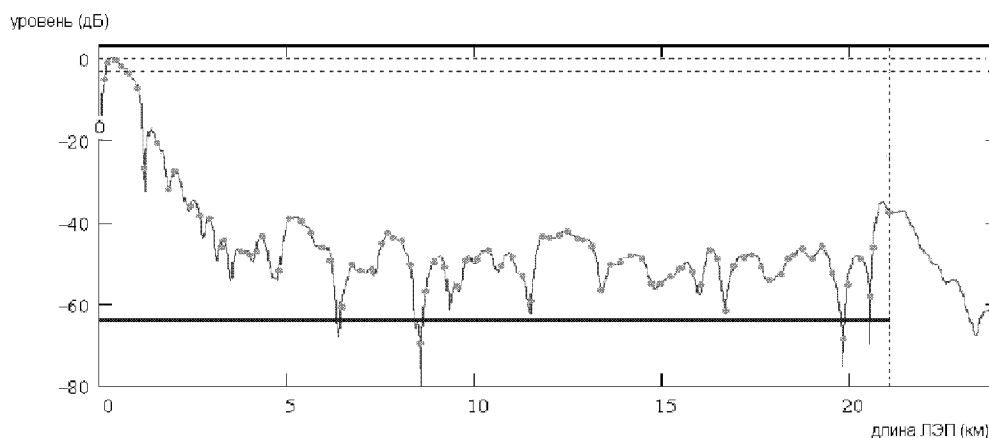


Рис. 7. Дальностный портрет ЛЭП

В результате экспериментов получена точность дистанционного контроля изоляции ЛЭП 220 кВ «Луч-Этилен II», которая составила около 170-250 м, что подтверждает теоретические предположения по возможности применения ЛЧМ сигналов.

На характер дистанционного контроля изоляции ЛЭП с применением высокочастотного зондирования существенное влияние оказывает уровень и характер помех. При резком изменении погодных условий зарегистрировано изменение уровня помех до 30 дБ.

Усредненное значение затухания ЛЧМ сигнала при распространении по ЛЭП составило 0,32 дБ/км, а групповая скорость распространения около 98,5 % от скорости света.

Определение чувствительности к изменениям изоляции ЛЭП проводилось на опытах различных видов коротких замыканий. Апробация с использованием ЛЧМ зондирующих сигналов осуществлялась на ЛЭП 220 кВ «Луч-Этилен II» филиала ОАО «ФСК ЕЭС» – Нижегородское ПМЭС в октябре 2006 года.

Программа опытов КЗ была построена от «сильных» к более «слабым» повреждениям ЛЭП (увеличивая сопротивления замыкания). К наиболее «сильным» повреждениям ЛЭП были отнесены металлические КЗ, обладающие наименьшими сопротивлениями замыкания на землю. Для имитации металлических КЗ применялись переносные заземления. В контуре заземления проводника фазы участвовало тело опоры, которое обладает небольшими индуктивно-активными сопротивлениями (менее 10 Ом), и сопротивление заземления опоры (менее 10 Ом). Каждый вид КЗ фиксировался исследовательским комплексом с подстанции «Луч». При этом через высокочастотное присоединение одной фазы ВЛ 220 кВ «Луч-Этилен II» осуществлялось зондирование и прием отраженных сигналов. В результате свертки накопленных отраженных сигналов и зондирующего для разных вариантов повреждений были получены эхограммы (рис. 8) однофазных КЗ на фазах А, В и С, зарегистрированные с фазы В.

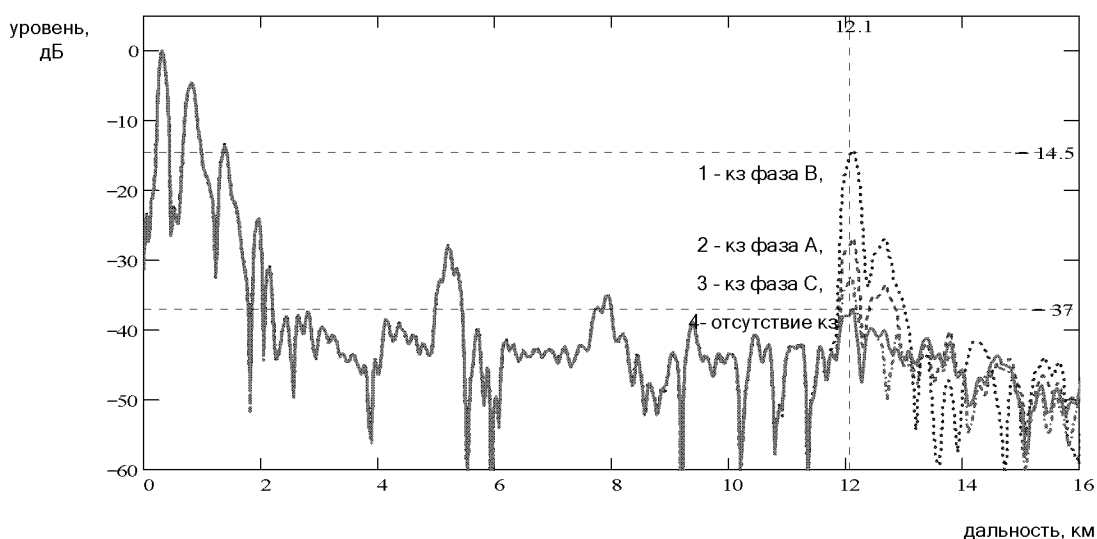


Рис. 8. Примеры эхограмм, зарегистрированных с фазы В

Анализ кривых рис. 8 позволяет сделать вывод о возможности регистрации КЗ исследовательским комплексом на других фазах с помощью однофазного исполнения измерений.

Имитация неметаллических КЗ производилась с помощью заземления фазного провода через переключаемый блок сопротивлений, который включал в себя 4 активных и 5 емкостных сопротивлений, с помощью которых имитировались различные виды нарушений изоляции ЛЭП. Монтаж переключаемого блока сопротивлений был выполнен на траверсе опоры. Блок сопротивлений размещался в металлическом корпусе, присоединенном вместе с одним из выводов к зачищенной от ржавчины траверсе заземленной опоры, а другим выводом присоединен с помощью переносного заземления к фазному проводу. Таким образом, между фазным проводником и контуром заземления обеспечивалось дополнительное сопротивление. К имитируемым нарушениям воздушной изоляции были отнесены сокращенные по сравнению с требованиями правил технической эксплуатации (ПТЭ) и правил устройства электроустановок (ПУЭ) габаритные расстояния от объектов с нулевым потенциалом до фазного провода. Примером такого нарушения может быть создание распространенного случая перекрытия на древесно-кустарниковую растительность (ДКР) (рис. 6), низовые пожары, удары молнии и т.д.

В результате экспериментальных исследований по имитации снижения изоляции линии были построены зависимости приведенные на рис. 9.

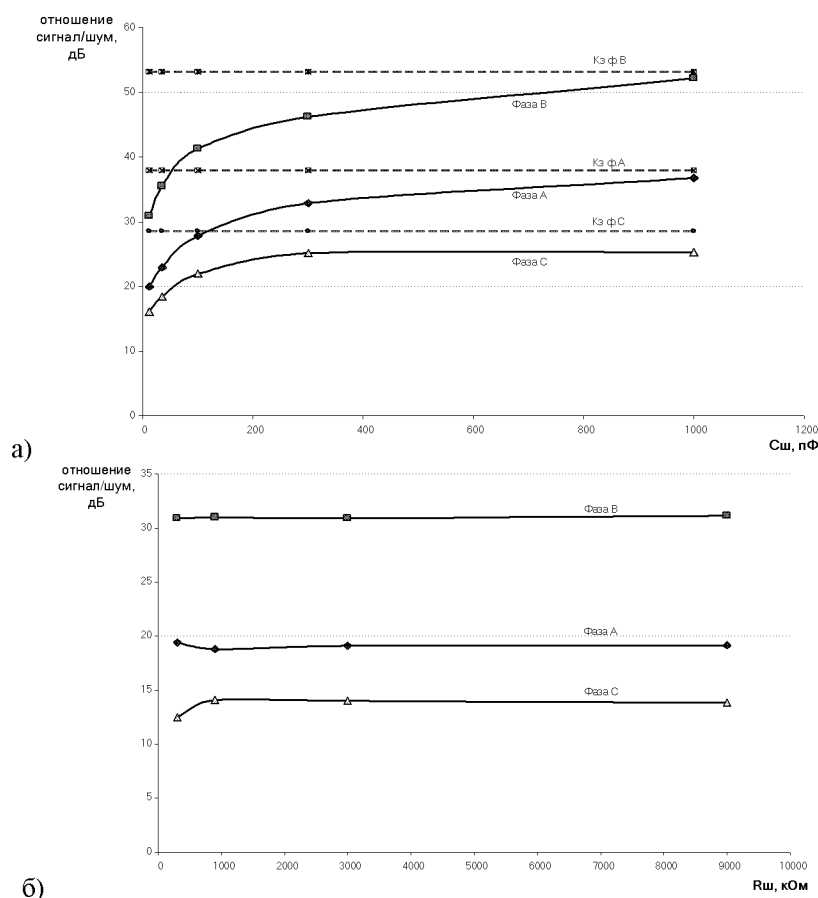


Рис. 9. Зависимость отношения сигнал/шум от величины  
а) активного сопротивления однофазной неоднородности; б) емкости однофазной неоднородности

Из графиков рис. 9 видно, что с увеличением величины емкости шунтирования фазного провода кривые асимптотически приближаются к величинам, соответствующим опытам металлических коротких замыканий.

Поскольку зондирующий импульс излучался и принимался только по фазе В величины амплитуд пиков для соседних фаз много меньше, чем для фазы В. По среднему затуханию спрогнозирована потенциальная дальность определения расстояния до места снижения изоляции рассматриваемой линии:  $L_a = 79,3$  км – для фазы «А»;  $L_b = 104,8$  км – для фазы «В»;  $L_c = 63,6$  км – для фазы «С».

Экспериментальные исследования по чувствительности дистанционного определения мест нарушений изоляции магистральных ЛЭП методами активного зондирования позволили:

- регистрировать снижения изоляции с помощью измерений однофазного исполнения;
- определять нарушения изоляции, связанные с регистрацией емкостного сопротивления между фазным проводником и землей (изменение стрел провеса, угроза от ДКР);
- определять расстояния до мест транспозиции и пересечения с другими ЛЭП и объектами, находящимися под измеряемой линией или близ нее и др.

Исследована возможность дистанционного контроля технического состояния подвесной и натяжной изоляции ЛЭП с подстанций через ВЧ присоединение на основе регистрации широкополосных параметров токов утечек через изоляцию.

В качестве объекта исследований был взят участок ЛЭП с подвесной гирляндой изоляторов ПС-120 в количестве 14 штук, соответствующей напряжению 220 кВ. Исследование проводилось в феврале 2006 года в лабораторных условиях в высоковольтном испытательном зале Инженерного Центра ОАО «Нижевоэнерго».

В ходе экспериментов измерительным комплексом фиксировались широкополосные параметры токов утечки через изоляцию (рис. 10,11).

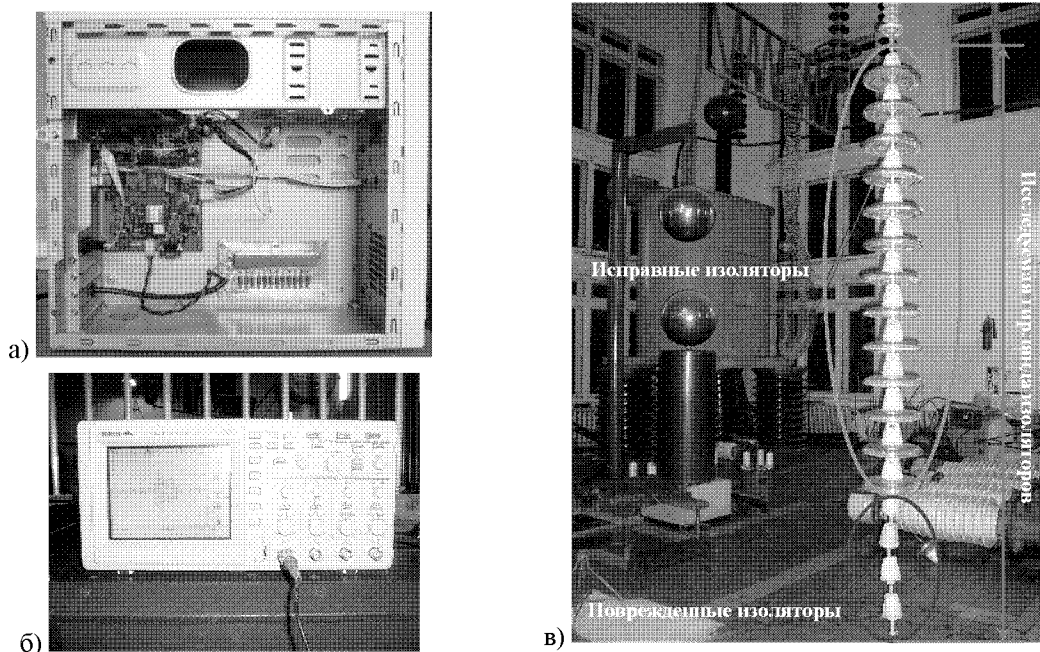


Рис. 10. Компоненты исследовательского комплекса:  
а) – широкополосный приемник, б) – широкополосный осциллограф, в) исследуемая гирлянда изоляторов



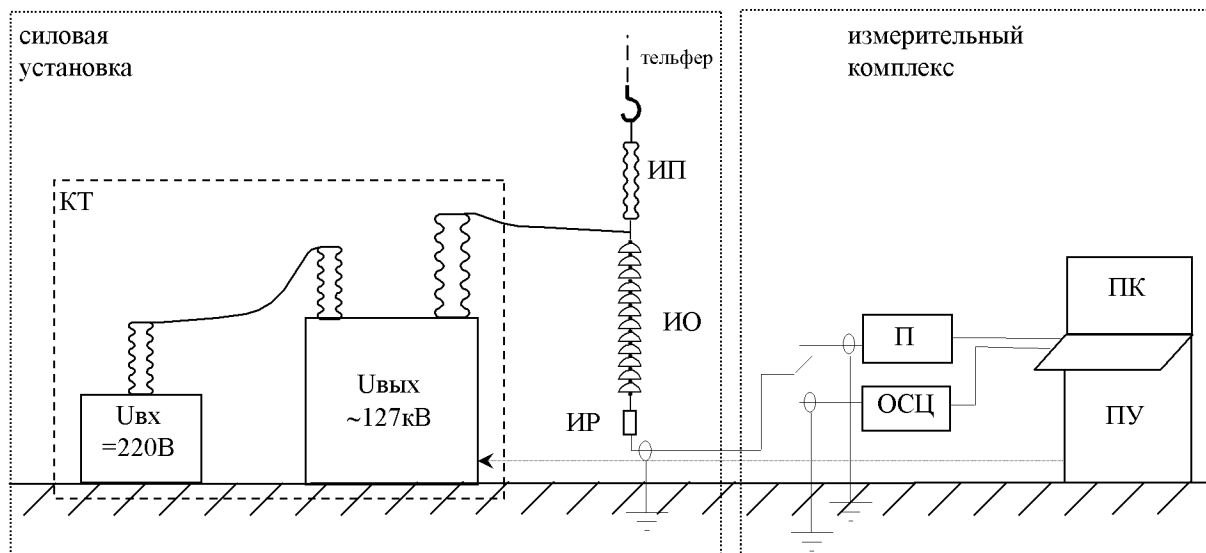


Рис. 11. Схема исследования широкополосных параметров токов утечек подвесной гирлянды изоляторов: силовая установка экспериментального комплекса включает: ИО – исследуемые нормальная и поврежденная гирлянды изоляторов; КТ – каскад испытательных трансформаторов, состоящий из двух последовательных повышающих трансформаторов; ИП – изолирующая подвеска гирлянды изолятора – тельфер; измерительный комплекс состоит: ПУ – пульт управления; П – широкополосный приемник; ОСЦ – осциллограф; ПК – персональный компьютер для обработки данных, ИР – измерительный резистор

Была рассмотрена однофазная схема замещения контура «земля – опора ЛЭП – подвесная изоляция – фазный провод – воздушный промежуток – земля» для исследования широкополосных параметров токов утечек. Такая схема замещения имеет вид колебательного контура с  $R, L, C$  элементами (рис. 12).

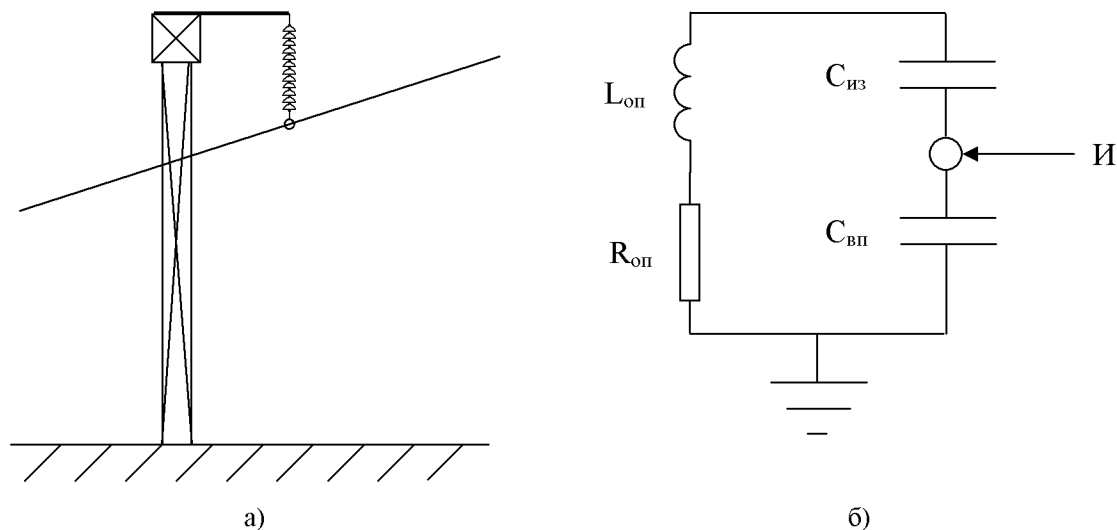


Рис. 12. Однофазная схема контура «земля – опора ЛЭП – подвесная изоляция – фазный провод – воздушный промежуток – земля»: а – натурная схема, б – схема замещения;  $R_{оп}$  – активное сопротивление опоры ЛЭП [4,5];  $L_{оп} = 0,14 \text{ мкГн}$  – индуктивное сопротивление металлической опоры ЛЭП [4,5];  $C_{из} = 3 \text{ нФ}$  – измеренное в ходе экспериментов емкостное сопротивление исследуемой гирлянды изоляторов;  $C_{вп} = 10 \text{ пкф}$  – удельная емкость воздушного промежутка между проводником в точке крепления к гирлянде изоляторов и поверхностью земли

В лабораторных условиях в схеме измерений участвовала только гирлянда изоляторов и не учитывался полный контур «земля – опора ЛЭП – подвесная изоляция – фазный провод – воздушный промежуток – земля».

Используя справочные данные и измерения, была вычислена резонансная частота колебательного контура, которая составила свыше 100 МГц.

В виду высокой стоимости приемника и генератора требуемой частоты и большим затуханием на таких частотах было принято решение о пассивной регистрации ЧР на частотах ниже резонансных.

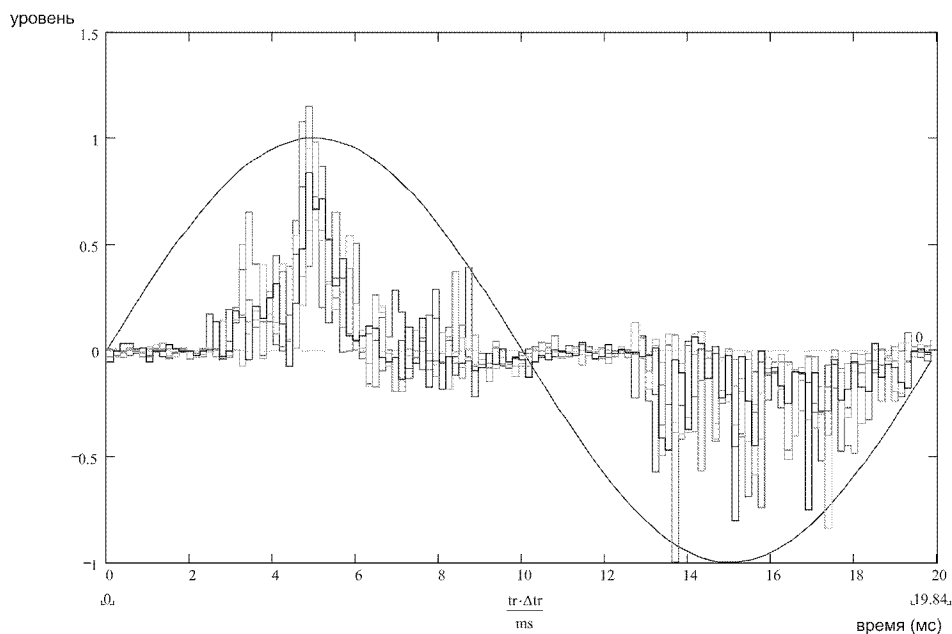


Рис. 13. Усредненные токи утечки, характеризующие различные повреждения изоляции

На рис. 13 показан закон изменения амплитуд частичных разрядов на изоляции для всех одиночных экспериментальных замеров совпадает с законом изменения амплитуды силового тока промышленной частоты 50 Гц. С учетом единообразия токов утечек разных групп экспериментов был вычислен общий ток утечки через изоляцию (рис.14).

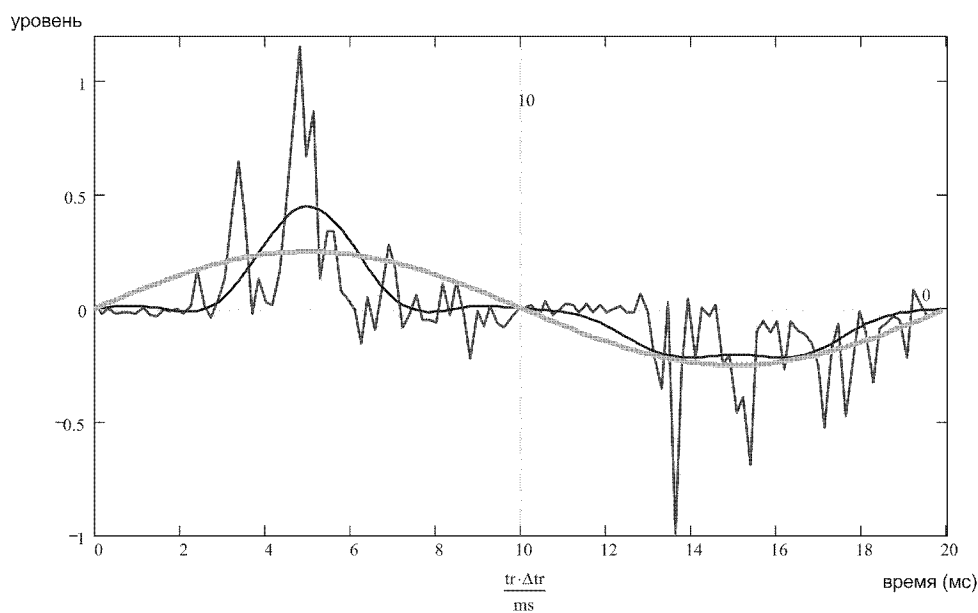


Рис. 14. Общий ток утечки, характеризующий процессы ЧР на изоляции

Подобно общему току утечки через изоляцию по данным всех групп экспериментов была построена вольтамперная характеристика ЧР на изоляции ЛЭП (рис. 15).

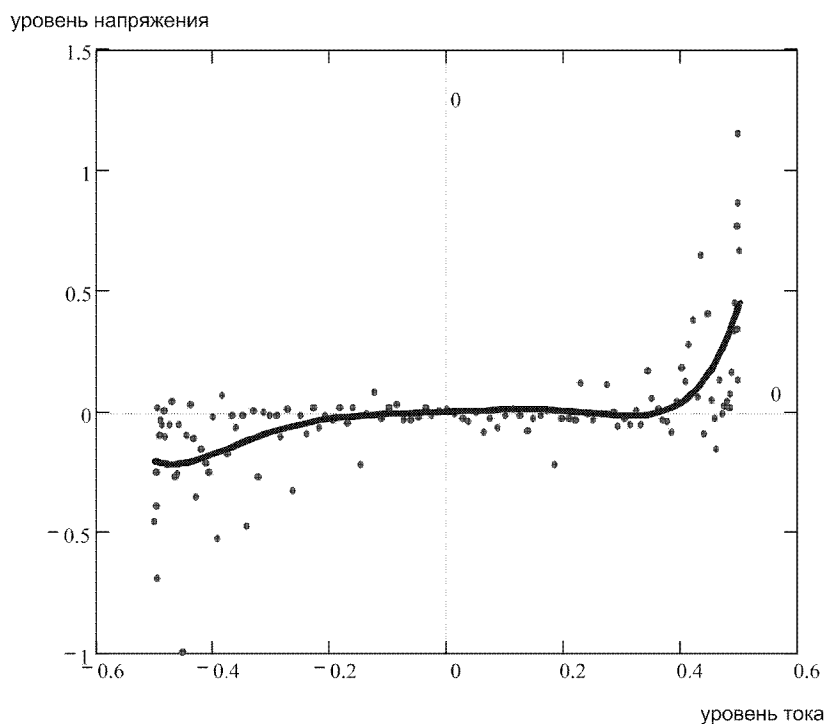


Рис. 15. ВАХ ЧР на изоляции ЛЭП

Идентификации состояния подвесной и натяжной изоляции состоит в определении максимальной близости исследуемой кривой ЧР (ВАХ) к кривой, характеризующей определенное состояние линейной изоляции.

Значительным результатом исследований является предложенные уровни снижения изоляции, представленные на рис. 16.

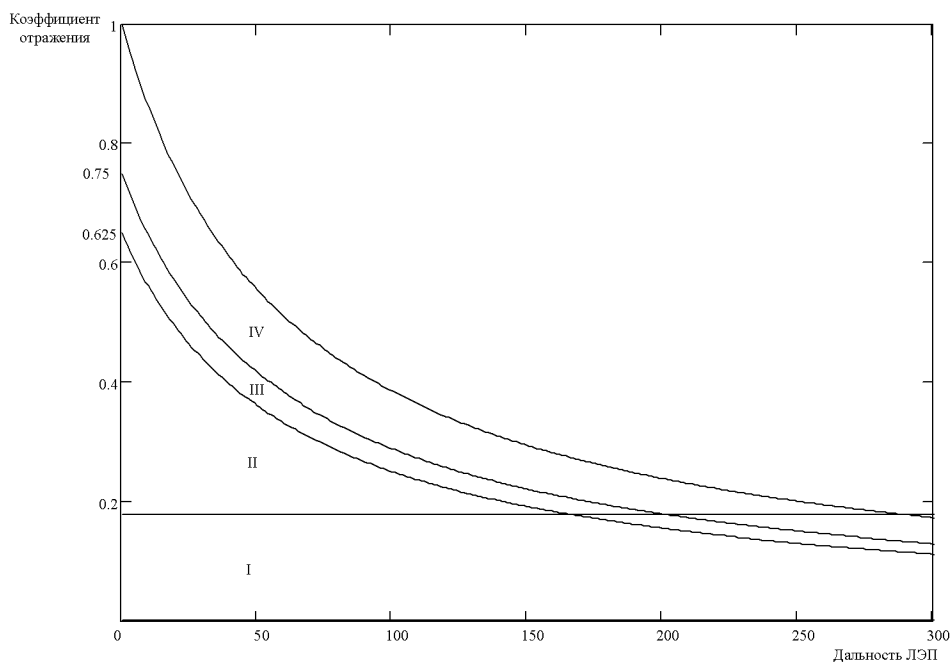


Рис. 16. Уровни изоляции высоковольтных линий электропередачи: I – уровень помех, II – допустимый уровень изоляции, III – предаварийный уровень изоляции, IV – аварийный уровень изоляции

Обозначенные на рис. 16 уровни изоляции позволяют определить влияние помех (зона I) на информативный параметр чувствительности – отношение сигнал/шум, допустимый уровень изоляции, обусловленный конструктивными особенностями ЛЭП и требуемый нормативами (зона II), необходимость выезда на ЛЭП с целью устранения угрозы повреждения на основе регистрации предаварийного уровня изоляции, регистрируемого устройствами ОМП и РЗиА (зона III), место снижения изоляции до уровня пробоев, перекрытий, КЗ, обрывов с успешной и неуспешной работой автоматического повторного включения (зона IV).

Полученные результаты моделирования и обработки характеризуют возможности разработанных технических средств по дистанционному определению снижения подвесной и натяжной изоляции ЛЭП в случаях ее полного или частичного (30% и более) перекрытия.

Предложенные уровни изоляции позволили организовать предупреждения повреждений на линиях электропередач на основе регистрации снижения изоляции линий электропередачи.

Анализ разработанных методов, технических средств и экспериментальных исследований дистанционного контроля изоляции ЛЭП показал реальную возможность для создания промышленных образцов приборов на подстанциях электрических сетей.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Сформулированы основные требования, основанные на использовании методов локации, к техническим средствам контроля изоляции: регистрация мест изменений уровней изоляции по всей длине ЛЭП, применение широкополосных локационных измерений, увеличение точностных характеристик до одного пролета, чувствительных характеристик допустимых и недопустимых уровней изоляции, применение для расчетов дискретной модели ЛЭП, позволяющие устранить недостатки наиболее широко применяемых в настоящее время акустических, электронно-оптических, радиочастотных и методов визуального осмотра.

2. На основе экспериментальных исследований локационных методов дистанционного контроля и диагностики изоляции установлены диагностические параметры для определения предаварийного уровня изоляции высоковольтных линий электропередач 110-750 кВ: величина коэффициента отражения и отношения сигнал/шум.

3. Предложена и обоснована на основе экспериментальных исследований классификация уровней изоляции высоковольтных линий электропередачи: допустимого, предаварийного и аварийного для предупреждения повреждений линий электропередачи.

4. Экспериментально подтверждено, что:

а) Разрешающая способность методов дистанционного контроля изоляции позволяет определять места снижения воздушной, подвесной и натяжной изоляции высоковольтных ЛЭП с точностью до одного пролета.

б) Чувствительность к изменениям воздушной изоляции ЛЭП около 10 пкФ обеспечивает дистанционный контроль с подстанций габаритных расстояний менее 1 метра.

в) Чувствительность к изменениям линейной изоляции ЛЭП на основе разработанных методов позволила дистанционно регистрировать случаи перекрытия в гирлянде более 30 % изоляторов.

5. Результаты экспериментальных исследований локационных методов дистанционного контроля и диагностики технически реализованы в опытно-промышленных образцах устройств.

6. Предложенные методы и средства дистанционного контроля изоляции высоковольтных линий электропередачи с подстанций в перспективе могут применяться для организации системы мониторинга за техническим состоянием ЛЭП для рациональной организации ремонтной кампании; определения места снижения уровня изоляции ЛЭП за счет влияния погодных условий (дождь, снегопад, ветер, гололед и др.) на основе регистрации интервальных изменений характеристик; контроля за потерями электрической энергии обнаружением мест утечки; охраны и сигнализации мест хищений элементов ЛЭП; решения задач дистанционной идентификации причин снижения изоляции и других задач эксплуатации электрических сетей.

## **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 электропередачи // Изв. Вузов. Проблемы энергетики. – 2007. - № 7-8. – С. 17-22.
2. **Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш., Кудрявцев Д.М.** Диагностика магистральных ЛЭП на основе частотно-временных методов // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. - С. 52-55.
3. **Куликов А.Л., Кудрявцев Д.М.** Локационные подходы к дистанционному контролю изоляции ЛЭП // Научные технологии. – 2007. - №7. – С. 31-37.

### **Публикации в других изданиях и патенты**

4. **Патент** на полезную модель № 59262 Российской Федерации, МПК G01 R31/11 Устройство для определения места повреждения линий электропередачи и связи / Куликов А.Л., Кудрявцев Д.М. – Опубл. 10.12.2006, Бюл. № 34.
5. **Мисриханов М.Ш., Куликов А.Л., Кудрявцев Д.М., Гречин В.П.** Исследование применения фазовых методов радиодальнометрии для определения мест повреждения на линиях электропередачи // Тез. докл.

- Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, - 2005. – Т. 1. – С. 38.
6. **Мисриханов М.Ш., Куликов А.Л., Кудрявцев Д.М.** Определение характеристик изоляции высоковольтных линий электропередач по широкополосным параметрам частичных разрядов // Тез. докл. 10-го юбилейного Междунар. форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: ХНУРЭ, - 2006. – С. 13.
  7. **Мисриханов М.Ш., Куликов А.Л., Кудрявцев Д.М.** Исследование возможности применения методов активного зондирования с использованием линейно-частотно-модулированных сигналов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 57. Задачи надежности систем энергетики для субъектов отношений в энергетических рынках. - Иркутск: ИСЭМ СО РАН, - 2007. - С. 180-190.
  8. **Мисриханов М.Ш., Кудрявцев Д.М.** Новые подходы в диагностике ВЛ СВН // Междунар. науч.-техн. конф. «Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования». – С. Петербург: ПЭИПК, – 2004. – С. 21-26.
  9. **Кудрявцев Д.М., Папков Б.В.** Классификация дефектов ЛЭП СВН в задачах диагностики // Тез. докл. III Всесоюз. молодеж. науч.-техн. конф. «Будущее технической науки». – Нижний Новгород: НГТУ, - 2004. С. 110-111.
  10. **Кудрявцев Д.М.** О классификации методов исследования технического состояния ЛЭП сверхвысокого напряжения // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, - 2005. – Т. 1. – С. 35.