

ГИЛЬМАНОВ Эдуард Ахнафович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ
НА ОСНОВЕ ИХ ДИАГНОСТИКИ
МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ**

Специальности:

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций;

**05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие
системы (в промышленности и медицине)**

АВТОРЕФЕРАТ

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

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре телекоммуникационных систем

Научный руководитель	д-р техн. наук, проф. СУЛТАНОВ Альберт Ханович
Научный консультант	канд. техн. наук, доц. ТЛЯВЛИН Анвар Зуфарович
Официальные оппоненты	д-р техн. наук, проф. ЗАЙКО Александр Иванович проф. каф. теоретических основ электротехники Уфимского государственного авиационного технического университета канд. техн. наук ГАЙФУЛЛИН Ренат Раитович технический директор ООО «Телекоммуникационные системы»
Ведущая организация	ЗАО «Энергоспецналадка», г. Уфа

Защита диссертации состоится «29» января 2010 г. в 10 часов
на заседании диссертационного совета Д- 212.288.07
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, актовый зал 1 корп.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «___» декабря 2009 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.



Валеев С.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В современных условиях развития промышленности возрастает роль кабельных линий (КЛ) передачи в сетях связи и системах электроснабжения предприятий. К сожалению, в настоящее время часть ведомственных КЛ морально и физически изношены, что является одной из главных причин их аварийных отказов. КЛ передачи относятся к дорогостоящим, ответственным и долговременным элементам систем связи и электроснабжения. Надежность их функционирования для потребителей I и II категории – одна из важнейших задач их бесперебойного электроснабжения и связи для предприятий с непрерывной технологией производства.

Известно, что запас прочности кабелей рассчитывается на стадии проектирования, а при их изготовлении его величина принимает конкретное значение. Это и определяет уровень надежности работы КЛ в условиях эксплуатации.

Увеличение уровня эксплуатационной надежности КЛ можно достигнуть совершенствованием технологии производства, применением новых изоляционных материалов, конструкций и оболочек кабелей. Создать абсолютно надежное кабельное изделие невозможно, хотя бы потому, что это будет экономически нецелесообразным. Тем самым, основной задачей при эксплуатации КЛ является сохранение его запаса прочности или поддержание уровня надежности, закладываемого заводом-изготовителем на рассчитываемый срок.

В реальных условиях эксплуатации на уровень эксплуатационной надежности КЛ воздействует множество разрушающих факторов, что ведет к снижению уровня их надежности. Для сохранения нормативного ресурса или для повышения эксплуатационной надежности кабелей связи (КС) и КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ до требуемого уровня используются различные мероприятия. К ним можно отнести: создание защитных кабельных сооружений (кабельная канализация и траншеи, туннели и каналы, кабельные эстакады и шахты и т.д.); повышение квалификации обслуживающего персонала; повышение технической оснащенности служб, занимающихся профилактикой, монтажом и ремонтом КЛ.

Несмотря на это, все перечисленные мероприятия не исключают возможности возникновения отказов КЛ из-за старения изоляции и возможного наличия в них заводских дефектов, так как при серийном производстве и массовом применении кабелей повышается вероятность появления в их изоляции дефектов из-за разного рода ошибок, возникающих в процессе их изготовления, транспортировки, монтажа, во время эксплуатации.

Одним из вариантов решения этой проблемы является замена КЛ, выработавших свой ресурс, но замена их всех в течение двух или трех лет по-

требует больших финансовых затрат.

Выходом из этого положения является совершенствование методов диагностики, которые позволят классифицировать КЛ по их остаточному ресурсу и создать план постепенной замены старых кабелей, что может, реально увеличить срок службы КЛ сверх нормативных сроков, и с большей экономией затрат обеспечить их техническое обслуживание и ремонт.

Теоретические и практические аспекты решения задач в этой области рассмотрены в работах таких ученых как: Гроднев И.И., Андреев В.А., Шалыт Г.М., Аксенов Ю.П., Лебедев Г.М., Ляпина А.Г., Кадомская К.П., Качесов В.Е., Лавров Ю.А., Сахно В.В., Benjamin T.L., Chen C.S., Roemer L.E., Robinson S.R., Thorn D.C., Grumbach R.S., Backmann M., Pfeiler C., Wabmuth A. и других.

Таким образом, исследования по повышению эффективности эксплуатации КЛ передачи, объединяющих в себе как симметричные КС, так и КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ на основе совершенствования диагностики методом импульсной рефлектометрии (МИР), является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является повышение эффективности эксплуатации кабельных линий передачи, создание системы моделирования и количественная оценка рефлектограмм (РФГ) кабельных линий.

Задачи исследования. Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка математической модели обобщенной кабельной линии передачи (ОКЛП), позволяющей на единой методологической основе проводить анализ процесса распространения импульсного сигнала, как в симметричном кабеле связи, так и в кабельной линии электропередачи напряжением 6-10 кВ.

2. Разработка математической модели обобщенной кабельной линии передачи с сосредоточенной неоднородностью при импульсном входном воздействии.

3. Разработка алгоритма имитационного моделирования обобщенной кабельной линии передачи.

4. Разработка прикладного программного обеспечения, реализующего метод импульсной рефлектометрии и его внедрения на производстве. Проведение численных экспериментов.

5. Разработка методики количественной оценки рефлектограмм кабельных линий с внедрением в эксплуатацию линий передачи.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории распространения электромагнитных волн в многопроводных линиях передачи, теории цепей с распределенными параметрами, теории функции комплексной переменной, а также теории интегрального и дифференциального исчисления. Применены методы математического мо-

делирования с применением компьютера. Проведены натурные эксперименты на разработанном экспериментальном стенде.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Математическая модель кабельной линии передачи с сосредоточенной неоднородностью, которая в *отличие* от существующих моделей, позволяет проводить оптимальный анализ результатов диагностики состояния эксплуатируемых, как симметричных кабелей связи, так и кабельных линий электропередачи напряжением 6-10 кВ с учетом затухания и искажения импульсного входного сигнала.

2. Алгоритм имитационного моделирования кабельной линии передачи и прикладное программное обеспечение, которые в *отличие* от известных алгоритмов и прикладных программных систем, учитывают зависимость вторичных параметров кабеля от частоты, что позволяет аналитически строить рефлектограммы различных кабельных линий, анализировать влияние неоднородностей на их форму и прогнозировать состояние линий.

3. *Впервые* предложена методика количественной оценки влияния неоднородностей на форму рефлектограмм кабельных линий передачи.

Практическую ценность имеют:

1. Методика количественной оценки рефлектограмм кабельных линий, позволяющая отслеживать динамику изменения его состояния, прогнозировать развитие различных дефектов (неоднородностей), что в конечном итоге повысит надежность и эффективность эксплуатации кабельных сетей.

2. Прикладное программное обеспечение, позволяющее не прибегая к измерениям на реальных, находящихся в эксплуатации кабелях (сетях), набрать статистику и установить влияние различных неоднородностей на форму рефлектограмм.

Результаты работы внедрены на производстве в электротехнической лаборатории МУП «Уфаводоканал» и использованы в учебном процессе ГОУ ВПО УГАТУ в рамках дисциплин «Направляющие системы электро-связи» и «Линии связи».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель обобщенной кабельной линии передачи.

2. Математическая модель кабельной линии передачи с сосредоточенной неоднородностью, представленной в виде четырехполюсника, при импульсном входном воздействии.

3. Алгоритм имитационного моделирования кабельной линии передачи и прикладное программное обеспечение, описывающие процессы распространения импульсного сигнала по кабельной линии и позволяющие производить аналитическое построение ее рефлектограмм.

4. Методика количественной оценки рефлектограмм кабельных линий передачи.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы обсуждались на: 54-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2003); Всероссийской научной конференции «Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности» (Астрахань 2007); VII и VIII Международных научно-технических конференциях «Физика и технические приложения волновых процессов» (Казань, 2007, Самара, 2008); пятой и седьмой Международных конференциях «Оптические технологии в телекоммуникациях» (Уфа, 2007, Самара, 2009); девятой Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (Казань, 2008); на семинарах кафедры «Телекоммуникационные системы» ГОУ ВПО УГАТУ (2008-2009).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы отражены в 9 публикациях, в том числе в статье журнала, рекомендованного ВАК и 8 статьях в материалах Всероссийских и Международных конференций, а также в одном свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009616341 от 17 ноября 2009 г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из 167 страниц машинописного текста, включающего в себя введение, четыре главы основного текста, выводы и заключение; 38 рисунков, 14 таблиц, библиографического списка из 62 наименований и трех приложений на 52 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования работы, показана научная новизна и практическая ценность, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены современные методы диагностики КС и КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ, методы измерений их электрических параметров и методы определения расстояния до мест повреждений (МП). Показано, что важнейшей задачей при обеспечении бесперебойного функционирования КС, как элемента систем управления производственными процессами, и КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ, как элемента системы электроснабжения, является объективная информация о состоянии их изоляции.

Проведен анализ современных методов диагностики состояния КЛ передачи и методов определения МП, из которого следует, что существует много общего между ними для КС и КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ, причем диагностика может проводиться одними приборами. В работе приведена классификация методов диагностики КЛ. Наиболее перспективным и широко применяемым в последнее время является МИР. Но в настоящее время он теоретически и экспериментально до конца не исследован. Преимущества метода – быстрота и простота измерений, возможность определения нескольких повреждений одновременно. Отмечается, что импульсным методом можно определить только повреждения, вызывающие значительные изменения волнового сопротивления измеряемой цепи (обрыв, ко-

роткое замыкание, сосредоточенная омическая асимметрия, разбитость пар). Недостатком этого метода является низкая чувствительность к понижению сопротивления даже при значительном снижении, а также отсутствие количественных оценок для анализа РФГ КЛ.

Отмечено, что для диагностики кабельных сетей важную роль играет статистика, которая набирается, либо численным моделированием, либо экспериментальным способом на физической модели. Приведено обоснование необходимости разработки математической модели КЛ при импульсном входном воздействии.

Во второй главе исследованы методы моделирования процессов распространения импульсного сигнала по КЛ передачи. Разработана математическая модель ОКЛП, позволяющая на единой методологической основе анализировать процесс распространения импульсного входного сигнала, как в симметричном КС, так и в КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ.

Математическая модель ОКЛП имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\mathbf{U}(x,s)}{dx} + \mathbf{Z}\mathbf{I}(x,s) &= \mathbf{E}(x,s) + \mathbf{L}\mathbf{i}(x,0), \\ \frac{d\mathbf{I}(x,s)}{dx} + \mathbf{Y}\mathbf{U}(x,s) &= \mathbf{J}(x,s) + \mathbf{C}\mathbf{u}(x,0). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\mathbf{Z}(s) = s\mathbf{L} + \mathbf{R}$, $\mathbf{Y}(s) = s\mathbf{C} + \mathbf{G}$.

$$\mathbf{U}(x,s) = \begin{Bmatrix} U_1(x,s) \\ \vdots \\ U_n(x,s) \end{Bmatrix}, \quad U_i(x,s) = \chi[u_i(x,t), t, s], \quad \mathbf{Z} = \begin{Bmatrix} Z_{11}(s) & \cdots & Z_{1n}(s) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1}(s) & \cdots & Z_{nn}(s) \end{Bmatrix},$$

$$\mathbf{I}(x,s) = \begin{Bmatrix} I_1(x,s) \\ \vdots \\ I_n(x,s) \end{Bmatrix}, \quad I_i(x,s) = \chi[i_i(x,t), t, s], \quad \mathbf{Y} = \begin{Bmatrix} Y_{11}(s) & -Y_{12}(s) & \cdots & -Y_{1n}(s) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{n1}(s) & -Y_{n2}(s) & \cdots & Y_{nn}(s) \end{Bmatrix}.$$

$$\mathbf{L} = \begin{Bmatrix} L_{11} & \cdots & L_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{n1} & \cdots & L_{nn} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{Bmatrix} C_{11} & -C_{12} & \cdots & -C_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -C_{n1} & -C_{n2} & \cdots & C_{nn} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{Bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{n1} & \cdots & R_{nn} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{Bmatrix} G_{11} & -G_{21} & \cdots & -G_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -G_{n1} & -G_{n2} & \cdots & G_{nn} \end{Bmatrix},$$

R_{ij} , G_{ij} , L_{ij} , C_{ij} – погонные сопротивление, проводимость, индуктивность, емкость.

$$\mathbf{E}(x,s) = \begin{Bmatrix} E_1(x,s) \\ \vdots \\ E_n(x,s) \end{Bmatrix}, \quad E_i(x,s) = \chi[\xi_i(x,t), t, s],$$

$$\mathbf{J}(x,s) = \begin{Bmatrix} J_1(x,s) \\ \vdots \\ J_n(x,s) \end{Bmatrix}, \quad J_i(x,s) = \chi[\zeta_i(x,t), t, s].$$

Граничные условия для системы уравнений (1) имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}\chi[\alpha u(0,t),t,s] + \mathbf{e}\chi[\beta i(0,t),t,s] &= \mathbf{P}(s), \\ \mathbf{e}\chi[\gamma u(l,t),t,s] + \mathbf{e}\chi[\lambda i(l,t),t,s] &= \mathbf{Q}(s), \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\mathbf{P}(s) = \begin{pmatrix} P_1(x,s) \\ \vdots \\ P_n(x,s) \end{pmatrix}, \quad P_i(s) = \chi[p_i(t),t,s], \quad \mathbf{Q}(s) = \begin{pmatrix} Q_1(s) \\ \vdots \\ Q_n(s) \end{pmatrix}, \quad Q_i(s) = \chi[q_i(t),t,s].$$

Связь параметров обобщенной модели с параметрами КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ или КС приведена в таблице 1.

Таблица 1. Связь параметров обобщенной модели с параметрами КЛ параметрами КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ или КС

Параметр обобщенной модели	Параметр КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ	Параметр КС
$U_i(x,s), I_i(x,s)$	Мгновенные значения напряжения и тока в i -ой цепи	
L_{ii} и C_{ii}	Собственные индуктивность и емкость i -ой цепи	
L_{ij} и C_{ij} (при $i \neq j$)	Взаимные индуктивность и емкостный коэффициент i -го и j -го проводов	Индуктивная и магнитная связи между i -й и j -й цепями
R_{ii}	$r_i + R_{gi}$ где r_i, R_{gi} – активные сопротивления i -го провода и пути в земле тока i_i	Активное сопротивление i -й цепи
R_{ij} (при $i \neq j$)	Коэффициент, характеризующий падение напряжения в i -м проводе от активных потерь при протекании тока i_j	Активная составляющая магнитной связи между i -й и j -й цепями
G_{ij}	Собственная активная проводимость утечки i -ой цепи	
G_{ij} (при $i \neq j$)	Взаимная активная проводимость утечки	Активная составляющая электрической связи между i -й и j -й цепями
$E_i(x,s)$	Внешнее воздействие, имеющее смысл линейной плотности ЭДС	Распределенный источник напряжения (помеха) в i -й цепи
$J_i(x,s)$	Внешнее воздействие, имеющее смысл линейной плотности тока, притекающего на провод извне	Распределенный источник тока (помеха) в i -й цепи

Математическая модель ОКЛП для случая ее тестирования рефлектометром разработана для системы из трех цепей ($n = 3$), с учетом следующих ограничений:

1. Исследуемая система не подвержена влиянию извне.
2. В момент ввода, в линию зондирующего импульса (ЗИ) напряжение и ток в ней отсутствовали.
3. ЗИ посылается в первую цепь, в остальных же цепях входное воздействие отсутствует.

С учетом этих допущений получена система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2}{dx^2}U_1(x,s) - \Gamma_{11}^2(s)U_1(x,s) - \Gamma_{12}^2(s)U_2(x,s) - \Gamma_{13}^2(s)U_3(x,s) &= 0, \\ \frac{d^2}{dx^2}U_2(x,s) - \Gamma_{21}^2(s)U_1(x,s) - \Gamma_{22}^2(s)U_2(x,s) - \Gamma_{23}^2(s)U_3(x,s) &= 0, \\ \frac{d^2}{dx^2}U_3(x,s) - \Gamma_{31}^2(s)U_1(x,s) - \Gamma_{32}^2(s)U_2(x,s) - \Gamma_{33}^2(s)U_3(x,s) &= 0, \end{aligned} \right\} (3)$$

где

$$\begin{aligned} \Gamma_{11}^2(s) &= Z_{11}(s)Y_{11}(s) - Z_{12}(s)Y_{21}(s) - Z_{13}(s)Y_{31}(s), \\ \Gamma_{12}^2(s) &= -Z_{11}(s)Y_{12}(s) + Z_{12}(s)Y_{22}(s) - Z_{13}(s)Y_{32}(s), \\ \Gamma_{13}^2(s) &= -Z_{11}(s)Y_{13}(s) - Z_{12}(s)Y_{23}(s) + Z_{13}(s)Y_{33}(s), \\ \Gamma_{21}^2(s) &= Z_{21}(s)Y_{11}(s) - Z_{22}(s)Y_{21}(s) - Z_{23}(s)Y_{31}(s), \\ \Gamma_{22}^2(s) &= -Z_{21}(s)Y_{12}(s) + Z_{22}(s)Y_{22}(s) - Z_{23}(s)Y_{32}(s), \\ \Gamma_{23}^2(s) &= -Z_{21}(s)Y_{13}(s) - Z_{22}(s)Y_{23}(s) + Z_{23}(s)Y_{33}(s), \\ \Gamma_{31}^2(s) &= Z_{31}(s)Y_{11}(s) - Z_{32}(s)Y_{21}(s) - Z_{33}(s)Y_{31}(s), \\ \Gamma_{32}^2(s) &= -Z_{31}(s)Y_{12}(s) + Z_{32}(s)Y_{22}(s) - Z_{33}(s)Y_{32}(s), \\ \Gamma_{33}^2(s) &= -Z_{31}(s)Y_{13}(s) - Z_{32}(s)Y_{23}(s) + Z_{33}(s)Y_{33}(s). \end{aligned}$$

Граничные условия для системы уравнений (3) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} U_1(0,s) + Z_B(s)I_1(0,s) &= P(s), \quad \frac{d}{dx}U_1(l,s) = 0; \\ \frac{d}{dx}U_2(0,s) &= 0, \quad \frac{d}{dx}U_2(l,s) = 0; \\ \frac{d}{dx}U_3(0,s) &= 0, \quad \frac{d}{dx}U_3(l,s) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Задача (3) решена с учетом (4) при следующих условиях:

1. Вторая третьи цепи не оказывают влияния на первую.
2. Отсутствуют взаимные влияния между второй и третьей цепями.

После преобразований получим решение для напряжения и тока в первой цепи:

$$\left. \begin{aligned} U_1(x,s) &= \frac{P(s)}{2} \left(e^{-\Gamma_{11}(s)x} + e^{\Gamma_{11}(s)(x-2l)} \right), \\ I_1(x,s) &= \frac{P(s)}{2Z_B(s)} \left(e^{-\Gamma_{11}(s)x} - e^{\Gamma_{11}(s)(x-2l)} \right). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Напряжение и ток во второй цепи:

$$\left. \begin{aligned} U_2(x,s) &= \frac{P(s)\Gamma_{21}^2(s)}{2\Gamma_{22}(s)[\Gamma_{11}^2(s) - \Gamma_{22}^2(s)]} \left[\begin{aligned} &\Gamma_{22}(s) \left[e^{-\Gamma_{11}(s)x} + e^{\Gamma_{11}(s)(x-2l)} \right] + \\ &+ \Gamma_{11}(s) \left[e^{-2\Gamma_{11}(s)l} - 1 \right] \times \\ &\times \frac{sh[\Gamma_{22}(s)x] - sh[\Gamma_{22}(s)(x-2l)]}{ch[2\Gamma_{22}(s)l] - 1} \end{aligned} \right], \\ I_2(x,s) &= \frac{P(s)\Gamma_{21}^2(s)}{2Z_B(s)\Gamma_{22}(s)[\Gamma_{11}^2(s) - \Gamma_{22}^2(s)]} \left[\begin{aligned} &\Gamma_{11}(s) \left[e^{-\Gamma_{11}(s)x} - e^{\Gamma_{11}(s)(x-2l)} \right] - \\ &- \Gamma_{11}(s) \left[e^{-2\Gamma_{11}(s)l} - 1 \right] \times \\ &\times \frac{sh[\Gamma_{22}(s)x] + sh[\Gamma_{22}(s)(x-2l)]}{ch[2\Gamma_{22}(s)l] - 1} \end{aligned} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Выражение для напряжения и тока в третьей цепи будет аналогично выражению (6), различие: вместо Γ_{21} будет Γ_{31} и вместо Γ_{22} будет Γ_{33} .

Для учета влияния второй и третьей цепей на первую цепь решается первое уравнение системы (3) при граничных условиях (4), при условии, что $U_2(x,s)$ и $U_3(x,s)$ определены из (6).

Для учета влияния первой цепи на вторую и третью, а также влияния второй и третьей цепей друг на друга уточняются напряжения 2-й и 3-й цепи ($U_2(x,s)$, $U_3(x,s)$) из второго и третьего уравнений системы (3) с учетом граничных условий (4).

В работе получена математическая модель ОКЛП с сосредоточенной неоднородностью при импульсном входном воздействии. При разработке модели рассматривалась цепь, представленная на рис. 1.

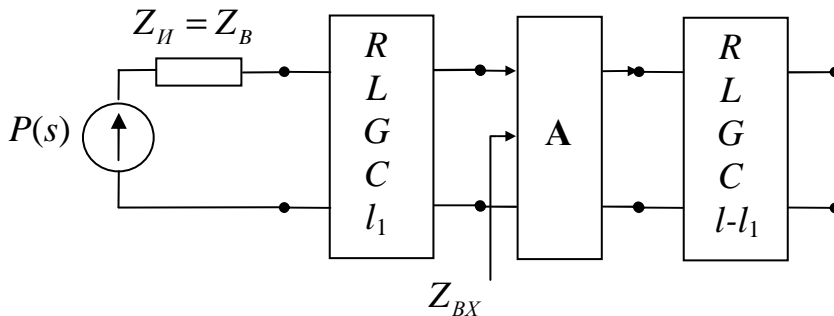


Рисунок 1 – Исследуемая двухпроводная линия

Решение задачи по моделированию процесса распространения импульсного сигнала по КЛ с сосредоточенной неоднородностью разделено на две подзадачи:

1. Определение волн напряжения $u_1(x, t)$ и тока $i_1(x, t)$, распространяющихся на участке линии $0 \leq x \leq l_1$, вследствие действия источника ЭДС, их отражения при набегании на четырехполюсник и отражения преломленной четырехполюсником волны от конца линии.

2. Определение волн напряжения $u_2(x, t)$ и тока $i_2(x, t)$, распространяющихся на участке линии $l_1 \leq x \leq l$, вследствие проникновения волн $u_1(x, t)$ и $i_1(x, t)$ через четырехполюсник и отражения от разомкнутого конца линии.

Если принять, что при $l_1 \leq x \leq l$

$$u_1(x, t) = 0, i_1(x, t) = 0,$$

а при $0 \leq x < l_1$

$$u_2(x, t) = 0, i_2(x, t) = 0,$$

то решение будет иметь вид

$$u(x, t) = \begin{cases} u_1(x, t), & \text{при } 0 \leq x < l_1 \\ u_2(x, t), & \text{при } l_1 \leq x \leq l \end{cases}, \quad (7)$$

$$i(x, t) = \begin{cases} i_1(x, t), & \text{при } 0 \leq x < l_1 \\ i_2(x, t), & \text{при } l_1 \leq x \leq l \end{cases}. \quad (8)$$

Граничные условия для $U_1(x, s), I_1(x, s)$ в операторной форме при $Z_H(s) = Z_B(s)$ будут иметь вид:

$$\begin{aligned} U_1(0, s) + Z_B(s)I_1(0, s) &= P(s), \\ U_1(l_1, s) &= Z_{BX}(s)I_1(l_1, s) \end{aligned} \quad (9)$$

Выразив $Z_{BX}(s)$ через известные \mathbf{A} -параметры четырехполюсника и $Z_B(s)$

$$Z_{BX}(s) = \frac{A_{11}Z_2(s) + A_{12}}{A_{21}Z_2(s) + A_{22}}, \quad (10)$$

где $Z_2(s)$ – входное сопротивление участка линии $l_1 \leq x \leq l$:

$$Z_2(s) = Z_B(s) \frac{Z_{H2}(s) + Z_B(s) \operatorname{th} \Gamma(l - l_1)}{Z_B(s) + Z_{H2}(s) \operatorname{th} \Gamma(l - l_1)}.$$

По условию задачи линия на конце разомкнута, $Z_{H2}(s) \rightarrow +\infty$:

$$Z_2(s) = \lim_{Z_{H2}(s) \rightarrow \infty} Z_B(s) \frac{Z_{H2}(s) + Z_B(s) \operatorname{th} \Gamma(l - l_1)}{Z_B(s) + Z_{H2}(s) \operatorname{th} \Gamma(l - l_1)} = \frac{Z_B(s)}{\operatorname{th} \Gamma(l - l_1)}.$$

Подставив (5) в (9) с учетом (10) после преобразований получено решение:

$$\left. \begin{aligned} U_1(x, s) &= \frac{P(s)}{2} \left(e^{-\Gamma(s)x} + k_{omp} e^{\Gamma(s)(x-2l_1)} \right), \\ I_1(x, s) &= \frac{P(s)}{2Z_B(s)} \left(e^{-\Gamma(s)x} - k_{omp} e^{\Gamma(s)(x-2l_1)} \right). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Граничные условия для $U_2(x, s)$, $I_2(x, s)$

$$\begin{aligned} U_1(l_1, s) &= A_{11}U_2(l_1, s) + A_{12}I_2(l_1, s), \\ I_2(l, s) &= 0. \end{aligned}$$

Решение для $U_2(x, s)$, $I_2(x, s)$ будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} U_2(x, s) &= \frac{P(s)(k_{omp} + 1)Z_B(s)(e^{\Gamma(s)(x-2l)} + e^{-\Gamma(s)x})}{2[(A_{11}Z_B(s) - A_{12})e^{2\Gamma(s)(l_1-l)} + A_{11}Z_B(s) + A_{12}]}, \\ I_2(x, s) &= \frac{P(s)(k_{omp} + 1)(e^{-\Gamma(s)x} - e^{\Gamma(s)(x-2l)})}{2[(A_{11}Z_B(s) - A_{12})e^{2\Gamma(s)(l_1-l)} + A_{11}Z_B(s) + A_{12}]} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Соотношение (11) и (12) позволяют определить напряжение и ток в любом сечении КЛ в операторной форме. Для того чтобы получить их временные зависимости достаточно выполнить обратное преобразование Лапласа.

Если принять, что $p(t)$ представляет собой импульс величиной K и длительностью τ , описываемый следующим выражением

$$p(t) = K[1(t) - 1(t - \tau)], \quad (13)$$

где $1(t)$ – единичная функция Хевисайда, то представленное решение будет моделировать процесс тестирования КЛ МИР.

В третьей главе исследованы параметры и форма ЗИ рефлектометра «Рейс-205» с целью оптимального моделирования распространения импульсного сигнала по КЛ передачи.

Разработан алгоритм расчета отраженного сигнала при моделировании процесса импульсной рефлектометрии. Он может быть условно разделен на два подалгоритма: в первом осуществляется расчет частотного коэффициента передачи КЛ; во втором на основе найденных значений коэффициента передачи рассчитываются значения отраженного сигнала.

Интерфейс прикладного программного обеспечения, моделирующего процесс распространения ЗИ по неоднородным КЛ, написанный на языке Object Pascal в среде программирования Borland Delphi 7.0, представлен на рис. 2.

Разработанное программное обеспечение позволяет производить аналитическое построение РФГ КЛ. В качестве исходных данных для расчета отраженного сигнала задаются вторичные параметры кабеля, сопротивление нагрузки на дальнем конце линии и А-параметры неоднородности, представленной в виде четырехполюсника. Параметры, характеризующие кабель, нагрузку и неоднородность, задаются с учетом их зависимости от частоты в реальных направляющих системах. Сопротивление источника ЗИ (в нашем случае – рефлектометра) равно волновому сопротивлению КЛ, т.е. на входе КЛ - режим согласованной нагрузки.

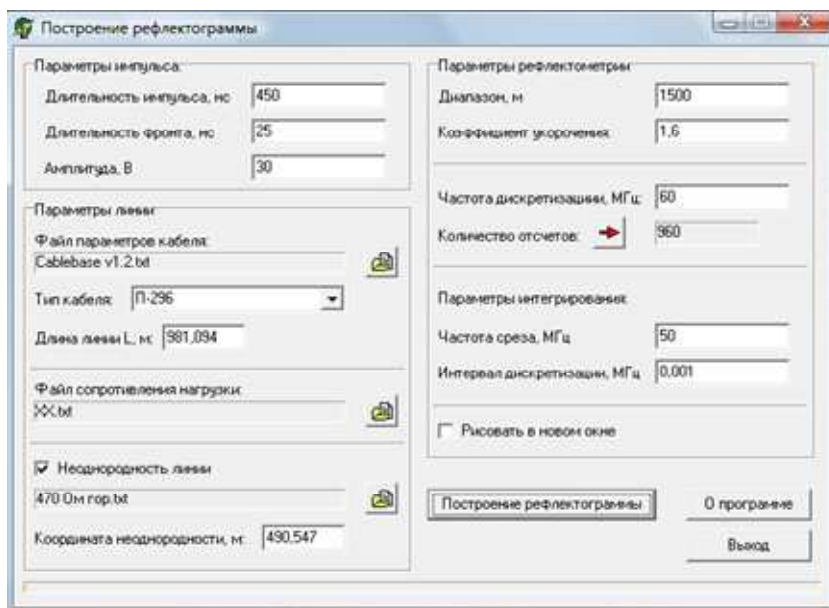


Рисунок 2 – Главное окно программы моделирующей процесс распространения ЗИ по неоднородным КЛ

Получены результаты численного моделирования аналитического построения РФГ для следующих трех случаев:

- понижение сопротивления изоляции между жилами;
- омическая асимметрия;
- дефект, моделируемый емкостью.

Эти результаты позволяют накопить статистический материал для определения влияния различных неоднородностей на форму РФГ.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию КЛ передачи, для проведения которых был разработан и изготовлен экспериментальный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 3. Основу стенда составляют две строительные длины полевого кабеля марки П-296 КС1 и КС2 по 500 м, которые вместе образуют линию связи длиной 1000 м. Стенд состоит из трех основных частей: симметричный КС, блок коммутации (БК) и блок измерений (БИ). Середина линии выведена на БК, начало и конец линии – на БИ. БИ используется непосредственно для проведения измерений, путем подключения измерительных приборов, а БК пред-

назначен для соединения строительных длин КС в одну линию и подключения элементов для имитации неоднородностей в линии.

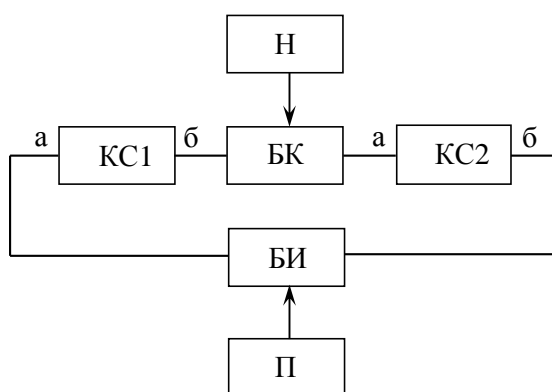


Рисунок 3 – Структурная схема экспериментального стенда

В работе представлены результаты исследований, наиболее часто встречающихся на практике повреждений:

1. Понижение сопротивления изоляции между жилами одной и той же или различных линий.
2. Понижение сопротивления изоляции между жилой и оболочкой.
3. Местная продольная асимметрия.
4. Локальные дефекты в изоляции, представленные в виде емкости.

Как отмечалось выше, недостатком МИР является отсутствие количественных оценок РФГ. Поэтому в работе в качестве такой количественной оценки предлагается рассматривать две величины: 1) отношение амплитуды отраженного от неоднородности импульса Δ_1 (Δ_2) к амплитуде импульса, отраженного от разомкнутого конца в случае отсутствия неоднородности $\max \Delta'$, которое обозначено как h ; 2) отношение амплитуды отраженного от неоднородности импульса Δ_1 (Δ_2) к амплитуде импульса, отраженного от разомкнутого конца $\max \Delta$ – обозначенное как q .

В первом случае предполагается, что имеется РФГ исследуемого кабеля без дефектов полученная, например, в процессе ввода в эксплуатацию новой КЛ, или при условии отсутствия неоднородностей (КЛ находится в нормальном техническом состоянии). Следует отметить, что амплитуда импульса, отраженного от конца КЛ будет в данном случае постоянной. Во втором случае, отраженный от разомкнутого конца КЛ импульс будет иметь различную амплитуду, которая зависит от величины, вида неоднородности.

Предложенная методика количественной оценки РФГ позволила построить семейство кривых, связывающих их параметры с параметрами неоднородностей в виде: а) понижения сопротивления изоляции между жилами одной и той же или различных линий; б) понижения сопротивления изоляции между жилой и оболочкой (экраном); в) местной продольной асимметрии; г) локальной емкости.

Сравнительный анализ РФГ, полученных в результате численного моделирования, и РФГ, полученных в результате эксперимента на реальной КЛ, приведен на рис. 4–6.

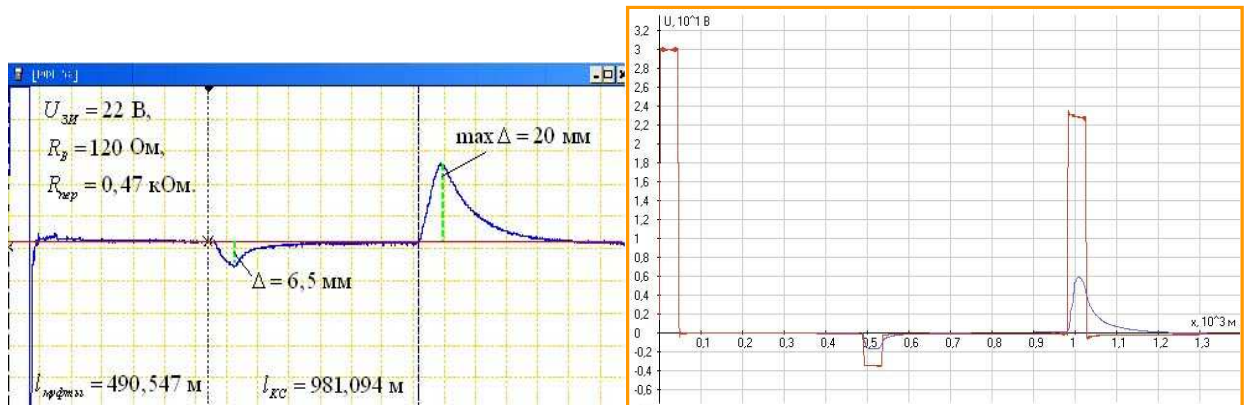


Рисунок 4 – РФГ при понижении сопротивления изоляции ($R_{из} = 470 \text{ Ом}$)

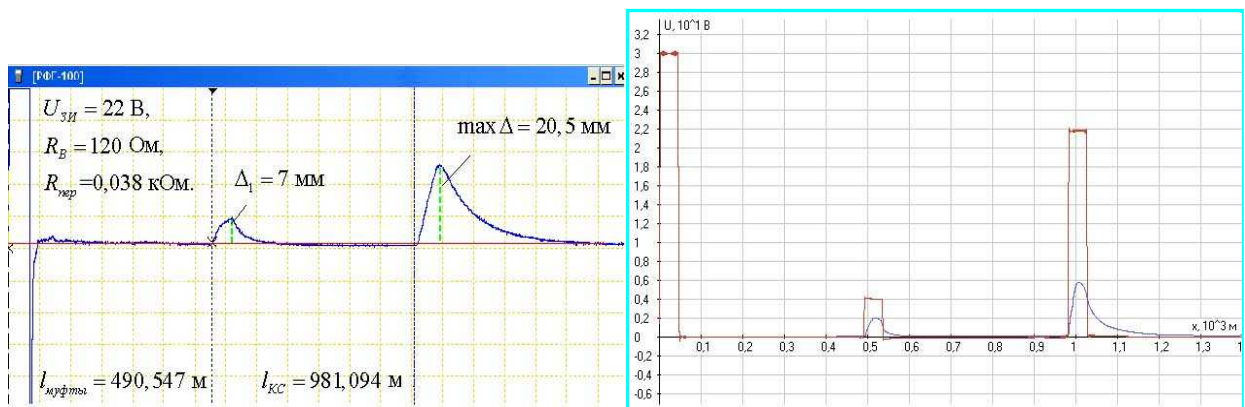


Рисунок 5 – РФГ при омической асимметрии ($R_{асим} = 38 \text{ Ом}$)

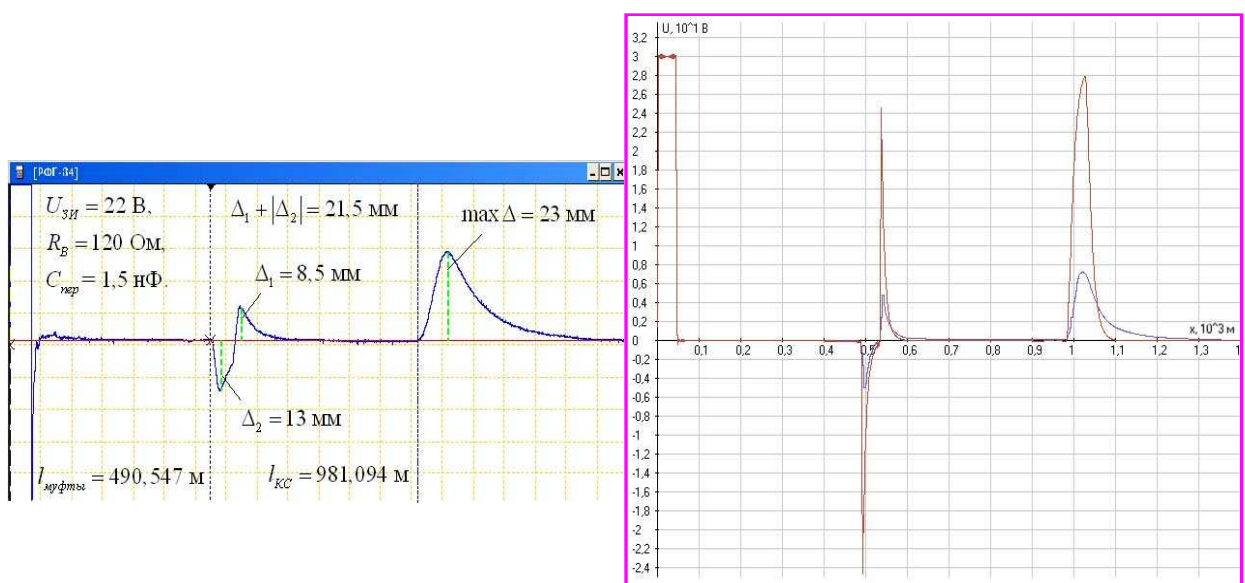


Рисунок 6 – РФГ при дефекте в виде емкости ($C = 1,5 \text{ нФ}$)

Достоверность результатов экспериментальных исследований на реальных КЛ подтверждается тем, что для каждой неоднородности было получено не менее 20 РФГ. При этом относительная погрешность определения величин Δ_1 (Δ_2), $\max \Delta'$, $\max \Delta$ не превысило 3%.

Анализ РФГ, полученных для КС и КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ, показал наличие общих закономерностей отражения сигнала от неоднородностей, вызванных изменением первичных параметров КЛ.

В приложении представлены РФГ из выполненных экспериментальных исследований, текст разработанного прикладного программного обеспечения аналитического построения РФГ КЛ передачи с сосредоточенной неоднородностью, а также документы, подтверждающие внедрение результатов работы в производство на МУП «Уфаводоканал» и в учебном процессе ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» в рамках учебных дисциплин «Направляющие системы электросвязи» и «Линии связи».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель обобщенной кабельной линии передачи на основе теории цепей с распределенными параметрами с применением обобщенной системы телеграфных уравнений, позволяющая при импульсном входном воздействии в одной из цепей учитывать затухание и искажение формы сигнала. Это дает возможность на единой методологической основе анализировать процесс его распространения, как в симметричном кабеле связи, так и в кабельной линии электропередачи напряжением 6-10 кВ. Определена связь параметров обобщенной модели с параметрами кабеля связи и кабельной линии электропередачи напряжением 6-10 кВ.

2. Разработана математическая модель обобщенной кабельной линии передачи с сосредоточенной неоднородностью, учитывающая импульсное входное воздействие и неоднородность, представленную в виде четырехполюсника с известными А-параметрами. Получены выражения для напряжений и токов в цепях трехпроводной обобщенной кабельной линии передачи, позволяющие численно моделировать процессы диагностики реальных кабельных линий методом импульсной рефлектометрии.

3. Разработан алгоритм имитационного моделирования обобщенной кабельной линии передачи, отличающийся от известных алгоритмов своей универсальностью инвариантного использования, как для кабелей связи, так и для кабельных линий электропередачи напряжением 6-10 кВ, позволяющий оказывать информационную поддержку при принятии решения об их состоянии и обеспечивающий достаточно точную сходимость с экспериментированием на физической модели.

4. На основе алгоритма разработано прикладное программное обеспечение, позволяющее производить аналитическое построение рефлектограмм кабельных линий передачи, набирать статистику по неоднородностям и принимать решение о состоянии линии. (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009616341 от 17 ноября 2009 г.). В результате численного моделирования установлено, что: при дефекте в виде понижения сопротивления изоляции расхождение по амплитуде отраженного импульса не превышает 8 %; при дефекте в виде омической асимметрии расхождение по амплитуде отраженного импульса не превышает 6 %; при дефекте представляемого в виде емкости, расхождение по амплитуде отраженного импульса не превышает 12 %.

5. Предложена методика количественной оценки рефлектограмм кабельных линий передачи в виде двух параметров: 1) отношение амплитуды отраженного от неоднородности импульса к амплитуде импульса, отраженного от разомкнутого конца в случае отсутствия неоднородности; 2) отношение амплитуды отраженного от неоднородности импульса к амплитуде импульса, отраженного от разомкнутого конца, позволяющая производить количественную оценку дефектов. Результаты работы внедрены в процесс эксплуатации кабельных линий передачи на МУП «Уфаводоканал» и в учебном процессе ГОУ ВПО УГАТУ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях из списка ВАК

1. Математическая модель обобщенной кабельной линии при импульсном входном воздействии / Султанов А.Х., Тлявлин А.З., Гильманов Э.А. и др. // Вестник УГАТУ. Серия - машиностроение, энергетика, электроника и измерительная техника, радиотехника и связь. Уфа: УГАТУ 2009. Т.13, №1(34).- С.200-205.

В других изданиях

2. К вопросу анализа влияния длительности зондирующего импульса на разрешающую способность. / Гильманов Э.А., Шабанов В.А. // Материалы 54-й НТК студентов, аспирантов и молодых ученых.- Уфа: УГНТУ, 2003.- С. 164-165.

3. Система диагностики состояния кабельных сетей / Гильманов Э.А., Султанов А.Х., Тлявлин А.З. // Инновационные технологии в управлении, образовании промышленности «АСТИНТЕХ-2007»: Материалы Всерос. НК.- Астрахань: АГУ, 2007. – Ч.1.- С. 180-182.

4. Решение телеграфных уравнений при помощи формулы трапеции для интеграла Римана-Меллина / Тлявлин А.З., Багманов В.Х., Зайнуллин Р.Ф., Гильманов Э.А. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Материалы 5 Междунар. НТК.- Уфа: УГАТУ, 2007.- С. 89-93.

5. Информационно-измерительный комплекс диагностики кабельных сетей / Тлявлин А.З., Султанов А.Х., Гильманов Э.А. // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе: Материалы 6 Междунар. НТК.- Казань: КГТУ, 2007.- С.419-420.

6. Приближенный метод решения телеграфных уравнений / Тлявлин А.З., Зайнуллин Р.Ф., Любопытов В.С., Гильманов Э.А. // Физика и технические приложения волновых процессов: Материалы VII Междунар. НТК.- Самара: СамГУ, 2008.- С. 74-75.

7. Методы диагностики кабельных линий / Гильманов Э.А., Тлявлин А.З., Султанов А.Х. // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник.- Уфа: УГАТУ, 2008.- С. 248-252.

8. Обобщенная математическая модель кабельной линии / Тлявлин А.З., Гильманов Э.А., Зайнуллин Р.Ф. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Материалы 9 Междунар. НТК.- Казань: КГТУ, 2008.- С.128-129.

9. Универсальный подход к диагностике кабельных линий передачи / Гильманов Э.А. // Оптические технологии в телекоммуникациях: Материалы VII Междунар. НТК. – Самара, 2009.- С. 386-389.

10. Построение рефлектограммы неоднородной кабельной линии / Любопытов В.С., Тлявлин А.З., Гильманов Э.А., Зайнуллин Р.Ф. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009616341 от 17 ноября 2009 г.

Диссертант



Э.А. Гильманов

ГИЛЬМАНОВ Эдуард Ахнафович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ
НА ОСНОВЕ ИХ ДИАГНОСТИКИ
МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Специальности:

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций;

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы
(в промышленности и медицине)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 14.12.09. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр. – отг. 1,0. Уч. – изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 610.

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12