

На правах рукописи



СЕРОШТАНОВ Сергей Сергеевич



00306743 1

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ**

Специальность 05.22.08 – «Управление процессами перевозок»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения» Федерального агентства железнодорожного транспорта (ОмГУПС ФАЖТ РФ) на кафедре «Автоматика и телемеханика».

Научный руководитель –

кандидат технических наук, доцент

Лунев Сергей Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Кравцов Юрий Александрович

кандидат технических наук, доцент

Культин Вадим Борисович

Ведущее предприятие: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарская государственная академия путей сообщения»

Защита состоится « 01 » февраля 2007 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д218.008.02 при Петербургском государственном университете путей сообщения по адресу: 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9, ауд. 7-320

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Петербургского государственного университета путей сообщения университета.

Автореферат разослан «27» 12 2006г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Е. Ю. Мокейчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. С каждым годом на железнодорожном транспорте увеличиваются объемы внедрения современных средств автоматики и телемеханики. Мощным средством увеличения пропускной способности железнодорожных линий и повышения безопасности движения поездов является автоблокировка (АБ). АБ позволяет организовать движение поездов попутного следования с малыми интервалами. Кроме того, она повышает производительность труда эксплуатационных работников, сокращает эксплуатационные расходы и обеспечивает высокую безопасность движения поездов.

Одним из путей повышения надежности технических средств, обеспечивающих безопасность движения поездов, является внедрение устройств непрерывного контроля за их состоянием. Своевременный контроль технического состояния устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) в динамике позволяет устанавливать необходимость и очередность мероприятий по предупреждению или оперативному устранению отказов.

На современном этапе развития систем АБ широкое распространение получили системы с тональными рельсовыми цепями (ТРЦ) и централизованным размещением аппаратуры. Использование сигнального тока тональной частоты позволяет повысить защищенность от воздействия помех тягового тока, практически, на порядок снизить потребляемую мощность, применить современную элементную базу, осуществить централизованное размещение аппаратуры, исключить взаимные влияния между рельсовыми цепями.

Одним из важнейших элементов данных систем являются рельсовые цепи (РЦ). Они выдают первичную информацию о состоянии контролируемых участков пути. С другой стороны, РЦ являются самым ненадежным элементом систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ). Исправность РЦ и безопасность их функционирования зависят от множества факторов, меняющихся с течением времени. В области исследования рельсовых цепей известны работы многих авторов: Брылеева А.М., Власенко С.В, Дмитриева В.С., Кравцова Ю.А., Культина В.Б, Лисенкова В.М., Минина В.А. и ряда других ученых.

Поиск отказов в РЦ не автоматизирован и осуществляется с использованием различных измерительных средств, что значительно увеличивает время поиска неисправности.

Целью работы является разработка методики и алгоритма непрерывного контроля и прогнозирования постепенных отказов с определением характера и места неисправности ТРЦ в системе централизованной автоблокировки с поста электрической централизации.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Обоснование необходимости включения в системы диагностики ТРЦ функции контроля состояния РЛ.
2. Исследование комплексных параметров ТРЦ с помощью теории представлений линейных групп и аппарата конформных отображений.
3. Разработка методов уточнения параметров ТРЦ при дополнительных измерениях.
4. Определение диагностической карты областей состояний РЛ на комплексной плоскости.
5. Проведение экспериментальных исследований по эффективности применения алгоритма и методики непрерывного контроля и прогнозирования состояний РЛ.
6. Определение экономической эффективности использования разработанных алгоритма и методики в средствах контроля и диагностики ТРЦ.

Методика исследования. В работе использованы положения теории групп, теории функций комплексных переменных, теоретические и экспериментальные методы исследования. Расчеты выполнялись с использованием ЭВМ на базе пакетов анализа MathCAD 13 и Microsoft office Excel 2003. При составлении схем замещения ТРЦ использованы основные положения теории четырехполюсников и линий с распределенными параметрами. Экспериментальные измерения проводились с использованием компьютерной техники и специализированных программ для анализа частотно-модулированных сигналов, таких как SONY Sound Forge 8.0, Syntrium Cool Edit Pro 2.1, TONE и ADC_VIEW. Данные, полученные экспериментальным путем, обрабатывались с использованием аппарата регрессионного анализа.

Научная новизна. В диссертационной работе решен комплекс вопросов, связанных с диагностикой и прогнозированием состояния рельсовой линии:

1. Обосновано применение математического аппарата конформных отображений для исследования параметров ТРЦ.

2. Определен перечень измеряемых параметров для реализации алгоритма диагностирования РЛ.

3. Разработан алгоритм непрерывного контроля и прогнозирования постепенных отказов с определением характера и места неисправности РЛ.

4. Разработана методика, позволяющая определять места продольных и поперечных неисправностей РЛ с точностью до 25 метров и погрешностью не более 10 %.

5. Сформулирована экстремальная задача нахождения коэффициентов дробно-линейного преобразования, решение которой существует и позволяет определить уточненные параметры рельсового четырехполюсника (ЧП).

6. Построена диагностическая карта областей состояния рельсовой линии на комплексной плоскости.

Достоверность научных положений обоснована теоретическими исследованиями, математическим моделированием и подтверждена экспериментально на Красноярской и Западно-Сибирской железных дорогах.

Практическая ценность работы. На основании проведенных исследований разработаны методика и алгоритм непрерывного контроля и прогнозирования состояния РЛ, которые могут найти применение в системах диагностики и прогнозирования состояния РЛ. Полученные в диссертационной работе научные результаты позволяют определять места возникновения внезапных и прогнозировать появление постепенных неисправностей.

Реализация работы. Диссертационная работа выполнялась в соответствии с планом НИОКР-2003 МПС России (Указание МПС от 28.03.2003 г. №40у) в рамках фундаментальных и поисковых научно-исследовательских работ ОмГУПС: «Разработка методов диагностирования автоблокировки с тональными рельсовыми цепями и централизованным расположением аппаратуры (АБТЦ)».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на девятой международной научно-технической конференции

студентов и аспирантов (г. Москва, 2003 г.); на международной научно-технической конференции инженеров электромехаников и ученых, посвященной тридцатилетию СамГАПС (г. Самара, 2003 г.); на XIV международной научно-технической конференции «Проблемы развития рельсового транспорта» (г. Ялта, 2004 г.); на Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука – третье тысячелетие» (Красноярск, 2005 г.); на международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития» (г. Одесса, 2006 г.); на Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» (г. Таганрог, 2006 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 статей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, библиографического списка и приложений, содержит 137 страниц основного текста, 43 рисунка, 10 приложений. Библиография включает 78 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертационной работы, ее практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследований.

В первом разделе диссертационной работы проведен анализ систем АБ с ТРЦ, выделены и обоснованы сравнительные характеристики данных систем. Проведен анализ измерительных приборов и систем диагностики ТРЦ.

В этой части работы поставлена и решена задача обоснования необходимости включения в систему диагностики ТРЦ функции прогнозирования состояния РЛ.

Возросшие потребности в высоконадежной системе автоблокировки, тяжелые условия эксплуатации РЦ продиктовали появление принципиально новой автоблокировки с рельсовыми цепями на тональных частотах АБТЦ.

В эксплуатации на железных дорогах России известны следующие виды систем автоблокировки, использующие рельсовые цепи тональной частоты:

– автоблокировка с тональными рельсовыми цепями и централизованным размещением аппаратуры АБТЦ;

– микропроцессорная система автоблокировки с децентрализованным размещением аппаратуры и рельсовыми цепями без изолирующих стыков АБ-Е2;

– микропроцессорная унифицированная система автоблокировки АБ-УЕ;

– автоблокировка с тональными рельсовыми цепями и централизованным размещением аппаратуры, реализованная на базе микропроцессорной централизации Еbiлок-950;

– микропроцессорная автоблокировка с тональными рельсовыми цепями, централизованным размещением аппаратуры и дублирующими каналами передачи информации АБТЦ-М.

Наиболее апробированной и распространенной из них на сегодняшний день является система АБТЦ. Все остальные, более новые системы, еще не прошли должной эксплуатационной проверки.

Для каждой системы автоблокировки используются свои тональные рельсовые цепи. С точки зрения диагностирования принципы их работы остаются неизменными, так как РЛ остается прежней. Изменяются лишь длина РЛ и частота сигнального тока. Размещение аппаратуры может варьироваться в зависимости от системы, но принцип диагностирования останется неизменным.

Как показывает практика, системы автоблокировки с ТРЦ так же имеют недостатки. Согласно официальной информации за два года эксплуатации (2004, 2005 гг.) системы АБТЦ на Красноярской ж.д., неисправность рельсовых линий составила 24 % от всех отказов системы.

В связи с этим возникает необходимость дополнения системы АБТЦ системой диагностики РЛ, которая позволит по результатам измерений входных параметров РЦ выдавать информацию об исправном или неисправном состоянии РЛ, а так же конкретизировать тот или иной отказ.

Для диагностики ТРЦ необходимо решение следующей задачи: определить по всем доступным для измерений на посту ЭЦ электрическим величинам характер и место отказа, а также своевременно обнаружить предотказное состояние. Наиболее оптимальными с этой точки зрения являются стационарные системы диагностики и непрерывного контроля. Расположение основной аппаратуры обязательно должно быть на приле-

гающих к перегону станциях, так как предполагается использование измерительной системы с централизованным расположением аппаратуры. Измерительная система должна не только отслеживать текущие значения измеряемых величин, но и выдавать краткую установку (характер и место возникновения неисправности) обслуживающему персоналу при возникновении неисправности в РЛ.

Проанализировав системы диагностики, используемые для анализа параметров ТРЦ, можно сделать вывод: ни одно из измерительных средств не рассчитано для анализа РЛ как источника постепенных и внезапных отказов.

Второй раздел диссертационной работы включает в себя разработку математической модели ТРЦ. Обосновано применение схемы замещения в виде ЧП на основе физической модели рельсовой линии. Рассмотрен вопрос уточнения параметров четырехполюсника РЦ.

Согласно проводимой ОАО «Российские железные дороги» технической политики с 2001 г. бесстыковой путь на железобетонных шпалах принят в качестве основной конструкции на главных и второстепенных линиях.

Технология укладки бесстыкового пути на сегодняшний день предусматривает изменения в строении балластной призмы и использование изоляционных материалов, таких как геотекстиль, пеноплекс и другие. В связи с этим возросло переходное сопротивление «рельсы – земля» по сравнению с предшествующими видами балласта. Общий вид балластной призмы и верхнего строения пути представлены на рис. 1. Благодаря появлению нового балласта и бесстыкового пути, автором предлагается упростить существующую схему замещения ТРЦ.

Расчеты показали, что в условиях повышенного сопротивления «рельсы – земля» утечка сигнального тока РЦ не будет превышать 2 %.

Соответственно, если ранее схема замещения ТРЦ была представлена в виде многополюсника и представляла значительные трудности для теоретического исследования, то теперь ее можно заменить четырехполюсником. Это позволяет применить матричные методы, используемые в электротехнике, и решить вторую задачу, а именно – применить аппарат теории представления линейных групп, конформных отображений, а также мелко-линейных преобразований.

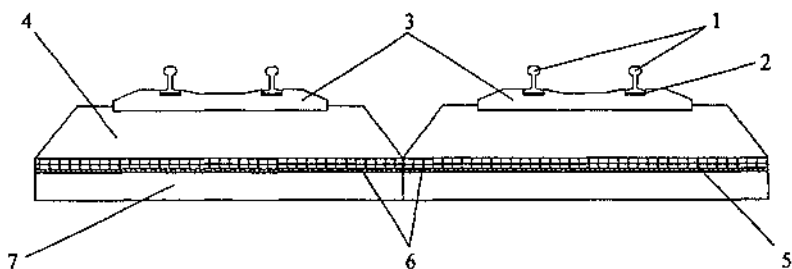


Рис. 1. Общий вид балластной призмы и верхнего строения пути на двухпутном участке: 1 – рельсы; 2 – резиновая подкладка; 3 – железобетонные шпалы; 4 – щебеночный балласт; 5 – пеноплекс-45; 6 – геотекстиль; 7 – старый балластный слой.

Особенностью ТРЦ при централизованном размещении аппаратуры является то, что аппаратура приемного и питающего концов находится на смежной с перегоном станции, что, в свою очередь, требует учитывать реактивное сопротивление кабельной линии, которое имеет емкостной характер и ряд характерных для нее неисправностей.

С учетом вышеизложенного, схему замещения ТРЦ можно представить в виде измененной классической схемы РЦ, как показано на рис. 2.

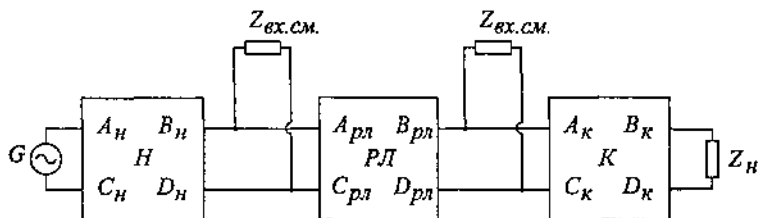


Рис. 2. Схема замещения тональной рельсовой цепи

Четырехполосники в конце (K) и в начале (H) РЦ заменяют кабельную линию, а так же согласующие устройства на приемном и питающем концах соответственно.

Измеряя значения входных и выходных параметров РЦ, можно не только контролировать состояние РЛ, но и прогнозировать постепенные отказы кабеля питающего конца РЦ. Это можно выполнить, анализируя РЦ в нормальном и шунтовом режимах ее работы, используя известные формулы последовательного и параллельного соединения ЧП.

Классический математический аппарат, используемый в теории ЧП, а именно матричный, неудобен для решения задачи поиска отказов и прогнозирования состояния РЛ, поскольку имеет следующие недостатки:

- не позволяет целиком увидеть область изменений входных параметров РЦ на питающем конце для данного режима работы;
- не решает вопрос определения области погрешностей значений вычисляемых параметров при известной погрешности измерений критических значений;
- отсутствует геометрическая наглядность полученных результатов.

Поэтому для решения данной задачи автор предлагает использовать более удобный математический аппарат, эквивалентный матричному – аппарат конформных отображений.

Рассмотрим применение аппарата конформных отображений и дробно-линейных преобразований для анализа работы ТРЦ.

Матрицы четырехполосников представляют элементы группы $PSL_2(C)$ (проективной специальной линейной группы второго порядка с коэффициентами из поля комплексных чисел). Элементы этой группы получаются отождествлением следующих матриц:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -A & -B \\ -C & -D \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Эта группа широко известна в математике и применяется при решении множества собственно математических проблем. Группа $PSL_2(C)$ имеет также представление дробно-линейными преобразованиями комплексной плоскости. В задачах электротехники дробно-линейное преобразование задается формулой

$$W = \frac{A \cdot Z + B}{C \cdot Z + D}, \quad (2)$$

и описывает отображение множества выходных параметров четырехполосника Z во множество входных W .

Электротехнический смысл конформных преобразований заключается в следующем. В качестве нагрузки ЧП рассматривается область значений комплексных сопротивлений, от значения $Z = 0$ – короткого замыкания до $Z = \infty$ разрыва или холостого хода. Так как действительная часть комплексного сопротивления всегда неотрицательна, $Re(Z) \geq 0$, то значение его представляет собой правую полуплоскость комплексной плоскости. Кон-

формное отображение, соответствующее ЧП, преобразует правую полуплоскость, дополненную бесконечно удаленной точкой, на окружность или полуплоскость, лежащую в правой полуплоскости. Положение области, получившейся при таком отображении, будет зависеть от параметров ЧП рельсовой линии, а положение точки внутри области – от сопротивления выходной нагрузки. Пример такого преобразования представлен на рис. 3.

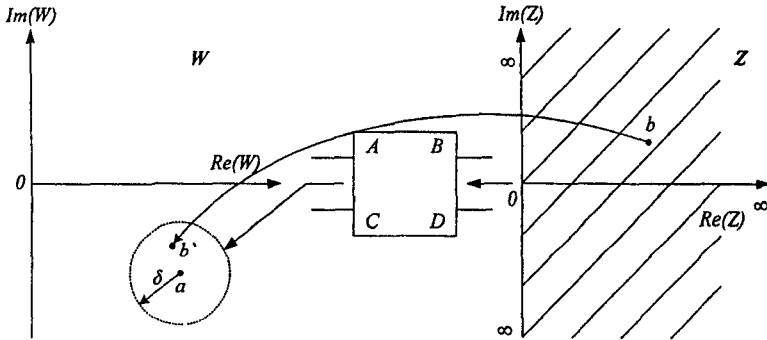


Рис.3. Пример конформного преобразования $W = \frac{A \cdot Z + B}{C \cdot Z + D}$ на комплексной плоскости, при фиксированных значениях параметров ЧП

Все сложные преобразования областей в электротехнике основаны на суперпозиции трех простейших отображений – сдвига, инверсии и растяжения (см. рис. 4).

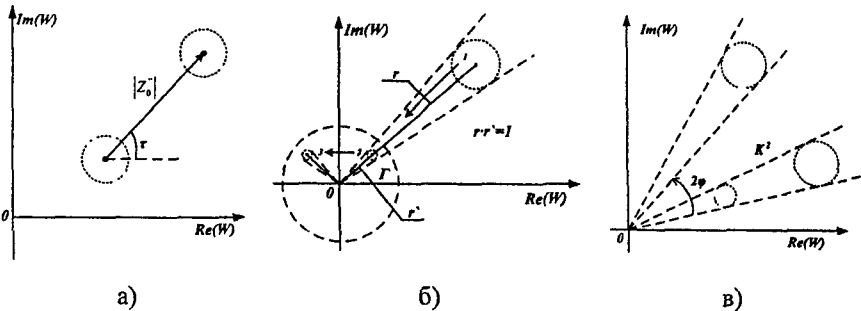


Рис. 4. Конформные преобразования типа сдвиг (а), инверсия (б) и растяжение (в)

Для нахождения области отображения всей правой полуплоскости комплексных сопротивлений, нагруженных на выход четырехполюсника

РЦ, в силу известного в теории конформных отображений принципа соответствия границ, необходимо найти, куда отобразится граница области (прямая $\operatorname{Re}(Z)=0$) при неизменных параметрах четырехполюсника РЦ. Результатом конформного преобразования прямой вида $\operatorname{Re}(\lambda Z)=\alpha$ является окружность с центром в точке

$$w_0 = \frac{2\alpha A\bar{C} + A\bar{D}\lambda + B\bar{C}\lambda}{2\alpha|C|^2 + 2\operatorname{Re}(C\bar{D}\lambda)}, \quad (3)$$

и радиусом

$$\rho = \left| \frac{(AD - BC)\lambda}{2\alpha|C|^2 + 2\operatorname{Re}(C\bar{D}\lambda)} \right|, \quad (4)$$

где A, B, C, D – коэффициенты четырехполюсника РЦ;

$\bar{B}, \bar{C}, \bar{D}, \bar{\lambda}$ – сопряженные комплексные величины;

λ, α – коэффициенты, для прямой $\operatorname{Re}(Z)=0$, $\lambda=1, \alpha=0$.

Чтобы определить параметры четырехполюсника РЦ предлагается проводить три измерения входного сопротивления при трех различных известных сопротивлениях, нагруженных на выход РЦ.

Формулы для расчета коэффициентов четырехполюсника РЦ, выводятся исходя из сохранения так называемого ангармонического отношения четырех точек при дробно-линейном преобразовании на комплексной плоскости. При условии выполнения соотношения $AD - BC = 1$, т.е. матрица

$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ представляет элемент группы $\operatorname{PSL}_2(\mathbb{C})$, а РЦ является пассивным

ЧП, коэффициенты A, B, C, D можно найти следующим формулам:

$$\begin{aligned} A &= \frac{W_2 \cdot W_1 \cdot (Z_2 - Z_1) + W_2 \cdot W_3 \cdot (Z_3 - Z_2) + W_3 \cdot W_1 \cdot (Z_1 - Z_3)}{\sqrt{(Z_1 - Z_2)(Z_1 - Z_3)(Z_2 - Z_3)(W_1 - W_2)(W_1 - W_3)(W_2 - W_3)}}, \\ B &= \frac{W_2 \cdot W_3 \cdot Z_1 \cdot (Z_2 - Z_3) + W_2 \cdot W_1 \cdot Z_3 \cdot (Z_2 - Z_1) + W_3 \cdot W_2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 - Z_1)}{\sqrt{(Z_1 - Z_2)(Z_1 - Z_3)(Z_2 - Z_3)(W_1 - W_2)(W_1 - W_3)(W_2 - W_3)}}, \\ C &= \frac{W_1 \cdot (Z_2 - Z_3) + W_2 \cdot (Z_3 - Z_1) + W_3 \cdot (Z_1 - Z_2)}{\sqrt{(Z_1 - Z_2)(Z_1 - Z_3)(Z_2 - Z_3)(W_1 - W_2)(W_1 - W_3)(W_2 - W_3)}}, \\ D &= \frac{W_1 \cdot Z_1 \cdot (Z_2 - Z_3) + W_2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 - Z_1) + W_3 \cdot Z_3 \cdot (Z_1 - Z_2)}{\sqrt{(Z_1 - Z_2)(Z_1 - Z_3)(Z_2 - Z_3)(W_1 - W_2)(W_1 - W_3)(W_2 - W_3)}}. \end{aligned} \quad (5)$$

где W_1, W_2, W_3 – измеренные значения входного сопротивления РЦ,

Z_1, Z_2, Z_3 – известные сопротивления, подключаемые к выходу рельсовой цепи.

При выполнении измерений появляются систематические и случайные погрешности. Для уменьшения случайной ошибки принято проводить дополнительные измерения параметров четырехполюсника при одинаковых значениях выходной нагрузки. В этом случае из серии измеренных значений $H_1, H_2 \dots H_m$ находят среднее арифметическое, которое считается наиболее вероятным значением искомой величины.

Для дальнейшего уменьшения ошибки автором предлагается применить другой метод, основанный на определении по специальным формулам уточненных параметров четырехполюсника за счет измерений при дополнительных (превышающих необходимое число два для симметричных и три для несимметричных четырехполюсников) известных значениях выходной нагрузки.

Разработанная методика позволяет уточнить параметры рельсового ЧП. Она основана на том, чтобы абсолютная погрешность метрики, определяемая разницей между W и W^* , была как можно меньше не в Евклидовой, а в метрике сферы Римана (см. рис. 5) для серии из n измерений, в соответствии с методом наименьших квадратов.

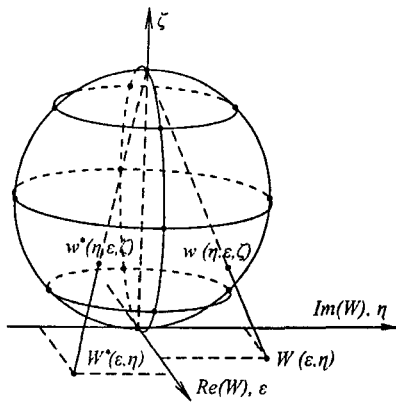


Рис. 5. Сфера Римана

Расстояние между двумя стереографическими проекциями точек на комплексной плоскости в метрике сферы Римана выражается следующей формулой.

$$\rho(W_1, W_2) = \frac{|W_2 - W_1|}{\sqrt{1 + |W_1|^2} \cdot \sqrt{1 + |W_2|^2}}. \quad (6)$$

Формулу (2) можно представить в виде:

$$W_i = E + \frac{F}{Z_i + G}, \quad (7)$$

где Z_i – сопротивление на выходном конце, а комплексные коэффициенты F , E и G связаны с параметрами A , B , C и D четырехполюсника соотношениями:

$$F = -\frac{1}{C^2}; E = \frac{A}{C}; G = \frac{D}{C}. \quad (8)$$

Распишем и получим целевую функцию:

$$W_i = e + \tilde{e}j + \frac{f + \tilde{f}j}{z_i + \tilde{z}_i j + g + \tilde{g}j} =,$$

$$W_i = e + \tilde{e}j + \frac{f(z_i + g) + \tilde{f}(\tilde{z}_i + \tilde{g}) + (\tilde{f}(z_i + g) - f(\tilde{z}_i + \tilde{g}))j}{(z_i + g)^2 + (\tilde{z}_i + \tilde{g})^2} =,$$

$$W_i = (e + \frac{f(z_i + g) + \tilde{f}(\tilde{z}_i + \tilde{g})}{(z_i + g)^2 + (\tilde{z}_i + \tilde{g})^2}) + (\tilde{e} + \frac{\tilde{f}(z_i + g) - f(\tilde{z}_i + \tilde{g})}{(z_i + g)^2 + (\tilde{z}_i + \tilde{g})^2})j,$$

$$\Phi(e; \tilde{e}; f; \tilde{f}; g; \tilde{g}) = \sum_{i=1}^n (\rho(e; \tilde{e}; f; \tilde{f}; g; \tilde{g}))^2 =$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{(e - V_i + \frac{f(z_i + g) + \tilde{f}(\tilde{z}_i + \tilde{g})}{(z_i + g)^2 + (\tilde{z}_i + \tilde{g})^2})^2 + (\tilde{e} - \tilde{V}_i + \frac{\tilde{f}(z_i + g) - f(\tilde{z}_i + \tilde{g})}{(z_i + g)^2 + (\tilde{z}_i + \tilde{g})^2})^2}{(1 + V_i^2 + \tilde{V}_i^2)(1 + (e + \frac{f(z_i + g) + \tilde{f}(\tilde{z}_i + \tilde{g})}{(z_i + g)^2 + (\tilde{z}_i + \tilde{g})^2})^2 + (\tilde{e} + \frac{\tilde{f}(z_i + g) - f(\tilde{z}_i + \tilde{g})}{(z_i + g)^2 + (\tilde{z}_i + \tilde{g})^2})^2)} \rightarrow \quad (9)$$

→ min

Получена экстремальная задача нахождения коэффициентов дробно-линейного преобразования, решение которой уточняет параметры четырехполюсника РЦ. Данная задача имеет хотя бы одно решение, так как функция $\Phi(e; \tilde{e}; f; \tilde{f}; g; \tilde{g})$ непрерывна и ограничена снизу ($\Phi \geq 0$), а сфера Римана является компактным многообразием (теорема Вейерштрасса). Таким образом, решается третья поставленная задача диссертационной работы.

Проведен анализ математической модели ТРЦ при возникновении продольных и поперечных неисправностей с применением классической теории РЦ, основанной на понятии ЧП.

В результате конформного преобразования правой полуплоскости (см. рис. 3) получаем множество точек (значений входного сопротивления), имеющих форму окружности с центром в точке A и радиусом R . Назовем эту окружность δ – окрестностью. При фиксированных параметрах рельсового ЧП значения входного сопротивления РЛ будут изменяться в пределах данной δ – окрестности, при любых изменениях значения выход-

ной нагрузки ($\text{Re}(Z) \geq 0$). При изменении параметров рельсового ЧП будет изменяться положение центра (точки A) и размеры δ – окрестности, но δ – окрестность обязательно будет представлять собой окружность. Рассмотрим направление движения и изменение δ – окрестности при последовательном проследовании шунта с фиксированным значением и подвижной единицы от приемного конца к питающему (см. рис. 5).

На рис. 5 точка A соответствует значению входного комплексного сопротивления при наложении шунта на приемном конце РЛ. Значение входного комплексного сопротивления в режиме «короткого замыкания» (КЗ) РЦ (шунт находится на питающем конце) обозначено точкой A'' . Направление движения данных δ – окрестностей обусловлено емкостным характером сопротивления кабеля СЦБ.

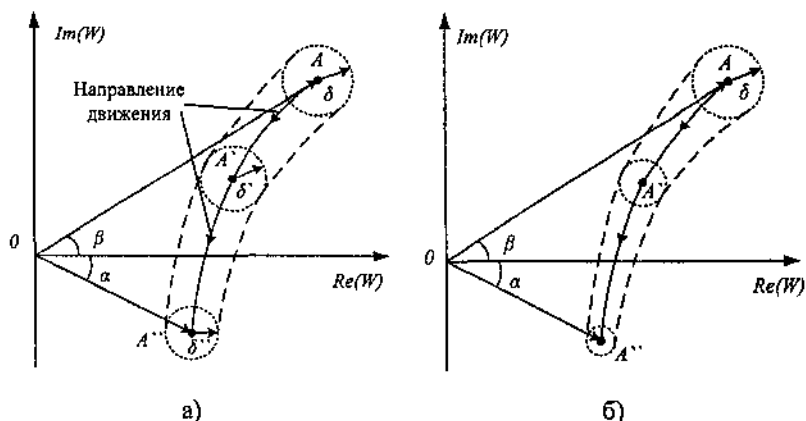


Рис. 5. Изменение положения δ – окрестности входного сопротивления в зависимости от (а) места внесения шунта на РЛ, (б) места положения подвижной единицы на РЛ

При эксплуатации устройств автоматики и телемеханики нельзя исключить появление внезапных отказов. Вместе с тем существует необходимость в обеспечении минимального времени влияния этих отказов на работу устройств автоматики и перевод системы в защитное состояние. На рис. 6 изображено поведение входного комплексного сопротивления РЦ при появлении внезапного отказа.

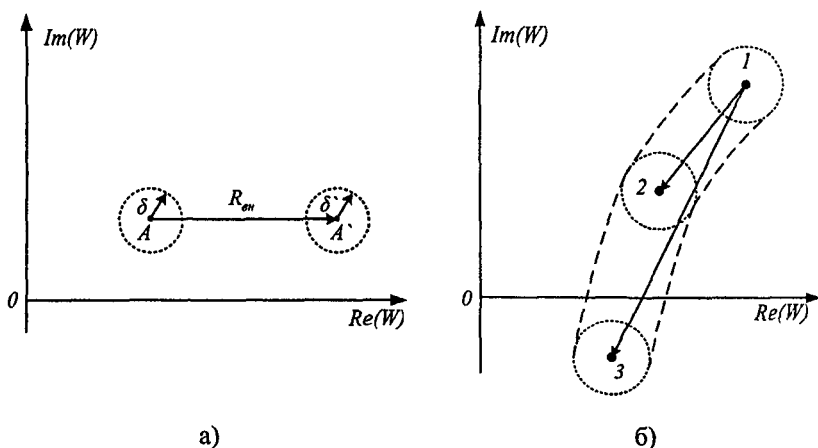


Рис. 6. Поведение области входного сопротивления РЦ: (а) при появлении продольной неисправности; (б) при появлении поперечной неисправности

Траектория смещения точки на комплексной плоскости обусловлена не только значением вносимого сопротивления в четырехполосника РЛ, но и характером возникшей неисправности. На рис. 6,б перемещению точки из 1 в 2 или 3, соответствует наличие неисправности типа КЗ. В РЛ наблюдается для точки 2 – КЗ на расстоянии l_2 от приемного конца РЛ, для точки 3 – короткое замыкание на питающем конце РЛ. Точность определения места положения неисправности зависит от неисправности, параметров ЧП и точности измерительных приборов. Для идентификации такого события необходимо проводить измерения с частотой, достаточной для фиксации подвижной единицы на самой короткой рельсовой линии. После расчета получаем временной интервал, равный 5 с.

Наряду с внезапными существуют и постепенные отказы. Данный вид отказов определяется при нормальной работе РЦ. В этом случае периодичность измерения не критична, достаточно отслеживать постепенные изменения внешних условий, порядка одного измерения в минуту.

В качестве дополнительной информации при определении места и характера возникновения постепенных отказов, автором предлагается использовать измерения, проводимые во время движения подвижной единицы по РЛ (см. рис. 7).

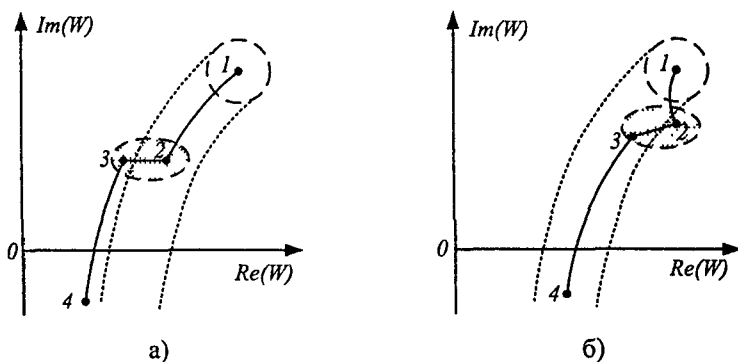


Рис. 7 – Неисправности, определяемые во время передвижения подвижной единицы: (а) поперечные; (б) продольные

На рис. 7 (а, б) изображены возможные поведения входного комплексного сопротивления РЦ в процессе передвижения подвижной единицы по РЛ от приемного конца к питающему при возникновении продольных и поперечных неисправностей.

Методика обнаружения неисправностей РЛ применяется следующим образом. Входное сопротивление, в силу ограничений (симметричности и однородности РЛ), плавно изменяется для нормально работающей РЛ при движении по ней подвижной единицы. Обнаружение неисправности сводится к анализу полученных значений входного сопротивления. Резкое изменение сопротивления говорит о наличии неисправности в РЛ. В зависимости от траектории движения текущего значения входного сопротивления РЦ можно определить характер и место возникновения неисправности. В этом случае при появлении поезда на участке измерения необходимо проводить в режиме реального времени.

В третьем разделе диссертационной работы решена четвертая задача – построение диагностических карт областей на комплексной плоскости для различных диагностических состояний РЛ.

Упрощенная схема ТРЦ показана на рис. 8.

Автором предлагается следующий алгоритм измерений в ТРЦ. Направление движения поезда слева направо. При движении поезда можно выделить следующие контрольные точки для измерений:

1. Первая колесная пара шунтирует рельсовую линию РЛ1 на релейном конце ПП1 (с учетом дополнительной зоны шунтирование РЛ1 про-

изойдет на некотором расстоянии от приемного конца ПП1 в зависимости от частоты сигнального тока). Зафиксировать данное событие можно по состоянию путевого приемника ПП1.

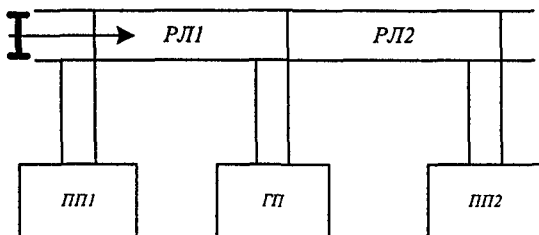


Рис. 8. Структурная схема ТРЦ

2. Шунтирование рельсовых линий РЛ1 и РЛ2 можно зафиксировать по состоянию путевых приемников ПП1, ПП2. В результате шунтирования получаем режим короткого замыкания для кабельной линии. Измерения входного сопротивления в данном режиме позволит сделать соответствующие выводы о состоянии кабельной линии.

3. Освобождение рельсовой линии РЛ1, последней колесной парой можно зафиксировать по состоянию путевого приемника ПП1. В этом случае наблюдается изменение значений входного сопротивления в зависимости от удаления последней колесной пары к приемному концу ПП2, до освобождения рельсовой линии РЛ2.

После того, как подвижная единица удалится на некоторое расстояние и не будет влиять на работу рельсовых линий РЛ1 и РЛ2, ТРЦ переходит в нормальный режим работы. В этом режиме есть возможность измерять токи и напряжения на питающем и приемных концах, находить изменение угла сдвига фаз и анализировать РЛ на предмет возникновения постепенных неисправностей.

В процессе измерений можно выделить следующие этапы:

1. Сбор данных. В ходе каждого отдельного измерения необходимо получить значения напряжения, тока и угла сдвига фаз между ними на приемном конце РЛ. Значения измеряемых величин регистрируются измерительным средством по синхронизирующим отметкам времени.

2. Анализ сигнала. Задача этого этапа заключается в расчете значений входного комплексного сопротивления в режимах короткого замыка-

ния, холостого хода и нормального функционирования РЛ для соответствующих РЦ.

3. Послеоперационная обработка. Пакет программ (Mathlab, Mathcad) используется для нахождения параметров четырехполосника РЛ, расчета производных параметров (волнового сопротивления и постоянной распространения сигнала) и сопоставления их с расчетными данными.

Для анализа основных диагностических состояний бесстыковой РЛ рассмотрим схему замещения с распределенными параметрами

Пусть несущая и модулирующая частота сигнального тока равны 580 и 12 Гц соответственно, длина РЛ 650 м, сопротивление изоляции равно 1 Ом·км. Правая полуплоскость $\text{Re} Z \geq 0$ при конформном отображении перейдет в окружность с центром в точке, рассчитываемой по формуле (3) и радиусом, рассчитываемым по формуле (4) (см. рис.9). В результате такого преобразования получаем область значений входных сопротивлений

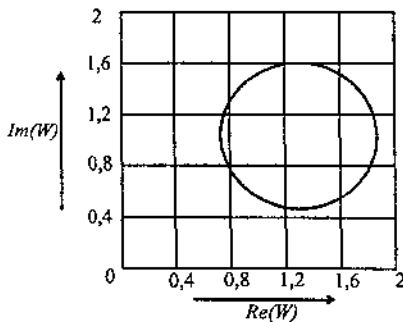


Рис. 9. Нормальная область РЛ

данного ЧП. Для любой нагрузки измеренное значение входного сопротивления будет находиться в полученной области. Размер и место нахождения области зависят от параметров четырехполосника РЛ. Нормальной областью РЛ будем называть область входных сопротивлений, измеренных при свободной и исправной рельсовой линии.

Для анализа и моделирования продольных неисправностей, воспользуемся методом вносимого сопротивления. Коэффициенты четырехполосника РЛ при возникновении продольных неисправностей можно найти как:

$$\begin{pmatrix} A_{in} & B_{in} \\ C_{in} & D_{in} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{ch} \gamma l_2 & Z_s \cdot \text{sh} \gamma l_2 \\ \frac{1}{Z_s} \cdot \text{sh} \gamma l_2 & \text{ch} \gamma l_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & R_{in} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{ch} \gamma l_1 & Z_s \cdot \text{sh} \gamma l_1 \\ \frac{1}{Z_s} \cdot \text{sh} \gamma l_1 & \text{ch} \gamma l_1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где l_1, l_2 – расстояния от релейного и питающего концов до места повреждения (внесения продольного сопротивления), км.

Согласно расчетам, получаем области для разных вносимых сопротивлений (см. рис. 10).

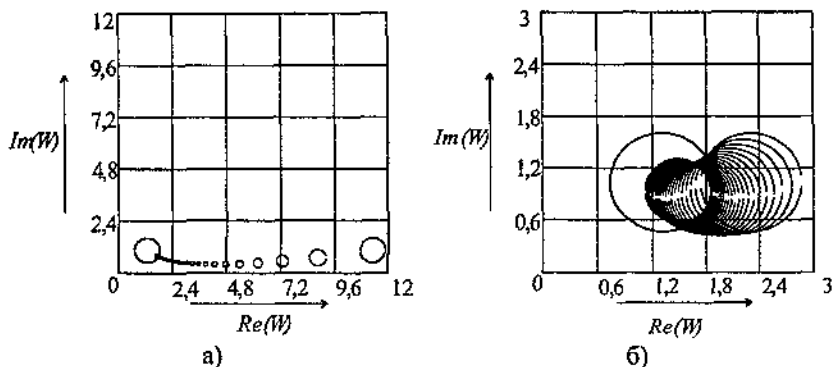


Рис. 10. Движение области входного сопротивления РЛ при внесении продольного сопротивления значением (а) 10 Ом, (б) 1 Ом (интервал 25 м)

Аналогично проводится анализ движения области при возникновении неисправности типа КЗ на РЛ. Коэффициенты четырехполосника РЛ в этом режиме находятся по формуле

$$\begin{pmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ch\gamma l_2 & Z_e \cdot sh\gamma l_2 \\ \frac{1}{Z_e} \cdot sh\gamma l_2 & ch\gamma l_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{R_w} & 0 \\ \frac{1}{R_w} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} ch\gamma l_1 & Z_e \cdot sh\gamma l_1 \\ \frac{1}{Z_e} \cdot sh\gamma l_1 & ch\gamma l_1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где R_w – сопротивление шунта (поперечное сопротивление).

На рис.11 изображено перемещение области в зависимости от места внесения неисправности типа КЗ на РЛ.

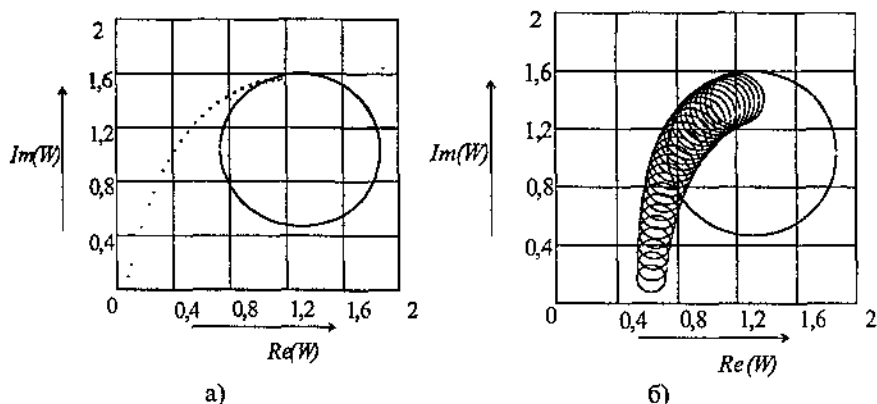


Рис. 11. Движение области входного сопротивления РЛ при внесении поперечного сопротивления значением (а) 0,06 Ом (б) 1 Ом (интервал 25 м)

В результате проведенного моделирования следует отметить:

- чем больше вносимое продольное сопротивление, тем точнее идентифицируется неисправность;
- для малых вносимых продольных сопротивлений идентификация отказа затруднена;
- чем меньше сопротивление шунта, тем точнее идентифицируется место отказа;
- поведение исследуемых моделей соответствует теоретическим основам работы РЦ.

Проанализируем поведение нормальной области при возникновении продольных и поперечных неисправностей с учетом смежной РЛ, путевого трансформатора и сигнального кабеля СЦБ на питающем конце. В качестве смежной рассматриваем бесконечно длинную РЛ, значение входного сопротивления которой находится, как отношение параметров (A/C). Путевой трансформатор рассматриваем как идеальный ЧП с известным коэффициентом трансформации $K=38$. Длина кабеля известна, а его параметры рассчитываются, исходя из справочных данных. В этом случае матричное представление рельсовой цепи для всех диагностических режимов будет выглядеть как:

$$\begin{pmatrix} A'' & B'' \\ C'' & D'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} K & 1 \\ 1 & K \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{sh\gamma}{Z_* \cdot ch\gamma} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} ch\gamma l_p & Z_* \cdot sh\gamma l_p \\ \frac{1}{Z_*} \cdot sh\gamma l_p & ch\gamma l_p \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где A'' , B'' , C'' и D'' – коэффициенты ЧП с учетом смежной РЛ. Аналогично формулам (13, 14), получаем формулы для условий внесения продольного и поперечного сопротивлений. Построение областей показано на рис. 12, а.

На рис. 12, б изображена нормальная область ТРЦ. Внутри этой области находится меньшая область, рассчитанная с учетом подключения на приемном конце бесконечно длинной смежной РЛ, согласующих устройств и сигнального кабеля СЦБ. Точкой обозначено текущее значение входного сопротивления нормально работающей ТРЦ.

В результате моделирования поперечных и продольных неисправностей получены совокупности областей, по которым можно судить о возникновении той или иной неисправности на определенном расстоянии от питающего или релейного конца РЛ.

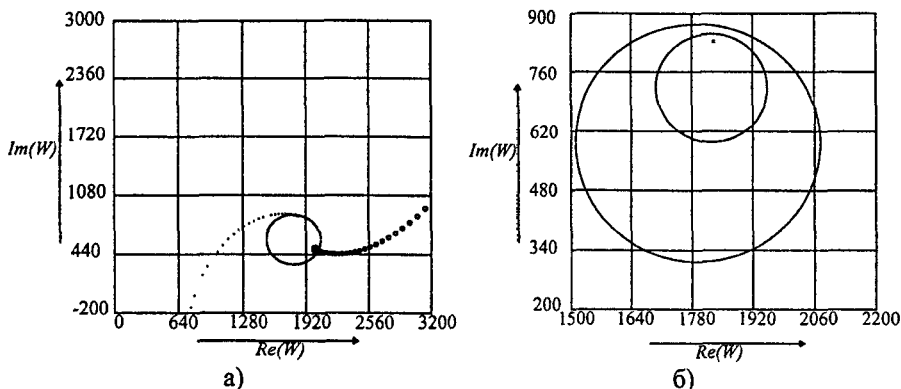


Рис. 12. Карта области: (а) входного сопротивления ТРЦ при внесении продольного и поперечного сопротивлений номиналами 10 и 0,06 Ом (интервал 25 м); (б) – область входного сопротивления нормально работающей РЦ

В четвертом разделе решены пятая и шестая задачи диссертационной работы.

Эффективность разработанных алгоритма и методики непрерывного контроля и прогнозирования состояния РЛ подтверждена эксплуатационными испытаниями, проведенными сотрудниками кафедры «Автоматика и телемеханика» ОмГУПС совместно со специалистами отделов сигнализации, централизации и блокировки Красноярской и Западно-Сибирской железных дорог, о чем составлены акты испытаний от 03 и 10 октября 2006 г соответственно.

На рис. 13 приведена карта областей, совмещенная с расчетными данными на основании измеренных величин для шунтового режима работы РЦ 2-2П и 2-4П перегона Красноярск – Бугач Красноярской железной дороги.

По результатам эксплуатационных испытаний сделано заключение:

1. Обработка полученных результатов показала адекватность теоретических исследований и целесообразность использования разработанной математической модели.

2. Применение разработанных алгоритма и методики непрерывного контроля и прогнозирования состояния РЛ, позволяет выявлять характер и место возникновения продольных и поперечных неисправностей с точностью до 25 м и погрешностью не более 10%.

3. Проведенные эксперименты показали перспективность диагностики состояния ТРЦ с использованием предложенной модели.

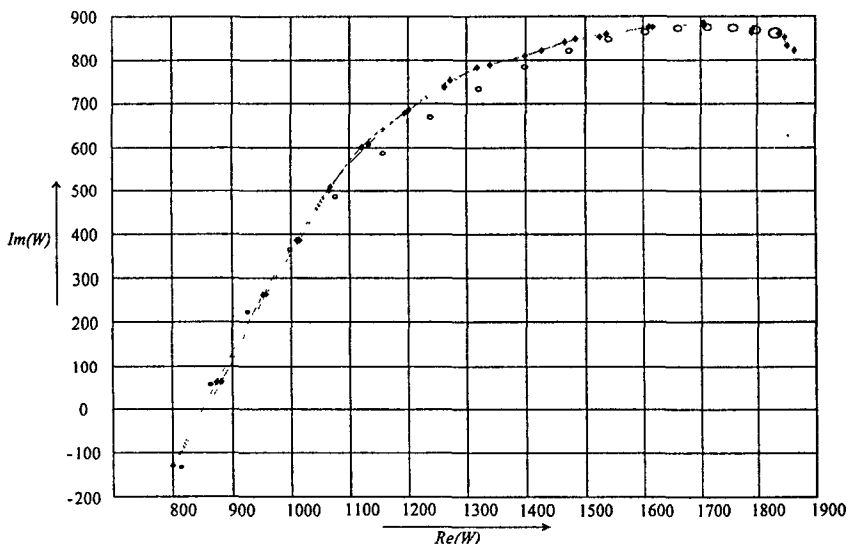


Рис. 13. Совмещенные расчетные и экспериментальные данные для ТРЦ 2-2П и 2-4П, перегона Красноярск – Бугач Красноярской железной дороги

При использовании предложенных алгоритма и методики непрерывного контроля и прогнозирования состояния РЛ экономический эффект обеспечивается за счет снижения простоев поездов и уменьшения среднего времени поиска и устранения неисправностей.

Выполнен экономический расчет эффективности внедрения диагностических устройств, использующих в процессе диагноза разработанные алгоритм и методику непрерывного контроля и прогнозирования состояния РЛ.

В приложениях представлены графические материалы научных экспериментов и аналитических расчетов, программы и акты проведения эксплуатационных испытаний на Красноярской и Западно-Сибирской железных дорогах, а также акты о внедрении результатов научных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основании теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в диссертационной работе, получены следующие основные результаты и выводы

1. Обоснована необходимость разработки метода прогнозирования состояния рельсовой линии для систем диагностики ТРЦ. Анализ отказов ТРЦ показал, что в среднем 24 % неисправностей, от общего числа, приходится на РЛ.

2. Анализ измерительных средств, используемых для измерения параметров ТРЦ показал, что ни одно из них не рассчитано для диагностики рельсовой линии – как источника постепенных и внезапных отказов.

3. Предложенный аппарат конформных отображений и дробно-линейных преобразований позволяет увидеть всю область изменения параметров тональных рельсовых цепей.

4. Сформулирована экстремальная задача нахождения коэффициентов дробно-линейного преобразования, с использованием метрики сферы Римана, решение которой существует и позволяет определить уточненные параметры четырехполюсника рельсовой цепи.

5. Применение разработанных методов и алгоритма непрерывного контроля и прогнозирования состояния РЛ позволяет выявлять места продольных и поперечных неисправностей с точностью до 25 м.

6. Построены диагностические карты областей состояния РЛ на комплексной плоскости при возникновении продольных неисправностей значениями от 1 до 10 Ом и при возникновении поперечных неисправностей значениями от 0,06 до 10 Ом.

7. Достоверность разработанных методов и алгоритма подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями на перегоне Красноярск – Бугач Красноярской железной дороги и на станции Московка Западно-Сибирской железной дороги. Расхождение результатов расчетов с экспериментальными данными не превышает 10 %.

8. Выполнен расчет экономической эффективности внедрения системы диагностики ТРЦ, использующей разработанные алгоритм и методы. Срок окупаемости затрат на внедрение системы диагностики на участке Зелеево – Бугач Красноярской ж.д. составил 12 месяцев. Чистый дисконтированный доход за десять лет составит 879190,69 руб.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Сероштанов С. С. Математическое моделирование режимов работы тональных рельсовых цепей / С. С. Сероштанов, Д. Ю. Землянухин // Тез. докл. девятой междунар. науч.–техн. конф. студентов и аспирантов. М., 2003. С. 271-272.
2. Опыт эксплуатации и перспективы внедрения тональных рельсовых цепей на станциях/ С. С. Сероштанов, С. В. Власенко и др.// Вестник инж. электромехаников ж.-д. тр. В. 1. Самара, 2003. С. 253-255.
3. Разработка методов диагностирования автоблокировки с тональными рельсовыми цепями и централизованным размещением аппаратуры (АБЦ) / С. С. Сероштанов, С. А. Лунев и др.// Сб. науч. статей / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2003. С. 253-255.
4. Использование аппарата конформных отображений в диагностике устройств СЦБ / С. С. Сероштанов, О. В. Гателюк и др. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. Луганськ, 2004. № 8(78). С. 162-165.
5. Сероштанов С. С. Применение компьютера для измерения и анализа сложных сигналов железнодорожной автоматики и телемеханики / С. С. Сероштанов, А. Г. Ходкевич // Молодежь и наука – третье тысячелетие: Сб. мат. всероссийской научн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / Гос. ун-т цветных металлов и золота. Красноярск, 2005. С. 547-549.
6. Сероштанов С. С. Прогнозирование постепенных отказов с определением характера и места неисправности в системах железнодорожной автоматики и телемеханики / С. С. Сероштанов, А. Г. Ходкевич // Материалы международной науч.-практ. конф. «Научные исследования их практическое применение. Современное состояние и пути развития `2006» Т 5. Одесса: Черноморье, 2006. С. 8-13.
7. Сероштанов С. С. Применение математического аппарата конформных отображений для непрерывного контроля и прогнозирования состояния тональных рельсовых цепей/ С. С. Сероштанов, С. А. Лунев// Омский научный вестник. № 9(46). Омск, 2006. С. 98-102.

Подписано к печати	20.12.06г.	Печ.л. – 1,5
Печать - ризография.	Бумага для множит. апп.	Формат 60x84 1\16
Тираж 100 экз.	Заказ № 1322.	

СР ПГУПС 190031, С-Петербург, Московский пр. 9