

Министерство путей сообщения РФ
Департамент кадров и учебных заведений

САМАРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

Е.М. ТАРАСОВ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЬСОВЫХ
ЦЕПЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ**

**Учебное пособие для студентов специальности «Автоматика,
телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»**

Рекомендовано учебно-методическим объединением в качестве учебного
пособия для вузов железнодорожного транспорта

Самара 2003

УДК 656.259.12

Т – 19

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
Российского государственного открытого технического университета
путей сообщения
И.Е. Дмитренко

Доктор технических наук, профессор
Самарской государственной академии путей сообщения
О.А. Кацюба

Начальник
Департамента информатизации и связи РАО ж.д. РФ
А.И. Данилов

Тарасов Е.М.

Т – 19 Математическое моделирование рельсовых цепей с распределенными параметрами рельсовых линий: Учеб. пособие. – Самара: СамГАПС, 2003. – 118с.

ISBN 5 – 901267 – 32 – X

Рассматривается структура, основные функции и область применения рельсовых цепей, их классификация, основные пути совершенствования алгоритмов функционирования, характеристики рельсовых линий – чувствительных элементов датчика состояния участков путей, рельсовых цепей, неоднородности в рельсовых линиях, математические модели нормального, шунтового и контрольного режимов при четырехполюсной схеме замещения рельсовых линий, а также при многополюсной схеме замещения рельсовых линий, математические модели согласующих устройств рельсовой цепи.

Пособие предназначено для студентов специальности 210700 «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» при изучении теории рельсовых цепей и математического моделирования систем и устройств автоматики и телемеханики, а также для аспирантов и инженеров, разработчиков систем интервального регулирования движением поездов.

Табл. - 2, ил. - 35, прил. – 3, библиогр. назв. – 27.

УДК 656.259.12

ISBN 5 – 901267 – 32 – X

© Самарская государственная
академия путей сообщения, 2003
© Тарасов Е.М., 2003

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	1
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. СТРУКТУРА РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ.....	10
1.1. Основные функции и область применения рельсовых цепей.....	10
1.2. Классификация рельсовых цепей.....	10
1.3. Требования к рельсовым цепям.....	14
1.4. Основные пути совершенствования алгоритмов функционирования рельсовых цепей.....	17
Вопросы и упражнения для самопроверки.....	28
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНИЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	29
2.1. Общие сведения о линиях с распределенными параметрами.....	29
2.2. Гармонические режимы в рельсовых линиях.....	30
2.3. Первичные и вторичные параметры рельсовых линий.....	33
2.4. Неоднородные длинные линии.....	36
2.5. Линия с распределенными параметрами как четырехполюсник.....	37
Вопросы и упражнения для самопроверки.....	44
3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНОЙ СХЕМЕ ЗАМЕЩЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ.....	46
3.1. Параметры рельсовых линий.....	46
3.2. Математические модели нормального режима.....	48
3.3. Математические модели шунтового режима.....	52
3.4. Математические модели контрольного режима.....	55
3.5. Машинная реализация математических моделей.....	59
Вопросы и упражнения для самопроверки.....	61
4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ МНОГОПОЛЮСНОЙ СХЕМЕ ЗАМЕЩЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ.....	62
4.1. Схемы замещения рельсовой цепи и ее компонент.....	62
4.2. Схемы замещения и параметры рельсовых линий.....	63
4.3. Матрица $[A]_O^N$ – параметров несимметричной трехпроводной рельсовой линии в нормальном режиме.....	68
4.4. Матрица $[A]_O^S$ – параметров несимметричной трехпроводной рельсовой линии в шунтовом режиме.....	71
4.5. Матрица $[A]^{OK}$ – параметров несимметричной трехпроводной рельсовой линии в контрольном режиме.....	77
4.6. Определение $[A]$ – параметров дроссель – трансформаторов в симметричном режиме.....	83
4.7. Определение $[A]$ параметров дроссель – трансформаторов с учетом секционирования обмоток.....	92
4.8. Методика определения $[A]$ – параметров дроссель – трансформаторов, учитывающая влияние земляного тракта.....	101
Вопросы и упражнения для самопроверки.....	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	109
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	116

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для изучения теоретической части дисциплин «Станционные системы автоматики и телемеханики», «Автоматика, телемеханика на перегонах», «Математическое моделирование» студентами дневной и заочной форм обучения специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». Будущие специалисты по проектированию и эксплуатации устройств железнодорожной автоматики и телемеханики должны изучить процессы, протекающие в рельсовых линиях – первичных датчиках информации о состоянии рельсовых линий участков контроля, чтобы успешно работать в условиях функционирования реальных систем интервального управления движением поездов.

Целью настоящего пособия является систематическое изложение вопросов, связанных с моделированием рельсовых цепей, в которых рельсовые линии представлены в виде четырехполюсных и многополюсных схем. Материалы пособия максимально ориентированы на использование математических пакетов персональных ЭВМ и базируются на публикациях отечественных авторов и оригинальных результатах, полученных в Самарской государственной академии путей сообщения в процессе выполнения научно-исследовательских работ.

Кроме теоретических основ, в пособии приводятся примеры и контрольные вопросы для самостоятельного изучения материала в области математического моделирования, устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Автор надеется, что пособие будет полезно также широкому кругу специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией электрических рельсовых цепей.

Пособие включает введение, 4 главы основного текста и заключение, а также вопросы для закрепления изученного материала. В основном тексте рассматриваются вопросы классификации рельсовых цепей, применяемых на магистральном железнодорожном транспорте РФ; основные сведения о распространении сигнала по длинным линиям (представляющим рельсовые линии); уравнения состояний линий; представления рельсовых линий в виде четырехполюсных и многополюсных схем в различных режимах; представления неоднородностей в рельсовых линиях в виде сосредоточенных и распределенных схем; определения матриц параметров четырехполюсных

и многополюсных схем рельсовых линий; различного вида дроссель – трансформаторов, и матриц учета взаимного влияния смежных рельсовых цепей. Приведенные материалы представлены в разрозненных литературных источниках, поэтому в настоящем учебном пособии сделана попытка рассмотреть эти вопросы совместно.

Автор выражает глубокую признательность кафедре «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Самарской государственной академии путей сообщения (зав. кафедрой проф. В.Б.Гуменников) за ценные замечания и рекомендации, которые были учтены автором при подготовке рукописи.

Отзывы, замечания и предложения по содержанию пособия просим направлять по адресу: 443066, г. Самара, 1-й Безымянный пер., д. 18, СамГАПС, кафедра «АТС».

ВВЕДЕНИЕ

Анализ распространения сигнала по рельсовым линиям с распределенными параметрами и большими потерями в установившемся режиме – один из важных и сложных разделов теории рельсовых цепей.

В предисловии отмечено, что вид основной математической модели рельсовой цепи зависит от формы представления рельсовой линии, причем в ряде случаев нельзя ограничиться четырехполюсной схемой замещения рельсовой линии, а необходимо применять многополюсную схему замещения, учитывающую земляной тракт передачи сигнального тока. Это особенно важно при моделировании шунтового и контрольного режимов, когда появляется неоднородность на рельсовой линии, и происходит подпитка приемника рельсовой цепи в обход поездного шунта и обрыва рельсовой линии.

Исходя из задач конкретного этапа анализа рельсовых цепей, их математическая модель должна отвечать самым различным требованиям: отражать с требуемой точностью зависимость выходных электрических параметров рельсовых цепей от их внутренних (проводимость изоляции, изменение сопротивления токопроводящих и изолирующих стыков) и внешних (помехи электрического тягового подвижного состава, линий электропередач) параметров в широком диапазоне их изменения, иметь однозначное соответствие физическим процессам в рельсовых линиях; включать необходимые аппроксимации и упрощения, которые позволяют реализовать ее программно на ЭВМ с различными возможностями; иметь большую универсальность, т.е. быть применимой к моделированию многочисленной группы рельсовых цепей (разветвленных, неразветвленных с различными длинами рельсовых линий); быть экономичной с точки зрения затрат машинных ресурсов. Эти требования в своем большинстве являются противоречивыми, и удачное компромиссное удовлетворение этих требований в одних задачах может оказаться далеким от оптимальности в других. По этой причине для одной и той же рельсовой цепи приходится иметь не одну, а несколько моделей. Например, рельсовые цепи, обладающие свойством поперечной симметрии, целесообразно анализировать четырехполюсными схемами замещения, а поперечной несимметрией необходимо использовать многополюсные схемы замещения. В связи с этим классификация моделей должна выполняться по множеству признаков, чтобы описать все возможные случаи.

Четырехполюсные и многополюсные элементы замещения рельсовых линий описываются соответствующими матрицам параметров.

Все матрицы делятся на две основные группы [1]:

- матрицы, соответствующие классической теории четырехполюсника;
- матрицы, соответствующие волновой теории четырехполюсника.

В первую группу входят матрицы передачи A , сопротивлений (импеданс) Z , проводимости Y , гибридная H и др. Во вторую – матрица рассеяния S и волновая матрица передачи T .

Поскольку частотный диапазон сигналов в рельсовых линиях ограничен областью низких частот ($f_{ст} \leq 1000\text{Гц}$), то в пособии рассматриваются матрицы первой группы.

Матрица передачи (цепная матрица) A соответствует передаче сигнала с левого входа четырехполюсника рельсовой линии на правый, следовательно, независимыми переменными считаются выходные (для четырехполюсника) напряжения U_2 и ток I_2 , а входные равны

$$\begin{cases} U_1 = A_{11}U_2 + A_{12}I_2; \\ I_1 = A_{21}U_2 + A_{22}I_2, \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

или

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}. \quad (\text{B.2})$$

Элементы матрицы A определяются частью в режиме холостого хода, частью – в режиме короткого замыкания второго выхода

$$A_{11} = \frac{U_1}{U_2} \Big|_{I_2 = 0}, \quad A_{12} = \frac{U_1}{I_2} \Big|_{U_2 = 0}, \quad A_{21} = \frac{I_1}{U_2} \Big|_{I_2 = 0}, \quad A_{22} = \frac{I_1}{I_2} \Big|_{U_2 = 0}. \quad (\text{B.3})$$

В *матрицах сопротивления* (холостого хода) Z независимыми считаются токи на входах, поэтому напряжения равны

$$\begin{cases} U_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2; \\ U_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2, \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

или

$$U = ZI, \quad U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.5})$$

Элементы матрицы Z называются z – параметрами и определяются в режиме холостого хода того или иного входа

$$z_{11} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{I_2 = 0}, \quad z_{12} = \frac{U_1}{I_2} \Big|_{I_1 = 0}, \quad z_{21} = \frac{U_2}{I_1} \Big|_{I_2 = 0}, \quad z_{22} = \frac{U_2}{I_2} \Big|_{I_1 = 0}. \quad (\text{B.6})$$

Для определения *матрицы проводимости* (короткого замыкания) Y задаются параметрами U_1 и U_2 на входах четырехполюсника, тогда токи равны

$$\begin{cases} I_1 = y_{11}U_1 + y_{12}U_2; \\ I_2 = y_{21}U_1 + y_{22}U_2, \end{cases} \quad (\text{B.7})$$

или

$$I = YU, \quad I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.8})$$

Элементы матрицы Y называются y – параметрами и определяются в режиме короткого замыкания того или иного входа

$$y_{11} = \frac{I_1}{U_1} \Big|_{U_2=0}, \quad y_{12} = \frac{I_1}{U_2} \Big|_{U_1=0}, \quad y_{21} = \frac{I_2}{U_1} \Big|_{U_2=0}, \quad y_{22} = \frac{I_2}{U_2} \Big|_{U_1=0}. \quad (\text{B.9})$$

Гибридная матрица H получается, когда независимыми переменными считаются ток на первом входе I_1 и напряжение на втором входе U_2 , остальные переменные равны

$$\begin{cases} U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2; \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2, \end{cases} \quad (\text{B.10})$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}. \quad (\text{B.11})$$

Элементы гибридной матрицы H называются h – параметрами и определяются в режиме холостого хода по первому входу и короткого замыкания – по второму входу

$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{U_2=0}, \quad h_{12} = \frac{U_1}{U_2} \Big|_{I_1=0}, \quad h_{21} = \frac{I_2}{I_1} \Big|_{U_2=0}, \quad h_{22} = \frac{I_2}{U_2} \Big|_{I_1=0}. \quad (\text{B.12})$$

Возможны еще два типа уравнений, соответствующих двум комбинациям пар зависящих и независящих параметров, но они не получили широкого распространения [2]

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} = H'; \quad (\text{B.13})$$

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = A'. \quad (\text{B.14})$$

Первая из них есть гибридная матрица, обратная матрице H , вторая – обратная матрице передачи A .

Вопросы моделирования рельсовых линий; моделирования устройств согласования в начале и конце рельсовой линии, включающие в себя моделирование дроссель – трансформаторов при электрической тяге поездов; питающих, согласующих и релейных трансформаторов при автономной тяге поездов; а также различных ограничителей; элементов защиты, представлены в разрозненных литературных источниках. Поэтому в настоящем пособии сделана попытка рассмотреть данные вопросы в комплексе.

1. СТРУКТУРА РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

1.1. Основные функции и область применения рельсовых цепей

Рельсовые цепи (РЦ) являются основным звеном современных систем управления движением поездов. На железных дорогах они выполняют функции путевого датчика информации о состоянии рельсового пути, а также телемеханического канала непрерывной передачи информации при автоблокировке, автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа, электрической централизации, диспетчерской централизации [3].

Как путевой датчик РЦ используется в пределах перегонов и станций для получения первичной дискретной информации о состояниях путевых участков, на основе которой автоматизируется процесс интервального регулирования движением поездов и повышается его безопасность.

В качестве путевого телемеханического канала РЦ широко используется для установления беспроводной логической связи между смежными исполнительно-распорядительными пунктами (сигнальными точками) в кодовой автоблокировке и передачи оперативной информации с пути на локомотив в системах автоматической локомотивной сигнализации.

Рельсовые цепи широко применяются в автоматических ограждающих устройствах, обеспечивающих безопасность движения поездов и автотранспорта в зоне переездов; в системах автоматического диспетчерского контроля, повышающих эффективность работы диспетчерского персонала; в горочной автоматической централизации, позволяющей автоматизировать процесс расформирования составов на сортировочных горках; в системах автоматического контроля перегона в комплексе путевой полуавтоматической блокировки, способствующей повышению пропускной способности участков и безопасности движения поездов.

1.2. Классификация рельсовых цепей

В настоящее время на сети магистральных железных дорог эксплуатируются более 300 разновидностей рельсовых цепей. Многообразие видов рельсовых цепей вызвано стремлением обеспечить безопасность движения поездов в конкретных условиях эксплуатации с использованием

простых технических решений, требующих минимальных средств на оборудование и содержание устройств.

Рельсовые цепи классифицируются по схемам включения приемника (нормально замкнутые и нормально разомкнутые), схемам включения рельсовых путей (неразветвленные и разветвленные), способу питания путевого приемника (непрерывным питанием и импульсным), роду тока (постоянного и переменного тока), использованию рельсов для пропуска тягового тока на электрифицированных участках (двухниточные и однониточные) [4].

На железнодорожном транспорте применяется два вида тяги: автономная и электрическая. Автономная тяга применяется, как правило, в тех районах страны, где отсутствует надежное электроснабжение [6]. Электрическая тяга подразделяется на два вида: переменного и постоянного тока. В районах с высокой надежностью электроснабжения может быть организован переход с автономной на электрическую тягу постоянного или переменного тока. РЦ, где тяговый ток пропускается по одной рельсовой нити, является однониточными, а одновременно по двум рельсовым нитям – двухниточными. Для соединения между собой тяговых рельсовых нитей по однониточной схеме применяются специальные медные продольные соединители (рис. 1.1, а), а по двухниточной схеме – основные обмотки дроссель – трансформаторов со средним выводом и медные междроссельные перемычки (рис. 1.1, б).

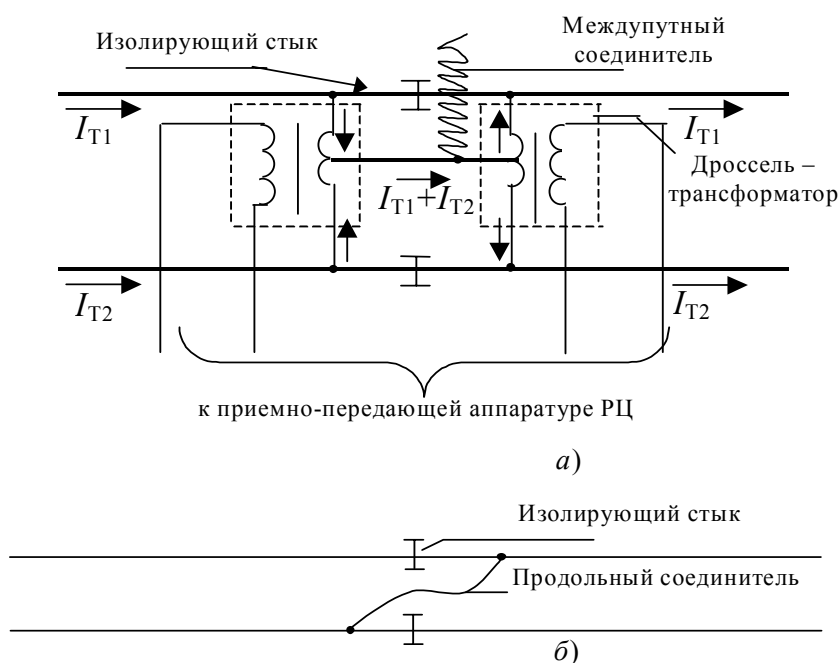


Рис. 1.1. Схемы пропуска тягового тока в обход изолирующих стыков:

I_{T1} и I_{T2} - тяговые токи в рельсах

При автоблокировке применяется всегда двухниточная схема пропуска тягового тока [5].

В РЦ применяются два вида источников питания: постоянного или переменного тока. Постоянный ток применяется только при автономной тяге с ненадежным электроснабжением. Форма сигнала в этом случае представляет собой последовательность прямоугольных импульсов. В последнее время во всех случаях применяются источники питания только переменного тока. В РЦ с источниками переменного тока несущая сигнала имеет гармоническую форму. Это связано с относительно простым способом получения такой формы, с лучшей помехозащищенностью РЦ от внешних помех, с возможностью организации более надежной защиты от взаимного влияния РЦ, с возможностью организации нескольких каналов по одной РЛ и т.д.

В последнее время в передающих устройствах РЦ применяются «ключевые» усилители», формирующие несущую сигнала, форму которой после фильтрации следует считать квазигармонической.

Форма сигнала РЦ зависит от вида модуляции, которая в свою очередь зависит от многих факторов: элементной базы, назначения РЦ, формы несущей сигнала и т.д. Абсолютная амплитудная манипуляция применяется в современных системах АБ: АБ постоянного тока, числовая кодовая АБ переменного тока и числовая кодовая АБ системы АБ – ЧКЕ. В новейшей системе АБ-Е2 для увеличения объема передаваемой информации и для повышения помехоустойчивости применяется двукратная фазоразностная модуляция (ФРМ 2) [6].

Важной особенностью РЦ, которая ранее не рассматривалась, является метод обработки сигнала в условиях действия помех. В традиционных, «устоявшихся» схемах применяют неадаптивный метод обработки сигнала, а в новейших разработках – адаптивный. Неадаптивный метод обработки основан на детерминированном методе расчета РЦ, в котором учитываются только наихудшие условия эксплуатации. Адаптивный метод обработки основан на статистическом подходе к работе РЦ, который предполагает, что все дестабилизирующие факторы условий эксплуатации имеют во времени случайный характер.

Информационный параметр сигнала, по которому осуществляется принятие решения, также оказывает влияние на конструкцию и принцип работы РЦ. Большинство РЦ имеет в своем составе амплитудные обнаружители сигнала, т.е. путевые приемники, в которых фиксируется

амплитуда сигнала. К ним относятся импульсные РЦ постоянного тока, числовые кодовые РЦ переменного тока и тональные РЦ. В рельсовых цепях с фазочувствительным приемником применяется амплитудно – синхронный обнаружитель сигнала. В сравнении с амплитудным обнаружителем сигнала амплитудно – синхронный позволяет повысить помехоустойчивость РЦ.

Надежность РЦ, в смысле безопасности движения поездов, зависит и от их защищенности от взаимного влияния, т.е. от электромагнитной совместимости. В реальных условиях эксплуатации возможны случаи объединения рельсовых нитей смежных и параллельно расположенных РЦ. В этом случае возможен ложный контроль состояния контролируемого участка.

Защита от взаимного влияния РЦ, т.е. электромагнитная совместимость (ЭМС), осуществляется по одному или нескольким параметрам сигналов РЦ. В настоящее время известно пять способов защиты: полярный, кодовый, частотный, гетеродинный и фазовый. Полярный способ основан на распознавании полярности сигнала, у которого в качестве несущей используется постоянный ток. Для исключения взаимного влияния смежных РЦ источники питания в них чередуют полярность сигнального тока. Этот способ нашел применение в импульсных РЦ постоянного тока. Кодовый способ основан на сравнении временных параметров логических импульсов и интервалов или на сравнении кодовых комбинаций сигналов смежных РЦ. Этот способ применяется в числовых кодовых РЦ и в РЦ с ФРМ2. В РЦ с ФРМ2 кодовый способ защиты применяется совместно с частотным способом [6].

Частотный способ реализуется посредством чередования рабочих диапазонов сигналов в смежных и параллельных РЦ. Гетеродинный способ защиты основан на чередовании в смежных и параллельно расположенных РЦ поддиапазонов рабочих диапазонов сигналов. Этот способ применяется в одном из видов частотной кодовой АБ. Защиту разработали под руководством д.т.н., профессора А.М.Брылеева, к.т.н., доцента Г.К.Ефимова и к.т.н. Д.К.Пугина. Физический смысл частотного и гетеродинного способов контроля один и тот же.

Фазовый способ защиты применяется в РЦ с ФЧП. Он основан на использовании синхронных приемников, которые, как и передатчики, чередуют синхронно в смежных и параллельно расположенных РЦ. Этот способ наиболее эффективен.

В подавляющем большинстве эксплуатируемых в нашей стране рельсовых цепей, рельсовые линии имеют в качестве границ между собой

изолирующие стыки. Этот элемент РЦ, согласно статистике эксплуатации, дает нам большее количество отказов. Последние разработки ученых в области путевого хозяйства по строительству и эксплуатации цельносварных рельсовых плетей, а также разработки ученых в теории РЦ, позволили применить «неограниченные» РЛ, в которых нет изолирующих стыков. В этих рельсовых цепях граница участка контроля устанавливается на границе естественного затухания сигналов [7].

Начало шестидесятых годов в развитии автоблокировки характерно созданием качественно новых систем с централизованным размещением аппаратуры (ЦАБ). Пионерами в этой области стали ученые: к.т.н. А.В.Шишляков, к.т.н. В.С.Дмитриев, к.т.н. А.В.Минин, д.т.н., профессор Ю.А.Кравцов, к.т.н., доцент Б.М.Степенский. В ЦАБ вся аппаратура, кроме устройств согласования и защиты и соединительных кабельных линий, располагается на смежных станциях. Важнейшей особенностью ЦАБ является возможность «лица принимающего решение» (ДНЦ) вмешиваться в процесс регулирования движения поездов на перегонах.

В настоящее время для повышения надежности работы АБ их оборудуют достаточно сложными по конструкции РЦ, которые позволяют реализовать эксплуатацию локомотивного парка с любыми системами АЛС. В зависимости от того, какая система или системы АЛС эксплуатируются на данном участке железной дороги, РЦ могут иметь различную комбинацию схем построения.

1.3. Требования к рельсовым цепям

Все РЦ разрабатываются с учетом технических указаний по проектированию устройств сигнализации, централизации и блокировки на железных дорогах колеи 1520 мм общей сети, методических указаний по проектированию устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте, руководящих указаний по защите от перенапряжений устройств СЦБ и различных дополнительных методических указаний по проектированию [3]. Основные требования к рельсовым цепям можно сформулировать в виде следующих положений:

1. Правильно рассчитанные рельсовые цепи должны устойчиво работать без сезонной регулировки и обеспечить надежное действие АЛСН.

2. Ответвления стрелочных изолированных участков, входящих в маршруты приема и отправления, а также ответвления длиной более 60 м,

считая от центра стрелочного перевода до изолирующего стыка, должны обязательно обтекаться током рельсовой цепи.

3. Контроль обтекания током ответвлений осуществляется установкой на каждом из них путевых реле или реактивного элемента. Число путевых реле не должно превышать трех в одной РЦ. Длины ответвлений стрелочных изолированных участков с релейными трансформаторами, считая от точки разветвления, не должны отличаться друг от друга более чем на 200 м.

4. В схемах разветвленных РЦ необходимо обеспечить надежную фиксацию положения «Занято» путевым приемником того параллельного ответвления, на котором находится подвижной состав. При этом контакты всех путевых приемников включаются в цепь контроля состояния РЦ последовательно.

5. Необтекаемые током ответвления стрелочных участков допускаются: на путях парков отправления грузовых поездов; путях отправления сортировочных парков, путях, по которым производятся только маневровые передвижения; на стрелках съездов предохранительных и улавливающих тупиков при длине ответвления не более 60 м; на негабаритных ответвлениях одиночных стрелок.

6. Для повышения надежности действия АЛСН и контроля поврежденного рельса РЦ перегонов при электротяге постоянного тока РЦ должны быть двухниточными. По этим же причинам на станциях, как правило, все приемо – отправочные пути должны быть двухниточными.

7. Влияние электротяги на РЦ распространяется по железнодорожному пути на участках с АБ (при сложных, гальванически связанных посредством дроссель – трансформаторов РЦ) на расстояние до 8 км, без АБ (при отсутствии сплошных РЦ) – на расстоянии до 5 км. В поперечном направлении влияние электротяги постоянного тока распространяется на расстояние до 300 м, переменного тока – до 100 м.

8. В зоне влияния электротяги постоянного тока применение РЦ с непрерывным и импульсным питанием постоянного тока и переменного тока с малогабаритными путевыми трансформаторами не допускается. В зоне влияния электроэнергии переменного тока не допускается использование РЦ с непрерывным или импульсным питанием переменного тока частотой 50 Гц.

9. Железнодорожные пути, расположенные на расстоянии до 100 м от линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 25 кВ и выше или пересекаемые ею, должны оборудоваться РЦ переменного тока 25 Гц. Для уменьшения влияния ЛЭП на устройствах АЛСН и АБ следует размещать РЦ таким

образом, чтобы пересечение пути и ЛЭП находилось ближе к питающим концам РЦ, но не менее 200 – 250 м от них. На однопутных участках пересечение должно приходиться примерно на середину изолированного участка.

10. Все типы РЦ с изолирующими стыками должны надежно защищать от взаимного влияния при электрическом замыкании изолирующих стыков. Такая защита осуществляется в РЦ с непрерывным питанием – подключением источника питания таким образом, чтобы у каждого изолирующего стыка была разноименная (встречная) полярность или обратные фазы; в смежных кодовых РЦ переменного тока – смещением импульсов по времени, а в импульсах РЦ постоянного тока – соблюдением у изолирующих стыков различной полярности питания.

В однопутных РЦ переменного тока контроль и защита выполняются тяговыми соединителями смежных РЦ.

Укороченные смежные РЦ в маневровых районах имеют одну общую нитку и могут иметь одинаковую полярность по разные стороны изолирующих стыков. Такие РЦ должны граничить друг с другом питающими концами.

11. Станционные РЦ с фазочувствительным приемником типа ДСШ, питающиеся от разных несфазированных между собой источников переменного тока, должны разграничиваться импульсной РЦ, РЦ другой частоты или стыковаться питающими концами. В этом случае на двухниточном плане станции у стыка делается надпись «Граница питания». На конце РЦ с реле ДСШ, примыкающей к импульсной или кодовой РЦ, должен устанавливаться питающий трансформатор.

12. Защита станционных непрерывных РЦ переменного тока от влияния граничащих с ним кодовых перегонных РЦ осуществляется установкой на границе с перегонами питающих трансформаторов или питанием перегонных РЦ от станционного источника питания с соблюдением чередования мгновенных полярностей напряжений на изолирующих стыках.

13. На участках с электротягой постоянного и переменного тока для канализации обратного тягового тока изолированные путевые участки, оборудованные РЦ, соединяются между собой с помощью дроссель – трансформаторов (двухниточные РЦ) или тяговых соединителей (однопутные РЦ).

Двухниточными РЦ обязательно оборудуются:

- главные пути станции и все изолированные участки, по которым предусматривается наложение АЛСН, на всем протяжении в пределах станции, включая стрелочные и бесстрелочные;
- приемо-отправочные пути и участки путей длиной более 500 м;
- все изолированные участки на станциях, имеющих до шести приемо-отправочных путей.

14. В двухниточных РЦ на главных путях дроссель – трансформаторы устанавливаются на питающем и релейном концах РЦ, а на боковых путях – только на питающем конце, если по условиям канализации тягового тока не требуется установка второго дроссель – трансформатора.

1.4. Основные пути совершенствования алгоритмов функционирования рельсовых цепей

Для решения задачи достоверной классификации состояний рельсовых линий необходимо, наряду с развитием существующих РЦ, создавать новые классификаторы состояний рельсовых линий (КСРЛ), позволяющие существенно расширить функциональные возможности рельсовых цепей при воздействии возмущающих факторов, организовать классификатором диагностику и прогнозирование состояния элементов рельсовой линии как первичного датчика информации и добиться относительной инвариантности классификатора к возмущающим воздействиям.

Наиболее перспективными для решения подобных задач представляются методы адаптивной обработки выходного сигнала рельсовой линии, методы распознавания образов с элементами самоотбора сложности полинома решающих функций, а также методы инвариантности с принципом многоканальности.

Принципы адаптивной обработки выходного сигнала в классификаторах состояний рельсовых линий

В новейших системах автоблокировки используется способ оценки состояний рельсовой линии на основе относительного изменения информационных параметров полезного сигнала [8].

Сущность метода заключается в том, что классификатор реагирует не на абсолютные значения амплитуды, а на скачкообразное изменение параметров полезного сигнала. Реально такие скачкообразные процессы

происходят при вступлении и освобождении поездом блок – участка, а также при обрыве рельсовой линии.

На рис. 1.2 изображена структурная схема классификатора, реализующего способ оценки состояний рельсовой линии, основанный на обнаружении относительного изменения амплитуды полезного сигнала. Классификатор содержит каскадно соединенные входной фильтр, детектор огибающей, интегратор, решающее устройство и блок памяти [9].

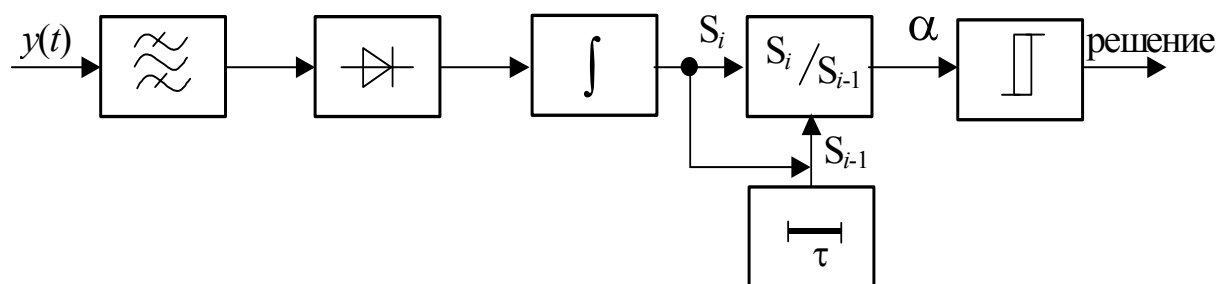


Рис. 1.2. Функциональная схема приемника РЦ, работающего по методу оценки относительного изменения параметров входного сигнала

В нормальном режиме, когда рельсовая линия свободна и исправна, на входе классификатора действует смесь сигнала РЛ и помех. Полезный сигнал фильтруется и детектируется. Постоянная составляющая сглаживается интегратором. С помощью аналого-цифрового преобразователя огибающая входного сигнала дискретизируется во времени и квантуется по амплитуде. Отсчеты амплитуды полезного сигнала $S_i = S_i(t)$ поступают на один из входов блока логической обработки. На второй его вход подаются значения сигнала через элемент задержки: $S_{i-1} = S_{i-1}(t)$. Согласно алгоритму обработки, в дискретные моменты времени вычисляются модуль частного смежных отсчетов и его знак

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \text{abs} \left\{ \frac{S(t_i)}{S(t_{i-1})} \right\}; \\ \beta &= \text{sgn} \left\{ \frac{S(t_i) - S(t_{i-1})}{|S(t_i) - S(t_{i-1})|} \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

Если величина β положительна, а α превышает пороговое значение $U_{п}$, задаваемое решающим устройством, то считается справедливой гипотеза об освобождении рельсовой линии. В противном случае принимается решение о неизменном состоянии рельсовой линии. На рис. 1.3 представлена структурная схема классификатора, реализующего описанный способ.

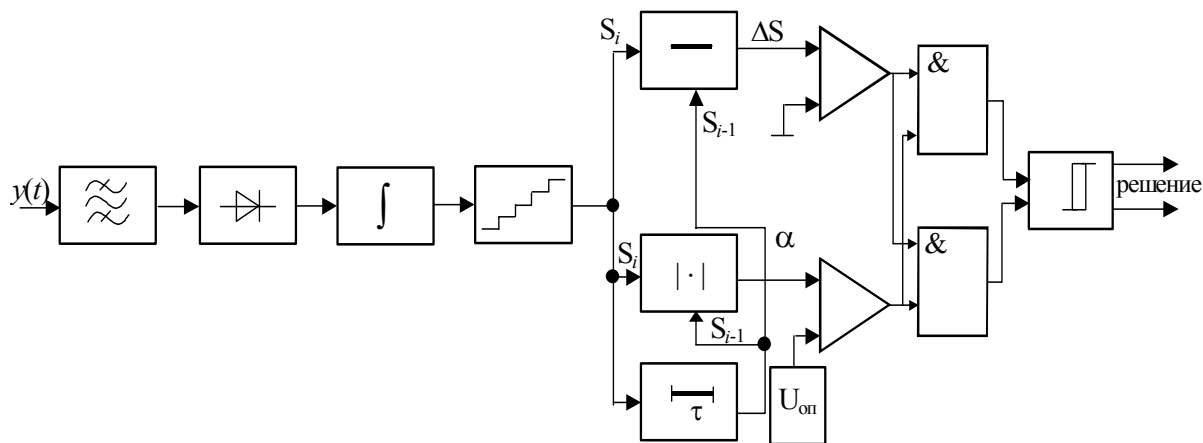


Рис. 1.3. Структурная схема приемника, работающего по методу оценки относительного изменения параметров входного сигнала

На входе классификатора включены полосовой фильтр, детектор огибающей, интегратор и дискретизатор. С выхода дискретизатора цифровые значения амплитуды огибающей подаются на блоки вычисления разности соседних отсчетов и модуля их частного, где обрабатываются в соответствии с алгоритмом

$$\left. \begin{aligned} \Delta S &= S(t_i) - S(t_{i-1}); \\ \alpha &= S(t_i) / S(t_{i-1}). \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Значение α сравнивается с фиксированным порогом $U_{п}$ в первом компараторе. Для определения знака разности, величина ΔS подается на вход второго компаратора, где сопоставляется с нулевым значением. Решение об освобождении рельсовой линии подвижным составом принимается в том случае, если выполняются два условия

$$\left. \begin{aligned} \Delta S &> 0; \\ \alpha &> U_{п}. \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

В противном случае считается, что рельсовая линия остается занятой подвижным составом либо неисправна.

При построении классификаторов состояний рельсовых линий, рассчитанных на работу при повышенной проводимости изоляции, и в условиях воздействия комплекса помех, хорошие результаты дает использование математического аппарата обнаружения разладки случайного процесса [9]. Под разладкой понимается скачкообразное изменение свойств случайного процесса. Различают положительную и отрицательную разладки. Применительно к контролю состояний рельсовых линий под положительной разладкой понимают скачкообразное изменение амплитуды сигнала контроля в момент освобождения рельсовой линии подвижным составом.

Отрицательная разладка заключается в скачкообразном ее снижении, происходящей под действием поездного шунта, либо при нарушении целостности рельсовых нитей.

Из рекуррентных методов обнаружения разладки широкое распространение нашел алгоритм кумулятивных сумм с отражающим экраном. Он представляет собой последовательный анализ Вальда. Правило обнаружения разладки строится на сравнении на h – ом шаге решающей статистики S_h с фиксированным порогом $U_{пв}$. Решающая статистика рассчитывается по формуле S_h

$$S_h = \left\{ S_{h-1} + \ln \frac{W_1(y_h|\Theta_2)}{W_0(y_h|\Theta_1)} \right\}^+, S_0 = 0, \quad (1.4)$$

где $W_1(y_h|\Theta_2)$, $W_0(y_h|\Theta_1)$ - условные плотности распределения вероятностей наличия параметров сигнала Θ_2 и Θ_1 в выборке $\{y_h\}$; Θ_2 и Θ_1 –параметры случайного процесса до и после разладки (в шунтовом и нормальном режимах).

Порог $U_{пв}$ устанавливается, исходя из требуемой вероятности правильного фиксирования свободного состояния рельсовой линии. Таким образом, если на h -ом шаге выполняется условие $S_h \geq U_{пв}$, принимается решение о свободном и исправном состоянии рельсовой линии. Если $S_h < U_{пв}$, справедливой считается гипотеза о занятом или неисправном состоянии линии, и выполняется следующее $h+1$ -ое наблюдение. В случае, если кумулятивная сумма на произвольном шаге становится отрицательна, то на следующем шаге ее значение обнуляется, что в формуле (1.4) обозначено значком (+).

Работу классификатора, реализующего алгоритм (1.4), поясняет пример, когда подвижной состав освобождает рельсовую линию. Временная диаграмма исходного процесса представлена на рис. 1.4.

В шунтовом режиме на входе классификатора присутствует смесь y_h слабого полезного сигнала Θ_1 и помех $\xi(t_h)$

$$y_h = \Theta_1 + \xi(t_h).$$

В этом случае значения функции $W_0(y_h|\Theta_1)$ будут превышать $W_1(y_h|\Theta_2)$, а логарифм отношения правдоподобия $\ln \frac{W_1(y_h|\Theta_2)}{W_0(y_h|\Theta_1)}$, вследствие случайного характера помех $\xi(t_h)$, будет с одинаковой вероятностью принимать как положительные, так и отрицательные значения, согласно

алгоритму (1.4), отрицательные значения кумулятивной суммы будут принудительно обнуляться. Таким образом, в шунтовом режиме накопление (аккумуляция) решающей статистики происходить не будет. Значения S_h будут случайным образом флуктуировать около нуля, как это показано на рис. 1.5.

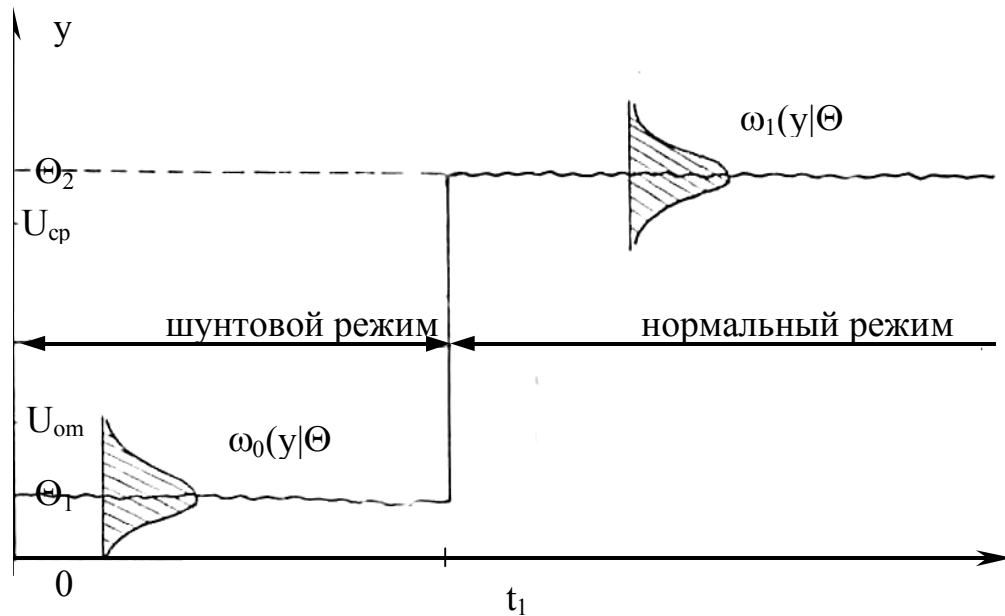


Рис. 1.4. Диаграмма напряжения на входе классификатора в момент освобождения поездом участка контроля

$$S_h = \left\{ S_{h-1} + \ln \frac{W_1(y_h | \Theta_2)}{W_0(y_h | \Theta_1)} \right\}^+, \quad S_0 = 0 \quad (1.5)$$

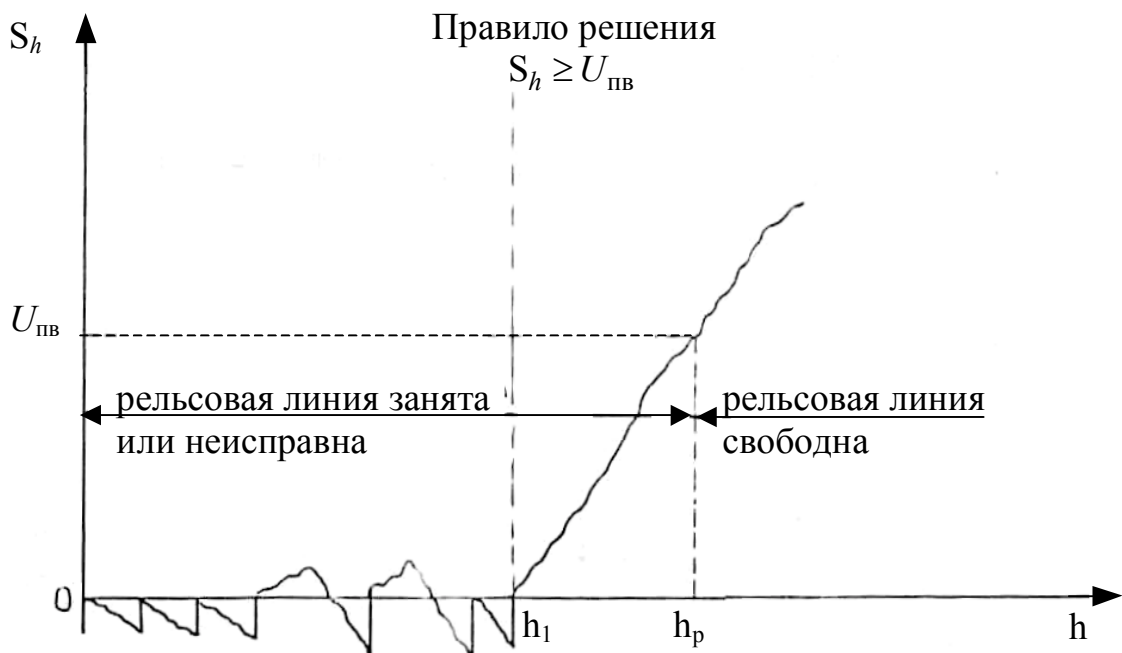


Рис. 1.5. Диаграмма решающей статистики

В нормальном режиме на входе классификатора действует смесь полезного сигнала высокого уровня Θ_2 и помехи. Значения функции $W_1(y_h|\Theta_2)$ в произвольный h -ый момент будут превышать величину $W_0(y_h|\Theta_1)$, и логарифм их отношения будет положительным. В этом случае кумулятивная сумма (1.5) с ростом номера шага h будет непрерывно возрастать. После превышения порога разладки $U_{\text{пв}}$ приемник зафиксирует свободное состояние рельсовой линии.

Аналогичным образом происходит работа при переходе из нормального режима в шунтовой либо контрольный.

Принцип построения и структура инвариантных классификаторов состояний рельсовых линий

Успешное решение задачи достижения полной или частичной независимости классификации состояния рельсовых линий от возмущений (помехи в рельсовых линиях, изменение проводимости изоляции, изменение сопротивлений рельсовых нитей, сопротивления изолирующих стыков и т.д.) возможно с позиций теории инвариантности, которая предполагает достижение полной или частичной независимости полезного сигнала от действующих на него возмущений. Для этого необходимо организовать как минимум один дополнительный (компенсационный) канал в рельсовой линии.

В работах [10 – 14] авторами сформулированы принципы инвариантности для построения классификаторов состояний рельсовых линий. Суть их в том, что классифицирующее устройство, используя выходную информацию двух независимых каналов, разделяет пространство состояний РЛ на классы образов нормального, шунтового и контрольного режимов и обеспечивает инвариантность от возмущающих воздействий с классификацией состояния сопротивления рельсовых линий.

При ограниченной информации о возмущениях, действующих на рельсовую линию, большое значение имеет решение задачи о выборе рациональной структуры инвариантного классификатора состояний рельсовой линии. Только правильный выбор структуры позволяет синтезировать инвариантный классификатор, который может быть физически реализован.

На выбор рациональной структуры инвариантного классификатора состояний рельсовой линии влияют следующие физические ограничения и

особенности:

- сложность организации информационной обратной связи между началом и концом рельсовой линии участка контроля;
- переменная структура схемы замещения РЛ в зависимости от класса состояний;
- наличие только единственного физического канала между входными и выходными сигналами;
- отсутствие возможности построения второго физического канала для компенсации возмущений.

На рис. 1.6 представлена структурная схема инвариантной системы автоматической классификации состояний рельсовых линий.

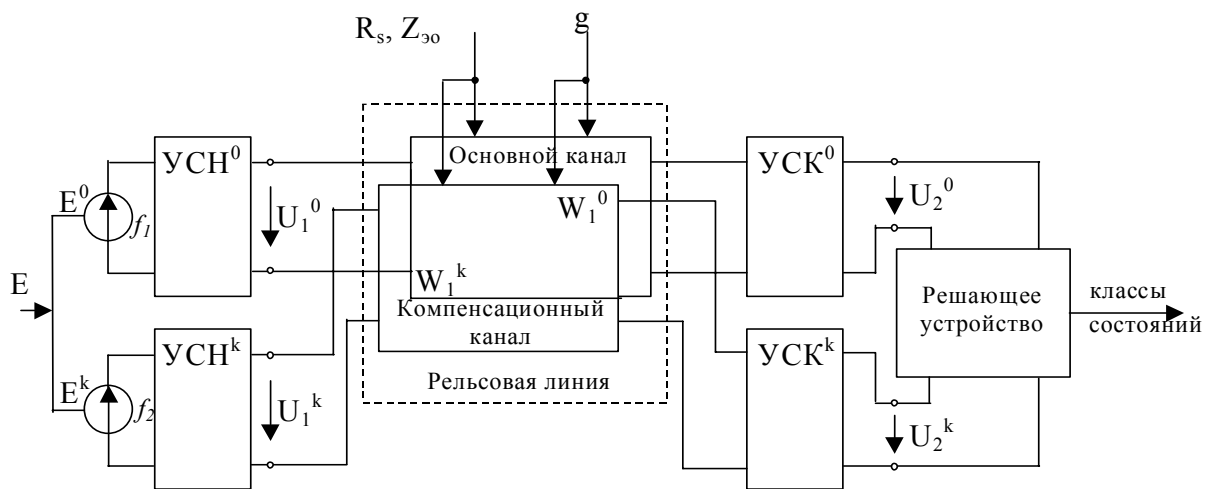


Рис. 1.6. Структурная схема инвариантной системы автоматической классификации состояний рельсовых линий:

$УСН^0$, $УСН^k$ – устройства согласования аппаратуры питания с рельсовой линией, соответственно, основного и компенсационного каналов; $УСК^0$, $УСК^k$ – устройства согласования классификатора состояний с рельсовой линией, соответственно, основного и компенсационного каналов; g – основной возмущающий параметр – проводимость изоляции; R_s , Z_{zo} – сопротивления поездного шунта, и места обрыва рельсовой линии; W_1^0 , W_1^k – передаточные функции по напряжению датчиков ÷ рельсовой линии W_1^0 и компенсационного W_1^k .

На входном конце в рельсовую линию с передаточными функциями по напряжению W_1^0 и W_1^k от двух генераторов различных частот f_1 и f_2 , питающихся от одного источника через устройства согласования $УСК^0$ и $УСК^k$, исключая влияние генераторов друг от друга, подается напряжение U_1^0 и U_1^k .

На выходном конце, через соответствующие устройства согласования УСК⁰ и УСК^k, настроенные на частоты f_1 и f_2 , напряжения U_2^0 и U_2^k (рис. 1.6) поступают на различные входы решающего устройства. Так как на меньшей частоте передаточная функция по напряжению W_1^0 больше, то и уровень напряжения U_2^0 (на частоте f_1) больше, и соответственно напряжение U_2^k компенсационного канала (на частоте f_2) меньше. Решающее устройство производит вычисление разности или отношения двух напряжений. Вычисленная величина поступает на элемент сравнения решающего устройства, в память которой априорно записаны граничные значения напряжений, опорные в каждом из режимов.

Элемент сравнения сопоставляет вычисленные значения напряжений с опорными и при выполнении одного из условий

$$\begin{cases} \Delta U \geq U_{on.min}^{н.р.} & \text{- нормальный режим,} \\ U_{on.max}^{ш.р.} \geq \Delta U \geq U_{on.min}^{ш.р.} & \text{- шунтовой режим,} \\ \Delta U \leq U_{on.min}^{ш.р.} & \text{- контрольный режим,} \end{cases}$$

где ΔU - входное значение напряжения в элемент сравнения (результат вычисления разности $U_1^0 - U_1^k$ или отношения U_1^0 / U_1^k),

$U_{on}^{н.р.}, U_{on}^{ш.р.}$ - априорно определенные напряжения, соответствующие нормальному и шунтовому режимам, на его выходе появляется информация о принадлежности состояния рельсовой линии к определенному классу.

Рассмотрим инвариантные возможности подхода.

При колебании питающего напряжения сети соответственно изменяются амплитуды напряжений и на выходе генераторов. Изменение сигнала на частотах f_1 и f_2 , если частоты достаточно близкие друг к другу, но не равны, имеют один закон изменения, поэтому эти колебания напряжения генераторов сказываются на изменении значений напряжений U_2^0 и U_2^k . Решающее устройство эти приращения компенсирует в результате операции вычитания или деления. Аналогично компенсируется и уменьшение. Это обеспечивает инвариантность к колебанию напряжения питающей сети.

При увеличении проводимости изоляции уменьшаются амплитуды напряжений U_2^0 и U_2^k , если частоты каналов близкие, то затухание сигналов в рельсовой линии обоих каналов близкое и, в результате выполнения операции вычитания или деления, результат относительно одинаковый. Это

подтверждает выполнение условия инвариантности к изменению проводимости изоляции.

Воздействие помех на оба канала (по f_1 и f_2) сказывается одинаково (т.к. физический канал для обеих частот один – рельсовая линия), $f_1 \approx f_2$, поэтому приращения ΔU в обоих каналах от составляющей помехи одинаково, и в решающем устройстве эти приращения компенсируются. Это показывает на достижения инвариантности к помехам.

Таким образом, при использовании принципов инвариантности в классификации состояний рельсовых линий необходимо реализовать дополнительный компенсирующий канал передачи информации, по которому передаются возмущения в решающее устройство. При этом особое внимание следует уделять формированию дополнительного канала, т.к. от правильного выбора принципов его организации зависит точность классификации.

Принцип построения и структура распознающих классификаторов состояний рельсовых линий

Распознавание образов – это процесс принятия решения, устанавливающий принадлежность распознаваемого образа (совокупности информативных признаков в каждый момент времени) к определенному заранее классу.

Преимущества методов распознавания состояний рельсовых линий заключаются в значительном расширении функциональных возможностей классификатора состояний рельсовых линий за счет существенного увеличения глубины распознавания состояний рельсовой линии посредством множества информативных признаков и решающих функций, и разбиения состояний на множество классов (с отдельным выделением III класса – класса неисправного состояния рельсовой линии); в организации внутренней логики развития с иерархической структурой, позволяющей, путем усложнения алгоритма классификации, повысить точность распознавания; в организации диагностики и прогнозирования состояния элементов рельсовой цепи; в относительной инвариантности к возмущающим воздействиям и живучести системы, а, в целом, в более высокой надежности и безопасности.

В работах [15 – 20] сформулированы принципы распознавания для построения распознающих классификаторов состояний рельсовых линий.

Суть их в том, что с помощью предварительно обученной решающей функции микропроцессорное решающее устройство предварительно разделяет множество образов, характеризующихся совокупностью первичных информативных признаков, на непересекающиеся классы, соответствующие режимам функционирования и диагностики элементов, а затем, в каждый момент времени, достоверно определяет принадлежность предъявляемого образа к конкретному классу (состоянию). Определение состояний рельсовой линии связано в основном с решением задач выделения информативных признаков и синтезом правил, на основе которых будет осуществляться разделение множества образов на классы.

На рис. 1.7 приведена структурная схема распознающей системы автоматической классификации состояний рельсовых линий.

Изменение состояния рельсовых линий отражается на изменении величин первичных признаков $m\{U_1, U_2, I_1\}$, информация которых поступает в блок предварительной обработки.

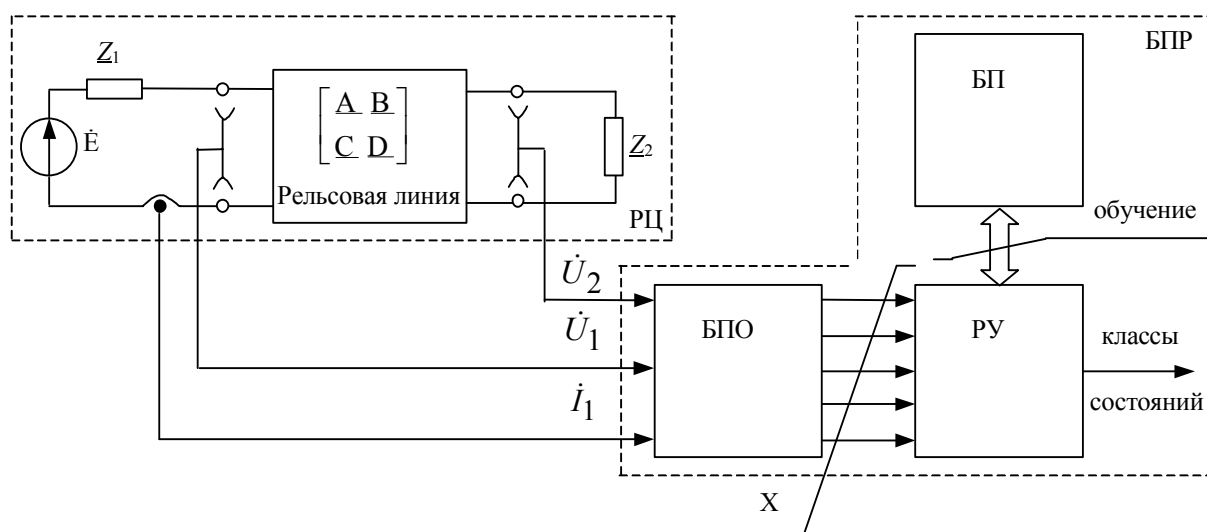


Рис. 1.7. Структурная схема распознающей системы автоматической классификации состояний рельсовых линий:

БПР – блок принятия решения; БП – блок памяти; БПО – блок предварительной обработки; РЦ – рельсовая цепь; РУ – решающее устройство; $X=f(U_1, I_1, U_2)$ – обобщенные признаки; U_1, I_1, U_2 – первичные информативные признаки

Задача, решаемая БПО, состоит в выделении характерных признаков, описывающих состояния рельсовой линии. Первой операцией на этом пути является операция устранения случайных искажений и сглаживания шумов, сопровождающих входную, первичную информацию, поступающую в

различные моменты времени. На этом этапе используется операция фильтрации, т.е. выделение сигнала из шума. Если рассматривать частотную область, то под этим понимается выделение тех энергетических составляющих, которые наиболее чувствительны к изменению состояний рельсовых линий. В процессе фильтрации из спектра выделяются отдельные частоты или полосы частот, несущие существенную информацию о состоянии рельсовой линии. Эти спектральные составляющие связаны с характерными признаками рельсовой линии или, точнее, составляющими вектора признаков.

Результатом операций, выполняемых в БПО, является получение характерных признаков, связанных с составляющими многомерного вектора исходных измерений. Выходные сигналы (X) БПО используются в качестве входных для устройства классификации.

Каждое состояние рельсовой линии отображается образом (X) в векторном пространстве. Полезный сигнал сопровождается шумами различного происхождения (помехи от электротяги, от блуждающих токов, колебания величины напряжения источника питания и т.д.). Поэтому в процессе измерений появляются погрешности и ошибки. Это приводит к тому, что одно и то же семейство предъявленных образов в действительности представляется как некоторое «облако» точек.

Решающее устройство, используя заранее определенную решающую функцию, классифицирует все образы на классы состояний (класс образов нормального, шунтового и контрольного режимов) по заранее выбранным правилам. Наиболее эффективно при распознавании состояний рельсовых линий использование единственной решающей функции с предварительным обучением с «учителем».

Задача синтеза перспективных классификаторов может быть успешно решена в первую очередь наличием математической модели чувствительного элемента первичного датчика состояний – рельсовых линий. И эту задачу можно решить представлением схемы замещения рельсовых линий в виде четырехполюсной или многополюсной схемы.

Вопросы и упражнения для самопроверки

1. Какие функции выполняют рельсовые цепи?
2. Перечислите виды рельсовых цепей в зависимости от сигнального тока и режима питания.
3. Каковы основные требования к рельсовым цепям?
4. Назовите режимы работы рельсовых цепей и их первичные параметры.
5. Каковы особенности рельсовых цепей при электротяге?
6. Какие рельсовые цепи применяют при электротяге постоянного и переменного тока?
7. Принципы относительной оценки параметра выходного сигнала.
8. Расскажите о принципе построения инвариантных классификаторов состояний.
9. Расскажите о принципе построения распознающих классификаторов состояний.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНИЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

2.1. Общие сведения о линиях с распределенными параметрами

Электрические свойства рельсовых линий полностью характеризуются первичными параметрами. По физической природе параметры рельсовых линии аналогичны параметрам колебательных контуров, составленных из элементов r, L, C . Различие заключается лишь в том, что в контурах эти параметры являются сосредоточенными, а в рельсовых линиях они равномерно распределены по всей длине. Удельные параметры r и L продольной цепи образуют полное сопротивление рельсовой петли $Z_0 = r + j\omega L$, а удельные параметры g и C (поперечные) – полную проводимость межрельсовой изоляции $Y_0 = g + j\omega C$. Из указанных четырех параметров лишь r и g обуславливают потери энергии: первый – тепловые потери в рельсах и других металлических частях; второй – потери в изоляции.

Под удельным сопротивлением рельсовой петли Z_0 понимают сопротивление обеих нитей со стыковыми соединителями и накладками с учетом межрельсовой взаимной индуктивности, отнесенное к 1 км рельсового пути. По существующим нормам сопротивление стыка не должно превышать сопротивление трех метров целого рельса.

При протекании по рельсам переменного тока необходимо учитывать поверхностный эффект, проявляющийся в ослаблении электромагнитного поля в радиальном направлении и, как следствие, уменьшения эффективной площади его поперечного сечения. Глубина проникновения магнитного поля оценивается величиной

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}},$$

где $\omega = 2\pi f$, $\mu = \mu_0\mu_1$, $\sigma = 4,76 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$,

для рельсовой стали: $\mu_1 = 100$ (в области малых напряженностей магнитного поля).

Расчеты показывают, что $\delta = 3,3 \cdot 10^{-3}$ м.

Таким образом, сопротивление рельса переменному току зависит не от площади поперечного сечения, а от его периметра и частоты.

В некоторых случаях приходится учитывать нелинейность сопротивления балласта, которое уменьшается с увеличением приложенного напряжения.

2.2. Гармонические режимы в рельсовых линиях

Рельсовые линии являются двухпроводными линиями с распределенными параметрами, для которых характерно множество состояний. В работе рассмотрены условия и характер распространения сигнала по рельсовым линиям в справочной форме, так как по данному вопросу имеются многочисленные публикации [21 – 24].

Уравнения двухпроводной длинной линии. Рассмотрим длинную линию, в которой в качестве проводников используются рельсы, и продольными параметрами являются удельное сопротивление и индуктивность рельсовой петли, а в качестве поперечных параметров выступают проводимость между рельсами и емкость между ними. Бесконечно малый участок РЛ представляется принципиальной схемой, изображенной на рис. 2.1.

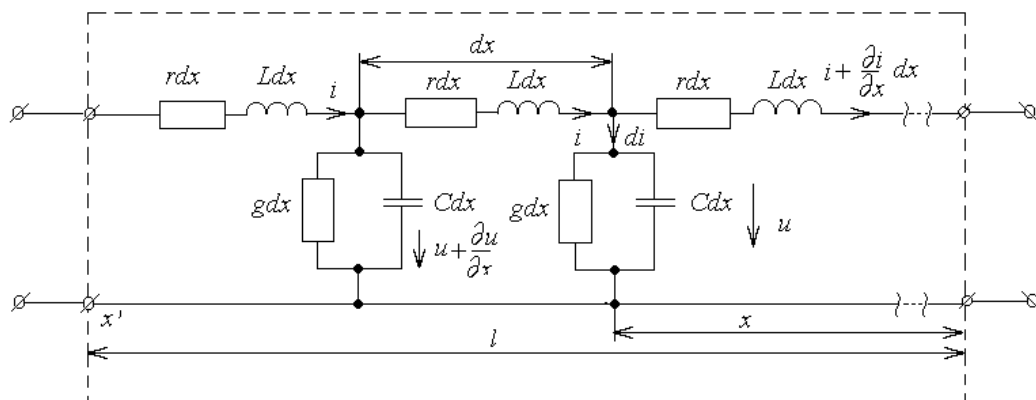


Рис. 2.1. Схема замещения дискретного участка РЛ малой длины

Полагая, что на входе рельсовой цепи действует источник гармонического напряжения, запишем следующие выражения для распределения напряжений и токов вдоль рельсовой линии (в дальнейшем

для удобства будем использовать обозначения $\dot{U} = \dot{U}(x)$, $\dot{I} = \dot{I}(x)$)

$$-\frac{dU}{dx} = Z_0 I; \quad (2.1)$$

$$-\frac{dI}{dx} = Y_0 U, \quad (2.2)$$

где $\frac{dI}{dx}$ – скорость изменения тока в направлении x ;

$\frac{dU}{dx}$ – скорость изменения напряжения в направлении x .

Комплексные параметры рельсовой линии на единицу длины имеют вид

$$Z_0 = Z_0 e^{j\varphi} = r + j\omega L \text{ Ом/км}; \quad Y_0 = Y_0 e^{j\varphi} = g + j\omega C \text{ См/км}. \quad (2.3)$$

Для решения уравнений (2.1 и 2.2) относительно U и I исключим сначала величину I из первого уравнения, взяв первую производную

$$-\frac{d^2U}{dx^2} = \frac{dI}{dx}(r + j\omega L),$$

и подставим в это выражение (2.2), тогда

$$\frac{d^2U}{dx^2} = U(r + j\omega L)(g + j\omega C).$$

$$\text{Обозначим } \gamma = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} \quad (2.4)$$

и получим

$$\frac{d^2U}{dx^2} = \gamma^2 U.$$

Общее решение приведенного уравнения можно записать в виде суммы прямых (падающих) и обратных (отраженных) бегущих волн с напряжением

$$U = U_{\text{пр}} + U_{\text{обр}} = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}. \quad (2.5)$$

Дифференцируя полученное уравнение, получим выражение

$$\frac{dU}{dx} = A_1 \gamma e^{\gamma x} - A_2 \gamma e^{-\gamma x} = \gamma (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x})$$

Подставим это уравнение в (2.1) и получим

$$I(r + j\omega L) = \gamma (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \text{ или,}$$

обозначив

$$Z_g = (r + j\omega L) / \gamma = \sqrt{(r + j\omega L) / (g + j\omega C)}, \quad (2.6)$$

найдем

$$IZ_g = -A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}. \quad (2.7)$$

Таким образом, имеем два уравнения (2.5) и (2.6) с двумя неизвестными A_1 и A_2 . Для их определения воспользуемся значениями тока и напряжения в начале рельсовой линии (при $x = 0$) U_1 и I_1 . Тогда уравнения (2.5) и (2.7) примут вид

$$U_1 = A_1 + A_2; \quad I_1 Z_{\epsilon} = -A_1 + A_2.$$

Отсюда

$$A_1 = (U_1 - I_1 Z_{\epsilon}) / 2; \quad A_2 = (U_1 + I_1 Z_{\epsilon}) / 2. \quad (2.8)$$

Подставляя (2.8) в (2.5) и (2.7), получаем

$$U = [(U_1 - I_1 Z_{\epsilon}) / 2] e^{\gamma x} + [(U_1 + I_1 Z_{\epsilon}) / 2] e^{-\gamma x};$$

$$I_1 Z_{\epsilon} = -[(U_1 - I_1 Z_{\epsilon}) / 2] e^{\gamma x} + [(U_1 + I_1 Z_{\epsilon}) / 2] e^{-\gamma x}.$$

С учетом того, что $ch \gamma x = (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}) / 2$ и $sh \gamma x = (e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}) / 2$, получим значения напряжения U_x и тока I_x в любой точке рельсовой линии x

$$\left. \begin{aligned} U_x &= U_1 ch \gamma x - I_1 Z_{\epsilon} sh \gamma x; \\ I_x &= I_1 ch \gamma x - (U_1 / Z_{\epsilon}) sh \gamma x. \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

В конце линии, при $x = l$ имеем

$$\left. \begin{aligned} U_l &= U_1 ch \gamma l - I_1 Z_{\epsilon} sh \gamma l; \\ I_l &= I_1 ch \gamma l - (U_1 / Z_{\epsilon}) sh \gamma l. \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

В рельсовых цепях, как правило, известны величина сопротивления нагрузки (реле), а также величина напряжения U_2 или тока I_2 его срабатывания.

Зависимость напряжения и тока в начале рельсовой линии от напряжения U_2 и тока I_2 в ее конце находится решением системы (2.10) относительно U_1 и I_1

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_2 ch \gamma l - I_2 Z_{\epsilon} sh \gamma l; \\ I_1 &= I_2 ch \gamma l + (U_2 / Z_{\epsilon}) sh \gamma l. \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Уравнения (2.9 – 2.11) представлены в общем виде и устанавливают взаимную связь токов и напряжений с параметрами линии r, L, C и g или γ и Z_{ϵ} и позволяют определить напряжения и токи в произвольной координате при любой длине рельсовой линии в зависимости от значений напряжений и токов в начале или в конце ее. Эти уравнения справедливы при любых нагрузках (Z_0 и Z_n) на концах рельсовой линии.

Из приведенных формул следует, что распространение энергии по рельсовой линии, ток и напряжение в любой точке линии описываются аналитически с помощью гиперболических функций от комплексных аргументов.

2.3. Первичные и вторичные параметры рельсовых линий

В периодических (квазистационарных) и в переходных режимах линии с распределенными параметрами могут характеризоваться двумя группами параметров – первичными и вторичными.

Для рельсовой линии, представленной длинной линией по рис. 2.1, первичные параметры, взятые на единицу длины, следующие:

Индуктивность рельсов L (Гн/км) характеризует способность цепи накапливать энергию в магнитном поле $W_m = LI^2 / 2$, а также определяет соотношение между током в рельсах и потокосцеплением: $L = \psi / I$.

Емкость C (Ф/км) оценивает способность цепи накапливать энергию электрического поля $W_e = CU^2 / 2$ и связывает заряды на рельсах с напряжением между ними: $C = q / v$.

Сопротивление рельсов r (Ом/км) характеризует потери энергии в проводах $W_r = rI^2$ и активное падение напряжения на них $U_r = rI$.

Проводимость изоляции g (См/км) между рельсами – величина, обратная сопротивлению изоляции, определяет потери энергии $W_g = gU^2$ в балластном материале между рельсами и ток утечки $I_y = gU$.

В приложении 1 представлены нормативные значения удельного сопротивления рельсовой линии $Z_p e^{j\varphi_p}$ при различных частотах сигнального тока.

К вторичным параметрам рельсовых линий относятся: волновое сопротивление и коэффициент распространения.

Волновое, или характеристическое, сопротивление, обозначаемое Z_ϵ , – это отношение комплексных действующих значений (или амплитуд) напряжения и тока прямой или обратной волн

$$Z_\epsilon = U_{\text{пр}} / I_{\text{пр}} = U_{\text{обр}} / I_{\text{обр}}. \quad (2.12)$$

Согласно (2.4) и (2.2)

$$Z_\epsilon = \sqrt{Z_0 / Y_0} = z_\epsilon e^{j\varphi_\epsilon}.$$

Так как $Z_0 = r + j\omega L$, а $Y_0 = g + j\omega C$ выражение для волнового сопротивления длинной линии имеет вид

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}}. \quad (2.13)$$

Коэффициент распространения $\gamma = \alpha + j\beta$, как следует из выражения (2.6), характеризует изменение модуля и аргумента действующего значения (или амплитуды) бегущей гармонической волны, например, для прямой

$$U_{\text{пр}}(x_2)/U_{\text{пр}}(x_1) = I_{\text{пр}}(x_2)/I_{\text{пр}}(x_1) e^{\gamma(x_2-x_1)}. \quad (2.14)$$

Километрический коэффициент затухания α – показывает степень убывания амплитуды напряжения или тока бегущей по рельсовой линии волны на расстоянии 1 км, измеряется в неперах (Нп) или в децибелах (дБ) на километр. Например, для прямой волны

$$\alpha = \ln \left| \frac{U_{\text{пр}}^H}{U_{\text{пр}}^K} \right| \text{ Нп/км}, \quad (2.15)$$

или

$$\alpha = 20 \lg \left| \frac{U_{\text{пр}}^H}{U_{\text{пр}}^K} \right| \text{ дБ/км}, \quad (2.16)$$

где $U_{\text{пр}}^H, U_{\text{пр}}^K$ – напряжение прямой волны в начале и в конце линии.

Из выражений (2.15), (2.16) следует, что

1 дБ \approx 0,115 Нп, или 1 Нп = 8,686 дБ.

Коэффициент фазы β измеряется в радианах на метр.

Для рельсовой линии по формуле (2.1)

$$\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)}. \quad (2.17)$$

Выделив в формуле (2.17) действительную и мнимую составляющие, получим

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[gr - \omega^2 CL + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)} \right]}; \quad (2.18)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\omega^2 CL - gr + \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)} \right]}. \quad (2.19)$$

На основании выражений (2.3)

$$\alpha = \sqrt{Z_0 Y_0} \cos \left(\frac{\varphi_z + \varphi_y}{2} \right); \quad \beta = \sqrt{Z_0 Y_0} \sin \left(\frac{\varphi_z + \varphi_y}{2} \right).$$

Коэффициент распространения волны и его зависимость от частоты характеризуют возможную дальность передачи сигнала, определяя его затухание и искажения.

Важное значение при моделировании рельсовой линии имеют еще две величины.

Фазовая скорость v – скорость перемещения какой-либо фазы напряжения или тока синусоидальной электромагнитной волны, бегущей вдоль рельсовой линии. В цепях с постоянными параметрами $v = \text{const}$ и

$$v = dx/dt = \omega/\beta, \quad (2.20)$$

где $\omega = 2\pi f$.

Длина волны λ – расстояние между двумя точками, взятыми в направлении распространения волны, фазы колебания в которых различаются на 2π :

$$\lambda = 2\pi/\beta. \quad (2.21)$$

Из выражений (2.20) и (2.21) следует, что

$$v = \lambda f = \lambda/T, \quad (2.22)$$

где f , T – частота и период колебания, задаваемые источником питания.

Для вторичных параметров возможны приближения. При $r \leq \omega L$ и $g \leq \omega C$

$$Z_g \approx \sqrt{L/C}; \quad \gamma \approx \sqrt{L \cdot C}; \quad v \approx 1/\sqrt{CL}; \quad \alpha \approx \frac{r}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{g}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad \beta \approx \omega \sqrt{CL}. \quad (2.23)$$

Наличие токопроводящих стыков, шпал с неодинаковыми изоляционными свойствами, а также режимы работы рельсовой цепи приводят к продольным и поперечным неоднородностям.

Пример 2.1. Вычислить входное сопротивление рельсовой линии, с подключенным к выходу приемником с сопротивлением 110 Ом. Частота сигнального тока 50 Гц; рельсы Р 65, $Z_{pl} = 0,8e^{j65^\circ}$ (1 км); $g_{из} = 1$ См/км, $C = 0$; длина рельсовой линии 2,6 км.

Решение. Вычислим сопротивление рельсовой линии длиной 1 км.

$$Z_{pl} = 0,8e^{j65^\circ} = 0,8 \cos 65^\circ + j0,8 \sin 65^\circ = 0,3381 + j0,725j.$$

По формулам (2.4) и (2.6) определим коэффициент распространения и волновое сопротивление линии длиной 1 км, соответственно:

$$\gamma = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} = 0,7544 + 0,4806j = 0,8944e^{j32,5^\circ},$$

и

$$Z_g = \sqrt{(r + j\omega L)/(g + j\omega C)} = 0,7544 + 0,4806j = 0,8944e^{j32,5^\circ}.$$

Используя систему (2.11), определим входное сопротивление рельсовой линии длиной 2,6 км

$$Z_{ex} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2 \operatorname{ch} \gamma l - I_2 Z_g \operatorname{sh} \gamma l}{(U_1/Z_g) \operatorname{sh} \gamma l + I_2 \operatorname{ch} \gamma l},$$

с учетом того, что $I_2 = U_2 / Z_H$, получим:

$$Z_{\theta_x} = \frac{Z_{\theta} (ch \gamma l - Z_{\theta} sh \gamma l)}{Z_H sh \gamma l + Z_{\theta} ch \gamma l} = 0,7416 + 0,4487j = 0,8667e^{j31,175^\circ}.$$

Следовательно, входное сопротивление нагруженной рельсовой линии длиной 2,6 км: $Z_{\theta_x} = 0,8667e^{j31,175^\circ}$ Ом.

2.4. Неоднородные длинные линии

Рассмотрим три вида неоднородностей в рельсовых линиях: 1) локальные неоднородности; 2) кусочно-однородные (составные) линии; 3) регулярно-неоднородные линии.

Основная задача анализа неоднородных линий – получение зависимостей, по которым можно найти распределение напряжения и тока при гармонических режимах [25].

Локальные неоднородности в длинных линиях. Линия с локальной неоднородностью в виде сосредоточенного двухполюсника Y_{Π} , включенного на расстояниях l_1 и l_2 , показана на рис. 2.2, а.

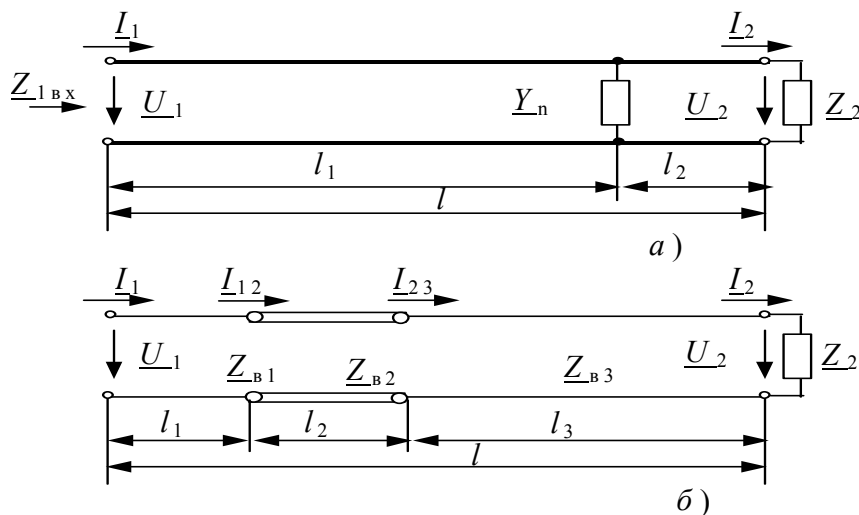


Рис. 2.2. Неоднородные рельсовые линии:

а – локально-неоднородная линия; б – кусочно-однородная (составная) линия; Z_2 – сопротивление нагрузки линии; Y_{Π} – сосредоточенная поперечная неоднородность

Для линии (рис. 2.2) справедливо матричное уравнение

$$\begin{Bmatrix} U \\ I \end{Bmatrix} = A^{\Sigma} \begin{Bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{Bmatrix}, \quad (2.24)$$

где

$$A^\Sigma = A_1 Y_\Pi A_2 = \begin{vmatrix} A_{11}^\Sigma & A_{12}^\Sigma \\ A_{21}^\Sigma & A_{22}^\Sigma \end{vmatrix} \quad (2.25)$$

и

$$A_{1,2} = \begin{vmatrix} \operatorname{ch} \gamma_{1,2} & Z_\epsilon \operatorname{sh} \gamma_{1,2} \\ \frac{\operatorname{sh} \gamma_{1,2}}{Z_\epsilon} & \operatorname{ch} \gamma_{1,2} \end{vmatrix}; \quad Y_\Pi = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ Y_\Pi & 1 \end{vmatrix}; \quad (2.26)$$

Z_ϵ, γ – волновое сопротивление и коэффициент распространения линии; $l = l_1 + l_2$, – длина линии. Подставляя в выражения (2.25) в (2.24), получаем

$$\left. \begin{aligned} A_{11}^\Sigma &= \operatorname{ch} \gamma + Z_\epsilon Y_\Pi \operatorname{sh} \gamma_1 \cdot \operatorname{ch} \gamma_2; \\ A_{12}^\Sigma &= Z_\epsilon \operatorname{sh} \gamma + Z_\epsilon^2 Y_\Pi \operatorname{sh} \gamma_1 \cdot \operatorname{sh} \gamma_2; \\ A_{21}^\Sigma &= \frac{1}{Z_\epsilon} \operatorname{sh} \gamma + Y_\Pi \operatorname{ch} \gamma_1 \cdot \operatorname{ch} \gamma_2; \\ A_{22}^\Sigma &= \operatorname{ch} \gamma + Z_\epsilon Y_\Pi \operatorname{ch} \gamma_1 \cdot \operatorname{sh} \gamma_2. \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

Входное сопротивление длинной линии с локальной неоднородностью и нагрузкой вычисляем по формуле

$$Z_{\text{вх}} = (A_{11}^\Sigma Z_2 + A_{12}^\Sigma) / (A_{21}^\Sigma Z_2 + A_{22}^\Sigma). \quad (2.28)$$

Кусочно-однородные (составные) длинные линии. Для кусочно-однородной (составной) линии (по рис. 2.2, б) расчет режима аналогичен рассмотренному выше. Эквивалентная матрица цепи

$$A^\Sigma = A_1 A_2 A_3 \dots = \prod_{i=1}^n A_i, \quad (2.29)$$

где матрицы A_i определяются согласно матрице (2.26) с соответствующей заменой индексов, причем в данном случае $Z_{\epsilon i}$ и γ_i различны для каждого участка.

2.5. Линия с распределенными параметрами как четырехполюсник

В общем случае рельсовую линию с распределенными параметрами можно рассматривать как несимметричный четырехполюсник. Этот четырехполюсник может находиться в режимах произвольной нагрузки или продольной, или поперечной несимметрии.

Режим пассивного взаимного четырехполюсника задается напряжением U_1 и I_1 на первичных 1 – 1' и напряжением U_2 и I_2 на вторичных 2 – 2' выводах (рис. 2.3).

Подобные линии с распределенными параметрами обычно имеют с двух концов сосредоточенные элементы Z_1 и Z_2 .

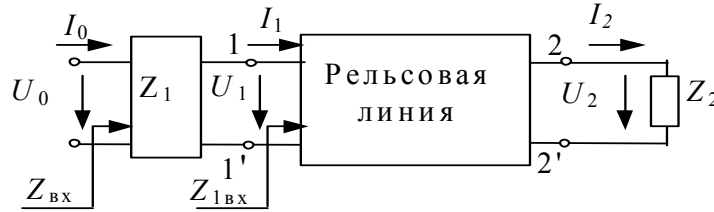


Рис. 2.3. Нагруженный в начале и в конце четырехполюсник рельсовой линии

Напряжения и токи по концам рельсового четырехполюсника можно связать уравнениями с коэффициентами различного типа [1]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= A_{11} \dot{U}_2 + A_{12} \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 &= A_{21} \dot{U}_2 + A_{22} \dot{I}_2; \end{aligned} \right\} \text{или} \begin{vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{vmatrix} = \|A\| \begin{vmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{vmatrix}, \quad (2.30)$$

где $\begin{vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{vmatrix}$ и $\begin{vmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{vmatrix}$ – матрицы-столбцы напряжений и токов;

$\|A\| = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix}$ – квадратная матрица коэффициентов;

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= Y_{11} \dot{U}_1 + Y_{12} \dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 &= Y_{21} \dot{U}_1 + Y_{22} \dot{U}_2; \end{aligned} \right\} \text{или} \begin{vmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{vmatrix} = \|Y\| \begin{vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{vmatrix}, \quad (2.31)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= Z_{11} \dot{I}_1 + Z_{12} \dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 &= Z_{21} \dot{I}_1 + Z_{22} \dot{I}_2; \end{aligned} \right\} \text{или} \begin{vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{vmatrix} = \|Z\| \begin{vmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{vmatrix}, \quad (2.32)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= H_{11} \dot{I}_1 + H_{12} \dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 &= H_{21} \dot{I}_1 + H_{22} \dot{U}_2; \end{aligned} \right\} \text{или} \begin{vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{vmatrix} = \|H\| \begin{vmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{vmatrix}, \quad (2.33)$$

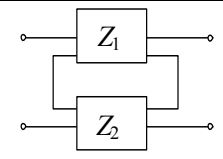
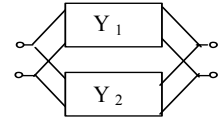
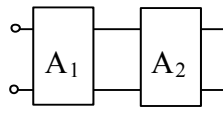
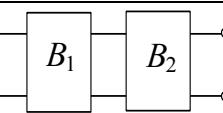
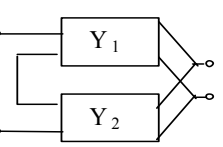
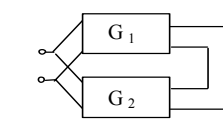
$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= G_{11} \dot{U}_1 + G_{12} \dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 &= G_{21} \dot{U}_1 + G_{22} \dot{I}_2; \end{aligned} \right\} \text{или} \begin{vmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{vmatrix} = \|G\| \begin{vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{vmatrix}. \quad (2.34)$$

Из четырех коэффициентов каждой системы уравнений только три независимых; справедливы уравнения связи

$$\left. \begin{aligned} A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1; \quad Y_{21} = -Y_{12}; \quad Z_{21} = -Z_{12} \\ H_{12} = H_{21}; \quad G_{12} = G_{21}. \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

В табл. 2.1. дана связь коэффициентов уравнений различного типа при указанных на рис. 2.3 положительных направлениях напряжений и токов.

Таблица 2.1

Вид параметра	Система уравнений четырехполюсника	Схема соединения четырехполюсника	Результирующее соотношение
1	2	3	4
Z-параметры	$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [Z] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$		$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2$
Y-параметры	$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = [Y] \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$		$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2$
A-параметры	$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$		$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 \times \mathbf{A}_2$
A ⁻¹ -параметры	$\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = [B] \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix}$		$\mathbf{B} = \mathbf{B}_2 \times \mathbf{B}_1$
1	2	3	4
H-параметры	$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = [H] \begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$		$\mathbf{H} = \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2$
G-параметры	$\begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [G] \begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$		$\mathbf{G} = \mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2$

* Часто матрицу A записывают в виде коэффициентов $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$.

Описание схемы с помощью матрицы четырехполюсника основано на записи матрицы четырехполюсника, у которого направление токов и напряжений соответствует представленным на рис. 2.3. В качестве независимых можно выбрать две переменные из четырех (U_1, U_2, I_1, I_2), а

оставшиеся две переменные на основании принципа суперпозиции выразить через выбранные независимые переменные. Таким образом, если a_1 , a_2 и a_3 , a_4 соответственно пары выбранных переменных, то можно записать

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

Имеется шесть возможных сочетаний пар переменных. В зависимости от выбора независимых переменных изменяются и коэффициенты четырехполюсников. Эти коэффициенты, а также схемы соединения четырехполюсников, для определения параметров которых применяют описываемую систему уравнений, приведены в табл. 2.1. Например, если два четырехполюсника соединены параллельно, то для расчета коэффициентов результирующего четырехполюсника удобней всего использовать Y -параметры. В этом случае Y -параметры результирующего четырехполюсника равны сумме Y -параметров каждого четырехполюсника.

Аналогично при каскадном соединении двух четырехполюсников неоднородной рельсовой линии матрица результирующего четырехполюсника определяется как произведение матриц, записанных в A -параметрах (передаточных параметрах).

Более сложные схемы можно представить состоящими из нескольких соединенных различным образом четырехполюсников. Используя соотношения для определения коэффициентов при различном соединении четырехполюсников, указанные в табл. 2.1, можно записать выражения для результирующих матриц рассматриваемых схем. При получении результирующей матрицы часто необходимо проводить преобразование матриц из одной системы параметров в другую.

Это можно сделать вручную с помощью табл. 2.2, которая определяет связь между различными коэффициентами четырехполюсников. Таким образом, анализ схемы с помощью четырехполюсников сводится к нахождению результирующей матрицы схемы, состоящей из более простых четырехполюсников. При расчете результирующей матрицы используют табл. 2.1 и 2.2.

Таблица 2.2

Типы уравнений	Коэффициенты					
	(Z)		(Y)		(A)	
(Z)	Z_{11}	Z_{12}	y_{22}/A_y	$-y_{12}/A_y$	A_{11}/A_{21}	$-1/A_{21}$
	Z_{21}	Z_{22}	$-y_{21}/A_y$	y_{11}/A_y	$1/A_{21}$	$-A_{22}/A_{21}$

(Y)	$Z_{22}/\Delta_Z \quad -Z_{12}/\Delta_Z$ $-Z_{21}/\Delta_Z \quad Z_{11}/\Delta_Z$	$y_{11} \quad y_{12}$ $y_{21} \quad y_{22}$	$A_{22}/A_{12} \quad -\Delta_A/A_{12}$ $1/A_{12} \quad -A_{11}/A_{12}$
(A)	$Z_{11}/Z_{21} \quad -\Delta_Z/Z_{21}$ $1/Z_{11} \quad -Z_{22}/Z_{21}$	$-y_{22}/y_{21} \quad 1/y_{21}$ $-\Delta_y/y_{21} \quad y_{11}/y_{21}$	$A_{11} \quad A_{12}$ $A_{21} \quad A_{22}$
(B)	$Z_{22}/Z_{12} \quad \Delta_Z/Z_{12}$ $1/Z_{12} \quad Z_{11}/Z_{12}$	$-y_{11}/y_{12} \quad -1/y_{12}$ $-\Delta_y/y_{12} \quad -y_{22}/y_{12}$	$A_{22}/\Delta_A \quad A_{12}/\Delta_A$ $A_{21}/\Delta_A \quad A_{11}/\Delta_A$
(H)	$\Delta_Z/Z_{22} \quad Z_{12}/Z_{22}$ $-Z_{21}/Z_{22} \quad 1/Z_{22}$	$1/y_{11} \quad -y_{12}/y_{11}$ $y_{21}/y_{11} \quad \Delta_y/y_{11}$	$A_{12}/A_{22} \quad \Delta_A/A_{22}$ $-1/A_{22} \quad A_{21}/A_{22}$
(G)	$1/Z_{11} \quad -Z_{12}/Z_{11}$ $Z_{21}/Z_{11} \quad \Delta_Z/Z_{11}$	$\Delta_y/y_{22} \quad y_{12}/y_{22}$ $-y_{21}/y_{22} \quad 1/y_{22}$	$A_{21}/A_{11} \quad 1/A_{11}$ $1/A_{11} \quad -A_{12}/A_{11}$

Типы уравнений	Коэффициенты		
	(B)	(H)	(G)
(Z)	$b_{22}/b_{21} \quad 1/b_{21}$ $\Delta_B/b_{21} \quad b_{11}/b_{21}$	$\Delta_h/h_{22} \quad h_{12}/h_{22}$ $-h_{21}/h_{22} \quad 1/h_{22}$	$1/g_{11} \quad -g_{12}/g_{11}$ $g_{21}/g_{11} \quad \Delta_g/g_{11}$
(Y)	$b_{11}/b_{12} \quad -1/b_{12}$ $\Delta_B/b_{12} \quad b_{22}/b_{12}$	$1/h_{11} \quad -h_{12}/h_{11}$ $h_{21}/h_{11} \quad \Delta_h/h_{11}$	$\Delta_g/g_{22} \quad g_{12}/g_{22}$ $-g_{21}/g_{22} \quad 1/g_{22}$
(A)	$b_{22}/\Delta_B \quad b_{12}/\Delta_B$ $b_{21}/\Delta_B \quad b_{11}/\Delta_B$	$-\Delta_h/h_{21} \quad h_{11}/h_{21}$ $-h_{22}/h_{21} \quad -1/h_{21}$	$1/g_{21} \quad g_{22}/g_{21}$ $g_{11}/g_{21} \quad \Delta_g/g_{21}$
(B)	$b_{11} \quad b_{12}$ $b_{21} \quad b_{22}$	$1/h_{12} \quad h_{11}/h_{12}$ $h_{22}/h_{12} \quad \Delta_h/h_{12}$	$-\Delta_g/g_{12} \quad -g_{22}/g_{12}$ $-g_{11}/g_{12} \quad -1/g_{12}$
(H)	$b_{12}/b_{11} \quad 1/b_{11}$ $-\Delta_B/b_{11} \quad b_{21}/b_{11}$	$h_{11} \quad h_{12}$ $h_{21} \quad h_{22}$	$g_{22}/\Delta_g \quad g_{12}/\Delta_g$ $-g_{21}/\Delta_g \quad g_{11}/\Delta_g$
(G)	$b_{21}/b_{22} \quad 1/b_{22}$ $\Delta_B/b_{22} \quad b_{12}/b_{22}$	$h_{22}/\Delta_h \quad -h_{12}/\Delta_h$ $-h_{21}/\Delta_h \quad h_{11}/\Delta_h$	$g_{11} \quad g_{12}$ $g_{21} \quad g_{22}$

Примечание: $\Delta Y = Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21}$; $\Delta Z = Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}$; $\Delta h = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}$.

Из табл. 2.2 следует, что для расчета коэффициентов четырехполюсников необходимо запрограммировать 30 различных таблиц преобразований [2]. Можно упростить программирование, осуществив расчет в два этапа. На первом этапе, выбирая передаточную матрицу **A** в качестве промежуточной, преобразование матрицы **A** в матрицу 2 произвести по следующей схеме: тип 1 \rightarrow **A**, **A** \rightarrow тип 2. Все возможные преобразования можно свести к схеме

$$(\mathbf{Z}, \mathbf{Y}, \mathbf{B}, \mathbf{H}, \mathbf{G}) \rightarrow \mathbf{A};$$

$$\mathbf{A} \rightarrow (\mathbf{Z}, \mathbf{Y}, \mathbf{B}, \mathbf{H}, \mathbf{G}).$$

Следовательно, в этом случае необходимо программировать лишь 10 возможных межматричных преобразований.

На втором этапе дальнейшее упрощение состоит в полном исключении взаимных преобразований. Этого можно достичь следующим образом. Если ограничиться описанием четырехполюсника в передаточных параметрах (А-параметрах), то можно выразить результирующие матрицы любых шести схем соединений, приведенных в табл. 2.1, через матрицы четырехполюсников, записанных в виде матрицы А-параметров. Например, для различных схем соединения двух четырехполюсников, матрицы передачи А-параметров которых записаны в виде

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix},$$

в соответствии с табл. 2.1 можно получить результирующие матрицы А-параметров в следующем виде:

для последовательного соединения четырехполюсников

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{A_1 C_2 + A_2 C_1}{C_1 + C_2} & \frac{(B_1 + B_2)(C_1 + C_2) - (A_1 - A_2)(D_1 - D_2)}{C_1 + C_2} \\ \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} & \frac{C_1 D_2 + C_2 D_1}{C_1 + C_2} \end{bmatrix}; \quad (2.37)$$

для параллельного соединения

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{A_1 B_2 + A_2 B_1}{B_1 + B_2} & \frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2} \\ \frac{(B_1 + B_2)(C_1 + C_2) - (A_1 - A_2)(D_1 - D_2)}{B_1 + B_2} & \frac{B_1 D_2 + B_2 D_1}{B_1 + B_2} \end{bmatrix}; \quad (2.38)$$

для последовательного соединения по входу и параллельного по выходу

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{(A_1 + A_2)(D_1 + D_2) - (B_1 - B_2)(C_1 - C_2)}{D_1 + D_2} & \frac{B_1 D_2 + B_2 D_1}{D_1 + D_2} \\ \frac{C_1 D_2 + C_2 D_1}{D_1 + D_2} & \frac{D_1 D_2}{D_1 + D_2} \end{bmatrix}; \quad (2.39)$$

для параллельного соединения по входу и последовательного по выходу

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} & \frac{A_1 B_2 + A_2 B_1}{A_1 + A_2} \\ \frac{A_1 C_2 + A_2 C_1}{A_1 + A_2} & \frac{(A_1 + A_2)(D_1 + D_2) - (B_1 - B_2)(C_1 - C_2)}{A_1 + A_2} \end{bmatrix}; \quad (2.40)$$

для каскадного соединения

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1 A_2 + B_1 C_2 & A_1 B_2 + B_1 D_2 \\ A_2 C_1 + C_2 D_1 & B_2 C_1 + D_1 D_2 \end{bmatrix}; \quad (2.41)$$

для «инверсного» каскадного соединения

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1 A_2 + B_2 C_1 & D_1 B_2 + A_1 B_2 \\ A_1 C_2 + C_1 D_2 & B_1 C_2 + D_1 D_2 \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

Применение выражений (2.37 – 2.42) позволяет существенно упростить затраты на формирование результирующей матрицы рельсовой цепи. Кроме того, сходство матриц (2.37 – 2.42) может быть также использовано при их программировании. Очевидно, что любое из шести приведенных уравнений четырехполюсника может быть выбрано за базисное, однако передаточные параметры четырехполюсника имеют преимущества по сравнению с другими параметрами, поскольку они могут быть применимы для наиболее распространенных схем, приведенных в приложении 2.

Использование библиотеки стандартных схем и алгоритмов задания их параметров позволяет создавать эффективные машинные программы моделирования РЦ, основывающиеся на представлении рельсовых линий в виде четырехполюсников.

Пример 2.2. Найти обобщенную модель $[A]_0$ параметров рельсовой цепи по рис. 2.3, если известны: волновое сопротивление $Z_g = 0,8944e^{j32,5^\circ}$ Ом; коэффициент распространения $\gamma = 0,8944e^{j32,5^\circ}$; длина линии 2,6 км.

На входе цепи включен \lceil - четырехполюсник с параметрами $Z_0 = 10$ Ом; $C = 8$ мкф, а на выходе четырехполюсник защитного блока фильтра (ЗБФ). Сопротивление нагрузки как в примере 2.1.

Решение:

$$Z_{ЗБФ} = 407e^{j-88,35^\circ},$$

$$[A]_0 = A_{Z_0} \cdot A_C \cdot A_{ПЛ} \cdot A_{ЗБФ}.$$

По приложению 2 определим параметры \lceil - четырехполюсника

$$A^{(0)} = A_{Z_0} \cdot A_C = \left\| \begin{array}{cc} 1 + j\omega C \cdot Z_0 & Z_0 \\ j\omega C & 1 \end{array} \right\|;$$

$$A_{ПЛ} = \left\| \begin{array}{cc} ch\gamma l & Z_g sh\gamma l \\ \frac{sh\gamma l}{Z_g} & ch\gamma l \end{array} \right\|;$$

$$A_{3БФ} = \left\| \begin{array}{cc} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{3БФ}} & 1 \end{array} \right\|.$$

Исходная обобщенная матрица рельсовой цепи равна

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & Z_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/X_C & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + jZ_0\omega C & Z_0 \\ j\omega C & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0003e^{j1,44^\circ} & 10 \\ 0,0025e^{j90^\circ} & 1 \end{bmatrix}.$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} ch(\gamma l) & Z_\epsilon sh(\gamma l) \\ sh(\gamma l) / Z_\epsilon & ch(\gamma l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,498e^{j70,9^\circ} & 3,229e^{j104,76^\circ} \\ 4,037e^{j39,76^\circ} & 3,498e^{j70,9^\circ} \end{bmatrix}.$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{3БФ} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/(407e^{j39,76^\circ}) & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\underline{A}_0 = A_1 \times A_2 \times A_3.$$

$$\underline{A}_0 = \begin{bmatrix} 43,315e^{j42,366^\circ} & 32,666e^{j73,741^\circ} \\ 4,028e^{j39,973^\circ} & 3,494e^{j71,011^\circ} \end{bmatrix}.$$

Вопросы и упражнения для самопроверки

1. Какие процессы происходят при распространении энергии вдоль рельсовой линии?
2. Что называется первичными параметрами рельсовой линии, как и почему они зависят от частоты сигнального тока?
3. Какие процессы в рельсовой линии характеризуются первичными параметрами?
4. Какие параметры называются вторичными параметрами рельсовой линии, как они выражаются через первичные параметры?
5. Физический смысл вторичных параметров: затухание, фазовый сдвиг и волновое сопротивление.
6. Какие процессы в рельсовой линии характеризуются волновыми параметрами?
7. Какова скорость распространения энергии по рельсовой линии, от чего она зависит?
8. Назовите режимы определения параметров матриц Z, Y, A и H четырехполюсников.
9. Сформулируйте условия, налагаемые требованиями взаимности и симметрии четырехполюсников на элементы классических матриц.

10. Определите элементы матриц проводимости Y и передачи A для реактивного входного четырехполюсника, изображенного на рис. 2.4, б.

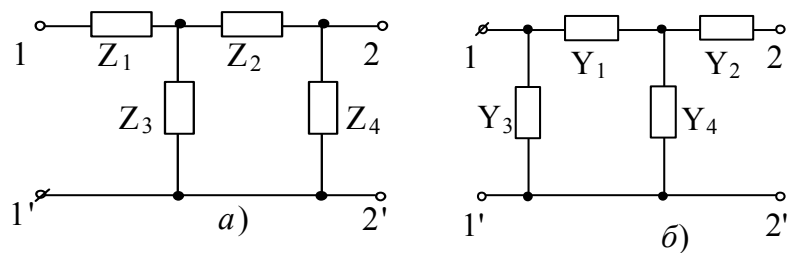


Рис. 2.4. Примеры схем четырехполюсников

11. Определите элементы матриц Z и передачи A для цепи (рис. 2.4, а).

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНОЙ СХЕМЕ ЗАМЕЩЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ

3.1. Параметры рельсовых линий

Расчет состояния РЛ основывается на ее представлении в виде двухпроводной или трехпроводной электрической линии с распределенными параметрами. Удельные значения первичных параметров могут зависеть от пространственной координаты, вследствие неоднородности, качества и состояния шпал, высоты балластного слоя, наличия междупутных перемычек, применяемых для канализации тягового тока, отсасывающих фидеров тягового тока и других факторов [4]. При этом продольными параметрами являются удельное сопротивление и индуктивность рельса, а в качестве поперечных параметров выступают проводимость между рельсами и емкость между ними, соответственно.

На рельсовую линию, как линию с распределенными параметрами, воздействуют различного рода внутренние и внешние возмущения.

Методически удобно различать три вида внешних возмущений на рельсовую линию, используемую как чувствительный элемент автоматизированной системы:

- непрерывные воздействия (изменение температуры, влажность и др.), изменяющие параметры рельсовой линии;
- дискретные воздействия (наложение поездного шунта, обрыв рельсовой линии), изменяющие структуру ее схемы замещения;
- непрерывные и дискретные помехи (помехи от тягового тока, от блуждающих токов и др.), не изменяющие параметры и структуру схемы замещения, а воздействующие вместе с основным сигналом на приемник [9].

Реакция рельсовой цепи на эти возмущения проявляется в изменении параметров сигналов на ее входе и выходе, являющихся информативными признаками ее состояния. Таковыми являются:

- амплитуды и фазы напряжения и тока на входе рельсовой линии;
- амплитуда и фаза напряжения на выходе нагруженной рельсовой линии.

Непрерывные и дискретные помехи и их влияние на тракт передачи, а соответственно и на работу приемника рельсовой цепи достаточно полно

исследованы и описаны в [6], где предложены организационные и технические мероприятия, которые не изменяют структуру схемы замещения и поэтому при разработке математических моделей порождения образов помехи не учитываются.

При исследованиях рельсовых цепей переменного синусоидального тока, рельсовую линию рассматривают как линию с равномерно распределенными параметрами [4]. Принятая идеализация позволяет получать результаты анализа, хорошо согласующиеся с реальными.

При двухпроводном представлении схемы рельсовой линии в нормальном режиме, рельсовая линия замещается пассивным симметричным четырехполюсником с распределенными параметрами, уравнения передачи которого в системе А – параметров имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \cdot A + \dot{I}_2 \cdot B \\ \dot{I}_1 &= \dot{U}_2 \cdot C + \dot{I}_2 \cdot D \end{aligned} \right\}, \quad (3.1)$$

где А, В, С, D – параметры рельсового четырехполюсника.

Известно, что такой четырехполюсник характеризуется лишь двумя независимыми параметрами, поскольку между параметрами существуют следующие соотношения

$$A \cdot D - B \cdot C = 1; \quad A = D.$$

В РЦ, использующей в качестве сигнала опроса переменное напряжение, эти параметры выражаются через комплексные гиперболические функции от вторичных параметров и длины l электрической линии

$$\left. \begin{aligned} A &= ch(\gamma l), \quad B = Z_B \cdot sh(\gamma l) \\ C &= \frac{1}{Z_B} \cdot sh(\gamma l), \quad D = A = ch(\gamma l) \end{aligned} \right\}. \quad (3.2)$$

Волновое сопротивление Z_B и коэффициент распространения γ являются однородно распределенными вторичными параметрами двухпроводной рельсовой линии и вычисляются по формулам (2.13 и 2.17).

При частоте сигнального тока менее 75 Гц в установившемся режиме величина C_0 мала, и ею пренебрегают. В этом случае соотношения (2.13 и 2.17) принимают вид

$$Z_B = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)/g}, \quad \gamma = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)g}. \quad (3.3)$$

3.2. Математические модели нормального режима

При формировании математических моделей [2] нормального режима удобно использовать обобщенную схему замещения РЦ, состоящую из: четырехполюсника N_1 , замещающего аппаратуру согласования источника сигнала с рельсовой линией, четырехполюсника $РЛ_н$, замещающего рельсовую линию рис. 3.1, четырехполюсника N_2 , замещающего аппаратуру согласования рельсовой линии и классификатора ее состояния, вход которого является нагрузкой Z_2 .

На рис. 3.1 приведена обобщенная схема замещения рельсовой цепи в нормальном режиме.

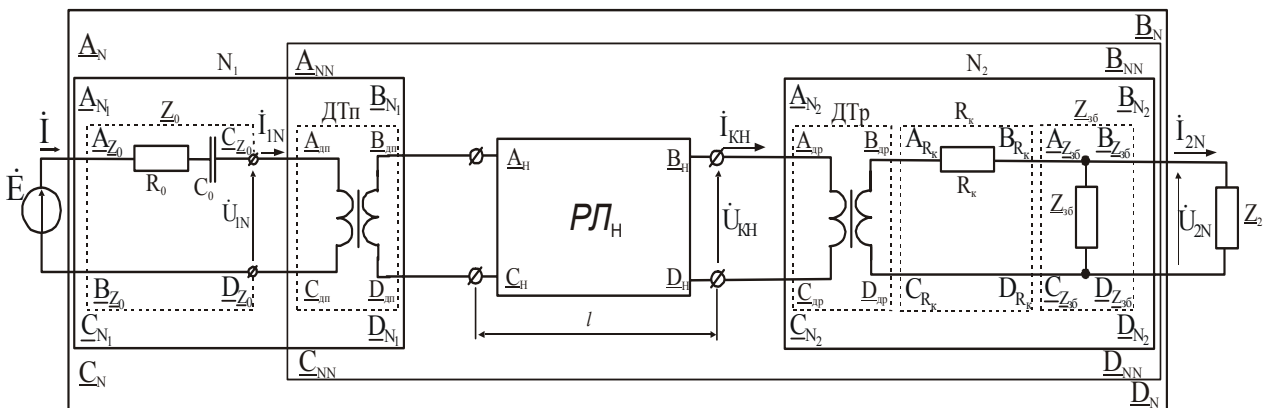


Рис. 3.1. Обобщенная схема замещения РЦ в нормальном режиме

В расчетах всех классов состояний коэффициенты четырехполюсников N_1 и N_2 , определяемые с учетом схемы и параметров элементов представленных в работе [3], остаются неизменными, и их параметры являются константами.

Коэффициенты четырехполюсника N_1 определяются как произведение двух матриц

$$\begin{aligned} \|N_1\| &= \begin{vmatrix} A_{N_1} & B_{N_1} \\ C_{N_1} & D_{N_1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{Z_0} & B_{Z_0} \\ C_{Z_0} & D_{Z_0} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{дп} & B_{дп} \\ C_{дп} & D_{дп} \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} (A_{дп} + Z_0 \cdot C_{дп}) & (B_{дп} + Z_0 \cdot D_{дп}) \\ C_{дп} & D_{дп} \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

где $A_{дп}, B_{дп}, C_{дп}, D_{дп}$ - коэффициенты дроссель трансформатора питающего конца РЦ ДТп, которые представлены в [3], Z_0 - комплексное сопротивление ограничителя, образованного активным сопротивлением ограничителя R_0 и емкостью C_0 .

Коэффициенты четырехполюсника N_2 определяются

$$\begin{aligned} \|N_2\| &= \begin{vmatrix} A_{N_2} & B_{N_2} \\ C_{N_2} & D_{N_2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{Др} & B_{Др} \\ C_{Др} & D_{Др} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{R_k} & B_{R_k} \\ C_{R_k} & D_{R_k} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{Z_{3б}} & B_{Z_{3б}} \\ C_{Z_{3б}} & D_{Z_{3б}} \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} (A_{Др} \cdot (1 + R_k/Z_{3б}) + B_{Др}/Z_{3б}) & (A_{Др} \cdot R_k + B_{Др}) \\ (C_{Др} \cdot (1 + R_k/Z_{3б}) + D_{Др}/Z_{3б}) & (C_{Др} \cdot R_k + D_{Др}) \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где $A_{Др}, B_{Др}, C_{Др}, D_{Др}$ - коэффициенты дроссель трансформатора релейного конца РЦ ДТр, которые представлены в работе [3], R_k - сопротивление кабеля между дроссель - трансформатором ДТр и нагрузкой Z_2 , $Z_{3б}$ - комплексное сопротивление защитного блока ЗБФ.

Матрица коэффициентов обобщенного четырехполюсника РЦ имеет вид

$$\begin{vmatrix} A_N & B_N \\ C_N & D_N \end{vmatrix} = \|N_1\| \times \|ПЛ_H\| \times \|N_2\|; \quad (3.6)$$

где

$$A_N = (A_{N_1} \cdot A_H + B_{N_1} \cdot C_H) \cdot A_{N_2} + (A_{N_1} \cdot B_H + B_{N_1} \cdot D_H) \cdot C_{N_2}, \quad (3.7)$$

$$B_N = (A_{N_1} \cdot A_H + B_{N_1} \cdot C_H) \cdot B_{N_2} + (A_{N_1} \cdot B_H + B_{N_1} \cdot D_H) \cdot D_{N_2}, \quad (3.8)$$

$$C_N = (C_{N_1} \cdot A_H + D_{N_1} \cdot C_H) \cdot A_{N_2} + (C_{N_1} \cdot B_H + D_{N_1} \cdot D_H) \cdot C_{N_2}, \quad (3.9)$$

$$D_N = (C_{N_1} \cdot A_H + D_{N_1} \cdot C_H) \cdot B_{N_2} + (C_{N_1} \cdot B_H + D_{N_1} \cdot D_H) \cdot D_{N_2}. \quad (3.10)$$

С учетом соотношений (3.2), (3.4), (3.5) коэффициенты (3.7 – 3.10) матрицы (3.6) принимают вид

$$\begin{aligned} A_N &= [(A_{ДП} + Z_o \cdot C_{ДП}) \cdot ch(\gamma) + (B_{ДП} + Z_o \cdot D_{ДП}) \cdot (sh(\gamma)/Z_b)] \cdot [A_{Др} \cdot (1 + R_k/Z_{3б}) + B_{Др}/Z_{3б}] + \\ &+ [(A_{ДП} + Z_o \cdot C_{ДП}) \cdot Z_b \cdot sh(\gamma) + (B_{ДП} + Z_o \cdot D_{ДП}) \cdot ch(\gamma)] \cdot [C_{Др} \cdot (1 + R_k/Z_{3б}) + D_{Др}/Z_{3б}]; \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} B_N &= [(A_{ДП} + Z_o \cdot C_{ДП}) \cdot ch(\gamma) + (B_{ДП} + Z_o \cdot D_{ДП}) \cdot (sh(\gamma)/Z_b)] \cdot [A_{Др} \cdot R_k + B_{Др}] + \\ &+ [(A_{ДП} + Z_o \cdot C_{ДП}) \cdot Z_b \cdot sh(\gamma) + (B_{ДП} + Z_o \cdot D_{ДП}) \cdot ch(\gamma)] \cdot [C_{Др} \cdot R_k + D_{Др}]; \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} C_N &= [C_{ДП} \cdot ch(\gamma) + D_{ДП} \cdot (sh(\gamma)/Z_b)] \cdot [A_{Др} \cdot (1 + R_k/Z_{3б}) + B_{Др}/Z_{3б}] + \\ &+ [C_{ДП} \cdot Z_b \cdot sh(\gamma) + D_{ДП} \cdot ch(\gamma)] \cdot [C_{Др} \cdot (1 + R_k/Z_{3б}) + D_{Др}/Z_{3б}]; \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} D_N &= [C_{ДП} \cdot ch(\gamma) + D_{ДП} \cdot (sh(\gamma)/Z_b)] \cdot [A_{Др} \cdot R_k + B_{Др}] + \\ &+ [C_{ДП} \cdot Z_b \cdot sh(\gamma) + D_{ДП} \cdot ch(\gamma)] \cdot [C_{Др} \cdot R_k + D_{Др}]. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Связь напряжения $\dot{U}_{вх}$ и тока $\dot{I}_{вх}$ на входе каждого из четырехполюсников $N_1, ПЛ_H, N_2, NN$ с напряжением $\dot{U}_{вых}$ и током $\dot{I}_{вых}$ на их выходах удобно выразить с помощью уравнений следующего вида

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\text{ВХ}} &= \dot{U}_{\text{ВЫХ}} \cdot A + \dot{I}_{\text{ВЫХ}} \cdot B \\ \dot{I}_{\text{ВХ}} &= \dot{U}_{\text{ВЫХ}} \cdot C + \dot{I}_{\text{ВЫХ}} \cdot D \end{aligned} \right\}, \quad (3.15)$$

Для обобщенного четырехполюсника рельсовой цепи для класса образов нормального режима уравнения (3.15) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{E} &= \dot{U}_{2N} \cdot A_N + \dot{I}_{2N} \cdot B_N \\ \dot{I} &= \dot{U}_{2N} \cdot C_N + \dot{I}_{2N} \cdot D_N \end{aligned} \right\}, \quad (3.16)$$

где \dot{E} и \dot{I} - напряжение и ток на входе обобщенного четырехполюсника N, \dot{U}_{2N} и \dot{I}_{2N} - напряжение и ток на нагрузке обобщенного четырехполюсника N.

Уравнения (3.16), с учетом (3.11) – (3.14), формируют математическую модель РЦ в нормальном режиме.

Из системы уравнений (3.16), с учетом (3.11), (3.12) и того, что

$$\dot{I}_{2N} = \dot{U}_{2N} / Z_2, \quad (3.17)$$

где Z_2 - комплексное сопротивление нагрузки (входной импеданс классификатора состояний), подключенного к выходу четырехполюсника N, получим уравнение, описывающее напряжение и его фазу на нагрузке РЦ, для класса образов нормального режима

$$\dot{U}_{2N} = |U_{2N}| \cdot e^{j\varphi_{U_{2N}}} = \dot{E} \cdot \frac{Z_2}{A_N \cdot Z_2 + B_N}, \quad (3.18)$$

где $A_N \cdot Z_2 + B_N =$

$$\begin{aligned} &= \left\{ (A_{\text{ДП}} + Z_o \cdot C_{\text{ДП}}) \cdot \text{ch}(\gamma) + (B_{\text{ДП}} + Z_o \cdot D_{\text{ДП}}) \cdot (\text{sh}(\gamma) / Z_b) \right\} \cdot [A_{\text{Др}} \cdot (1 + R_k / Z_{36}) + B_{\text{Др}} / Z_{36}] + \\ &+ \left\{ (A_{\text{ДП}} + Z_o \cdot C_{\text{ДП}}) \cdot Z_b \cdot \text{sh}(\gamma) + (B_{\text{ДП}} + Z_o \cdot D_{\text{ДП}}) \cdot \text{ch}(\gamma) \right\} \cdot [C_{\text{Др}} \cdot (1 + R_k / Z_{36}) + D_{\text{Др}} / Z_{36}] \cdot Z_2 + \\ &+ \left\{ (A_{\text{ДП}} + Z_o \cdot C_{\text{ДП}}) \cdot \text{ch}(\gamma) + (B_{\text{ДП}} + Z_o \cdot D_{\text{ДП}}) \cdot (\text{sh}(\gamma) / Z_b) \right\} \cdot [A_{\text{Др}} \cdot R_k + Z_{\text{Др}}] + \\ &+ \left\{ (A_{\text{ДП}} + Z_o \cdot C_{\text{ДП}}) \cdot Z_b \cdot \text{sh}(\gamma) + (B_{\text{ДП}} + Z_o \cdot D_{\text{ДП}}) \cdot \text{ch}(\gamma) \right\} \cdot [C_{\text{Др}} \cdot R_k + D_{\text{Др}}] = J_N. \end{aligned}$$

Связь напряжения \dot{U}_{1N} и тока \dot{I}_{1N} на входе четырехполюсника NN с напряжением \dot{U}_{2N} и током \dot{I}_{2N} на его выходе описывается системой уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1N} &= \dot{U}_{2N} \cdot A_{NN} + \dot{I}_{2N} \cdot B_{NN} \\ \dot{I}_{1N} &= \dot{U}_{2N} \cdot C_{NN} + \dot{I}_{2N} \cdot D_{NN} \end{aligned} \right\}, \quad (3.19)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_{NN} &= (A_H \cdot A_{N_2} + B_H \cdot C_{N_2}) \cdot A_{ДП} + (C_H \cdot A_{N_2} + D_H \cdot C_{N_2}) \cdot B_{ДП} \\ B_{NN} &= (A_H \cdot B_{N_2} + B_H \cdot D_{N_2}) \cdot A_{ДП} + (C_H \cdot B_{N_2} + D_H \cdot D_{N_2}) \cdot B_{ДП} \\ C_{NN} &= (A_H \cdot A_{N_2} + B_H \cdot C_{N_2}) \cdot C_{ДП} + (C_H \cdot A_{N_2} + D_H \cdot C_{N_2}) \cdot D_{ДП} \\ D_{NN} &= (A_H \cdot B_{N_2} + B_H \cdot D_{N_2}) \cdot C_{ДП} + (C_H \cdot B_{N_2} + D_H \cdot D_{N_2}) \cdot D_{ДП} \end{aligned} \right\}. \quad (3.20)$$

Из системы уравнений (3.19), с учетом (2.7), (2.12), (3.17), (3.18), (3.20),

напряжение \dot{U}_{1N} и ток \dot{I}_{1N} на входе рельсовой линии, находящейся в классе образов нормального режима, определяются следующими выражениями

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1N} &= |U_{1N}| \cdot e^{j\varphi_{U_{1N}}} = \dot{E} \cdot \left\{ \left[\left(A_{Др} \cdot \left(1 + \frac{R_k}{Z_{3б}} \right) + \frac{B_{Др}}{Z_{3б}} \right) \cdot Z_2 + (A_{Др} \cdot R_k + B_{Др}) \right] \cdot \left[ch(\gamma) \cdot A_{ДП} + \frac{1}{Z_b} \cdot sh(\gamma) \cdot B_{ДП} \right] + \right. \\ &+ \left. \left[\left(C_{Др} \cdot \left(1 + \frac{R_k}{Z_{3б}} \right) + \frac{D_{Др}}{Z_{3б}} \right) \cdot Z_2 + (C_{Др} \cdot R_k + D_{Др}) \right] \cdot \left[Z_b \cdot sh(\gamma) \cdot A_{ДП} + ch(\gamma) \cdot B_{ДП} \right] \right\} / J_N; \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1N} &= |I_{1N}| \cdot e^{j\varphi_{I_{1N}}} = \dot{E} \cdot \left\{ \left[\left(A_{Др} \cdot \left(1 + \frac{R_k}{Z_{3б}} \right) + \frac{B_{Др}}{Z_{3б}} \right) \cdot Z_2 + (A_{Др} \cdot R_k + B_{Др}) \right] \cdot \left[ch(\gamma) \cdot C_{ДП} + \frac{1}{Z_b} \cdot sh(\gamma) \cdot D_{ДП} \right] + \right. \\ &+ \left. \left[\left(C_{Др} \cdot \left(1 + \frac{R_k}{Z_{3б}} \right) + \frac{D_{Др}}{Z_{3б}} \right) \cdot Z_2 + (C_{Др} \cdot R_k + D_{Др}) \right] \cdot \left[Z_b \cdot sh(\gamma) \cdot C_{ДП} + ch(\gamma) \cdot D_{ДП} \right] \right\} / J_N. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Уравнения (3.18), (3.21), (3.22) являются математическими моделями информативных признаков нормального режима $m_N = \{U_{1N}, \varphi_{U_{1N}}, I_{1N}, \psi_{I_{1N}}, U_{2N}, \varphi_{U_{2N}}\}$.

Пример 3.1. Определить выражение передаточной функции по напряжению через параметры рельсовой цепи (рис. 3.1) в нормальном режиме.

Решение. Общий вид выражения передаточной функции РЦ в нормальном режиме имеет вид

$$W_N = \frac{U_{2N}}{E}.$$

Система уравнений состояния рельсовой цепи в нормальном режиме имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1N} &= \dot{U}_{2N} \cdot A_N^0 + \dot{I}_{2N} \cdot B_N^0 \\ \dot{I}_{1N} &= \dot{U}_{2N} \cdot C_N^0 + \dot{I}_{2N} \cdot D_N^0 \end{aligned} \right\}.$$

С учетом $\dot{U}_{1N} = \dot{E} - \dot{I}_{1N} \cdot Z_0$; $\dot{I}_{2N} = \dot{U}_{2N} / Z_H$ имеем

$$\left. \begin{aligned} E - I_{1N} \cdot Z_0 &= \dot{U}_{2N} \cdot \left(\frac{A_N^0 \cdot Z_H + B_N^0}{Z_H} \right) \\ I_{1N} &= \dot{U}_{2N} \cdot \left(\frac{C_N^0 \cdot Z_H + D_N^0}{Z_H} \right) \end{aligned} \right\}$$

Подставив второе уравнение в первое, получим

$$E - \dot{U}_{2N} \cdot \left(\frac{C_N^0 \cdot Z_H + D_N^0}{Z_H} \right) \cdot Z_0 = \dot{U}_{2N} \cdot \left(\frac{A_N^0 \cdot Z_H + B_N^0}{Z_H} \right).$$

Из полученного уравнения следует

$$E = \dot{U}_{2N} \cdot \left(\frac{A_N^0 \cdot Z_H + B_N^0 + (C_N^0 \cdot Z_H + D_N^0) Z_0}{Z_H} \right).$$

В результате общий вид передаточной функции рельсовой цепи через ее параметры следующий

$$W_N = \left(\frac{Z_H}{A_N^0 \cdot Z_H + B_N^0 + (C_N^0 \cdot Z_H + D_N^0) Z_0} \right).$$

3.3 Математические модели шунтового режима

Класс образов шунтового режима характеризуется наличием на контролируемом участке рельсовой линии подвижной единицы.

На рис. 3.2 представлена обобщенная схема замещения РЦ в классе образов шунтового режима.

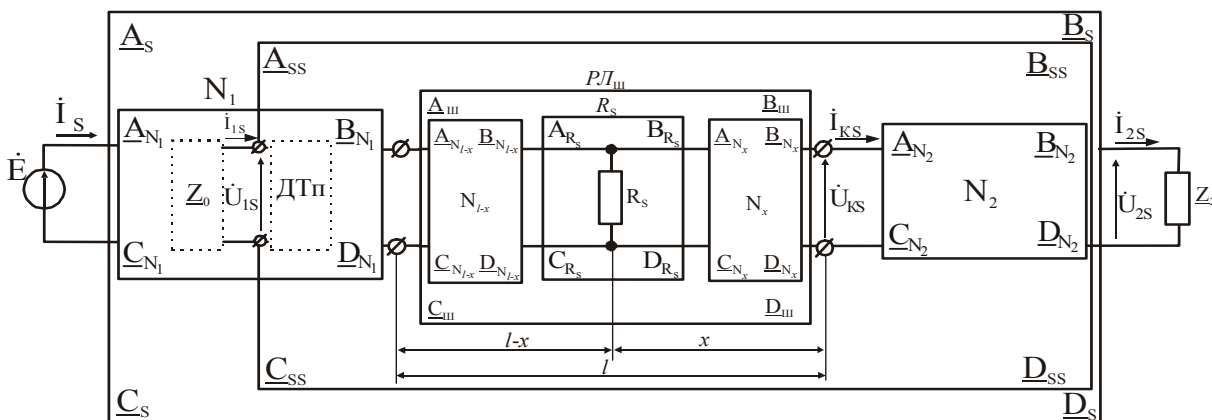


Рис. 3.2. Обобщенная схема замещения РЦ в классе образов шунтового режима

Так как на РЦ, находящуюся в классе образов шунтового режима, кроме t° , χ , $R_{из}$, ξ и т.п., оказывает влияние дискретное воздействие в виде шунта с конечным сопротивлением R_s , то обобщенный четырехполюсник рельсовой линии $PЛ_{III}$ определим как

$$[A]_m = \begin{bmatrix} A_{N_{l-x}} & B_{N_{l-x}} \\ C_{N_{l-x}} & D_{N_{l-x}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_S} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{N_x} & B_{N_x} \\ C_{N_x} & D_{N_x} \end{bmatrix} =$$

$$A_{III} = (A_{N_{l-x}} + B_{N_{l-x}}/R_S) \cdot A_{N_x} + B_{N_{l-x}} \cdot C_{N_x}, \quad (3.23)$$

$$B_{III} = (A_{N_{l-x}} + B_{N_{l-x}}/R_S) \cdot B_{N_x} + B_{N_{l-x}} \cdot D_{N_x}, \quad (3.24)$$

$$C_{III} = (C_{N_{l-x}} + D_{N_{l-x}}/R_S) \cdot A_{N_x} + D_{N_{l-x}} \cdot C_{N_x}, \quad (3.25)$$

$$D_{III} = (C_{N_{l-x}} + D_{N_{l-x}}/R_S) \cdot B_{N_x} + D_{N_{l-x}} \cdot D_{N_x}, \quad (3.26)$$

где $A_{N_{l-x}}, B_{N_{l-x}}, C_{N_{l-x}}, D_{N_{l-x}}$ - коэффициенты четырехполюсника N_{l-x} рельсовой линии, длиной $(l-x)$ км от ее начала до места нахождения поездного шунта R_S

$$\left. \begin{aligned} A_{N_{l-x}} &= ch((l-x) \cdot \gamma); & B_{N_{l-x}} &= Z_B \cdot sh((l-x) \cdot \gamma) \\ C_{N_{l-x}} &= \frac{1}{Z_B} \cdot sh((l-x) \cdot \gamma); & D_{N_{l-x}} &= A_{N_{l-x}} = ch((l-x) \cdot \gamma) \end{aligned} \right\}, \quad (3.27)$$

$A_{N_x}, B_{N_x}, C_{N_x}, D_{N_x}$ - коэффициенты четырехполюсника N_x рельсовой линии, длиной x км от места нахождения поездного шунта R_S до конца рельсовой линии

$$\left. \begin{aligned} A_{N_x} &= ch(x \cdot \gamma); & B_{N_x} &= Z_B \cdot sh(x \cdot \gamma) \\ C_{N_x} &= \frac{1}{Z_B} \cdot sh(x \cdot \gamma); & D_{N_x} &= A_{N_x} = ch(x \cdot \gamma) \end{aligned} \right\}. \quad (3.28)$$

Тогда коэффициенты обобщенного четырехполюсника рельсовой линии PL_{III} (3.23 – 3.26), с учетом (3.27), (3.28), примут вид

$$A_{III} = \left(ch((l-x) \cdot \gamma) + \frac{Z_B \cdot sh((l-x) \cdot \gamma)}{R_S} \right) \cdot ch(x \cdot \gamma) + sh((l-x) \cdot \gamma) \cdot sh(x \cdot \gamma), \quad (3.29)$$

$$B_{III} = \left(ch((l-x) \cdot \gamma) + \frac{Z_B \cdot sh((l-x) \cdot \gamma)}{R_S} \right) \cdot Z_B \cdot sh(x \cdot \gamma) + Z_B \cdot sh((l-x) \cdot \gamma) \cdot ch(x \cdot \gamma), \quad (3.30)$$

$$C_{III} = \left(\frac{sh((l-x) \cdot \gamma)}{Z_B} + \frac{ch((l-x) \cdot \gamma)}{R_S} \right) \cdot ch(x \cdot \gamma) + \frac{ch((l-x) \cdot \gamma) \cdot sh(x \cdot \gamma)}{Z_B}, \quad (3.31)$$

$$D_{III} = \left(\frac{sh((l-x) \cdot \gamma)}{Z_B} + \frac{ch((l-x) \cdot \gamma)}{R_S} \right) \cdot Z_B \cdot sh(x \cdot \gamma) + ch((l-x) \cdot \gamma) \cdot ch(x \cdot \gamma). \quad (3.32)$$

Матрица коэффициентов обобщенного четырехполюсника $[A]_S$ всей РЦ в классе образов шунтового режима имеет вид

$$[A]_S = \left\| \begin{matrix} A_S & B_S \\ C_S & D_S \end{matrix} \right\| = \|N_1\| \times \|PL_{III}\| \times \|N_2\| = \quad (3.33)$$

$$A_S = (A_{N_1} \cdot A_{III} + B_{N_1} \cdot C_{III}) \cdot A_{N_2} + (A_{N_1} \cdot B_{III} + B_{N_1} \cdot D_{III}) \cdot C_{N_2}, \quad (3.34)$$

$$B_S = (A_{N_1} \cdot A_{III} + B_{N_1} \cdot C_{III}) \cdot B_{N_2} + (A_{N_1} \cdot B_{III} + B_{N_1} \cdot D_{III}) \cdot D_{N_2}, \quad (3.35)$$

$$C_S = (C_{N_1} \cdot A_{III} + D_{N_1} \cdot C_{III}) \cdot A_{N_2} + (C_{N_1} \cdot B_{III} + D_{N_1} \cdot D_{III}) \cdot C_{N_2}, \quad (3.36)$$

$$D_S = (C_{N_1} \cdot A_{III} + D_{N_1} \cdot C_{III}) \cdot B_{N_2} + (C_{N_1} \cdot B_{III} + D_{N_1} \cdot D_{III}) \cdot D_{N_2}. \quad (3.37)$$

Для схемы рис. 3.2 справедливы соотношения

$$\left. \begin{aligned} \dot{E} &= \dot{U}_{2S} \cdot A_S + \dot{I}_{2S} \cdot B_S \\ \dot{I}_S &= \dot{U}_{2S} \cdot C_S + \dot{I}_{2S} \cdot D_S \end{aligned} \right\}. \quad (3.38)$$

Уравнения (3.38) формируют математическую модель рельсовой цепи в классе образов шунтового режима.

Из системы уравнений (3.38), с учетом (2.24), (3.34), (3.35) уравнение, описывающее напряжение и его фазу на нагрузке РЦ для класса образов шунтового режима, примет вид

$$\dot{U}_{2S} = |U_{2S}| \cdot e^{j\varphi_{U_{2S}}} = \dot{E} \cdot \frac{Z_2}{A_S \cdot Z_2 + B_S}, \quad (3.39)$$

Связь напряжения \dot{U}_{1S} и тока \dot{I}_{1S} на входе четырехполюсника A_{SS} с напряжением \dot{U}_{2S} и током \dot{I}_{2S} на его выходе описывается системой уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1S} &= \dot{U}_{2S} \cdot A_{SS} + \dot{I}_{2S} \cdot B_{SS} \\ \dot{I}_{1S} &= \dot{U}_{2S} \cdot C_{SS} + \dot{I}_{2S} \cdot D_{SS} \end{aligned} \right\}, \quad (3.40)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_{SS} &= (A_{III} \cdot A_{N_2} + B_{III} \cdot C_{N_2}) \cdot A_{ДП} + (C_{III} \cdot A_{N_2} + D_{III} \cdot C_{N_2}) \cdot B_{ДП} \\ B_{SS} &= (A_{III} \cdot B_{N_2} + B_{III} \cdot D_{N_2}) \cdot A_{ДП} + (C_{III} \cdot B_{N_2} + D_{III} \cdot D_{N_2}) \cdot B_{ДП} \\ C_{SS} &= (A_{III} \cdot A_{N_2} + B_{III} \cdot C_{N_2}) \cdot C_{ДП} + (C_{III} \cdot A_{N_2} + D_{III} \cdot C_{N_2}) \cdot D_{ДП} \\ D_{SS} &= (A_{III} \cdot B_{N_2} + B_{III} \cdot D_{N_2}) \cdot C_{ДП} + (C_{III} \cdot B_{N_2} + D_{III} \cdot D_{N_2}) \cdot D_{ДП} \end{aligned} \right\}. \quad (3.41)$$

Из системы уравнений (3.40), с учетом (3.5), (3.27), (3.29 – 3.32), (3.39),

(3.41), напряжение \dot{U}_{1S} и ток \dot{I}_{1S} на входе рельсовой линии, находящейся в классе образов шунтового режима, определяются следующими выражениями

Уравнения (3.39), (3.40) являются математическими моделями информативных признаков $m_S = \{U_{1S}, \varphi_{U_{1S}}, I_{1S}, \psi_{I_{1S}}, U_{2S}, \varphi_{U_{2S}}\}$ шунтового режима.

Пример 3.2. Определить выражение передаточной функции через параметры цепи по напряжению рельсовой цепи в шунтовом режиме (рис. 3.2).

Решение. Общий вид выражения передаточной функции РЦ в шунтовом режиме имеет вид

$$W_S = \frac{U_{2S}}{E}.$$

Система уравнений состояния рельсовой цепи в шунтовом режиме имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1S} &= \dot{U}_{2S} \cdot A_S^0 + \dot{I}_{2S} \cdot B_S^0 \\ \dot{I}_{1S} &= \dot{U}_{2S} \cdot C_S^0 + \dot{I}_{2S} \cdot D_S^0 \end{aligned} \right\}.$$

С учетом $\dot{U}_{1S} = E - \dot{I}_{1S} \cdot Z_0$; $\dot{I}_{2S} = \dot{U}_{2S} / Z_H$ имеем

$$\left. \begin{aligned} E - \dot{I}_{1S} \cdot Z_0 &= \dot{U}_{2S} \cdot \left(\frac{A_S^0 \cdot Z_H + B_S^0}{Z_H} \right) \\ \dot{I}_{1S} &= \dot{U}_{2S} \cdot \left(\frac{C_S^0 \cdot Z_H + D_S^0}{Z_H} \right) \end{aligned} \right\}.$$

Подставив второе уравнение в первое, получим

$$E - \dot{U}_{2S} \cdot \left(\frac{C_S^0 \cdot Z_H + D_S^0}{Z_H} \right) \cdot Z_0 = \dot{U}_{2S} \cdot \left(\frac{A_S^0 \cdot Z_H + B_S^0}{Z_H} \right).$$

Из полученного уравнения следует

$$E = \dot{U}_{2S} \cdot \left(\frac{A_S^0 \cdot Z_H + B_S^0 + (C_S^0 \cdot Z_H + D_S^0) Z_0}{Z_H} \right).$$

В результате общий вид передаточной функции рельсовой цепи через ее параметры следующий

$$W_S = \frac{\dot{U}_{2S}}{E} \left(\frac{Z_H}{A_S^0 \cdot Z_H + B_S^0 + (C_S^0 \cdot Z_H + D_S^0) Z_0} \right).$$

3.4. Математические модели контрольного режима

Класс образов контрольного режима характеризуется наличием на контролируемом участке рельсовой линии излома рельсовой нити.

На рис. 3.3. представлена обобщенная схема замещения РЦ в классе образов контрольного режима.

Разрыв рельсовой нити эквивалентен включению в месте обрыва сопротивления Z_3 [4, 5], величина которого определяется выражением

$$Z_3 = E_x Z_B \sqrt{1 + 2\rho(cth\gamma_1 l_1 + cth\gamma_1 l_2)}, \quad (3.42)$$

где l_1 и l_2 - участки рельсовой линии слева и справа от места обрыва и равны соответственно, $l-x$ и x ;

E_x – постоянная земляного тракта, зависящая от частоты сигнального тока [4] (для частоты 50 Гц, $E_x = 1,72 + j0,18$);

$$\gamma_1 = \frac{E \cdot \gamma}{\sqrt{1+2\rho}} \text{ - коэффициент распространения волны земляного тракта}$$

рельсовой линии;

γ - коэффициент распространения сигнала по линии;

Z_B - волновое сопротивление;

ρ - коэффициент поверхностной проводимости, характеризующий отношение между составляющими сопротивления изоляции.

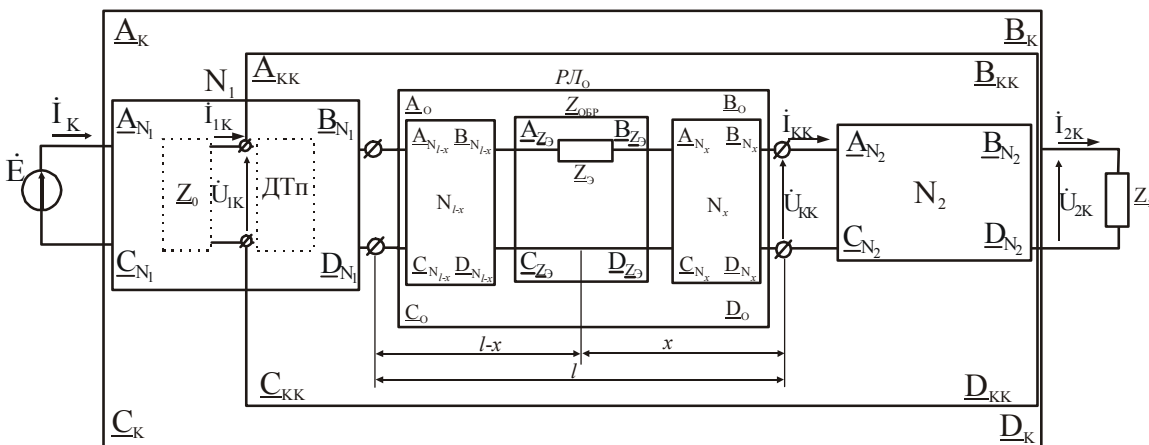


Рис. 3.3. Обобщенная схема замещения РЦ в классе образов контрольного режима

В зависимости от вида шпал и балласта ρ принимает следующие значения:

- деревянные шпалы с щебеночным балластом – 1,8,
- деревянные шпалы с песчаным балластом – 3,2,
- железобетонные шпалы с щебеночным балластом – 9,1.

Если в расчетах не учитывается утечка сигнального тока по шпалам, то $\rho = 0$.

Так как на РЦ, находящуюся в классе образов контрольного режима, кроме t° , χ , $R_{из}$, ξ и т.п, оказывает влияние дискретное воздействие в виде излома рельсовой нити с конечным сопротивлением Z_3 , то обобщенный четырехполюсник рельсовой линии $P/Л_0$ определим как

$$[A]_0 = \begin{bmatrix} A_{N_{l-x}} & B_{N_{l-x}} \\ C_{N_{l-x}} & D_{N_{l-x}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & Z_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{N_x} & B_{N_x} \\ C_{N_x} & D_{N_x} \end{bmatrix} =$$

$$A_0 = A_{N_{l-x}} \cdot A_{N_x} + (A_{N_{l-x}} \cdot Z_3 + B_{N_{l-x}}) \cdot C_{N_x}, \quad (3.43)$$

$$B_0 = A_{N_{l-x}} \cdot B_{N_x} + (A_{N_{l-x}} \cdot Z_3 + B_{N_{l-x}}) \cdot D_{N_x}, \quad (3.44)$$

$$C_0 = C_{N_{l-x}} \cdot A_{N_x} + (C_{N_{l-x}} \cdot Z_3 + D_{N_{l-x}}) \cdot C_{N_x}, \quad (3.45)$$

$$D_0 = C_{N_{l-x}} \cdot B_{N_x} + (C_{N_{l-x}} \cdot Z_3 + D_{N_{l-x}}) \cdot D_{N_x}, \quad (3.46)$$

где $A_{N_{l-x}}, B_{N_{l-x}}, C_{N_{l-x}}, D_{N_{l-x}}$ - коэффициенты четырехполюсника N_{l-x} рельсовой линии, длиной $(l-x)$ км от ее начала до места излома рельса Z_3 , определяемые по (3.27),

$A_{N_x}, B_{N_x}, C_{N_x}, D_{N_x}$ - коэффициенты четырехполюсника N_x рельсовой линии, длиной x км от места излома рельса Z_3 до конца рельсовой линии, определяемые по (3.28).

Коэффициенты обобщенного четырехполюсник рельсовой линии РЛ₀ (3.43 – 3.46), с учетом (3.27), (3.28), примут вид

$$A_0 = ch((l-x) \cdot \gamma) \cdot ch(x \cdot \gamma) + \frac{(ch((l-x) \cdot \gamma) \cdot Z_3 + Z_B \cdot sh((l-x) \cdot \gamma))}{Z_B} \cdot sh(x \cdot \gamma), \quad (3.47)$$

$$B_0 = ch((l-x) \cdot \gamma) \cdot Z_B \cdot sh(x \cdot \gamma) + (ch((l-x) \cdot \gamma) \cdot Z_3 + Z_B \cdot sh((l-x) \cdot \gamma)) \cdot ch(x \cdot \gamma), \quad (3.48)$$

$$C_0 = \frac{sh((l-x) \cdot \gamma) \cdot ch(x \cdot \gamma)}{Z_B} + \left(\frac{sh((l-x) \cdot \gamma) \cdot Z_3}{Z_B} + ch((l-x) \cdot \gamma) \right) \cdot \frac{sh(x \cdot \gamma)}{Z_B}, \quad (3.49)$$

$$D_0 = sh((l-x) \cdot \gamma) \cdot sh(x \cdot \gamma) + \left(\frac{sh((l-x) \cdot \gamma) \cdot Z_3}{Z_B} + ch((l-x) \cdot \gamma) \right) \cdot ch(x \cdot \gamma). \quad (3.50)$$

Матрица коэффициентов обобщенного четырехполюсника A_K всей РЦ в классе образов контрольного режима имеет вид

$$\|A_K\| = \left\| \begin{bmatrix} A_K & B_K \\ C_K & D_K \end{bmatrix} \right\| = \|N_1\| \times \|P\mathcal{L}_0\| \times \|N_2\| = \quad (3.51)$$

$$A_K = (A_{N_1} \cdot A_0 + B_{N_1} \cdot C_0) \cdot A_{N_2} + (A_{N_1} \cdot B_0 + B_{N_1} \cdot D_0) \cdot C_{N_2}, \quad (3.52)$$

$$B_K = (A_{N_1} \cdot A_0 + B_{N_1} \cdot C_0) \cdot B_{N_2} + (A_{N_1} \cdot B_0 + B_{N_1} \cdot D_0) \cdot D_{N_2}, \quad (3.53)$$

$$C_K = (C_{N_1} \cdot A_0 + D_{N_1} \cdot C_0) \cdot A_{N_2} + (C_{N_1} \cdot B_0 + D_{N_1} \cdot D_0) \cdot C_{N_2}, \quad (3.54)$$

$$D_K = (C_{N_1} \cdot A_0 + D_{N_1} \cdot C_0) \cdot B_{N_2} + (C_{N_1} \cdot B_0 + D_{N_1} \cdot D_0) \cdot D_{N_2}. \quad (3.55)$$

Для схемы рис. 3.3 справедливы соотношения

$$\left. \begin{aligned} \dot{E} &= \dot{U}_{2K} \cdot A_K + \dot{I}_{2K} \cdot B_K \\ \dot{I}_K &= \dot{U}_{2K} \cdot C_K + \dot{I}_{2K} \cdot D_K \end{aligned} \right\}. \quad (3.56)$$

Уравнения (3.56), с учетом (3.52) – (3.55), формируют математическую модель РЦ в классе образов контрольного режима.

Из системы уравнений (3.56), с учетом (3.6), (3.17), (3.52), (3.53), уравнение, описывающее напряжение и его фазу на нагрузке РЦ в классе образов контрольного режима, примет вид

$$\dot{U}_{2K} = |U_{2K}| \cdot e^{j\varphi_{U_{2K}}} = \dot{E} \cdot \frac{Z_2}{A_K \cdot Z_2 + B_K}. \quad (3.57)$$

Связь напряжения \dot{U}_{1K} и тока \dot{I}_{1K} на входе четырехполюсника A_{KK} с напряжением \dot{U}_{2K} и током \dot{I}_{2K} на его выходе описывается системой уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1K} &= \dot{U}_{2K} \cdot A_{KK} + \dot{I}_{2K} \cdot B_{KK} \\ \dot{I}_{1K} &= \dot{U}_{2K} \cdot C_{KK} + \dot{I}_{2K} \cdot D_{KK} \end{aligned} \right\} \quad (3.58)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_{KK} &= (A_O \cdot A_{N_2} + B_O \cdot C_{N_2}) \cdot A_{ДП} + (C_O \cdot A_{N_2} + D_O \cdot C_{N_2}) \cdot B_{ДП} \\ B_{KK} &= (A_O \cdot B_{N_2} + B_O \cdot D_{N_2}) \cdot A_{ДП} + (C_O \cdot B_{N_2} + D_O \cdot D_{N_2}) \cdot B_{ДП} \\ C_{KK} &= (A_O \cdot A_{N_2} + B_O \cdot C_{N_2}) \cdot C_{ДП} + (C_O \cdot A_{N_2} + D_O \cdot C_{N_2}) \cdot D_{ДП} \\ D_{KK} &= (A_O \cdot B_{N_2} + B_O \cdot D_{N_2}) \cdot C_{ДП} + (C_O \cdot B_{N_2} + D_O \cdot D_{N_2}) \cdot D_{ДП} \end{aligned} \right\}. \quad (3.59)$$

Уравнения (3.57), (3.58) с учетом (3.59), являются математическими моделями информативных признаков $m_K = \{U_{1K}, \varphi_{U_{1K}}, I_{1K}, \psi_{I_{1K}}, U_{2K}, \varphi_{U_{2K}}\}$ контрольного режима.

Пример 3.3. Определить выражение передаточной функции через параметры цепи по напряжению, рельсовой цепи в контрольном режиме (рис. 3.3).

Решение. Общий вид выражения передаточной функции РЦ по напряжению имеет вид

$$W_K = \frac{U_{2K}}{E}.$$

Система уравнений состояния рельсовой цепи в контрольном режиме имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1K} &= \dot{U}_{2K} \cdot A_K^0 + \dot{I}_{2K} \cdot B_K^0 \\ \dot{I}_{1K} &= \dot{U}_{2K} \cdot C_K^0 + \dot{I}_{2K} \cdot D_K^0 \end{aligned} \right\}.$$

С учетом $\dot{U}_{1K} = \dot{E} - \dot{I}_{1K} \cdot Z_0$; $\dot{I}_{2K} = \dot{U}_{2K} / Z_n$ имеем

$$\left. \begin{aligned} \dot{E} - I_{1K} \cdot Z_0 &= \dot{U}_{2K} \cdot \left(\frac{A_K^0 + Z_H \cdot B_K^0}{Z_H} \right) \\ I_{1K} &= \dot{U}_{2K} \cdot \left(\frac{C_K^0 + Z_H \cdot D_K^0}{Z_H} \right) \end{aligned} \right\}$$

Подставив второе уравнение в первое, получим

$$\dot{E} - \dot{U}_{2K} \cdot \left(\frac{C_K^0 + Z_H \cdot D_K^0}{Z_H} \right) \cdot Z_0 = \dot{U}_{2K} \cdot \left(\frac{A_K^0 + Z_H \cdot B_K^0}{Z_H} \right).$$

Из полученного уравнения следует

$$\dot{E} = \dot{U}_{2K} \cdot \left(\frac{A_K^0 + Z_H \cdot B_K^0 + (C_K^0 + Z_H \cdot D_K^0)Z_0}{Z_H} \right).$$

В результате общий вид передаточной функции рельсовой цепи через ее параметры следующий

$$W_K = \frac{\dot{U}_{2K}}{\dot{E}} \left(\frac{Z_H}{A_K^0 + Z_H \cdot B_K^0 + (C_K^0 + Z_H \cdot D_K^0)Z_0} \right).$$

3.5. Машинная реализация математических моделей

Входные и выходные параметры m_N, m_S, m_K рельсовой цепи в нормальном, шунтовом и контрольном режимах сложным образом связаны с изменяющимися первичными параметрами рельсовой линии, сопротивлениями по ее концам, координатами нахождения шунта и обрыва рельсовых нитей. Поэтому формирование математических моделей практически осуществимо лишь на ЭВМ. Учитывая, что ток на выходе нагруженной рельсовой линии связан с напряжением через сопротивление нагрузки, и следовательно, как информативный признак, не эффективен при разделении множества состояний на классы нормального шунтового и контрольного режимов, его амплитуду и начальную фазу исключаем.

Процедура машинного моделирования РЦ сводится к пошаговому выполнению следующих операций.

Шаг 1. Задаются первичные параметры рельсовой линии, значения сопротивлений по ее концам и амплитуда напряжения питания.

Шаг 2. Формируются матрицы четырехполюсников устройств согласования и защиты по концам рельсовой линии по соотношениям (3.4 – 3.5).

Шаг 3. Вычисляются коэффициенты обобщений матрицы $[A]_N$ и дополнительной матрицы $[A]_{NN}$.

- Шаг 4.* Вычисляются значения параметров РЦ \dot{U}_{1N} , \dot{U}_{2N} и \dot{I}_{1N} .
- Шаг 5.* Организуется цикл вычислений значений информативных признаков при варьируемой проводимости изоляции и осуществляется формирование массивов m_N .
- Шаг 6.* Осуществляется переход в шунтовой режим.
- Шаг 7.* Вычисляются коэффициенты рельсового четырехполюсника, замещающего рельсовую линию от релейного конца до места нахождения шунта.
- Шаг 8.* Вычисляются коэффициенты рельсового четырехполюсника, замещающего рельсовую линию от питающего конца до места нахождения шунта.
- Шаг 9.* Вычисляются коэффициенты обобщенной рельсовой линии в шунтовом режиме, используя соотношения (3.29 – 3.32).
- Шаг 10.* Вычисляются коэффициенты обобщенной матрицы четырехполюсника рельсовой цепи $[A]_S$ по соотношениям (3.38 – 3.41).
- Шаг 11.* Вычисляются значения параметров \dot{U}_{1S} , \dot{U}_{2S} и \dot{I}_{1S} .
- Шаг 12.* Организуются циклы вычислений значений информативных признаков при варьируемой проводимости изоляции и координаты изменения шунта, и осуществляется формирование массивов m_S шунтового режима.
- Шаг 13.* Переход в контрольный режим.
- Шаг 14.* Вычисляются коэффициенты рельсового четырехполюсника, замещающего рельсовую линию от релейного конца до места нахождения обрыва рельсовой нити.
- Шаг 15.* Вычисляются коэффициенты рельсового четырехполюсника, замещающего рельсовую линию от питающего конца до места нахождения обрыва рельсовой нити.
- Шаг 16.* Вычисляются коэффициенты четырехполюсника, замещающего место обрыва рельсовой нити.
- Шаг 17.* Вычисляются коэффициенты обобщенной рельсовой линии в контрольном режиме.
- Шаг 18.* Вычисляются коэффициенты четырехполюсника рельсовой цепи в контрольном режиме.
- Шаг 19.* Вычисляются значения \dot{U}_{1K} , \dot{U}_{2K} и \dot{I}_{1K} .

Шаг 20. Организуются циклы вычислений значений информативных признаков при варьировании проводимости изоляции, координаты места обрыва рельсовой нити и осуществляется формирование массивов m_k контрольного режима.

Шаг 21. Печатаются результаты исследований и фиксируется окончание исследований.

Блок – схема сформулированного алгоритма формирования математических моделей на ЭВМ представлена в приложении 3.

Вопросы и упражнения для самопроверки

1. Определить матрицу передаточного сопротивления рельсовой цепи по рис. 3.1 в нормальном режиме

$$Z_{no}^N = \frac{U_{2N}}{I_{1N}}.$$

2. Определить матрицу передаточной проводимости рельсовой цепи по рис. 3.1 в нормальном режиме

$$Y_{no} = \frac{I_{2N}}{E}.$$

3. Определить матрицу передаточного сопротивления рельсовой линии по рис. 3.2 в шунтовом режиме

$$Z_{no}^S = \frac{U_{2S}}{I_{1S}}.$$

4. Определить матрицу передаточной проводимости рельсовой линии по рис. 3.2 в шунтовом режиме

$$Y_{no}^S = \frac{I_{2S}}{U_{1S}}.$$

5. Определить матрицу передаточной проводимости рельсовой цепи по рис. 3.3 в контрольном режиме

$$Z_{no}^K = \frac{U_{2K}}{E}.$$

6. Определить матрицу передаточной проводимости рельсовой линии по рис. 3.3 в контрольном режиме

$$Y_{no}^K = \frac{I_{2K}}{E}.$$

4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ МНОГОПОЛЮСНОЙ СХЕМЕ ЗАМЕЩЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ

4.1. Схемы замещения рельсовой цепи и ее компонент

При формировании математических моделей рельсовая цепь рассматривается как каскадное соединение устройства согласования и защиты аппаратуры в начале рельсовой линии (УСН), устройства согласования и защиты аппаратуры в конце рельсовой линии (УСК) и самой рельсовой линии. На рис. 4.1 представлена схема замещения рельсовой цепи.

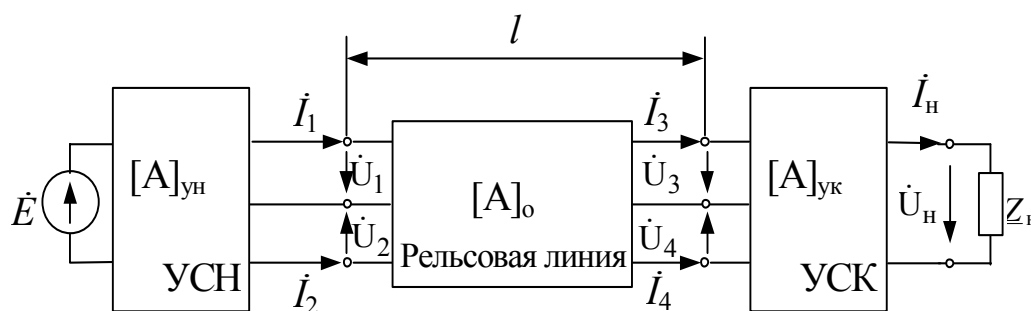


Рис. 4.1. Функциональная схема рельсовой цепи с многополюсной схемой замещения рельсовой линии

Устройство согласования и защиты в начале рельсовой цепи состоит из последовательно соединенных: четырехполюсника $[A]_{сн}$, замещающего аппаратуру регулирования и ограничения тока источника питания; $(2 \times n)$ полюсника дроссель – трансформатора питающего конца рельсовой линии $[A]_{дп}$; $(2 \times n)$ полюсника $[A]_{сп}$, замещающего сопротивления соединительных проводов и эквивалентное сопротивление между средним выводом основной обмотки дроссель – трансформатора и рельсовой линией. На рис. 4.2 представлена схема замещения устройства согласования и защиты аппаратуры в начале рельсовой цепи.

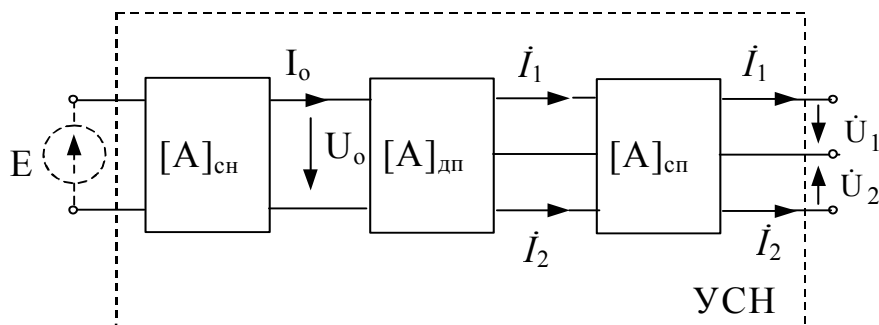


Рис. 4.2. Схема замещения устройства согласования аппаратуры в начале рельсовой линии

Устройство согласования рельсовой линии с нагрузкой (УСК) состоит из каскадно – соединенных: $(2 \times n)$ полюсника, замещающего дроссель – трансформатор релейного конца рельсовой линии $[A]_{др}$, четырехполюсника $[A]_{ск}$, замещающего аппаратуру согласования и защиты нагрузки, в частном случае защитный блок фильтров (ЗБФ). На рис. 4.3 представлена схема замещения устройства согласования и защиты нагрузки в конце рельсовой линии.

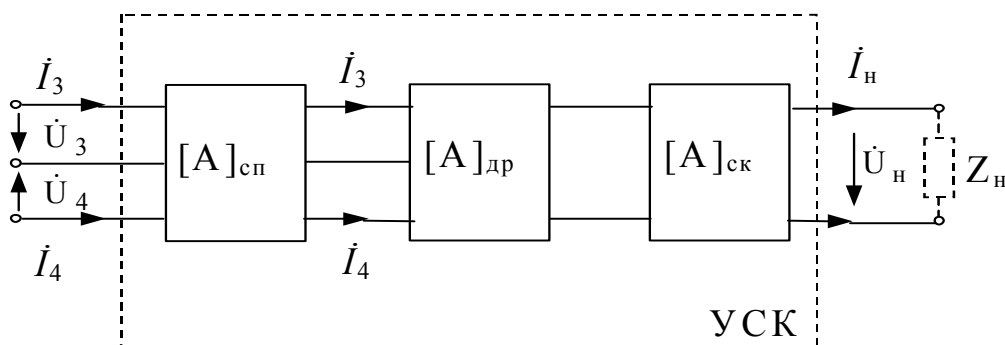


Рис. 4.3. Схема замещения устройства согласования и защиты нагрузки в конце рельсовой линии

4.2. Схемы замещения и параметры рельсовых линий

Удельные значения первичных параметров рельсовых линий (r , L , C , g) и соответственно ее вторичных параметров: волновое сопротивление – Z_v и коэффициент распространения γ – зависят от пространственной координаты РЛ, вследствие неоднородности качества и состояния шпал, высоты балластного слоя, наличия междупутных перемычек, применяемых для канализации тягового тока, отсасывающих фидеров тягового тока заземления опор контактной сети и других факторов [4]. При этом продольными параметрами являются удельное сопротивление (r) и индуктивность (L) рельса, а в качестве поперечных параметров выступают проводимость между рельсами (g) и емкость (C) между ними, соответственно.

Расчет электрических параметров РЛ основывается на ее представлении в виде двухпроводной или трехпроводной электрической линии с распределенными параметрами.

Аналитические методы расчета, используемые в работе [4], с двухпроводной схемой замещения рельсовой линии дают удовлетворительные результаты в нормальном и шунтовом режимах, но не могут обеспечить требуемой точности в контрольном режиме, поскольку сопротивление земли как провода принимается равным нулю.

Для учета сопротивления земляного тракта рельсовая линия представлена в виде трехпроводной схемы (рис. 4.4).

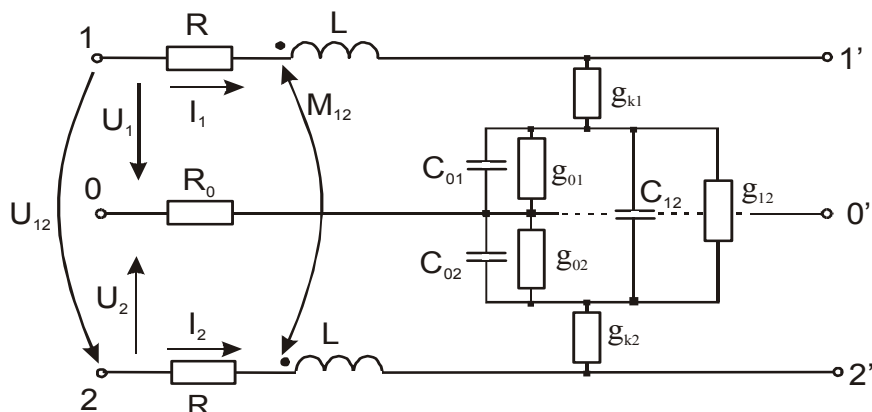


Рис. 4.4. Шестиполюсная трехпроводная схема замещения рельсовой линии:

M_{12} – взаимная индуктивность между рельсовыми нитями; g_{k1} , g_{k2} – проводимости слоя рельс-накладка; g_{01} , g_{02} – удельные проводимости заземления рельсовых нитей; g_{12} – удельная проводимость верхнего слоя балласта и шпал; C_{01} , C_{02} – емкости двойного слоя: рельс – накладная – рельс; R_0 – сопротивление земляного тракта

Из всех видов физико – химических процессов, обуславливающих появление электрической емкости при протекании переменного тока промышленной частоты между рельсами по железобетонным шпалам, наибольшее значение имеют поляризационная емкость и емкость двойного слоя. На электрифицированных участках к одной из рельсовых нитей пути присоединяются опоры контактной сети, и эквивалентная проводимость изоляции может оказаться выше 1,0 См/км, вследствие утечки сигнального тока в землю через заземление опор.

В нормальном режиме возникает поперечная несимметрия, вследствие различия проводимости изоляции рельсовых нитей ($Y_1 \neq Y_2$), которая оценивается коэффициентом

$$k_g = \sqrt{g_{k1} / g_{k2}} - 1. \quad (4.1)$$

Продольная несимметрия рельсовой линии как многополюсника проявляется в шунтовом режиме, вследствие замыкания рельсовых нитей колесными парами подвижного состава. Следует отметить, что любая несимметрия приводит к увеличению числа независимых параметров эквивалентного многополюсника.

Матрица параметров линейного пассивного или активного неавтономного шестиполюсника (в данном случае 3×2 полюсника) имеет размерность равную четырём (рис. 4.5).

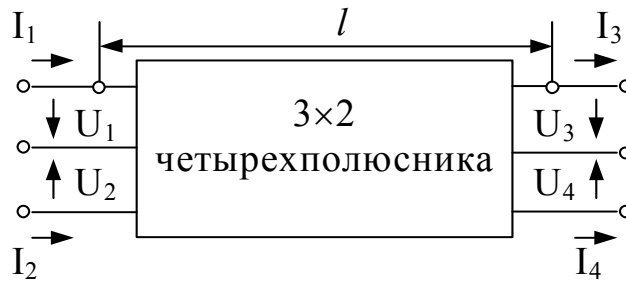


Рис. 4.5. Шестиполюсная схема замещения участка рельсовой линии

Это означает, что из восьми активных параметров $(\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{U}_2, \dot{U}_3, \dot{I}_3, \dot{I}_4, \dot{U}_4)$ четыре любых параметра (вектор воздействия) можно задавать произвольно, а остальные четыре (вектор реакции) будут функционально зависеть от заданных. Общее число возможных видов систем параметров для рассматриваемого проходного шестиполюсника равно $C_8^4 = 70$. Каждую из этих систем можно записать в нескольких формах, в зависимости от выбранного порядка внутри групп входных и выходных величин многополюсника. Кроме того, возможны различные способы выбора направлений токов. В рассматриваемом случае удобно выбрать направления токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 как втекающих в 2×4 -полюсник, а токов \dot{I}_3 и \dot{I}_4 как вытекающих из него. С целью получения симметричной структуры матрицы выбран следующий вид записи системы линейных уравнений, определяющих коэффициенты матрицы A – параметров:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = a_{11}\dot{U}_3 + a_{12}\dot{I}_3 + a_{13}\dot{I}_4 + a_{14}\dot{U}_4, \\ \dot{I}_1 = a_{21}\dot{U}_3 + a_{22}\dot{I}_3 + a_{23}\dot{I}_4 + a_{24}\dot{U}_4, \\ \dot{I}_2 = a_{31}\dot{U}_3 + a_{32}\dot{I}_3 + a_{33}\dot{I}_4 + a_{34}\dot{U}_4, \\ \dot{U}_2 = a_{41}\dot{U}_3 + a_{42}\dot{I}_3 + a_{43}\dot{I}_4 + a_{44}\dot{U}_4. \end{cases} \quad (4.2)$$

Система A – параметров по сравнению с другими системами имеет ряд преимуществ. Во – первых, при каскадном соединении нескольких многополюсников расчет параметров эквивалентного многополюсника сводится к выполнению операции матричного умножения. Во – вторых, формулы для определения входных сопротивлений нагруженного многополюсника имеют простую структуру и трудоемкость вычислений по этим формулам относительно невелика.

Эквивалентным шестиполюсником может быть представлен как дискретный участок небольшой длины, схема замещения которого содержит элементы со сосредоточенными параметрами, так и участок рельсовой линии

произвольной длины, который должен рассматриваться как длинная электрическая линия с распределенными параметрами.

Для определения А – параметров шестиполюсника рельсовая линия представлена в виде большого числа элементарных участков длиной dx каждый, в пределах которого схема замещения может быть представлена набором типовых дискретных полиномов (рис. 4.6).

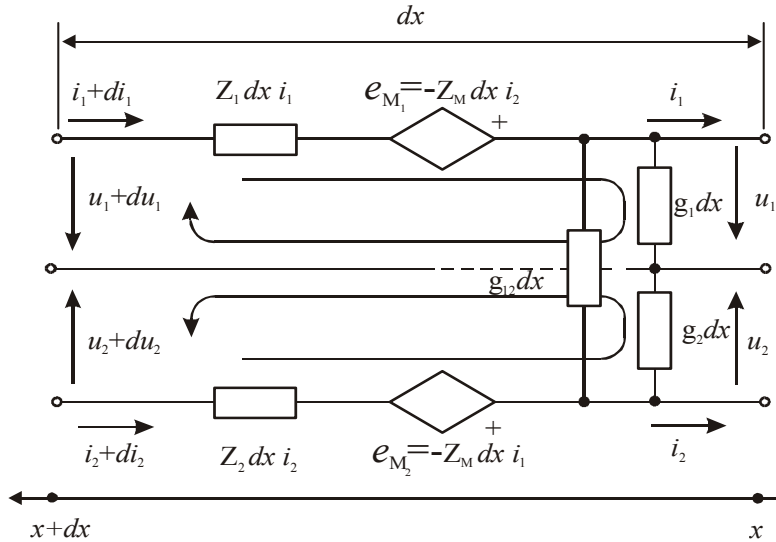


Рис. 4.6. Трехпроводная схема замещения элементарного участка рельсовой линии

Для удобочитаемости формул в этом разделе условно будем обозначать комплексы пассивных и активных параметров в упрощенном виде.

На основании 2-го закона Кирхгофа (с учетом того, что ось x направлена влево) для участка пути длиной dx получаем уравнение

$$z_1 dx \cdot i_1 + u_1 - (u_1 + du_1) = e_{M_1},$$

учитывая, что $e_{M_1} = -z_M \cdot dx \cdot i_2$, получаем

$$\frac{du_1}{dx} = z_1 i_1 + z_M i_2. \tag{4.3}$$

На основании 1 – го закона Кирхгофа получаем уравнение

$$\frac{di_1}{dx} = (g_1 + g_{12}) u_1 - g_{12} u_2. \tag{4.4}$$

Аналогично получаем еще два уравнения

$$\frac{du_2}{dx} = z_2 i_2 + z_M i_1, \tag{4.5}$$

$$\frac{di_2}{dx} = (g_2 + g_{12}) u_2 - g_{12} u_1. \tag{4.6}$$

Запишем соотношения (4.3) – (4.6) в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{du_1}{dx} = z_1 i_1 + z_M i_2, \\ \frac{di_1}{dx} = (g_1 + g_{12}) u_1 - g_{12} u_2, \\ \frac{di_2}{dx} = -g_{12} u_1 + (g_2 + g_{12}) u_2, \\ \frac{du_2}{dx} = z_M i_1 + z_2 i_2. \end{cases} \quad (4.7)$$

Получение характеристического уравнения упрощается, если выполнить формальную замену вида $\frac{du}{dx} = p \cdot u$ и $\frac{di}{dx} = p \cdot i$, тогда характеристическая матрица системы имеет вид

$$\begin{bmatrix} -p & z_1 & z_M & 0 \\ g_1 + g_{12} & -p & 0 & -g_{12} \\ -g_{12} & 0 & -p & g_1 + g_{12} \\ 0 & z_M & z_2 & -p \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Собственные значения этой матрицы являются корнями характеристического уравнения. Их можно найти, приравняв определитель матрицы (4.8) к нулю. Характеристическое уравнение имеет вид

$$p^4 - [z_1(g_1 + g_{12}) + z_2(g_2 + g_{12}) - 2z_M g_{12}] p^2 + (z_1 z_2 - z_M^2)(g_1 g_2 + g_1 g_{12} + g_2 g_{12}) = 0.$$

Решив это биквадратное уравнение, получим выражение для определения коэффициентов распространения сигнала в рельсовой линии

$$\gamma_k = \pm \sqrt{a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - a_0}}; \quad k=1 \dots 4;$$

причем

$$a_0 = (z_1 z_2 - z_M^2)(g_1 g_2 + g_1 g_{12} + g_2 g_{12});$$

$$a_2 = \frac{1}{2} [g_{12} \cdot (z_1 + z_2 - 2z_M) + g_1 z_1 + g_2 z_2]$$

4.3. Матрица $[A]_0^N$ – параметров несимметричной трехпроводной рельсовой линии в нормальном режиме

Класс образов нормального режима характеризуется свободным и исправным состоянием рельсовых линий. Схема замещения рельсовой линии в виде трехпроводной линии соответствует рис. 4.5.

Общее решение для напряжения $U_1(x)$ (рис. 4.6) для классов образов нормального режима описывается выражением

$$u_1(x) = A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x + A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x, \quad (4.9)$$

где $\gamma_1 = \sqrt{a_2 - \sqrt{a_2^2 - a_0}}$; $\gamma_2 = \sqrt{a_2 + \sqrt{a_2^2 - a_0}}$,

A_1, A_2, A_3, A_4 – произвольные постоянные, зависящие от граничных условий задачи. Для каждой корректно поставленной задачи величины $\dot{U}_2(x), \dot{I}_1(x), \dot{I}_2(x)$ можно выразить через значения этих постоянных и некоторые дополнительные коэффициенты h_1, h_2 и квадратную матрицу $[y_{ij}]$ второго порядка

$$u_2(x) = h_1(A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x) + h_2(A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x), \quad (4.10)$$

$$h_1 = \frac{\gamma_1^2 - z_1(g_1 + g_{12}) + z_M g_{12}}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}};$$

$$h_2 = \frac{\gamma_2^2 - z_1(g_1 + g_{12}) + z_M g_{12}}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}};$$

$$i_1(x) = y_{11}(A_1 sh\gamma_1 x + A_2 ch\gamma_1 x) + y_{12}(A_3 sh\gamma_2 x + A_4 ch\gamma_2 x), \quad (4.11)$$

$$i_2(x) = y_{21}(A_1 sh\gamma_1 x + A_2 ch\gamma_1 x) + y_{22}(A_3 sh\gamma_2 x + A_4 ch\gamma_2 x), \quad (4.12)$$

где

$$[y_{ij}] = \frac{1}{z_1 z_2 - z_M^2} \begin{bmatrix} \gamma_1(z_2 - h_1 z_M) & \gamma_2(z_2 - h_2 z_M) \\ \gamma_1(h_1 z_1 - z_M) & \gamma_2(h_2 z_1 - z_M) \end{bmatrix}.$$

Определим значение $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_2$, через параметры рельсовой линии. Для этого продифференцируем по (x) обе части выражения (4.3)

$$\frac{d^2 u_1}{dx^2} = z_1 \frac{di_1}{dx} + z_M \frac{di_2}{dx}. \quad (4.13)$$

Теперь подставим в правую часть (4.13) соотношения (4.4) и (4.6)

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u_1}{dx^2} &= z_1 [(g_1 + g_2)u_1 - g_{12}u_2] + z_M [(g_2 + g_{12})u_2 - g_{12}u_1] = \\ &u_1 [z_1(g_1 + g_{12}) - z_M g_{12}] + u_2 [z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}] \end{aligned} \quad (4.14)$$

Выразим из (4.22) переменную u_2

$$u_2 = \frac{1}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}} \left\{ \frac{d^2 u_1}{dx^2} - u_1 [z_1(g_1 + g_{12}) - z_M g_{12}] \right\}. \quad (4.15)$$

Дважды продифференцируем выражение (4.9) по x и подставим в правую часть выражения для $\frac{d^2 u_1}{dx^2}$ и u_1

$$\begin{aligned} u_2 &= \frac{1}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}} \left\{ \gamma_1^2 A_1 ch\gamma_1 x + \gamma_1^2 A_2 sh\gamma_1 x + \gamma_2^2 A_3 ch\gamma_2 x + \gamma_2^2 A_4 sh\gamma_2 x - \right. \\ &- \left[A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x + A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x \right] [z_1(g_1 + g_{12}) - z_M g_{12}] \Big\} = \\ &= \frac{\gamma_1^2 + z_M g_{12} - z_1(g_1 + g_{12})}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}} \cdot A_1 ch\gamma_1 x + \frac{\gamma_1^2 + z_M g_{12} - z_1(g_2 + g_{12})}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}} \cdot A_2 sh\gamma_1 x + \\ &+ \frac{\gamma_2^2 + z_M g_{12} - z_1(g_1 + g_{12})}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}} \cdot A_3 ch\gamma_2 x + \frac{\gamma_2^2 + z_M g_{12} - z_1(g_1 + g_{12})}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}} \cdot A_4 sh\gamma_2 x = \\ &= F(\gamma_1)(A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x) + F(\gamma_2)(A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x), \end{aligned} \quad (4.16)$$

где $F(\gamma) = \frac{\gamma^2 + z_M g_{12} - z_1(g_1 + g_{12})}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}}$.

Теперь найдем формулы для токов i_1 и i_2 . Продифференцируем выражение (4.4) по x и подставим в левую часть соотношения (4.3). Для удобства обозначим

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{du_1}{dx} = \gamma_1 A_1 sh\gamma_1 x + \gamma_1 A_2 ch\gamma_1 x + \gamma_2 A_3 sh\gamma_2 x + \gamma_2 A_4 ch\gamma_2 x, \\ \epsilon_2 &= \frac{du_2}{dx} = h_1 \gamma_1 A_1 sh\gamma_1 x + h_1 \gamma_1 A_2 ch\gamma_1 x + h_2 \gamma_2 A_3 sh\gamma_2 x + h_2 \gamma_2 A_4 ch\gamma_2 x, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} h_1 &= F(\gamma_1) = \frac{\gamma_1^2 + z_M g_{12} - z_1(g_1 + g_{12})}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}}, \\ h_2 &= F(\gamma_2) = \frac{\gamma_2^2 + z_M g_{12} - z_1(g_1 + g_{12})}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}}. \end{aligned}$$

В результате получим систему линейных алгебраических уравнений второго порядка относительно искоемых переменных i_1 и i_2

$$\begin{cases} z_1 i_1 + z_M i_2 = \epsilon_1, \\ z_M i_1 + z_2 i_2 = \epsilon_2, \end{cases}$$

Решив эту систему, получим

$$i_1 = \frac{\mathfrak{e}_1 z_2 - \mathfrak{e}_2 z_M}{z_1 z_2 - z_M^2} = \frac{z_2 \gamma_1 - z_M h_1 \gamma_1}{z_1 z_2 - z_M^2} (A_1 sh \gamma_1 x + A_2 ch \gamma_1 x) +$$

$$+ \frac{z_1 \gamma_2 - z_M h_2 \gamma_2}{z_1 z_2 - z_M^2} (A_3 sh \gamma_2 x + A_4 ch \gamma_2 x) =$$

$$= y_{11} (A_1 sh \gamma_1 x + A_2 ch \gamma_1 x) + y_{12} (A_3 sh \gamma_2 x + A_4 ch \gamma_2 x),$$

где $y_{11} = \gamma_1 \frac{z_2 - h_1 z_M}{z_1 z_2 - z_M^2}$; $y_{12} = \gamma_2 \frac{z_2 - h_2 z_M}{z_1 z_2 - z_M^2}$;

$$i_2 = \frac{z_1 \mathfrak{e}_2 - z_M \mathfrak{e}_1}{z_1 z_2 - z_M^2} = \gamma_1 \frac{z_1 h_1 - z_M}{z_1 z_2 - z_M^2} (A_1 sh \gamma_1 x + A_2 ch \gamma_1 x) +$$

$$+ \gamma_2 \frac{h_2 z_1 - z_M}{z_1 z_2 - z_M^2} (A_3 sh \gamma_2 x + A_4 ch \gamma_2 x) =$$

$$= y_{21} (A_1 sh \gamma_1 x + A_2 ch \gamma_1 x) + y_{22} (A_3 sh \gamma_2 x + A_4 ch \gamma_2 x),$$

где $y_{21} = \gamma_1 \frac{z_1 h_1 - z_M}{z_1 z_2 - z_M^2}$; $y_{22} = \gamma_2 \frac{h_2 z_1 - z_M}{z_1 z_2 - z_M^2}$.

Возвращаясь к обозначениям токов и напряжений в схеме, изображенной на рис. 4.5, а также учитывая направление оси x , указанное на рис. 4.6, полагая в уравнениях (4.9), (4.10), (4.11) и (4.12) $x=0$, получаем

$$\begin{cases} \dot{U}_3 = A_1 + A_3, \\ \dot{U}_4 = h_1 A_1 + h_2 A_3, \\ \dot{I}_3 = y_{11} A_2 + y_{12} A_4, \\ \dot{I}_4 = y_{21} A_2 + y_{22} A_4. \end{cases}$$

Выразим параметры A_1, A_2, A_3, A_4 через $\dot{U}_3, \dot{U}_4, \dot{I}_3, \dot{I}_4$

$$A_1 = \frac{\dot{U}_3 h_2 - \dot{U}_4}{h_2 - h_1}; \quad A_2 = \frac{\dot{I}_3 y_{22} - \dot{I}_4 y_{12}}{d}; \quad A_3 = \frac{\dot{U}_4 - \dot{U}_3 h_1}{h_2 - h_1}; \quad A_4 = \frac{\dot{I}_4 y_{11} - \dot{I}_3 y_{21}}{d}. \quad (4.17)$$

$$d = y_{11} \cdot y_{22} - y_{21} \cdot y_{12}.$$

Полагая в уравнениях (4.9), (4.10), (4.11) и (4.12) $x=l$ (l – длина линии), получаем

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = y_{11} S_1 A_1 + y_{11} C_1 A_2 + y_{12} S_2 A_3 + y_{12} C_2 A_4, \\ \dot{I}_2 = y_{21} S_1 A_1 + y_{21} C_1 A_2 + y_{22} S_2 A_3 + y_{22} C_2 A_4, \\ \dot{U}_1 = C_1 A_1 + S_1 A_2 + C_2 A_3 + S_2 A_4, \\ \dot{U}_2 = h_1 C_1 A_1 + h_1 S_1 A_2 + h_2 C_2 A_3 + h_2 C_2 A_4, \end{cases} \quad (4.18)$$

где $S_1 = sh(\gamma_1 l)$; $C_1 = ch(\gamma_1 l)$; $S_2 = sh(\gamma_2 l)$; $C_2 = ch(\gamma_2 l)$;

Подставляя значения A_1, A_2, A_3, A_4 , определенные по формулам (4.17), в правую часть соотношений (4.18), и проведя группировку по $\dot{U}_3, \dot{U}_4, \dot{I}_3, \dot{I}_4$, получаем формулы для вычисления коэффициентов матрицы A – параметров исследуемой длинной трехпроводной электрической линии.

Окончательный вид матрицы A – параметров в классе образов нормального режима в символьном виде имеет вид

$$[A]_O^N = \begin{pmatrix} \frac{h_2 C_1 - h_1 C_2}{h_2 - h_1} & \frac{y_{22} S_1 - y_{21} S_2}{d} & \frac{y_{11} S_2 - y_{12} S_1}{d} & \frac{C_2 - C_1}{h_2 - h_1} \\ \frac{h_2 y_{11} S_1 - h_1 y_{12} S_2}{h_2 - h_1} & \frac{y_{11} y_{22} C_1 - y_{12} y_{21} C_2}{d} & \frac{y_{11} y_{12} (C_2 - C_1)}{d} & \frac{y_{12} S_2 - y_{11} S_1}{h_2 - h_1} \\ \frac{h_2 y_{21} S_1 - h_1 y_{22} S_2}{h_2 - h_1} & \frac{y_{21} y_{22} (C_1 - C_2)}{d} & \frac{y_{11} y_{22} C_1 - y_{12} y_{21} C_2}{d} & \frac{y_{22} S_2 - y_{21} S_1}{h_2 - h_1} \\ \frac{h_2 h_1 (C_1 - C_2)}{h_2 - h_1} & \frac{h_1 y_{22} S_1 - h_2 y_{21} S_2}{d} & \frac{h_2 y_{11} S_2 - h_1 y_{12} S_1}{d} & \frac{h_2 C_2 - h_1 C_1}{h_2 - h_1} \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

4.4. Матрица $[A]_O^S$ – параметров несимметричной трехпроводной рельсовой линии в шунтовом режиме

Класс образов шунтового режима характеризуется наличием на контролируемом участке рельсовой линии подвижной единицы (рис. 4.7).

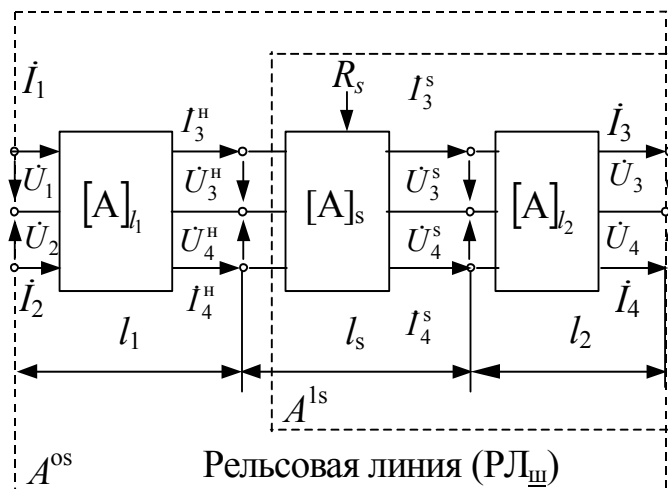


Рис. 4.7. Обобщенная схема замещения РЦ в классе образов шунтового режима

Так как на рельсовую линию, находящуюся в классе образов шунтового режима, кроме изменения проводимости g , оказывает влияние дискретное воздействие в виде шунта с конечным сопротивлением R_s , то обобщенный многополюсник $[A]_0^S$ рельсовой линии $РЛ_{III}$ определим как каскадное соединение 3-х шестиполюсников $[A]_{/1}$, $[A]_s$ и $[A]_{/2}$.

Вид используемой схемы замещения зависит от того, какого типа локальная неоднородность первичных параметров рельсовой линии имеет место на данном участке пути, что, собственно, и определяет режим рельсовой цепи. Имеется два принципиально разных подхода к определению параметров элементарного шестиполюсника, соответствующего участку с существенно увеличенной межрельсовой проводимостью (шунтовой режим) или увеличенным сопротивлением одного из рельсов (контрольный режим).

Первый подход базируется на схемах замещения, содержащих только указанные проводимости или сопротивления.

Второй подход базируется на схеме замещения с распределенной моделью, т.е. участок рельсовой линии рассматривается с распределенными параметрами.

Матрица $[A]_s$ – параметров дискретной шестиполюсной схемы замещения элементарного участка рельсовой линии с шунтом

На рис. 4.8 представлена схема участка рельсовой линии, содержащей шунт, при использовании трехпроводной модели.

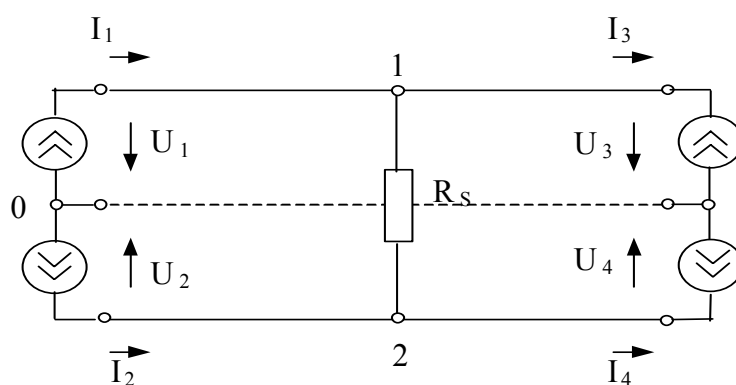


Рис. 4.8. Эквивалентная схема участка рельсовой линии, содержащей дискретный сосредоточенный шунт

Для определения $[A]_s$ параметров рельсовой линии подключим источники тока к зажимам цепи.

Для узла 0 по 1 закону Кирхгофа получим соотношение

$$-I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0. \quad (4.20)$$

Таким образом, можно произвольно задавать значения только трех источников тока из четырех, и значение последнего определяется из соотношения (4.20).

Будем считать заданными I_1, I_2 и I_3 , а I_4 будет являться варьируемой переменной. Используя законы Кирхгофа для узлов и контуров схемы, изображенной на рис. 4.8, получим систему уравнений

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0, & (4.21) \\ I_1 - I_3 - I_{12} = 0, & (4.22) \\ I_2 - I_4 + I_{12} = 0, & (4.23) \\ U_1 - U_3 = 0, & (4.24) \\ U_2 - U_4 = 0, & (4.25) \\ R_s \cdot I_{12} + U_2 - U_1 = 0. & (4.26) \end{cases}$$

Для получения соотношений для определения A – параметров систему (4.21 – 4.26) необходимо представить в следующем виде (4.2).

Как отмечалось выше, соотношение (4.2) должно выполняться безусловно и его исключаем из системы. Из уравнения (4.26) выразим ток I_{12} и подставим в соотношения (4.22) и (4.23), в результате получим

$$I_{12} = (U_1 - U_2)/R_s.$$

$$\begin{cases} I_1 - I_3 - (U_1/R_s) + (U_2/R_s) = 0, & (4.27) \\ I_2 - I_4 + (U_1/R_s) + (U_2/R_s) = 0, & (4.28) \\ U_1 - U_3 = 0, & (4.29) \\ U_2 - U_4 = 0. & (4.30) \end{cases}$$

Выразим напряжения U_1 и U_2 из уравнений (4.29) и (4.30), подставим их в формулы (4.27) и (4.28), и, поменяв порядок записи уравнений, получим:

$$\begin{cases} U_1 = U_3, \\ I_1 = (U_3/R_s) - I_3 - (U_4/R_s), \\ I_2 = (-U_3/R_s) + I_4 + (U_4/R_s), \\ U_2 = U_4. \end{cases}$$

Тогда, искомая матрица $[A]_s$ – параметров схемы, изображенной на рис. 4.8, имеет вид

$$[A]_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1/R_S & 1 & 0 & -1/R_S \\ -1/R_S & 0 & 1 & 1/R_S \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.31)$$

Погрешность расчета шунтового режима рельсовой линии при использовании модели с дискретно расположенным поездным шунтом зависит от величины проводимости изоляции на участке, асимметрии сопротивлений рельсовых нитей. Поэтому для учета указанных условий и для обеспечения необходимой точности расчета режима рельсовой линии необходимо использовать схему замещения элементарного участка рельсовой линии с распределенной моделью.

Матрица $[A]_s$ – параметров распределенной шестиполусной схемы замещения элементарного участка рельсовой линии с шунтом

На рис. 4.9 представлена схема элементарного участка рельсовой линии, содержащей шунт при трехпроводной распределенной модели.

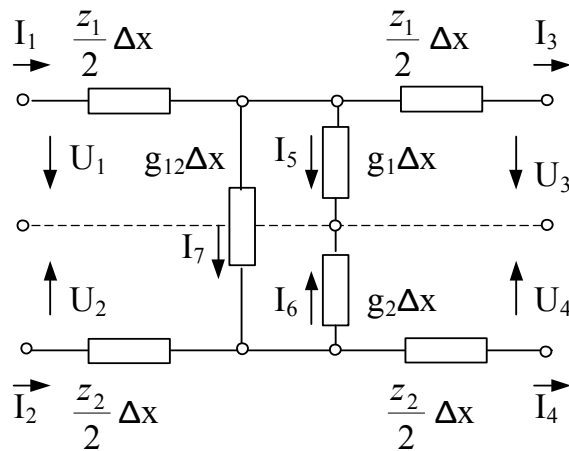


Рис. 4.9. Распределенная схема замещения участка рельсовой линии с поездным шунтом

Вследствие небольшой величины, влиянием межрельсовой взаимоиנדукции на режим цепи можно пренебречь.

Используя метод токов ветвей для T – схемы (рис. 4.9), получим систему

$$I_1 - I_3 - I_5 - I_7 = 0, \quad (4.32)$$

$$I_2 - I_4 - I_6 + I_7 = 0, \quad (4.33)$$

$$\frac{z_1}{2} I_1 + \frac{1}{g_1} I_5 = U_1, \quad (4.34)$$

$$\frac{z_1}{2} I_2 + \frac{1}{g_2} I_6 = U_2, \quad (4.35)$$

$$\frac{z_1}{2} I_3 - \frac{1}{g_1} I_5 = -U_3, \quad (4.36)$$

$$\frac{z_1}{2} I_4 - \frac{1}{g_2} I_6 = -U_4, \quad (4.37)$$

$$\frac{1}{g_1} I_5 - \frac{1}{g_2} I_6 - \frac{1}{g_{12}} I_7 = 0. \quad (4.38)$$

Выразим I_5 и I_6 из (4.36) и (4.37), а затем I_7 из (4.38)

$$I_5 = g_1 \left(U_3 + \frac{z_1}{2} I_3 \right),$$

$$I_6 = g_2 \left(U_4 + \frac{z_2}{2} I_4 \right),$$

$$I_7 = g_{12} \left(\frac{1}{g_1} I_5 - \frac{1}{g_2} I_6 \right) = g_{12} \left(U_3 + \frac{z_1}{2} I_3 - \frac{z_2}{2} I_4 - U_4 \right).$$

Подставим I_5 , I_6 , I_7 в (2.32) и (2.33)

$$I_1 - I_3 - g_1 \left(U_3 + \frac{z_1}{2} I_3 \right) - g_{12} \left(U_3 + \frac{z_1}{2} I_3 - \frac{z_2}{2} I_4 - U_4 \right) = 0, \quad (4.39)$$

$$I_2 - I_4 - g_2 \left(U_4 + \frac{z_2}{2} I_4 \right) + g_{12} \left(U_3 + \frac{z_1}{2} I_3 - \frac{z_2}{2} I_4 - U_4 \right) = 0.$$

Отсюда:

$$I_1 = (g_1 + g_{12}) U_3 + \left(1 + \frac{z_1 g_1}{2} + \frac{z_1 g_{12}}{2} \right) I_3 - \frac{z_2 g_{12}}{2} I_4 - g_{12} U_4, \quad (4.40)$$

$$I_2 = -g_{12} U_3 - \frac{z_1 g_{12}}{2} I_3 + \left(1 + \frac{z_2 g_2}{2} + \frac{z_2 g_{12}}{2} \right) I_4 + (g_2 + g_{12}) U_4. \quad (4.41)$$

Подставляя (4.40) и (4.41) соответственно в (4.34) и (4.35) и выражая из полученных выражений U_1 и U_2 , получим

$$U_1 = \left(1 + \frac{z_1 g_1}{2} + \frac{z_1 g_{12}}{2} \right) U_3 + \frac{z_1}{2} \left(2 + \frac{z_1 g_1}{2} + \frac{z_1 g_{12}}{2} \right) I_3 - \frac{z_1 z_2 g_{12}}{4} I_4 - \frac{z_1 g_{12}}{2} U_4, \quad (4.42)$$

$$U_2 = -\frac{z_2 g_{12}}{2} U_3 - \frac{z_1 z_2 g_{12}}{4} I_3 + \frac{z_2}{2} \left(2 + \frac{z_2 g_2}{2} + \frac{z_2 g_{12}}{2} \right) I_4 + \left(1 + \frac{z_2 g_2}{2} + \frac{z_2 g_{12}}{2} \right) U_4. \quad (4.43)$$

Для получения матрицы $[A]_s$ – параметров выпишем коэффициенты правых частей соотношений (4.40) – (4.43), переставив их в соответствии с принятым порядком (U_1, I_1, I_2, U_2)

$$[A]_s = \begin{pmatrix} \left(1 + \frac{z_1 g_1}{2} + \frac{z_1 g_{12}}{2}\right) & \frac{z_1}{2} \left(2 + \frac{z_1 g_1}{2} + \frac{z_1 g_{12}}{2}\right) & -\frac{z_1 z_2 g_{12}}{4} & -\frac{z_1 g_{12}}{2} \\ g_1 + g_{12} & \left(1 + \frac{z_1 g_1}{2} + \frac{z_1 g_{12}}{2}\right) & -\frac{z_2 g_{12}}{2} & -g_{12} \\ -g_{12} & -\frac{z_1 g_{12}}{2} & \left(1 + \frac{z_2 g_2}{2} + \frac{z_2 g_{12}}{2}\right) & g_2 + g_{12} \\ -\frac{z_2 g_{12}}{2} & -\frac{z_1 z_2 g_{12}}{4} & \frac{z_2}{2} \left(2 + \frac{z_2 g_2}{2} + \frac{z_2 g_{12}}{2}\right) & \left(1 + \frac{z_2 g_2}{2} + \frac{z_2 g_{12}}{2}\right) \end{pmatrix} \quad (4.44)$$

В шунтовом режиме g_{12} не зависит от Δx , все остальные параметры являются погонными, и их значения пропорциональны Δx . При $\Delta x \rightarrow 0$ матрица (4.44) приобретает вид

$$[A]_s|_{\Delta x \rightarrow 0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ g_{12} & 1 & 0 & -g_{12} \\ -g_{12} & 0 & 1 & g_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Эта матрица соответствует ранее полученной из дискретной схемы замещения без учета первичных параметров, что косвенно подтверждает её аналогию данной схеме.

Для определения A – параметров обобщенного шестиполюсника, образованного тремя каскадно соединенными 6-ти полюсниками (рис. 4.7), на первом этапе необходимо выполнить операцию умножения двух квадратных матриц $[A]_s$ и $[A]_{l_2}$

$$[A]_{1s} = [A]_s \times [A]_{l_2} = \begin{bmatrix} A_{11}^{1s} & A_{12}^{1s} & A_{13}^{1s} & A_{14}^{1s} \\ A_{21}^{1s} & A_{22}^{1s} & A_{23}^{1s} & A_{24}^{1s} \\ A_{31}^{1s} & A_{32}^{1s} & A_{33}^{1s} & A_{34}^{1s} \\ A_{41}^{1s} & A_{42}^{1s} & A_{43}^{1s} & A_{44}^{1s} \end{bmatrix}.$$

При этом, каждый элемент результирующей матрицы $[A]_1$ вычисляется по формуле

$$A_{ik}^1 = \sum_{j=1}^4 A_{ij}^k \cdot A_{jk}^s. \quad (4.45)$$

На втором этапе необходимо также выполнить операцию умножения двух квадратных матриц $[A]_{l_1}$ и $[A]_{l_s}$, согласно формуле (4.45), и в результате получим искомую матрицу $[A]_0^s$

$$[A]_0^s = [A]_{l_1} \times [A]_{l_s} = \begin{bmatrix} A_{11}^{0s} & A_{12}^{0s} & A_{13}^{0s} & A_{14}^{0s} \\ A_{21}^{0s} & A_{22}^{0s} & A_{23}^{0s} & A_{24}^{0s} \\ A_{31}^{0s} & A_{32}^{0s} & A_{33}^{0s} & A_{34}^{0s} \\ A_{41}^{0s} & A_{42}^{0s} & A_{43}^{0s} & A_{44}^{0s} \end{bmatrix}.$$

С учетом того, что коэффициенты матрицы $[A]_{l_1}$ и $[A]_{l_2}$, определяемые матрицей (4.19) при сосредоточенном и распределенном представлении участка с поездным шунтом одинаковы, то матрицы обобщенных шестиполюсников рельсовой линии имеют одинаковый вид, но отличаются только значениями параметров матрицы $[A]_{l_s}$.

4.5. Матрица $[A]^{ок}$ – параметров несимметричной трехпроводной рельсовой линии в контрольном режиме

Класс образов контрольного режима характеризуется наличием на контролируемом участке рельсовой линии излома рельсовой нити.

Схема замещения рельсовой линии при оборванной рельсовой линии на расстоянии l_1 от начала и l_2 от конца её изображена на рис. 4.10.

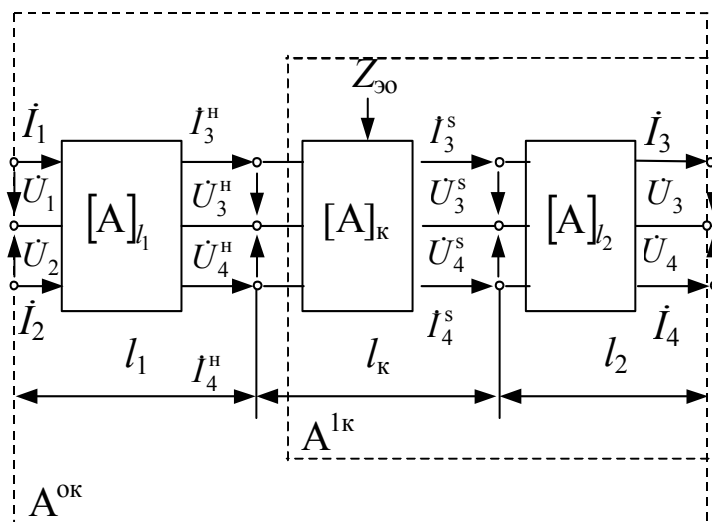


Рис. 4.10. Обобщенная схема замещения РЦ

в классе образов контрольного режима

Схема замещения рельсовой линии в контрольном режиме представляет собой каскадное соединение трех шестиполюсников $[A]_{l_1}$, $[A]_k$ и $[A]_{l_2}$. Первый из шестиполюсников $[A]_{l_1}$ замещает участок рельсовой линии между УСН и местом обрыва рельсовых линий, а второй $[A]_{l_2}$ между местом обрыва и УСК.

Для определения параметров обобщенной матрицы $[A]^{ок}$ в контрольном режиме необходимо определить параметры элементарного шестиполюсника $[A]_k$, включенного между шестиполюсниками $[A]_{l_1}$ и $[A]_{l_2}$.

Матрица $[A]_k$ – параметров локальной схемы замещения элементарного участка обрыва рельсовой линии

Схема элементарного участка рельсовой линии, содержащей локальный участок повышенного сопротивления ($Z_{э0}$) продольной цепи (согласно рис. 4.10), без учета проводимости изоляции, представлена на рис. 4.11.

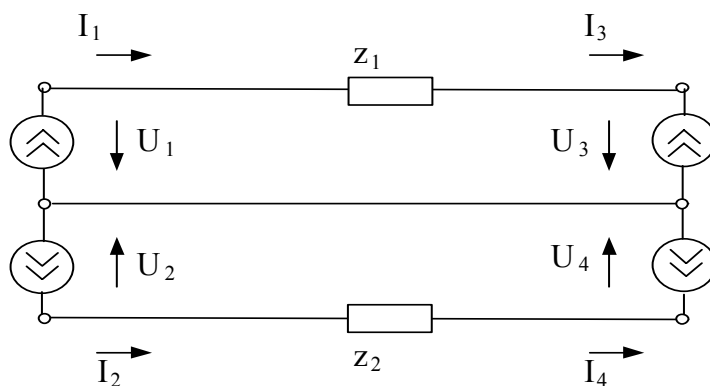


Рис. 4.11. Эквивалентная схема участка рельсовой линии с локальной продольной неоднородностью

На основании законов Кирхгофа получим систему уравнений

$$\begin{cases} I_1 = I_3, \\ I_2 = I_4, \\ U_1 = I_3 z_1 + U_3, \\ U_2 = I_4 z_2 + U_4. \end{cases}$$

Поменяв порядок написания этих уравнений, получим

$$\begin{cases} U_1 = U_3 + z_1 I_3, \\ I_1 = I_3, \\ I_2 = I_4, \\ U_2 = z_2 I_4 + U_4. \end{cases}$$

Матрица $[A]_к$ – параметров имеет вид

$$[A]_к = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & z_2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.46)$$

Замечание. Погрешность расчета контрольного режима рельсовой линии при использовании приведенной модели зависит от отношения сопротивлений поврежденного участка рельсовой цепи и изоляции в цепи рельс – шпалы – балласт – земля. При большом значении указанного отношения для обеспечения необходимой точности расчета режима рельсовой линии необходимо использовать распределенную модель электрической цепи.

Для анализа контрольного режима целесообразно учитывать сопротивления разрыва рельсовой цепи сразу для обоих рельсов, поскольку обрыв одного из рельсов будет являться частным случаем при использовании соответствующих формул для коэффициентов А – параметров.

Матрица $[A]_к$ – параметров распределенной шестиполусной схемы замещения элементарного участка обрыва рельсовой линии

На рис. 4.12 представлена схема элементарного участка рельсовой линии, содержащей локальный участок повышенного сопротивления продольной цепи и распределенные проводимости изоляции.

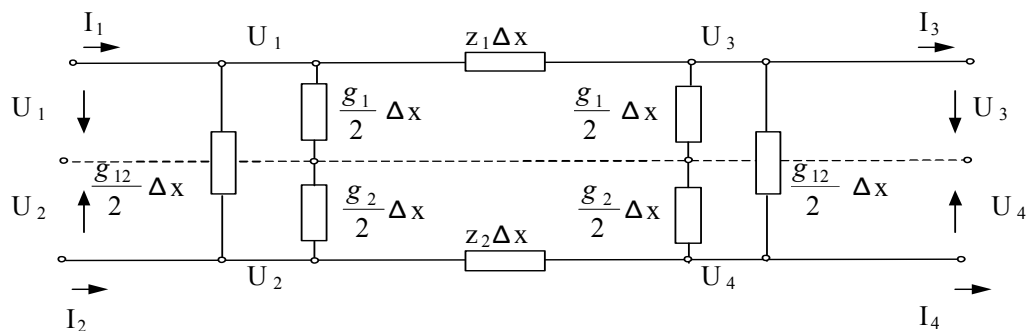


Рис. 4.12. Схема замещения участка рельсовой линии с продольной и распределенной проводимостью изоляции

Используя метод узловых потенциалов для расчета схемы, получим

$$Y \cdot dx \times U = I, \quad (4.47)$$

где $U^T = (U_1, U_2, U_3, U_4),$

$$I^T = (I_1, I_2, I_3, I_4).$$

Запишем систему уравнений (4.47) в алгебраической форме

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{1}{z_1} + \frac{g_1}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right) U_1 + \left(-\frac{g_{12}}{2} \right) U_2 + \left(-\frac{1}{z_1} \right) U_3 + 0 \cdot U_4 = I_1, \end{aligned} \right. \quad (4.48)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \left(-\frac{g_{12}}{2} \right) U_1 + \left(\frac{1}{z_2} + \frac{g_2}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right) U_2 + 0 \cdot U_3 + \left(-\frac{1}{z_2} \right) U_4 = I_2, \end{aligned} \right. \quad (4.49)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \left(-\frac{1}{z_1} \right) U_1 + 0 \cdot U_2 + \left(\frac{1}{z_1} + \frac{g_1}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right) U_3 + \left(-\frac{g_{12}}{2} \right) U_4 = -I_3, \end{aligned} \right. \quad (4.50)$$

$$\left\{ \begin{aligned} 0 \cdot U_1 + \left(-\frac{1}{z_2} \right) U_2 + \left(-\frac{g_{12}}{2} \right) U_3 + \left(\frac{1}{z_2} + \frac{g_2}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right) U_4 = -I_4. \end{aligned} \right. \quad (4.51)$$

Умножив обе части (4.50) и (4.51) на (-1) получим матрицу Y-параметров шестиполюсника

$$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_1} + \frac{g_1}{2} + \frac{g_{12}}{2} & -\frac{g_{12}}{2} & -\frac{1}{z_1} & 0 \\ -\frac{g_{12}}{2} & \frac{1}{z_2} + \frac{g_2}{2} + \frac{g_{12}}{2} & 0 & -\frac{1}{z_2} \\ \frac{1}{z_1} & 0 & -\left(\frac{1}{z_1} + \frac{g_1}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right) & \frac{g_{12}}{2} \\ 0 & \frac{1}{z_2} & \frac{g_{12}}{2} & -\left(\frac{1}{z_2} + \frac{g_2}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right) \end{bmatrix}. \quad (4.52)$$

Переход к матрице A – параметров может быть выполнен при помощи преобразований, рассмотренных в работе [10]. Наличие нулей в матрице (4.52) позволяет упростить как процедуру преобразования, так и конечные соотношения.

Выразив U_1 и U_2 , соответственно, из уравнений (4.50) и (4.51) и подставив эти соотношения в (4.48) и (4.49), получим

$$U_1 = \left(1 + \frac{z_1 g_1}{2} + \frac{z_1 g_{12}}{2} \right) U_3 + z_1 I_3 - \frac{z_1 g_{12}}{2} U_4. \quad (4.53)$$

$$I_1 = \left[z_1 \left(\frac{1}{z_1} + \frac{g_1}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right)^2 + z_2 \left(\frac{g_{12}}{2} \right)^2 - \frac{1}{z_1} \right] U_3 + \left(1 + \frac{z_1 g_1}{2} + \frac{z_1 g_{12}}{2} \right) I_3 - \frac{z_2 g_{12}}{2} I_4 + \left[\frac{z_1 g_{12}}{2} \left(\frac{1}{z_1} + \frac{g_1}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right) + \frac{z_1 g_{12}}{2} \left(\frac{1}{z_2} + \frac{g_2}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right) \right] U_4. \quad (4.54)$$

$$I_2 = \left[-\frac{z_1 g_{12}}{2} \left(\frac{1}{z_1} + \frac{g_1}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right) - \frac{z_2 g_{12}}{2} \left(\frac{1}{z_2} + \frac{g_2}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right) \right] U_3 - \frac{z_1 g_{12}}{2} I_3 + \left(1 + \frac{z_2 g_2}{2} + \frac{z_2 g_{12}}{2} \right) I_4 + \left[z_1 \left(\frac{g_{12}}{2} \right)^2 + z_2 \left(\frac{1}{z_2} + \frac{g_2}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right)^2 \right] U_4. \quad (4.55)$$

$$U_2 = -\frac{z_2 g_{12}}{2} U_3 + z_2 I_4 + \left(1 + \frac{z_2 g_2}{2} + \frac{z_2 g_{12}}{2} \right) U_4. \quad (4.56)$$

Для получения матрицы $[A]_k$ – параметров рассматриваемого шестиполюсника выпишем коэффициенты правых частей уравнений (4.53) – (4.56).

$$[A]_k = \begin{pmatrix} N_1 & z_1 & 0 & -\frac{z_1 g_{12}}{2} \\ M_2 & N_1 & -\frac{z_1 g_{12}}{2} & M_1 \\ M_1 & -\frac{z_1 g_{12}}{2} & N_2 & M_3 \\ -\frac{z_2 g_{12}}{2} & 0 & z_2 & N_2 \end{pmatrix}, \quad (4.57)$$

где $N_1 = 1 + \frac{z_1 g_1}{2} + \frac{z_1 g_{12}}{2}$;

$$N_2 = 1 + \frac{z_2 g_2}{2} + \frac{z_2 g_{12}}{2};$$

$$M_1 = -\frac{g_{12}}{2} \left(1 + \frac{z_1 g_1}{2} + \frac{z_1 g_{12}}{2} \right) + \frac{g_{12}}{2} \left(1 + \frac{z_2 g_2}{2} + \frac{z_2 g_{12}}{2} \right);$$

$$M_2 = z_1 \left(\frac{1}{z_1} + \frac{g_1}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right)^2 + z_2 \left(\frac{g_{12}}{2} \right)^2 - \frac{1}{z_1};$$

$$M_3 = z_2 \left(\frac{1}{z_2} + \frac{g_2}{2} + \frac{g_{12}}{2} \right)^2 + z_1 \left(\frac{g_{12}}{2} \right)^2 - \frac{1}{z_2}.$$

В контрольном режиме z_1 и z_2 не зависят от Δx , в то время как все проводимости поперечных ветвей пропорциональны Δx , поэтому при $\Delta x \rightarrow 0$ матрица (4.57) приобретает вид

$$[A]_{\Delta x \rightarrow 0} = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & z_2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Отметим, что эта матрица соответствует ранее полученной из локальной схемы замещения без учета первичных параметров, что косвенно подтверждает ее аналогию данной схеме.

Для получения A – параметров обобщенного шестиполюсника, образованного каскадным соединением трех шестиполюсников (рис. 4.10), необходимо получить коэффициенты матрицы $[A]_{lK}$, а затем перемножением $[A]_{lI}$ на $[A]_{lK}$, получить коэффициенты искомой матрицы $[A]^{OK}$.

$$[A]_{lS} = [A]_{lK} \times [A]_{lI} = \begin{bmatrix} A_{11}^{lK} & A_{12}^{lK} & A_{13}^{lK} & A_{14}^{lK} \\ A_{21}^{lK} & A_{22}^{lK} & A_{23}^{lK} & A_{24}^{lK} \\ A_{31}^{lK} & A_{32}^{lK} & A_{33}^{lK} & A_{34}^{lK} \\ A_{41}^{lK} & A_{42}^{lK} & A_{43}^{lK} & A_{44}^{lK} \end{bmatrix}.$$

Для получения матрицы $[A]^{OK}$ – параметров несимметричной рельсовой линии необходимо перемножить матрицы $[A]_{lI}$ на $[A]_{lK}$

$$[A]_{lO}^S = [A]_{lI} \times [A]_{lK} = \begin{bmatrix} A_{11}^{OK} & A_{12}^{OK} & A_{13}^{OK} & A_{14}^{OK} \\ A_{21}^{OK} & A_{22}^{OK} & A_{23}^{OK} & A_{24}^{OK} \\ A_{31}^{OK} & A_{32}^{OK} & A_{33}^{OK} & A_{34}^{OK} \\ A_{41}^{OK} & A_{42}^{OK} & A_{43}^{OK} & A_{44}^{OK} \end{bmatrix}.$$

С учетом того, что коэффициенты $[A]_{lI}$ и $[A]_{lK}$ определяемые матрицей (4.19) для схем, не учитывающих и учитывающих первичные параметры рельсовой линии с обрывом рельсовых нитей, одинаковы, то матрицы обобщенных шестиполюсников рельсовых линий имеют одинаковый вид, но отличаются только значениями параметров матрицы $[A]_{lK}$.

4.6. Определение [A] – параметров дроссель – трансформаторов в симметричном режиме

Одним из компонент схемы замещения устройств согласования аппаратуры РЦ с рельсовой линией в ее начале и в конце и обеспечивающих непрерывность тягового тока в координатах изолирующих стыков, являются дроссель – трансформаторы (рис. 4.13), у которых в смежных рельсовых цепях средние точки первичных путевых обмоток, подключенных к рельсовым линиям, соединены между собой.

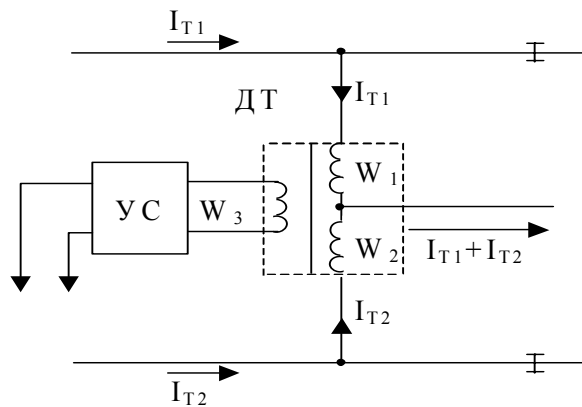


Рис. 4.13. Схема подключения дроссель – трансформатора к рельсовым линиям:

I_{T1} , I_{T2} – тяговые токи в рельсах; W_1 , W_2 – первичные обмотки дроссель – трансформатора; УС – устройство сопряжения с аппаратурой РЦ.

Для тягового тока обмотки дроссель – трансформатора W_1 и W_2 включены встречно, что препятствует намагничиванию сердечника. Сигнальный ток (ток опроса) протекает через путевую обмотку в одном направлении, вследствие чего в ней создается напряжение, используемое при работе РЦ.

Теоретически дроссель – трансформатор как пассивный четырехполюсник (для сигнального тока) должен обладать свойством обратимости [39], которое определяется соотношением

$$\det A = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 1,$$

где $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$ – матрица A – параметров.

Степень несоответствия условию обратимости можно оценить величиной

$$\xi(A) = \det A - 1.$$

Коэффициенты матрицы A – параметров дроссель – трансформатора ДТ – 02 – 500 при $n_1 = 40$, $f = 50$ Гц на релейном конце, представленные в работе [3] имеют следующие значения

$$A = \begin{pmatrix} 0,03e^{-j2^\circ} & 1,47j61^\circ \\ 0,14e^{-j82^\circ} & 40,1^{-j1^\circ} \end{pmatrix}. \quad (4.58)$$

Эти данные удовлетворяют условию обратимости с погрешностью $\xi(A) = 0,0129$.

При использовании матрицы Z – параметров

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{pmatrix},$$

условие обратимости имеет вид

$$z_{12} = z_{21}.$$

Z параметры четырехполюсника выражаются через A – параметры следующим образом

$$Z = \begin{pmatrix} -1 & a_{11} \\ 0 & a_{21} \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} 0 & a_{12} \\ 1 & a_{22} \end{pmatrix} = \frac{1}{a_{21}} \begin{pmatrix} a_{11} & \det A \\ 1 & a_{22} \end{pmatrix}. \quad (4.59)$$

Подставляя (4.58) в (4.59) получим

$$Z = \begin{pmatrix} 0,0409 + j0,2103 & 1,0739 + j7,1194 \\ 0,9941 + j7,0733 & 44,8073 + j282,91 \end{pmatrix}. \quad (4.60)$$

Рассмотрим следующую схему замещения трансформатора

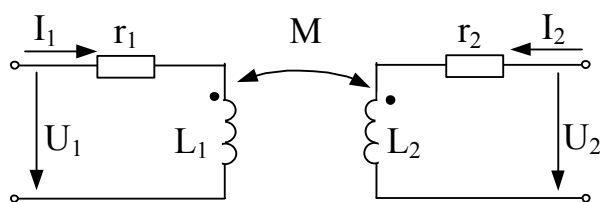


Рис. 4.14. Четырехполосная схема замещения трансформатора

Этой схеме соответствует следующая система уравнений передачи четырехполюсника

$$\left. \begin{aligned} (r_1 + j\omega L_1)I_1 + j\omega MI_2 &= U_1 \\ j\omega MI_1 + (r_2 + j\omega L_2)I_2 &= U_2 \end{aligned} \right\}$$

которую можно записать в матричном виде

$$Z \times I = U, \quad (4.61)$$

$$\text{где } Z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 + j\omega L_1 & j\omega M \\ j\omega M & r_2 + j\omega L_2 \end{pmatrix}, \quad (4.62)$$

$$I = [I_1 \ I_2]^T; \quad U = [U_1 \ U_2]^T.$$

Из матриц (4.60) и (4.62) можно сделать следующие выводы:

1. Значения коэффициентов z_{12} и z_{21} удовлетворяют условию обратимости с погрешностью порядка 1%.

2. Данная схема замещения не может учесть дополнительные потери, связанные с ненулевыми значениями вещественной части z_{12} и z_{21} в матрице (4.62). Эти потери можно учесть, считая взаимную индуктивность M комплексным числом.

Целесообразно откорректировать z_{12} и z_{21} в (4.62) так, чтобы условие обратимости выполнялось. Если положить:

$$z_M = \frac{z_{12} + z_{21}}{2} = 1,034 + j7,096 \text{ Ом}, \quad (4.63)$$

то четырехполюсник будет взаимным. Переход от Z – параметров к A – параметрам осуществляется операцией

$$A = \begin{pmatrix} -1 & z_{11} \\ 0 & z_M \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} 0 & z_M \\ 1 & z_{22} \end{pmatrix} = \frac{1}{z_M} \begin{pmatrix} z_{11} & \det Z \\ 1 & z_{22} \end{pmatrix},$$

где $\det Z = z_{11}z_{22} - z_M^2$.

Откорректированные по этому методу значения коэффициентов матрицы A – параметров равны

$$A_{c1} = \begin{pmatrix} 0,0299e^{-j2,71^\circ} & 1,4641e^{j61,30^\circ} \\ 0,1394e^{-j81,71^\circ} & 39,94e^{-j0,71^\circ} \end{pmatrix}.$$

Отклонение полученных значений от исходных данных (4.58) можно оценить с помощью критерия

$$\delta(A_c) = \frac{1}{4} \sqrt{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left(\left| \frac{a_{ij}^c - a_{ij}}{a_{ij}} \right| \right)^2},$$

где a_{ij}^c – элементы матрицы A_c , a_{ij} – элементы матрицы A .

Проводя вычисления, получим

$$\delta(A_{c1}) = 3,23 \cdot 10^{-3}.$$

Значения критерия можно уменьшить путем решения оптимизационной задачи, в которой $\delta(A_c)$ используется в качестве минимизируемой функции, а оптимизируемыми переменными являются независимые параметры обратимого четырехполюсника. Используя вместо (4.63) соотношение

$$z_M = [z_{12} + k_1(z_{21} - z_{12}) \cdot (1 + jk_2)],$$

находим, что функция $\delta(A_c)$ принимает минимальное значение при $k_1 = 0,54$ и $k_2 = 3 \cdot 10^{-4}$.

Откорректированные значения элементов матрицы Z равны

$$Z_{c2} = \begin{pmatrix} 0,0408 + j0,2103 & 1,0287 + j7,0948 \\ 1,0287 + j7,0948 & 44,807 + j282,902 \end{pmatrix}. \quad (4.64)$$

Используя процедуру перехода, получаем откорректированные значения $[A]$ – параметров дроссель – трансформатора

$$A_{c2} = \begin{pmatrix} 0,0299e^{-j2,75^\circ} & 1,4724e^{j60,96^\circ} \\ 0,1395e^{-j81,75^\circ} & 39,9535e^{-j0,75^\circ} \end{pmatrix}.$$

Откорректированным значениям элементов матрицы соответствует погрешность аппроксимации, равная

$$\delta(A_{c2}) = 2,5 \cdot 10^{-3}.$$

На основе значений (4.64) с помощью соотношения (4.63) можно рассчитать индуктивность основной и дополнительной обмоток и коэффициент связи

$$L_1 = \frac{I_M(z_{11})}{\omega} = \frac{0,2103}{314,16} = 0,6696 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

$$L_2 = \frac{I_M(z_{22})}{\omega} = \frac{282,91}{314,16} = 0,9005 \text{ Гн},$$

$$M = \frac{I_M(z_M)}{\omega} = 0,0226 \text{ Гн},$$

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = 0,9197 \text{ Гн}.$$

Каждая из индуктивностей L_1 и L_2 имеет составляющую, которая существует независимо от наличия ферромагнитного сердечника (рис. 4.14).

Для оценки численных значений этих составляющих можно воспользоваться соотношениями, приведенными в работе [26] для цилиндрической катушки

$$L = \frac{2\mu_0 W^2}{S} \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{r_1}^{r_2} dr \cdot r \int_{r_1}^{r_2} d\rho \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^2 (-1)^i \cdot \frac{z - z_i}{\sqrt{(z - z_i)^2 + (r + \rho)^2}} \cdot \left\{ \frac{K(t_i) - E(t_i)}{t_i^2} + \frac{(r - \rho)^2}{4r\rho} [K(t_i) - \Pi(h, t_i)] \right\}, \quad (4.65)$$

где: W – число витков обмотки;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$ – магнитная проницаемость;

r_1 и r_2 – внутренний и наружный радиусы катушки с обмоткой;

$(z_2 - z_1)$ – длина катушки;

$S = (z_1 - z_2) \cdot (r_2 - r_1)$ – площадь поперечного сечения обмотки;

$$h = \frac{4\pi r \cdot \rho}{(r + \rho)^2};$$

$$t_i = 2 \sqrt{\frac{r \cdot \rho}{(z - z_i)^2 + (r + \rho)^2}}, \quad i \in 1, 2;$$

h, t_i – вспомогательные переменные;

z, r, ρ – переменные интегрирования;

$K(t), E(t), \Pi(t)$ – полные эллиптические интегралы первого, второго и третьего рода:

$$K(t) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - t^2 \sin^2 \beta}};$$

$$E(t) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - t^2 \sin^2 \beta} d\beta;$$

$$\Pi(h, t) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\beta}{(1 - h \sin^2 \beta) \sqrt{1 - t^2 \sin^2 \beta}}.$$

В результате расчетов по формуле (4.65), выполненных с помощью компьютера для рассматриваемого дроссель – трансформатора, получены следующие значения

$$L_{10} = 1,6 \cdot 10^{-6} \Gamma_H; \quad L_{20} = 3,8 \cdot 10^{-3} \Gamma_H.$$

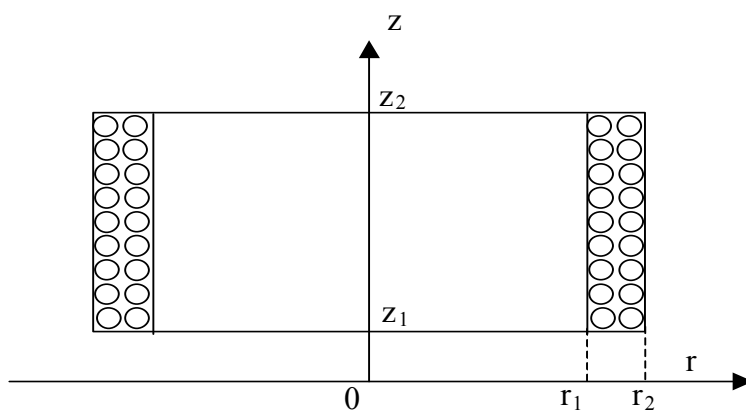


Рис. 4.15. Схема представления цилиндрической катушки

Соответствующие индуктивные сопротивления равны

$$X_{10} = 2\pi f L_{10} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

$$X_{20} = 2\pi f L_{20} = 1,2 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление обмоток можно определить без учета поверхностного эффекта, поскольку на частоте 50 Гц толщина скин – слоя в меди равна 2 см [27]

$$r_{10} = \rho \frac{\ell_1}{S_1} = 1,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{3,2}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

$$r_{20} = \rho \frac{\ell_1}{S_1} = 12 \text{ Ом}.$$

Таким образом, комплексные сопротивления обмоток, вследствие потерь в меди и рассеяния магнитного поля, имеют следующие значения

$$z_{10} = (5 + j5)10^{-4} \text{ Ом},$$

$$z_{20} = 1,2 + j12 \text{ Ом}.$$

Схемы замещения трансформаторов с управляемыми источниками напряжения и тока (ИНУТ и ИТУН), изображенные на рис. 2.17, являются наиболее универсальными.

Y – параметры схемы (рис. 4.16, б) для рассматриваемого дроссель – трансформатора могут быть получены из (4.64), путем обращения матрицы Z – параметров

$$Y = Z^{-1} = \begin{bmatrix} 12,862 - j23,891 & -0,330 + j0,594 \\ -0,330 + j0,594 & 0,009 - j0,018 \end{bmatrix}.$$

Эти схемы целесообразно использовать в том случае, если результаты измерительных элементов свидетельствуют, что четырехполюсник не обладает свойством обратимости. Схема с ИНУТ применяется при

использовании метода контурных токов, а схема с ИТУН – метода узловых потенциалов.

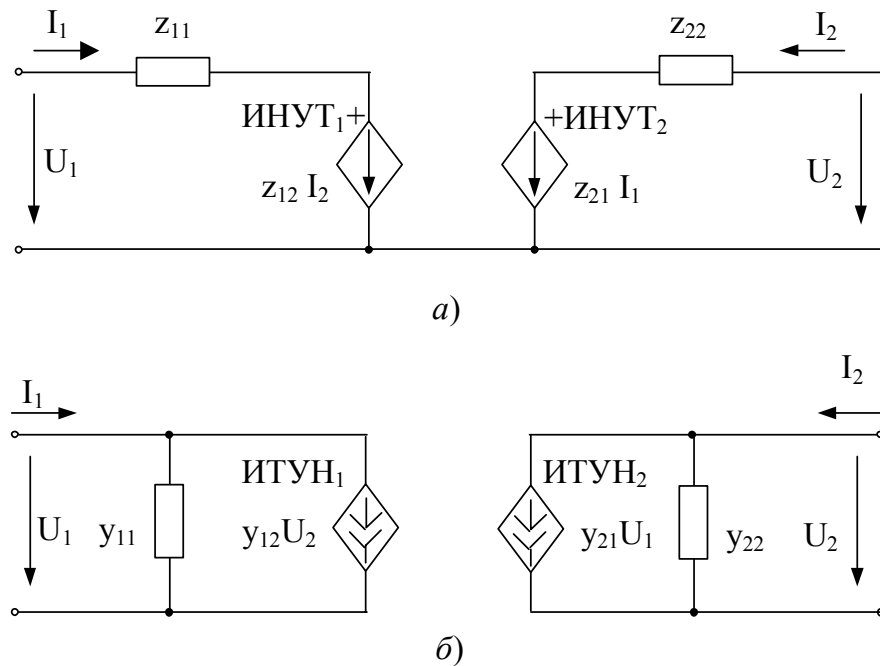


Рис. 4.16. Схема замещения трансформаторов:

а) с источником напряжения управляемым током, б) с источником тока управляемым напряжением.

Дополнительным достоинством таких схем замещения является простая интерпретация Z и Y – параметров трансформатора как четырехполюсника.

Представление реального трансформатора в виде схемы замещения, содержащей каскадно соединенные идеальный трансформатор и T – образный пассивный четырехполюсник, позволяет учесть рассеяние магнитного потока и потери в меди и стали относительно одной из обмоток (рис. 4.17).

Матрица A – параметров результирующего четырехполюсника A_{12} равна произведению соответствующих матриц отдельно каскадно соединенных четырехполюсников:

$$A_{12} = A_1 \cdot A_2. \quad (4.66)$$

Матрицы A – параметров этих четырехполюсников определяются соотношениями:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ n_1 & n_1 \end{bmatrix}, \quad (4.67)$$

где $n_1 = \frac{W_2}{W_1}$ – коэффициент трансформации;

W_1 и W_2 – число витков основной и дополнительной обмоток трансформатора.

$$A_2 = \frac{1}{z_3} \begin{pmatrix} z_1 + z_3 & (z_1 + z_3)(z_2 + z_3) - z_3^2 \\ 1 & z_2 + z_3 \end{pmatrix}, \quad (4.68)$$

где z_1, z_2, z_3 – сопротивления Т – образной схемы замещения, матрица Z – параметров которой равна

$$Z_2 = \begin{pmatrix} z_1 + z_3 & z_3 \\ z_3 & z_2 + z_3 \end{pmatrix}. \quad (4.69)$$

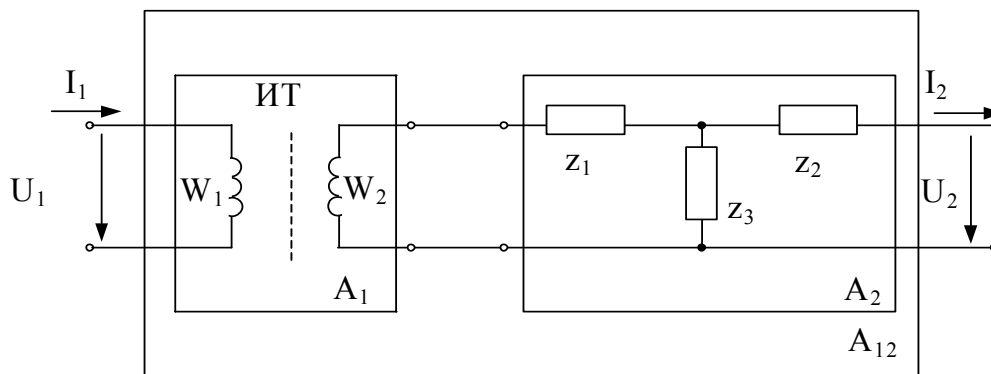


Рис. 4.17. Схема замещения дроссель – трансформатора, учитывающая потери в меди и стали

Из (4.66) можно выразить А – параметры Т – образной схемы

$$A_2 = A_1^{-1} \cdot A_{12}. \quad (4.70)$$

Для рассматриваемого трансформатора, используя для A_{12} значения коэффициентов матрицы (4.66), с учетом (4.67) и (4.70), получим

$$A_2 = \begin{pmatrix} 1,198 - j0,0628 & 28,507 + j51,428 \\ (0,487 - j3,466) \cdot 10^{-3} & 1,002 - j0,0175 \end{pmatrix}. \quad (4.71)$$

Теперь по формуле (2.59) находим Z – параметры Т – образной схемы

$$Z_2 = \begin{pmatrix} 65,42 + j336,56 & 42,96 + j284,77 \\ 39,76 + j282,93 & 44,81 + j282,90 \end{pmatrix}. \quad (4.72)$$

Сопоставляя соотношения (4.69) и (4.72), находим значения сопротивлений Т – образной схемы

$$z_3 = \frac{Z_{12} + Z_{21}}{2} = 41,36 + j283,85 \text{ Ом},$$

$$\begin{aligned} z_1 &= z_{11} - z_3 = 24,06 + j52,70 \text{ Ом}, \\ z_2 &= z_{22} - z_3 = 3,447 - j0,952 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (4.73)$$

В показательной форме эти значения равны

$$\begin{aligned} z_1 &= 57,936e^{j65,46^\circ} \text{ Ом}, \\ z_2 &= 3,5769e^{-j15,44^\circ} \text{ Ом}, \\ z_3 &= 286,85e^{j81,71^\circ} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Относительную погрешность определения Z_3 можно оценить следующим образом

$$\frac{|z_{12} - z_{21}|}{|z_{12} + z_{21}|} = 6,423 \cdot 10^{-3}.$$

Заменяя элементы побочной диагонали матрицы (4.72) откорректированным значением (2.73), получим уточненные значения матрицы A – параметров рассматриваемого дроссель – трансформатора

$$A_{12C_1} = \begin{pmatrix} 0,0299e^{-j2,71^\circ} & 1,464e^{j61,3^\circ} \\ 0,1394e^{-j81,71^\circ} & 39,941e^{-j0,71^\circ} \end{pmatrix}. \quad (4.74)$$

Отклонение значений (4.74) от исходных значений (4.66) по критерию $\delta(A_c)$ составляет величину

$$\delta(A_{12C_1}) = 3,23 \cdot 10^{-3}.$$

Повысить точность аппроксимации A – параметров можно за счет более рационального выбора величины z_m . Проводя оптимизацию при $z_m = 41,1535 + j283,79$ Ом, откорректированные значения A – параметров рассматриваемого дроссель – трансформатора будут равны:

$$A_{12C_2} = \begin{pmatrix} 0,02989e^{-j2,749^\circ} & 1,47226e^{j60,968^\circ} \\ 0,13949e^{-j81,749^\circ} & 39,953e^{-j0,749^\circ} \end{pmatrix},$$

при этом $\delta(A_{12C_2}) = 2,5 \cdot 10^{-3}$.

Сопровитления T – образной схемы замещения для этого варианта коррекции равны:

$$\begin{aligned} z_1 &= 58,077e^{j65,3^\circ} = 24,27 + j52,76 \text{ Ом}, \\ z_2 &= 3,760e^{-j13,7^\circ} = 3,65 - j0,89 \text{ Ом}, \\ z_3 &= 286,76e^{j81,79^\circ} = 41,15 + j283,79 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

4.7. Определение [A] параметров дроссель – трансформаторов с учетом секционирования обмоток

На этапе экспериментального исследования передаточных характеристик дроссель – трансформатора целесообразно использовать систему Z – параметров, а затем расчетным путем получить A – параметры.

Обозначим Z' и A' – матрицы параметров дроссель – трансформатора на релейном конце, а Z'' и A'' – на питающем конце.

Дроссель – трансформатор на приемном конце рельсовой линии (рис. 4.18) может быть представлен эквивалентной схемой, учитывающей собственные и взаимные индуктивности обмоток:

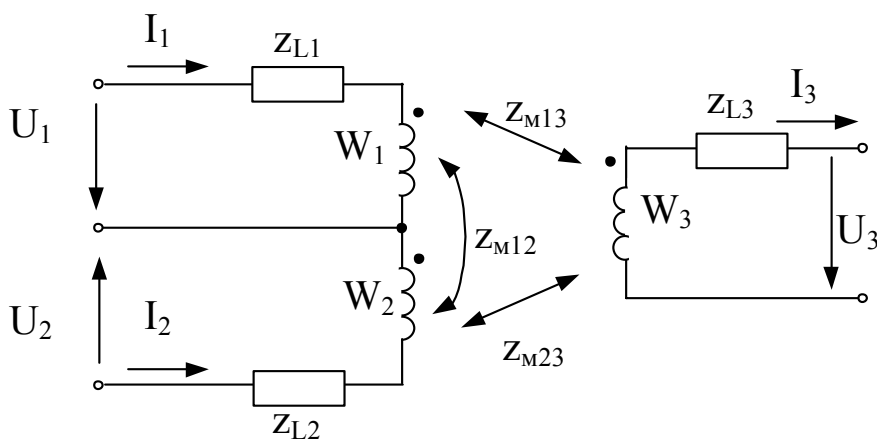


Рис. 4.18. Эквивалентная схема дроссель – трансформатора приемного конца рельсовой линии

Дроссель – трансформатор со средней точкой основной обмотки имеет три пары внешних зажимов и может рассчитываться как (2×3) полюсник, в котором при выбранных направлениях токов и напряжений связь между ними описывается системой уравнений

$$\begin{bmatrix} z_{L1} & z_{M12} & z_{M13} \\ z_{M21} & z_{L2} & z_{M23} \\ z_{M31} & z_{M32} & z_{L3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ -I_2 \\ -I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ -U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}. \quad (4.75)$$

Упорядочив знаки перед обозначениями токов и напряжений, систему (4.75) можно представить в виде

$$Z' \times I = U, \quad (4.76)$$

где

$$Z' = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{L1} & -z_{M12} & -z_{M13} \\ -z_{M21} & z_{L2} & z_{M23} \\ z_{31} & -z_{M32} & -z_{L3} \end{bmatrix}, \quad (4.77)$$

$$I = [I_1, I_2, I_3]^T,$$

$$U = [U_1, U_2, U_3]^T.$$

Для рассматриваемого (2×3) полюсника должны выполняться условия:

$$z_{M12} = z_{M21}, \quad z_{M13} = z_{M31}, \quad z_{M23} = z_{M32}.$$

Из соображений симметрии относительно средней точки основной обмотки можно считать справедливыми следующие соотношения

$$z_{L1} = z_{L2}, \quad z_{M13} = z_{M31}.$$

Однако, в реальных дроссель – трансформаторах представленные условия выполняются приближенно.

Численные значения коэффициентов уравнений передачи дроссель – трансформатора могут быть получены в результате обработки данных измерительного эксперимента как минимум в трех различных его нагрузочных режимах.

Поскольку число неизвестных параметров (2×3) полюсника в общем случае равно девяти, необходимо получить систему из девяти линейно – независимых уравнений

$$A \times X = B, \quad (4.78)$$

где

$$X = [z_{11}, z_{12}, z_{13}, z_{21}, z_{22}, z_{23}, z_{31}, z_{32}, z_{33}]^T, \quad (4.79)$$

$$B = [U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{31}, U_{32}, U_{33}]^T. \quad (4.80)$$

$$A = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{21} & I_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_{12} & I_{22} & I_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_{13} & I_{23} & I_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{11} & I_{21} & I_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{12} & I_{22} & I_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{13} & I_{23} & I_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{11} & I_{21} & I_{31} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{12} & I_{22} & I_{32} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{13} & I_{23} & I_{33} \end{bmatrix}. \quad (4.81)$$

В (4.79) и (4.77) индексы совпадают, а в (4.80) и (4.81) первый индекс соответствует обозначениям рис. 4.18, а второй индекс обозначает номер измерительного эксперимента с соответствующим нагрузочным режимом трансформатора.

Из (4.81) видно, что система (4.78) распадается на три системы третьего порядка, которые могут быть решены независимо друг от друга. Таким образом, значения коэффициентов матрицы (4.77) могут быть найдены построчно как корни следующих систем линейных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами:

$$\begin{bmatrix} I_{11} & I_{21} & I_{31} \\ I_{12} & I_{22} & I_{32} \\ I_{13} & I_{23} & I_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \\ z_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{i1} \\ U_{i2} \\ U_{i3} \end{bmatrix},$$

где i – номер строки в матрице (4.77).

Значения диагональных элементов матрицы Z' могут быть найдены также в режиме холостого хода как входное сопротивление трансформатора для каждой пары зажимов при отсутствии нагрузки на остальных зажимах. Для повышения точности измерений рекомендуется провести серию экспериментов с последующей статистической обработкой результатов.

Эффективным методом экспериментального исследования характеристик дроссель – трансформаторов является использование двух однотипных дроссель – трансформаторов, соединенных основными обмотками через сопротивления Z_1 и Z_2 (рис. 4.19).

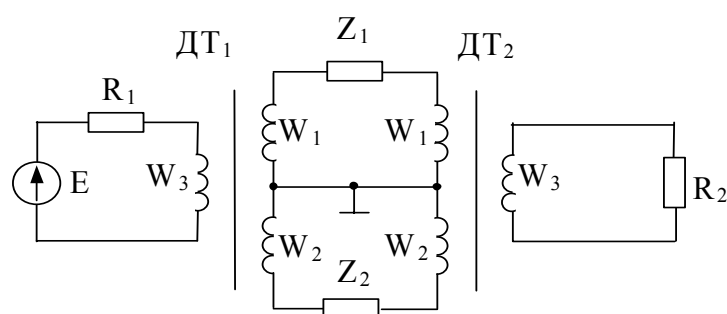


Рис. 4.19. Схема определения коэффициентов уравнений передачи дроссель – трансформатора

В качестве низкоомных калиброванных сопротивлений Z_1 и Z_2 целесообразно использовать дроссели с модулем комплексного сопротивления $|Z| = 0,2 \dots 1$ Ом. Сердечник должен иметь достаточный воздушный зазор для обеспечения стабильности характеристик магнитной

цепи. Для увеличения рассеиваемой активной мощности можно использовать сердечник с повышенными потерями на вихревые токи. Калиброванные ограничительное и нагрузочное сопротивления ($R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 250 \text{ Ом}$) и источник питания E с действующим значением напряжения 160 В должны обладать требуемой стабильностью при токе до 1 А .

Численные значения коэффициентов уравнений передачи дроссель – трансформатора со средней точки приближенно могут быть найдены из матрицы параметров трансформатора без средней точки, приводимые в справочной литературе /3/. Однако эти данные необходимо дополнить значением коэффициента взаимоиндуктивной связи между секциями основной обмотки.

На основании вышеперечисленных условий, коэффициент связи определится соотношением

$$k = \frac{Z_{M12}}{Z_{L1}}. \quad (4.82)$$

Пусть дана матрица дроссель – трансформатора без средней точки на релейном конце

$$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}, \quad \text{причем } z_{12} = z_{21} = z_M.$$

Этой матрице соответствует система (4.83). Для обозначения токов и напряжений (2×2) полюсника будем использовать строчные буквы, а для (2×3) полюсника – прописные.

$$\left. \begin{aligned} z_{11} \times i_1 + z_M \times i_2 &= u_1 \\ z_M \times i_1 + z_{22} \times i_2 &= u_2 \end{aligned} \right\}. \quad (4.83)$$

Используя соотношения связи между токами и напряжением (2×2) полюсника и (2×3) полюсника, получаем

$$\begin{aligned} i_1 &= I_1 = -I_2, \\ i_2 &= -I_3, \\ u_1 &= 2U_1 = -2U_2, \\ u_2 &= U_3, \end{aligned}$$

и, подставляя их в систему (4.76), с учетом вышеприведенных условий, получаем

$$\left. \begin{aligned} (z_{L1} + z_{M12})i_1 + z_{M13}i_2 &= \frac{u_1}{2} \\ 2z_{M13}i_1 + z_{L2} \times i_2 &= u_2 \end{aligned} \right\}. \quad (4.84)$$

Сравнивая коэффициенты левых частей систем (4.83) и (4.84) и, используя соотношение (4.82) получаем

$$\begin{aligned} z_{L1} &= \frac{z_{11}}{2(1+k)}; & z_{M12} &= \frac{kz_{11}}{2(1+k)}; & z_{M13} &= \frac{z_M}{2}; \\ z_{M21} &= \frac{kz_{11}}{2(1+k)}; & z_{L2} &= \frac{z_{11}}{2(1+k)}; & z_{M23} &= \frac{z_M}{2}; \\ z_{M31} &= \frac{z_M}{2}; & z_{M32} &= \frac{z_M}{2}; & z_{L3} &= z_{22}. \end{aligned} \quad (4.85)$$

Подставляя (4.85) в (4.77), получаем

$$Z_1' = \begin{bmatrix} \frac{z_{11}}{2(1+k)} & -\frac{z_{11}k}{2(1+k)} & -\frac{z_M}{2} \\ -\frac{z_{11}k}{2(1+k)} & \frac{z_{11}}{2(1+k)} & \frac{z_M}{2} \\ \frac{z_M}{2} & -\frac{z_M}{2} & -z_{22} \end{bmatrix}. \quad (4.86)$$

В частном случае (при $k = 1$) матрица (4.86) примет вид

$$Z_2' = \begin{bmatrix} \frac{z_{11}}{4} & -\frac{z_{11}}{4} & -\frac{z_M}{2} \\ -\frac{z_{11}}{4} & \frac{z_{11}}{4} & \frac{z_M}{2} \\ \frac{z_M}{2} & -\frac{z_M}{2} & -z_{22} \end{bmatrix}. \quad (4.87)$$

Численные значения Z – параметров дроссель – трансформатора типа ДТ – 02 – 500 со средней точкой при $n = 40$ и $k = 0,99$ получим подстановкой (4.64) в (4.86)

$$Z_1' = \begin{bmatrix} 0,0103 + j0,0528 & -0,0101 - j0,0523 & -0,514 - j3,547 \\ -0,0101 - j0,0523 & 0,0103 + j0,0528 & 0,514 + j3,547 \\ 0,514 + j3,547 & -0,514 - j3,547 & -44,807 - j282,90 \end{bmatrix}.$$

Для ориентировочных расчетов и для отладки программного обеспечения удобно использовать матрицы параметров идеального трансформатора со средней точкой. Коэффициенты этой матрицы выражаются через коэффициент трансформации и входное индуктивное сопротивление одной из обмоток.

Обозначим число витков первой и второй половин основной обмотки W_1 и W_2 , а число витков дополнительной обмотки W_3 (рис. 4.17). Для удобства введем два коэффициента трансформации n и n_1 . Пусть $W = W_1 = W_2$, тогда

$$n = \frac{W_3}{W}; \quad n_1 = \frac{W_3}{W_1 + W_2} = \frac{W_3}{2W} = \frac{n}{2}. \quad (4.88)$$

В идеальном трансформаторе потери отсутствуют, и все коэффициенты взаимной индукции равны единице. Приняв эти допущения, получим

$$Z_{L_k} = j\omega L_k; \quad L_k = W_k^2 G_k; \quad k \in 1, 3, \quad (4.89)$$

где G_k – магнитная проводимость сердечника трансформатора, относительно местоположения k – обмотки

$$E_{Mij} = j\omega M_{ij}; \quad M_{ij} = \sqrt{L_i L_j}; \quad i, j \in 1, 3, \quad (i \neq j).$$

Из (4.77), (4.88) и (4.89), при $G = G_1 = G_2 = G_3$, следует

$$Z'_{3_{\text{ИТ}}} = Z \times \begin{bmatrix} 1 & -1 & -n \\ -1 & 1 & n \\ n & -n & -n^2 \end{bmatrix}, \quad (4.90)$$

где $Z = j\omega W^2 G$.

Из сравнения матриц (4.87) и (4.90) с учетом (4.64) и ранее определенного Z_{10} , следует

$$Z = \frac{Z_{11} - Z_{10}}{4} = \frac{0,04 + j0,21}{4} = 0,01 + j0,0525 = 0,05344e^{j79,2^\circ}.$$

На метрологические характеристики дроссель – трансформатора как звена измерительной цепи в наибольшей степени влияет стабильность магнитной проницаемости материала магнитопровода μ_1 , которая зависит от величины несимметрии тягового тока, температуры и времени эксплуатации. Магнитная проводимость сердечника связана с геометрическими параметрами сердечника соотношением

$$G = \mu_0 S / \left(\frac{\ell_1}{\mu_1} + \delta \right),$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$;

S и ℓ_1 – площадь сечения и приведенная длина магнитопровода;

δ – ширина воздушного зазора.

Вещественная часть магнитной проводимости сердечника (с учетом воздушного зазора) численно равна индуктивности обмотки, состоящей из одного витка. С учетом потерь на гистерезис и вихревые токи ее целесообразно представить в виде комплексной величины:

$$G = \frac{Z}{j\omega W^2} = 3,466 \times 10^{-6} e^{-j10,8^\circ} \text{ Гн.}$$

Дроссель – трансформатор со средней точкой в основной обмотке является (2×3) полюсником и переход к А – параметрам без преобразования структуры матрицы Z – параметров невозможен, поскольку матрица А – параметров существует лишь для (2×2n) полюсников. Представление дроссель – трансформатора в виде (2×4) полюсника удобнее осуществить не на схемном уровне, а путем увеличения размерности матрицы Z – параметров на единицу. Коэффициенты дополнительной строки и столбца матрицы (4.90) могут иметь произвольные значения, однако для упрощения аналитических преобразований при переходе к системе А-параметров желательно использовать значения 0 и 1. Дополнительными условиями являются неравенство нулю определителя системы и минимум разброса собственных чисел матрицы для получения ее хорошей обусловленности.

При этом преследуется цель получения обратимого (2×4) полюсника, поскольку виртуальные переменные U₄ и I₄ имеют локальную область действия и не влияют на параметры результирующего (2×2) полюсника, образованного каскадным соединением рельсовой линии и двух дроссель – трансформаторов со средней точкой.

С учетом этого расширенная матрица Z – параметров идеализированного дроссель – трансформатора на релейном конце рельсовой цепи будет равна

$$Z'_{4\text{ИТ}} = Z \times \begin{bmatrix} 1 & -1 & -n & 0 \\ -1 & 1 & n & 1 \\ n & -n & -n^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.91)$$

Расширенная система линейных алгебраических уравнений (4.76) с учетом матрицы (4.91), имеет вид

$$Z'_{4\text{ИТ}} \times [I_1, I_2, I_3, I_4]^T = [U_1, U_2, U_3, U_4]^T. \quad (4.92)$$

Правую часть системы (4.92) запишем в виде

$$[U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4]^T = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}. \quad (4.93)$$

С учетом (4.93) систему (4.92) можно записать так

$$\begin{bmatrix} z & -z & -nz & 0 \\ -z & z & nz & z \\ nz & -nz & -n^2z & 0 \\ 0 & z & 0 & z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}. \quad (4.94)$$

Матрица A – параметров рассматриваемого (2×4) полюсника может быть получена путем преобразования системы (4.94) к виду, в котором в качестве неизвестных используются компоненты вектора $[U_1, I_1, I_2, U_2]^T$

$$\begin{bmatrix} -1 & z & -z & 0 \\ 0 & -z & z & -1 \\ 0 & nz & -nz & 0 \\ 0 & 0 & z & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \\ I_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & nz & 0 & 0 \\ 0 & -nz & -z & 0 \\ 0 & n^2z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_3 \\ I_3 \\ I_4 \\ U_4 \end{bmatrix}. \quad (4.95)$$

Введем следующие обозначения

$$V = [U_1, I_1, I_2, U_2]^T, \quad (4.96)$$

$$W = [U_3, I_3, I_4, U_4]^T, \quad (4.97)$$

$$P = \begin{bmatrix} -1 & z & -z & 0 \\ 0 & -z & z & -1 \\ 0 & nz & -nz & 0 \\ 0 & 0 & z & 0 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0 & nz & 0 & 0 \\ 0 & -nz & -z & 0 \\ 1 & n^2z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -z & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.98)$$

По определению, матрица A – параметров (2×4) полюсника связывает векторы V и W

$$V = A \times W. \quad (4.99)$$

С учетом обозначения (4.96 – 4.98) соотношение (4.136) примет вид

$$P \times V = Q \times W. \quad (4.100)$$

Подставляя (4.99) в (4.100), получаем

$$P \times A \times W = Q \times W.$$

Отсюда следует

$$P \times A = Q. \quad (4.101)$$

Таким образом, матрицу A – параметров можно найти путем решения системы линейных алгебраических уравнений (4.101)

$$A = P^{-1} \times Q. \quad (4.102)$$

Подставляя матрицы (4.98) в выражение (4.102), получим выражения для коэффициентов матрицы A – параметров идеализированного дроссель – трансформатора на релейном конце

$$A'_{ИТ} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{nz} & n & -1 & \frac{1}{z} \\ 0 & 0 & -1 & \frac{1}{z} \\ -\frac{1}{n} & 0 & z & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.103)$$

Если на питающем и релейном концах рельсовой цепи используются односторонние дроссель – трансформаторы, то матрица A – параметров идеализированного дроссель – трансформатора на питающем конце $A''_{ИТ}$ может быть получена как обратная матрица по отношению к матрице $A'_{ИТ}$ (с учетом смены направлений всех токов на противоположные)

$$A''_{ИТ} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{nz} & n & -1 & -\frac{1}{z} \\ 0 & 0 & -1 & -\frac{1}{z} \\ -\frac{1}{n} & 0 & -z & 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} n & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{nz} & \frac{1}{n} & -\frac{1}{n} & 0 \\ -\frac{1}{z} & 0 & 0 & -\frac{1}{z} \\ 1 & 0 & -z & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.104)$$

Для целей тестирования представляет интерес матрица A – параметров четырехполюсника A_2 , получаемого в результате непосредственного соединения двух дроссель – трансформаторов, что соответствует единичной передаче всех токов и напряжений рельсовой линии

$$A_4 = A''_{ИТ} \times A'_{ИТ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{n^2 z} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2z & -1 \end{bmatrix}.$$

Матрица A_2 является подматрицей матрицы A_4 и получается выделением из нее первых двух строк и столбцов

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2}{n^2 z} & 1 \end{bmatrix}.$$

Из этого следует, что при $Z \rightarrow \infty$ матрица (4.147) становится единичной матрицей, что соответствует неискаженной передаче напряжения и тока на зажимах четырехполюсника.

4.8. Методика определения $[A]$ – параметров дроссель – трансформаторов, учитывающая влияние земляного тракта

На станционных приемо – отправочных путях и стрелочно – путевых секциях средние выводы дроссель – трансформаторов, с целью канализации обратного тягового тока, объединены между собой междупутными перемычками, имеющими относительный контакт с землей. Поэтому в схеме подключения дроссель – трансформатора к рельсовым нитям необходимо предусмотреть эквивалентное сопротивление между средней точкой основной обмотки дроссель – трансформатора и землей.

Схема замещения дроссель – трансформатора с эквивалентным сопротивлением z_0 между средней точкой основной обмотки и землей показана на рис. 4.20. Сопротивление z_0 имеет конечную величину при наличии дроссельных перемычек смежных рельсовых цепей для канализации тягового тока. Ранее было показано, что Т – образная схема замещения трансформатора не всегда обеспечивает достаточную точность. Поэтому рассматриваемая схема содержит сопротивления z_1 и z_2 , с помощью которых можно учесть различие в индивидуальности секций основной обмотки и сопротивления подводящих проводов и контакта с рельсовой линией.

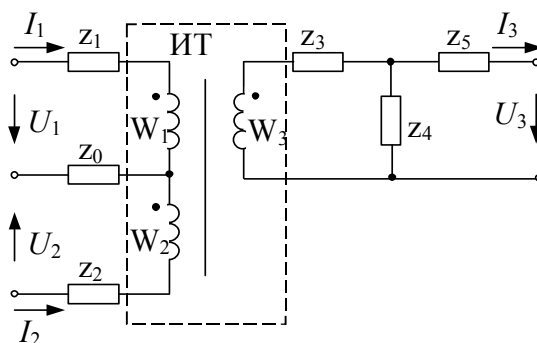


Рис. 4.20. Схема замещения дроссель – трансформатора

Особенностью данной модели является использование характеристик сердечника и возможность определения зависимости матричных параметров трансформатора от магнитной проницаемости материала сердечника и величины воздушного зазора.

Схема содержит идеальный трансформатор ИТ, рассеивание и потери в котором отсутствуют, а магнитная проводимость сердечника конечна и постоянна для магнитного потока, сцепленного с каждой из обмоток. Он имеет двухсекционную основную обмотку с числом витков W_1 и W_2 и дополнительную (повышающую) обмотку с числом витков W_3 , причем $W_1 = W_2 = W_3$.

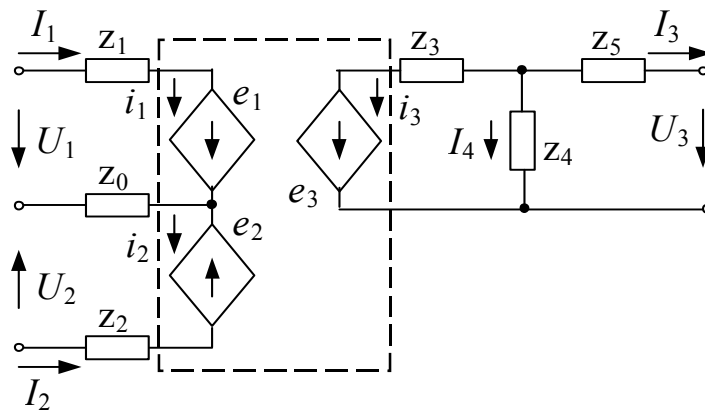


Рис. 4.21. Эквивалентная схема дроссель – трансформатора

Для упрощения последующих выражений введем дополнительный коэффициент трансформации $n = 2n_1$, где $n_1 = \frac{W_3}{2W}$. Токи в обмотках (для их обозначения будем использовать строчные буквы) связаны с токами на зажимах дроссель – трансформаторов I_1, I_2, I_3 соотношениями (рис. 4.21)

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= I_1 \\ i_2 &= -I_2 \\ i_3 &= -I_3 - I_4 \end{aligned} \right\}. \quad (4.105)$$

ЭДС, наводимые в обмотках, представим в виде управляемых системой токов источников напряжения (ИНУТ)

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -z_m(i_1 + i_2 + ni_3) \\ e_2 &= -z_m(i_1 + i_2 + ni_3) \\ e_3 &= -nz_m(i_1 + i_2 + ni_3) \end{aligned} \right\}, \quad (4.106)$$

где $z_m = j\omega GW^2$; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

G – результирующая магнитная проводимость сердечника с учетом воздушного зазора.

На основании второго закона Кирхгофа имеем

$$\left. \begin{aligned} z_1 I_1 + z_0 (I_1 + I_2) &= U_1 + e_1 \\ z_2 I_2 + z_0 (I_1 + I_2) &= U_2 - e_2 \\ -z_5 I_3 + z_3 i_3 &= U_3 + e_3 \\ -z_4 I_4 + z_3 i_3 &= e_3 \end{aligned} \right\} \quad (4.107)$$

Подставляя (4.105) в (4.106) и (4.106) в (4.107), получаем

$$Z_4 \cdot I_4 = U_4,$$

где

$$Z_4 = \begin{bmatrix} z_0 + z_1 + z_m & z_0 - z_m & -nz_m & -nz_m \\ z_0 - z_m & z_0 + z_2 + z_m & nz_m & nz_m \\ nz_m & -nz_m & -(z_3 + z_5 + n^2 z_m) & -(z_3 + n^2 z_m) \\ nz_m & -nz_m & -(z_3 + n^2 z_m) & -(z_3 + z_4 + n^2 z_m) \end{bmatrix}, \quad (4.108)$$

$$I_4 = (I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4)^T; \quad U_4 = (U_1 \ U_2 \ U_3 \ 0)^T.$$

Решив систему относительно вектора $(U_1 \ U_2 \ U_3 \ I_4)$ и выделив коэффициенты при U_1, U_2 и U_3 , получим соотношение

$$Z_3 \cdot I_3 = U_3, \quad (4.109)$$

где $I_3 = (I_1 \ I_2 \ I_3)^T$; $U_3 = (U_1 \ U_2 \ U_3)^T$

$$Z_3 = \begin{bmatrix} z_0 + z_1 + z_m - \frac{n^2 z_m^2}{\Delta} & z_0 - z_m + \frac{n^2 z_m^2}{\Delta} & -nz_m + \frac{nz_m(z_3 + n^2 z_m)}{\Delta} \\ z_0 - z_m + \frac{n^2 z_m^2}{\Delta} & z_0 + z_2 + z_m - \frac{n^2 z_m^2}{\Delta} & nz_m - \frac{nz_m(z_3 + n^2 z_m)}{\Delta} \\ nz_m - \frac{nz_m(z_3 + n^2 z_m)}{\Delta} & -nz_m + \frac{nz_m(z_3 + n^2 z_m)}{\Delta} & -(z_3 + z_5 + n^2 z_m) + \frac{(z_3 + n^2 z_m)^2}{\Delta} \end{bmatrix}, \quad (4.110)$$

где $\Delta = z_3 + z_4 + n^2 z_m$.

Анализ выражений для коэффициентов матрицы (4.110) показывает, что увеличение сопротивления z_0 при наличии дроссельной перемычки со смежной рельсовой цепью приводит к изменению коэффициентов, связанных только с напряжениями и токами в секциях основной обмотки и могут быть легко учтены.

Если положить $z_0 = 0, z_1 = z_2, n = 2n_1 = 2 \cdot 40 = 80$, то на основании (4.110) и матрицы Z'_1 получим

$$z_1 + z_m - \frac{n^2 z_m^2}{z_3 + z_4 + n^2 z_m} = z_{11}, \quad (4.111)$$

$$-z_m + \frac{n^2 z_m^2}{z_3 + z_4 + n^2 z_m} = z_{12}, \quad (4.112)$$

$$-nz_m + \frac{nz_m(z_3 + n^2 z_m)}{z_3 + z_4 + n^2 z_m} = z_{13}, \quad (4.113)$$

$$-(z_3 + z_5 + n^2 z_m) + \frac{(z_3 + n^2 z_m)^2}{z_3 + z_4 + n^2 z_m} = z_{33}. \quad (4.114)$$

Здесь z_{11} , z_{12} , z_{13} и z_{33} – значения коэффициентов, приведенные в матрице Z'_1 . Величина z_1 определяется вычитанием левых частей (4.111) и (4.112)

$$z_1 = z_{11} + z_{12}$$

Величины z_3 и z_4 находятся в результате решения системы линейных алгебраических уравнений второго порядка, полученных из (4.112) и (4.113)

$$\begin{bmatrix} z_m + z_{12} & z_m + z_{12} \\ z_{13} & nz_m + z_{13} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = -n^2 z_m \begin{bmatrix} z_{12} \\ z_{13} \end{bmatrix}.$$

Значение z_5 определяется из (4.114)

$$z_5 = \frac{(z_3 + n^2 z_m)^2}{z_3 + z_4 + n^2 z_m} - z_3 - n^2 z_m - z_{33}. \quad (4.115)$$

Для ориентировочных расчетов, а также для отладки программного обеспечения получим упрощенные соотношения для коэффициентов матрицы (4.110). Полагая в (4.108) $i_4 = 0$, т.е. пренебрегая потерями в сердечнике трансформатора, получим

$$Z = \begin{pmatrix} z_0 + z_1 + z_m & z_0 - z_m & -nz_m \\ z_0 - z_m & z_0 + z_1 + z_m & nz_m \\ nz_m & -nz_m & -z_3 - z_5 - n^2 z_m \end{pmatrix}. \quad (4.116)$$

Матрица Z – параметров трансформатора без потерь и без рассеяния может быть получена, если в соотношениях (2.116) положить $z_0 = z_1 = z_2 = z_3 = z_5 = 0$, при этом

$$Z = z_m \begin{bmatrix} 1 & -1 & -n \\ -1 & 1 & n \\ n & -n & -n^2 \end{bmatrix}. \quad (4.117)$$

Сравнивая матрицу (4.117) с матрицей Z – параметров (4.90), видим, что они идентичны. Это можно рассматривать как элемент тестирования разработанных математических моделей дроссель – трансформатора.

Для предоставления дроссель – трансформатора в виде (2×4) полюсника с целью обеспечения возможности перемножения матриц, описывающих параметры рельсовой линии и устройств согласования на ее концах, необходимо увеличить порядок системы (4.109) на единицу. Для этого введем в матрицу (4.110) дополнительную строку и дополнительный столбец. На схемном уровне это можно отразить созданием дополнительной цепи с параметрами I_4 и U_4 . Значения дополнительных элементов должны быть выбраны так, чтобы полученная матрица была неособенной. Этому условию удовлетворяет матрица

$$Z' = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & 0 \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{00} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & 0 \\ 0 & z_{00} & 0 & z_{00} \end{bmatrix}. \quad (4.118)$$

Здесь, z_{ij} ($i \in 1, 3, j \in 1, 3$) – элементы матрицы (4.110).

z_{00} – виртуальное сопротивление произвольной величины не равное нулю.

Таким образом, дроссель – трансформатор на релейном конце может быть представлен в виде (2×4) полюсника, зависимость между токами и напряжениями у которого описывается системой

$$Z' \times I = U, \quad (4.119)$$

где $I = [I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4]^T$; $U = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4]^T$.

Матрица Z – параметров дроссель – трансформатора на питающем конце Z'' может быть получена из $[Z']$, если произвести в ней замены

$$\begin{aligned} I_1 &\Leftrightarrow -I_3; & I_2 &\Leftrightarrow -I_4; \\ U_1 &\Leftrightarrow U_3; & U_2 &\Leftrightarrow U_4. \end{aligned}$$

В результате получаем

$$Z'' = \begin{bmatrix} -z_{33} & 0 & -z_{31} & -z_{32} \\ 0 & -z_{00} & 0 & -z_{00} \\ -z_{13} & 0 & -z_{11} & -z_{12} \\ -z_{23} & -z_{00} & -z_{21} & -z_{22} \end{bmatrix}. \quad (4.120)$$

Матрицы A – параметров могут быть получены из матриц (4.118) и (4.120) с помощью матричного преобразования (4.102)

$$A' = [P']^{-1} \times Q', \quad (4.121)$$

$$A'' = [P'']^{-1} \times Q''. \quad (4.122)$$

Рассмотрим методику получения матриц P', Q', P'', Q'' на основе элементов матриц Z' и Z'' .

Систему (4.118) для удобства можно записать в следующем символическом виде с использованием обобщенных обозначений элементов матрицы Z

I_1	I_2	I_3	I_4	U_1	U_2	U_3	U_4
z_{11}	z_{12}	z_{13}	z_{14}	1	0	0	0
z_{21}	z_{22}	z_{23}	z_{24}	0	1	0	0
z_{31}	z_{32}	z_{33}	z_{34}	0	0	1	0
z_{41}	z_{42}	z_{43}	z_{44}	0	0	0	1

(4.123)

Произведя перестановку столбцов вместе с обозначениями соответствующих токов или напряжений, получим

U_1	I_1	I_2	U_2	U_3	I_3	I_4	U_4
-1	z_{11}	z_{12}	0	0	$-z_{13}$	$-z_{14}$	0
0	z_{21}	z_{22}	-1	0	$-z_{23}$	$-z_{24}$	0
0	z_{31}	z_{32}	0	1	$-z_{33}$	$-z_{34}$	0
0	z_{41}	z_{42}	0	0	$-z_{43}$	$-z_{44}$	1

(4.124)

Матричная структура (4.124) соответствует соотношению (4.100). Из этих соотношений следует, что

$$P = \begin{bmatrix} -1 & z_{11} & z_{12} & 0 \\ 0 & z_{21} & z_{22} & -1 \\ 0 & z_{31} & z_{32} & 0 \\ 0 & z_{41} & z_{42} & 0 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0 & -z_{13} & -z_{14} & 0 \\ 0 & -z_{23} & -z_{24} & 0 \\ 1 & -z_{33} & -z_{34} & 0 \\ 0 & -z_{43} & -z_{44} & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.125)$$

Применяя матричные структуры (4.125) для (4.118) и (4.120), получаем

$$P' = \begin{bmatrix} -1 & z_{11} & z_{12} & 0 \\ 0 & z_{21} & z_{22} & -1 \\ 0 & z_{31} & z_{32} & 0 \\ 0 & 0 & z_{00} & 0 \end{bmatrix}, \quad Q' = \begin{bmatrix} 0 & -z_{13} & 0 & 0 \\ 0 & -z_{23} & -z_{00} & 0 \\ 1 & -z_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -z_{00} & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.126)$$

$$P'' = \begin{bmatrix} -1 & -z_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -z_{00} & -1 \\ 0 & -z_{13} & 0 & 0 \\ 0 & -z_{23} & -z_{00} & 0 \end{bmatrix}, \quad Q'' = \begin{bmatrix} 0 & z_{31} & z_{32} & 0 \\ 0 & 0 & z_{00} & 0 \\ 1 & z_{11} & z_{12} & 0 \\ 0 & z_{21} & z_{22} & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.127)$$

Подставляя (4.126) в (4.121), получаем:

$$A'_{\text{ДР}} = \begin{bmatrix} \frac{z_{11}}{z_{31}} & z_{13} - \frac{z_{11}}{z_{31}}z_{33} & -z_{12} + \frac{z_{11}}{z_{31}}z_{32} & -z_{12} - \frac{z_{11}z_{32}}{z_{31}z_{00}} \\ \frac{1}{z_{13}} & -\frac{z_{33}}{z_{31}} & \frac{z_{32}}{z_{31}} & -\frac{z_{32}}{z_{31}z_{00}} \\ 0 & 0 & -1 & \frac{1}{z_{00}} \\ \frac{z_{21}}{z_{31}} & z_{23} - \frac{z_{21}}{z_{31}}z_{33} & z_0 - z_{22} + \frac{z_{21}}{z_{31}}z_{32} & z_{22} - \frac{z_{21}z_{32}}{z_{31}z_{00}} \end{bmatrix}. \quad (4.128)$$

Подставляя (4.127) в (4.122), получаем

$$A''_{\text{ДП}} = \begin{bmatrix} \frac{z_{33}}{z_{13}} & -z_{31} + \frac{z_{11}}{z_{13}}z_{33} & -z_{32} + \frac{z_{12}}{z_{13}}z_{33} & 0 \\ -\frac{1}{z_{13}} & -\frac{z_{11}}{z_{13}} & -\frac{z_{12}}{z_{13}} & 0 \\ \frac{z_{23}}{z_{13}z_{00}} & -z_{21} + \frac{z_{11}z_{23}}{z_{00}z_{13}} & -z_{22} + \frac{z_{12}z_{23}}{z_{00}z_{13}} & -\frac{1}{z_{00}} \\ -\frac{z_{23}}{z_{13}} & z_{21} - \frac{z_{11}}{z_{13}}z_{23} & -z_{00} + z_{22} - \frac{z_{12}}{z_{13}}z_{23} & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.129)$$

Подставляя в (4.128) и (4.29) численные значения, приведенные в матрице Z'_1 и полагая $z_{00} = 10 \text{ Ом}$, получаем следующие значения для матриц A – параметров дроссель – трансформаторов типа ДТ – 02 – 500 ($n_1 = 40$, $n = 80$, $f = 50 \text{ Гц}$) на релейном и питающем концах рельсовой линии

$$A' = \begin{bmatrix} 0,0151 - j0,00083 & 0,3962 + j0,6829 & -0,0005 - j0,00052 & (1+j)5 \cdot 10^4 \\ 0,04003 - j0,2761 & 79,90 + j1,046 & -1 & 0,1 \\ 0 & 0 & -1 & 0,1 \\ -0,0149 + j0,00071 & -0,3555 - j0,6419 & 9,9955 - j0,00052 & (1+j)5 \cdot 10^4 \end{bmatrix}, \quad (4.130)$$

$$A'' = \begin{bmatrix} 79,90 + j1,046 & 0,3962 + j0,6829 & -0,35553 - j0,6419 & 0 \\ 0,0400 - j0,2761 & 0,0151 - j0,008 & -0,0149 + j0,0007 & 0 \\ -0,1 & -0,0005 - j0,0005 & -0,0005 - j0,0005 & -0,1 \\ 1 & 0,0005 + j0,000529 & -9,995 + j0,00052 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.131)$$

Вопросы и упражнения для самопроверки

1. Какие преимущества многополюсной схемы замещения РЛ перед четырехполюсной?
2. Какие особенности определения обобщенной матрицы многополюсника рельсовой линии в нормальном режиме?
3. Какие особенности определения обобщенной матрицы многополюсника рельсовой линии в шунтовом режиме?
4. Какие особенности определения обобщенной матрицы многополюсника рельсовой линии в контрольном режиме?
5. Как учитываются взаимные влияния смежных рельсовых цепей?
6. Определить численные значения матрицы $[A]_0^N$ при длине рельсовой линии 2.6 км, $f_{cm} = 50$ Гц.
7. Определить численные значения матрицы $[A_S]$ при длине распределенного участка с шунтом $l_{ш}$ (задается преподавателем), $f_{cm} = 50$ Гц.
8. Определить численные значения матрицы $[A]_K$ при длине распределенного участка с обрывом l_0 (задается преподавателем), $f_{cm} = 50$ Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математическое моделирование рельсовых линий – важная составляющая часть анализа существующих и синтеза перспективных классификаторов состояний рельсовых линий. В связи дальнейшим совершенствованием алгоритмов классификации состояний рельсовых линий, происходит непрерывное развитие теории распространения сигналов по рельсовой линии, так и разработки новых видов решающих устройств классификаторов.

Чувствительным элементом первичного датчика состояний участков пути являются рельсовые линии, и от того, какой схемой они замещаются при анализе и синтезе рельсовых цепей, существенно зависят результаты. Аналитические методы расчета, используемые в настоящее время, с двухпроводной схемой замещения рельсовой линии дают удовлетворительные результаты в нормальном и шунтовом режимах, но не могут обеспечить требуемой точности в контрольном режиме. В работе для учета сопротивления земляного тракта, рельсовая линия представлена в виде многополюсной схемы.

Такая схема замещения позволяет учитывать токи протекающие по земляному тракту при наличии неоднородности в рельсовой линии и создавать математические модели, адекватные физическим моделям.

Значения, полученные в курсе математического моделирования рельсовых цепей с распределенными параметрами рельсовых линий, позволяет студентам в дальнейшей работе грамотно эксплуатировать системы интервального регулирования движением поездов. Задачей настоящего пособия является помощь студентам в освоении этих знаний.

Нормативные значения удельного сопротивления рельсовой линии

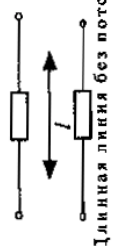
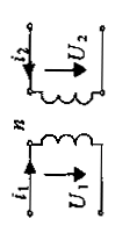
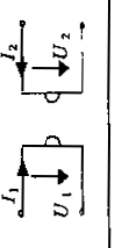
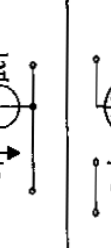
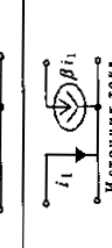
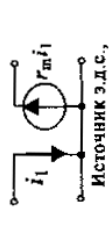

	Удельное сопротивление Z , Ом/км при частоте сигнального тока f , Гц			
	0	25	50	75
Стальные приварные	0,1 – 0,2	$0,55e^{j50^0}$	$0,85e^{j60^0}$	–
Медные приварные и косые (одноточные РЦ)	–	$0,50e^{j52^0}$	$0,80e^{j65^0}$	–
Медные приварные (двухточные РЦ)	–	$0,50e^{j52^0}$	$0,80e^{j65^0}$	$1,07e^{j68^0}$

	Удельное сопротивление Z , Ом/км при частоте сигнального тока f , Гц				
	125	175	225	275	325
Стальные приварные	–	–	–	–	–
Медные приварные и косые (одноточные РЦ)	–	–	–	–	–
Медные приварные (двухточные РЦ)	$1,53e^{j70^0}$	$1,97e^{j72^0}$	$2,53e^{j75^0}$	$3,19e^{j77^0}$	$3,74e^{j78^0}$

Приложение 2

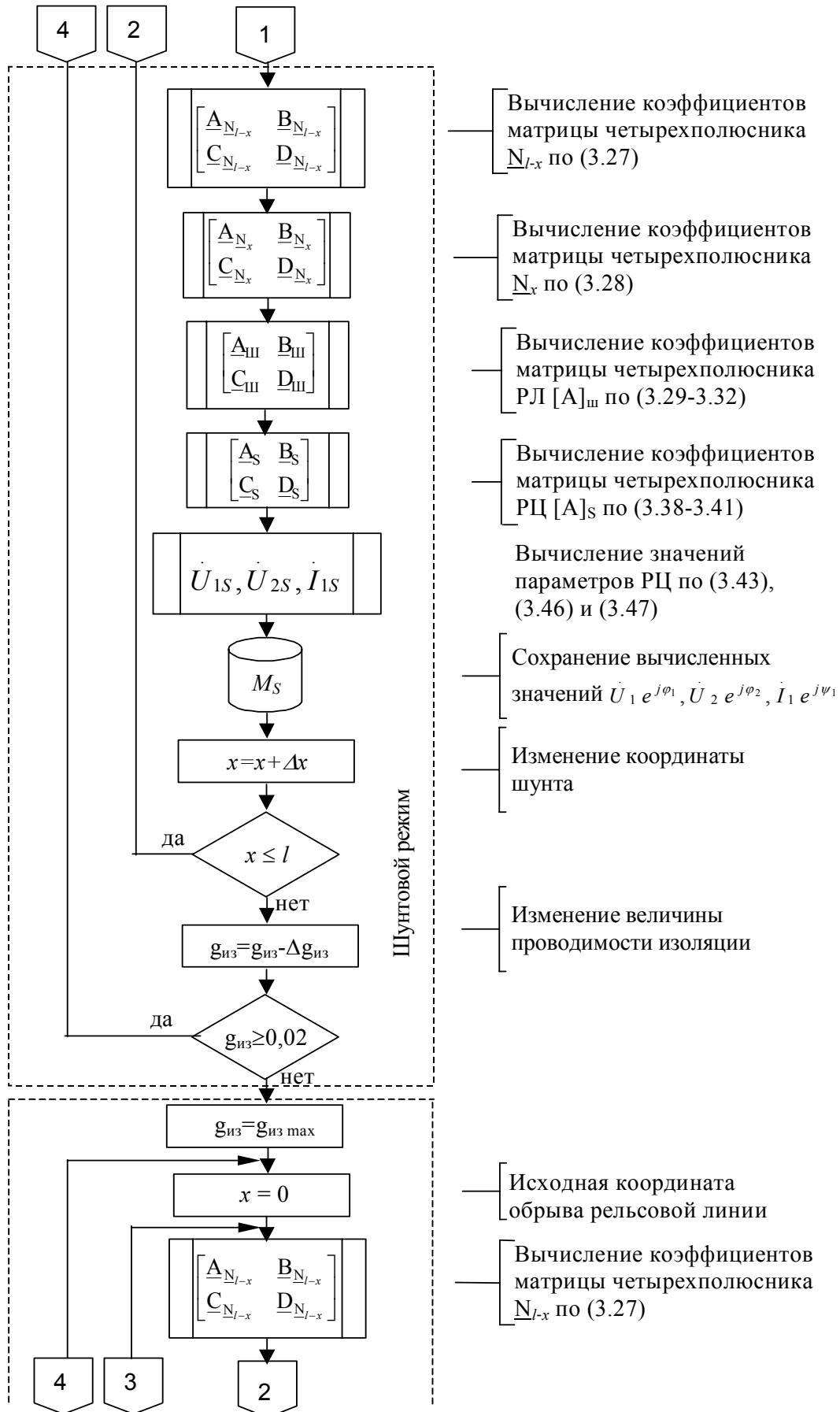
Вид схемы	Матрицы параметров					
	Z	Y	A	B	H	G
<p>Не существует</p>	$\begin{matrix} Y & -Y \\ -Y & Y \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} Z & 1 \\ -1 & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 & -1 \\ 1 & Z \end{matrix}$	
<p>Не существует</p>	<p>Не существует</p>	$\begin{matrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 & 1 \\ -1 & Y \end{matrix}$	$\begin{matrix} Y & -1 \\ 1 & 0 \end{matrix}$	
<p>Не существует</p>	$\begin{matrix} \frac{Y_1(Y_2+Y_3)}{\Sigma Y} & -\frac{Y_1 Y_2}{\Sigma Y} \\ -\frac{Y_1 Y_2}{\Sigma Y} & \frac{Y_2(Y_1+Y_3)}{\Sigma Y} \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_3} & \frac{Z_1 Z_2}{Z_3} \\ \frac{1}{Z_3} & 1 + \frac{Z_2}{Z_3} \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 + \frac{Z_2}{Z_3} & \frac{Z_1 Z_2}{Z_3} \\ \frac{1}{Z_3} & 1 + \frac{Z_1}{Z_3} \end{matrix}$	$\begin{matrix} Z_1 + \frac{1}{Y_2 + Y_3} & \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \\ -\frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} & \frac{1}{Z_2 + Z_3} \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 & \frac{Z_3}{Z_1 + Z_2} \\ -\frac{Z_3}{Z_1 + Z_2} & \frac{\Sigma Y}{Y_2(Y_1 + Y_3)} \end{matrix}$	
<p>Не существует</p>	$\begin{matrix} Y_1 + Y_3 & -Y_3 \\ -Y_3 & Y_2 + Y_3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 + \frac{Y_2}{Y_3} & \frac{1}{Y_3} \\ Y_1 + Y_2 + \frac{Y_1 Y_2}{Y_3} & 1 + \frac{Y_2}{Y_3} \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 + \frac{Y_1}{Y_3} & \frac{1}{Y_3} \\ Y_1 + Y_2 + \frac{Y_1 Y_2}{Y_3} & 1 + \frac{Y_2}{Y_3} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{1}{Y_1 + Y_3} & \frac{Y_3}{Y_1 + Y_3} \\ -\frac{Y_3}{Y_1 + Y_3} & \frac{1}{Y_1 + Y_3} \end{matrix}$	$\begin{matrix} Y_1 + \frac{1}{Z_2 + Z_3} & \frac{-Y_3}{Y_2 + Y_3} \\ \frac{Y_3}{Y_2 + Y_3} & \frac{1}{Y_2 + Y_3} \end{matrix}$	
<p>Не существует</p>	$\begin{matrix} \frac{Y_a + Y_b}{2} & \frac{Z_b - Y_a}{2} \\ \frac{Y_b - Y_a}{2} & \frac{Y_a + Y_b}{2} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{Z_a + Z_b}{Z_b - Z_a} & \frac{2Z_a Z_b}{Z_b - Z_a} \\ \frac{Z_b - Z_a}{2} & \frac{Z_a + Z_b}{Z_b - Z_a} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{Z_a + Z_b}{Z_b - Z_a} & \frac{2Z_a Z_b}{Z_b - Z_a} \\ \frac{Z_b - Z_a}{2} & \frac{Z_a + Z_b}{Z_b - Z_a} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{Z_a Z_b}{Z_a + Z_b} & \frac{Z_b - Z_a}{Z_a + Z_b} \\ \frac{Z_b - Z_a}{Z_a + Z_b} & \frac{Z_a - Z_b}{Z_a + Z_b} \end{matrix}$	$\begin{matrix} 2 & \frac{Z_a \cdot Z_b}{Z_a + Z_b} \\ \frac{Z_a + Z_b}{Z_b - Z_a} & \frac{2Z_a Z_b}{Z_a + Z_b} \\ \frac{Z_a + Z_b}{Z_b - Z_a} & \frac{Z_a + Z_b}{Z_a + Z_b} \end{matrix}$	
<p>Не существует</p>	$\begin{matrix} \frac{cthy}{Z_0} & -\frac{cschy}{Z_0} \\ \frac{Z_0}{Z_0} & \frac{cthy}{Z_0} \\ -\frac{cschy}{Z_0} & \frac{Z_0}{Z_0} \end{matrix}$	$\begin{matrix} ch\lambda & Z_0 sh\lambda \\ sh\lambda & sh\lambda \end{matrix}$	$\begin{matrix} ch\lambda & Z_0 sh\lambda \\ sh\lambda & ch\lambda \end{matrix}$	$\begin{matrix} Z_0 th\lambda & sech\lambda \\ -sech\lambda & \frac{th\lambda}{Z_0} \end{matrix}$	$\begin{matrix} th\lambda & -sech\lambda \\ sech\lambda & Z_0 th\lambda \end{matrix}$	

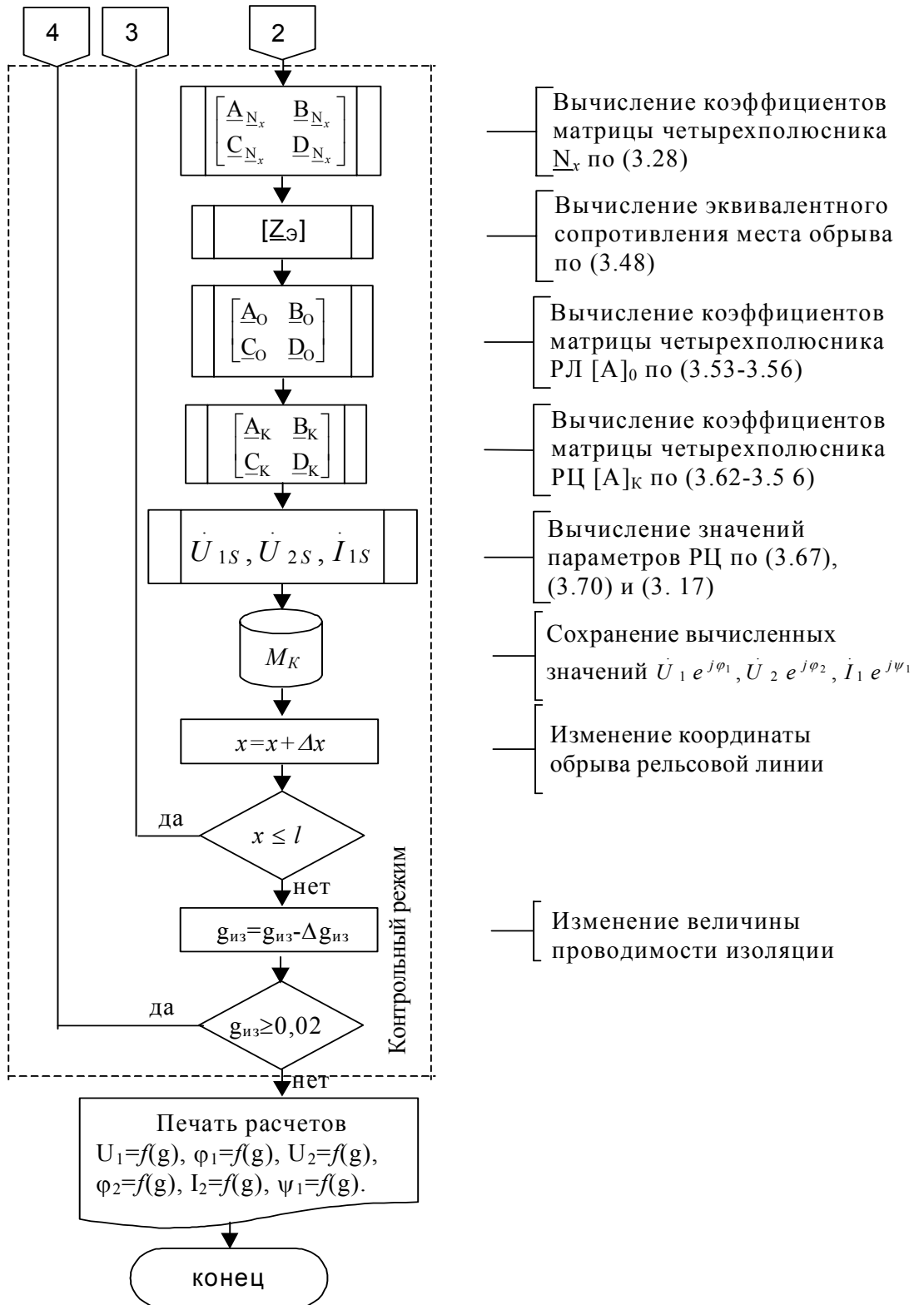
Продолжение приложения 2

Вид схемы	Матрицы параметров					
	Z	Y	A	B	H	G
 <p>Линия без потерь</p>	$\begin{matrix} -jZ_0 \operatorname{ctg} \beta l & -jZ_0 \operatorname{csc} \beta l \\ -jZ_0 \operatorname{csc} \beta l & -jZ_0 \operatorname{ctg} \beta l \end{matrix}$	$\begin{matrix} -j \operatorname{ctg} \beta l / Z_0 & j \operatorname{csc} \beta l / Z_0 \\ j \operatorname{csc} \beta l / Z_0 & -j \operatorname{ctg} \beta l / Z_0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \cos \beta l & jZ_0 \sin \beta l \\ j \sin \beta l / Z_0 & \cos \beta l \end{matrix}$	$\begin{matrix} \cos \beta l & jZ_0 \sin \beta l \\ j \sin \beta l / Z_0 & \cos \beta l \end{matrix}$	$\begin{matrix} jZ_0 \operatorname{tg} \beta l & \operatorname{sec} \beta l \\ -\operatorname{sec} \beta l & j \operatorname{tg} \beta l / Z_0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} j \operatorname{tg} \beta l & -\operatorname{sec} \beta l \\ \operatorname{sec} \beta l & jZ_0 \operatorname{tg} \beta l \end{matrix}$
	Не существует	Не существует	$\begin{matrix} n & 0 \\ 0 & 1/n \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1/n & 0 \\ 0 & n \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 & n \\ -n & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 & -1/n \\ 1/n & 0 \end{matrix}$
	$\begin{matrix} 0 & -a \\ a & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 & 1/a \\ -1/a & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 & a \\ 1/a & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 & a \\ 1/a & 0 \end{matrix}$	Не существует	Не существует
	Не существует	Не существует	$\begin{matrix} 1/\mu & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix}$	Не существует	То же	$\begin{matrix} 0 & 0 \\ \mu & 0 \end{matrix}$
	То же	$\begin{matrix} 0 & 0 \\ g_m & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 & -1/g_m \\ 0 & 0 \end{matrix}$	То же	Не существует	Не существует
 <p>Источник тока, управляемый током</p>	Не существует	Не существует	$\begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/r_m \end{matrix}$	Не существует	$\begin{matrix} 0 & 0 \\ \beta & 0 \end{matrix}$	Не существует
 <p>Источник э.д.с., управляемый током</p>	$\begin{matrix} 0 & 0 \\ r_m & 0 \end{matrix}$	То же	$\begin{matrix} 0 & 0 \\ 1/r_m & 0 \end{matrix}$	То же	Не существует	То же



Блок – схема программы моделирования рельсовых цепей четырехполюсной схемой замещения рельсовой линии





БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фидлер Дж. К., Найтингейл К. Машинное проектирование электронных схем: Пер. с англ. -М.: Высшая школа, 1985.-216 с.
2. Алексеев О.В., Головьев А.А., Пивоваров И.Ю. и др. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: Учебное пособие для вузов/Под ред. Алексеева О.В. -М.: Высшая школа, 2000.-479 с.
3. Аркатов В.С., Котляренко Н.Ф., Баженов А.И. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: Справочник. -М.: Транспорт, 1982.-360 с.
4. Брылеев А.М., Кравцов Ю.А., Шишляков А.В. Теория, устройство и работа рельсовых цепей. -М.: Транспорт, 1978.-344 с.
5. Аркатов В.С., Кравцов Ю.А., Степенский Б.М. Рельсовые цепи. Анализ и техническое обслуживание. -М.: Транспорт, 1990.-295 с.
6. Леушин В.Б. Особенности структур рельсовых цепей автоблокировки. Учебное пособие. -Самара: СамИИТ, 1999.-96 с.
7. Дмитриев В.С., Минин В.А. Новые системы автоблокировки. -М.: Транспорт, 1981.-247 с.
8. Беляков И.В., Леушин В.Б. Анализ параметров дестабилизирующих факторов в системах контроля состояния рельсовых линий// За технический прогресс на железных дорогах: Тез. докл., Ч.2./ Материалы межвузовской с международным участием научно – практической конференции, посвященной 20-летию института. – Самара.-1993.- с. 59 - 60.
9. Лисенков В.М. Теория автоматических систем интервального регулирования. -М.: Транспорт, 1987.-150 с.
10. Тарасов Е.М. Инвариантные системы контроля состояний рельсовых линий. -Самара: Изд. СамГАПС, 2002.-134 с.
11. А/с SU №1794763 Способ контроля свободного состояния рельсовой линии/ Омский институт инженеров ж.-д. транспорта; Брылеев А.М., Лисин С.Л., Пиманов Е.П., Тарасов Е.М.. Опубликовано Б.И. 1993г., №6, МКИ В61L23/16.
12. Патент РФ № 2173276 Способ контроля состояния рельсовой линии/Самарский институт инженеров железнодорожного транспорта; Тарасов Е.М., Белоногов А.С. - заявлено 31.05.1999, №99111187/28; Опубликовано 10.09.2001 Бюл.№25, МКИ В61L 23/16.
13. Патент РФ № 2173277 Рельсовая цепь/ Самарский институт инженеров железнодорожного транспорта; Тарасов Е.М., Белоногов А.С., Куров М.Б. – заявлено 31.05.1999, № 99111433/28; Опубликовано 10.09.2001 Бюл.№25, МКИ В61L 23/16.
14. Свидетельство об официальной регистрации интеллектуального продукта в ВНТИЦ № 73200100154. Способ классификации состояния рельсовой линии при пониженном сопротивлении изоляции/ Тарасов Е.М., Белоногов А.С., Коняшин В.А., Тарасова Е.В. Зарегистрировано 15.08.2001г./М.:ВНТИЦ, 2001г.

15. Тарасов Е.М., Пиманов Е.П. Параметрический синтез рельсовых цепей с обучаемыми классификаторами состояния/Межвузовский сборник научных трудов. Самара, СамИИТ, 1995 г., 31-35 с.
16. А.С. 1794752 (СССР) Рельсовая цепь. Пиманов Е.П., Тарасов Е.М., Брылеев А.М., Лисин С.Л., Герасимов С.В. – заявлено 23.11.1989, № 4762346.
17. Шишляков А.В., Кравцов Ю.А., Михайлов А.Ф. Эксплуатационная надежность устройств автоблокировки и АЛС. -М.: Транспорт, 1969.-96 с.
18. Лекута Г.Ф. Задачи общие и ответственные // Автоматика, телемеханика и связь. -1986. -№ 3. -С. 34 – 35.
19. Углик А., Надворник Б. Способы решения рельсовых цепей для участков с пониженным сопротивлением балласта. -Бюллетень ОСЖД. Варшава, № 3, 1982, С. 9 – 12.
20. Тарасов Е.М. Выбор эталонов классов при синтеза классификатора систем распознавания// Сб. исследования и разработка ресурсосберегающих технологий на ж.д. транспорте, -Самара, 1999.
21. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. 3-е изд. -Л.: Энергоиздат, 1981. Т.1, 533 с., Т2, 415 с.
22. Теория основы электротехники/ Под ред. проф. Ионкина П.А. -М.: Высшая школа, 1976. Т1, 559 с., Т2, 383 с.
23. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. 8-е изд. -М.: Высшая школа, 1984. Т1, 559 с., Т2, 231 с.
24. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники, линейные электрические цепи. 5-е изд. -М.: Энергия, 1978.-591 с.
25. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. -М.: Энерготомиздат, 1990.-248 с.
26. Александрова М.Г. и др. Расчет электрических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ Под ред. Данилова П.В. и Филиппова Е.С. -М., Радио и связь, 1983.-344 с.
27. Тарлецкий Я.П., Рыбаков Ю.П. Электродинамика. -М.: Высшая школа. 1990. – 352 с.

План 2003г.

Учебное издание

ТАРАСОВ Евгений Михайлович

**Математическое моделирование рельсовых цепей
с распределенными параметрами рельсовых линий**

Учебное пособие

Под редакцией автора

Технический редактор: Шими́на И.А.
Компьютерная верстка: Чертыковцева Н.В.

Подписано в печать 30.12.2003г. Формат 60 x 90 1/16.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Усл. п.л. 7,4. Уч. изд. л. 5,1.
Тираж 100 экз. Заказ № 195.

Отпечатано в Самарской государственной академии путей сообщения
г. Самара, ул. Заводское шоссе, 18