

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**

Одобрено кафедрой  
«Железнодорожная автоматика,  
телемеханика и связь»

**ТЕОРИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Задание на курсовой проект  
с методическими указаниями  
для студентов IV курса

*по специальности: 190901.65. Системы обеспечения движения поездов*

*Профиль/специализация: «Автоматика и телемеханика (СА)»,*

*«Телекоммуникационные системы и сети железнодорожного транспорта» (СТ),*

*«Электроснабжение железных дорог (СЭ)»*

**РОАТ**

**Москва - 2014**

С о с т а в и т е л и: канд. техн. наук, проф. Ю.Г. Боровков,  
канд. техн. наук, доц. И.А. Журавлев.

## **КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

### **«Синтез линейных электрических цепей систем железнодорожной автоматики и телемеханики»**

#### **ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ**

Для успешного выполнения курсового проекта студент должен иметь представление об основных задачах и функциях систем железнодорожной автоматики и телемеханики, особенностях построения и этапах синтеза электрических рельсовых цепей.

Прежде, чем приступить к выполнению курсового проекта, студент должен изучить основные разделы теории линейных электрических цепей с целью закрепления лекционного материала и накопления теоретических знаний для успешного решения поставленных задач в области расчета линейных электрических цепей систем железнодорожной автоматики и телемеханики.

Цель курсового проекта – дать навыки практического применения полученных в процессе обучения знаний для решения конкретных задач, возникающих при проектировании электрических рельсовых цепей.

Необходимые чертежи и графики выполняются с применением современных компьютерных технологий и представляются на белой бумаге стандартных размеров 297x210 мм. Пояснительная записка набирается в электронном виде и после проверки и форматирования выдается на печать с нумерацией страниц, как текста, так и графического материала. Исправления по замечаниям делаются либо на чистой стороне листа рядом с замечаниями рецензента, которые нельзя удалять, либо исправления делаются в электронном виде на отдельной странице и сопровождаются надписью «Работа над ошибками».

Курсовой проект содержит задание, состоящее из нескольких взаимосвязанных задач. Пояснительная записка должна содержать условия и исходные данные к проекту в целом согласно своему варианту. Ход решения поставленных задач должен сопровождаться краткими пояснениями с приложением необходимых графиков или таблиц с расчетными данными. Под

графиками должно стоять конкретное его наименование, оси координат должны быть промасштабированы и обозначены с указанием принятой размерности функции и аргумента. Приводимые формулы должны быть разборчивыми для чтения и пронумерованы. Сокращения слов в тексте, кроме общепринятых, не допускается. Также не допускается ксерокопирование текста, выполненных графиков и рисунков, кроме тех, которые приводятся в качестве исходных данных к проекту.

В конце пояснительной записки рекомендуется приводить список использованной литературы.

## **ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

Произвести синтез линейной электрической рельсовой цепи по условиям выполнения нормального и шунтового режимов работы с учетом воздействия наиболее неблагоприятных внешних факторов.

Как правило исходными данными при синтезе рельсовой цепи являются первичные параметры двухпроводной симметричной рельсовой линии: удельное сопротивление изоляции -  $r_{и}$ , Ом\*км и ее полное удельное сопротивление  $Z_{п}$ , Ом/км, которое зависит как от частоты сигнального тока  $f_c$  в рельсах, так и от их типа (типоразмера).

В свою очередь, частота сигнального тока зависит от рода тяги, способа кодирования информационных сообщений и особенностей защиты передаваемых сообщений. В связи с вышесказанным, выполнение проекта разбивается на несколько промежуточных этапов:

- 1.1 Определение полного удельного сопротивления двухпроводной рельсовой линии.
- 1.2 Определение вторичных параметров рельсовой линии.
- 1.3 Расчет и построение графика зависимости от длины рельсовой цепи модуля максимального сопротивления передачи  $Z_{по макс}$  основной схемы

замещения электрической рельсовой цепи в нормальном режиме для разных сопротивлений по концам рельсовой линии.

1.4 Расчет и построение графика зависимости от длины рельсовой цепи минимального сопротивления передачи  $Z_{\text{пош мин}}$  основной схемы замещения электрической рельсовой цепи в шунтовом режиме для разных сопротивлений по концам рельсовой линии.

1.5 Определение максимальной длины рельсовой цепи и величин сопротивлений по концам рельсовой цепи по условиям выполнения нормального и шунтового режимов.

Исходные данные к пункту 1.1 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета удельного активного сопротивления  $r_a$  рельсовой линии и удельного полного индуктивного сопротивления  $L_{\text{п}}$ .

Исходные данные	Варианты заданий, выбираемых по последней цифре шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_c$ – частота сигнального тока, Гц.	25	50	75	125	175	225	275	325	420	480
Тип рельса	P50	P65	P65	P50	P50	P65	P50	P65	P50	P65
$S$ – площадь поперечного сечения рельса, см <sup>2</sup>	64,5	82,9	82,9	64,5	64,5	82,9	64,5	82,9	64,5	82,9
$u$ – периметр поперечного сечения рельса, см.	62	70	70	62	62	70	62	70	62	70
$b$ = эквивалентный радиус круга с длиной окружности, равной периметру $u$ , см.	9,9	11,1	11,1	9,9	9,9	11,1	9,9	11,1	9,9	11,1

В таблице 2 приведены значения некоторых констант, которые будут использованы в процессе выполнения пунктов задания 1.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета максимальной длины рельсовой линии  $l_0$  и оптимальных сопротивлений  $Z_{вхо}$  по концам рельсовой линии.

$\rho$ – удельное сопротивление рельсовой стали, Ом·мм <sup>2</sup> /м	$a$ – расстояние между осями рельсовых нитей, см.	$\mu_0$ – магнитная проницаемость воздуха, Гн/м	$\mu_{ст}$ – относительная магнитная проницаемость рельсовой стали	$k_{н}$ – коэффициент неустойчивости источника питания рельсовой цепи	$k_3$ – коэффициент запаса по срабатыванию путевого реле.	$k_{вн}$ – коэффициент надежного возврата путевого реле.
0,21	160	$4\pi \cdot 10^{-7}$	100	1,05	1,1	0,4

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

### *Общие сведения по теории рельсовых цепей*

Рельсовые цепи являются основным элементом железнодорожной автоматики и телемеханики, действие которого заложено в устройство практически всех автоматических и телемеханических систем регулирования движения поездов и в значительной степени определяет надежность работы устройств и безопасность движения поездов.

Рельсовая цепь представляет собой электрическую цепь, в которой имеются источник питания и нагрузка (реле), а проводниками электрического тока являются рельсовые нити железнодорожного пути. Электрическая схема простейшей РЦ (рисунок 1) состоит из питающего конца, рельсовой линии и релейного конца.

На питающем конце РЦ устанавливают аккумулятор 2, работающий в буферном режиме с выпрямителем 1 типа ВАК, или путевой трансформатор ПТ.

Питание поступает в рельсовую линию через резистор  $R_0$ , который обеспечивает шунтовой режим работы РЦ.

Рельсовая линия имеет две рельсовые нити 7, которые состоят из отдельных рельсовых звеньев, соединенных между собой токопроводящими стыковыми соединителями 8 для уменьшения электрического сопротивления рельсовых нитей. В зависимости от рода тяги на участке и способа крепления к рельсу стыковые соединители

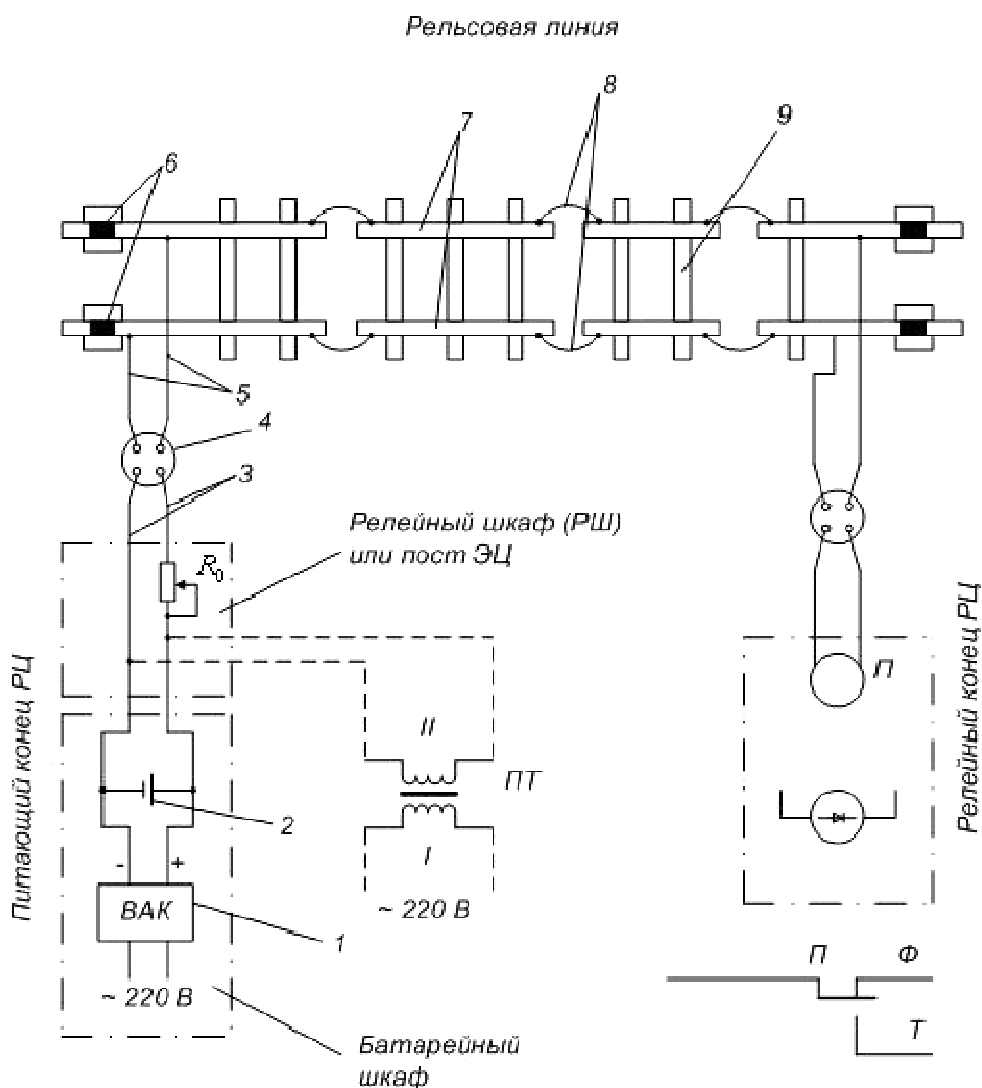


Рисунок 1 – Схема рельсовой цепи.

бывают трех типов. На участках с автономной тягой применяют стальные штепсельные или приварные соединители. На электрифицированных участках

используют медные приварные соединители. Рельсовые нити изолированы друг от друга деревянными или железобетонными шпалами 9.

Рельсовые линии смежных РЦ электрически разделяют друг от друга с помощью изолирующих стыков 6 с металлическими накладками или с помощью клеболтовых стыков. Изолирующие стыки должны обеспечивать надежную электрическую изоляцию и механическую прочность верхнего строения пути.

На электрифицированных участках у изолирующих стыков в рельсовой линии устанавливают дроссели-трансформаторы которые обеспечивают пропуск тягового тока по рельсовым нитям в обход изолирующих стыков. На релейном конце (рисунок 1) сигнальный ток из рельсовой линии принимает путевое реле П, которое фиксирует состояние РЦ (занятое или свободное) и передает эту информацию для работы различных устройств автоматики и телемеханики. Аппаратура питающего и релейного концов, расположенная в релейном шкафу или на посту ЭЦ, кабелем 3 через кабельную стойку 4 или путевую коробку, установленную вблизи пути и тросовую перемычку 5 подключается к рельсовым нитям пути.

Принцип работы РЦ заключается в том, что значение тока, поступающего от источника питания к путевому реле через рельсовую линию, зависит от состояния участка пути. При свободном участке (нормальный режим) сигнальный ток от источника питания по рельсовым нитям протекает в обмотку путевого реле П, отчего реле возбуждается и притягивает якорь, замыкая фронтальные контакты ( $\Phi$ ) и фиксируя свободу и исправность РЦ. Возбужденное состояние реле П продолжается до момента вступления на рельсы подвижного состава или разрыва рельсовой нити пути вследствие изъятия или излома рельса, обрыва стыкового соединителя или другого повреждения.

При занятии путевого участка подвижным составом (шунтовой режим) происходит шунтирование рельсовых нитей малым электрическим сопротивлением скатов поезда. Сигнальный ток в обмотке путевого реле намного больше сопротивления скатов поезда. Путевое реле отпускает якорь, размыкает



фронтные ( $\Phi$ ) и замыкает тыловые ( $T$ ) контакты, чем и осуществляет контроль занятости РЦ поездом.

Таким образом, РЦ предназначены для непрерывного контроля свободности или занятости путевых изолированных участков на станциях и перегонах, электрической целостности рельсовых нитей, связи движущегося поезда с путевыми и локомотивными светофорами, возвращения тягового тока обратно на подстанцию, а также для исключения перевода стрелок под подвижным составом. Так как РЦ обеспечивают контроль целостности рельсовой нити, они являются надежным и эффективным средством повышения безопасности движения поездов на перегонах и станциях.

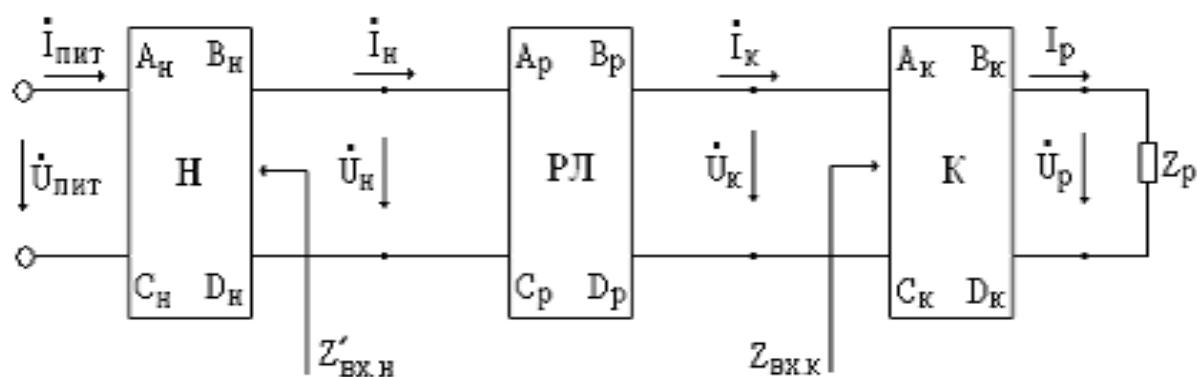


Рисунок 2 – Общая схема замещения рельсовой цепи

Общая схема замещения р.ц. в каждом из режимов, кроме режимов АЛС и короткого замыкания, имеет один и тот же вид. Отличие лишь в обозначении коэффициентов рельсового четырехполюсника, а также расчетных токов и напряжений путевого реле и источника питания.

Каждый из четырехполюсников  $H$  и  $K$  может быть представлен в виде каскадного соединения элементарных четырехполюсников, замещающих отдельные простейшие части электрических схем питающего и релейного концов и представленных на рисунке 3. Коэффициент  $A$  любого четырехполюсника есть отношение напряжения на его входе к напряжению на выходе в режиме холостого хода, а коэффициент  $D$  – отношение входного тока четырехполюсника к выходному току в режиме короткого замыкания. Из рассмотрения схем

четыреполюсников, представленных на рисунке 3, следует:  $A1 = 1$ ;  $D1 = 1$ ;  $A2 = 1$ ;  $D2 = 1$ .

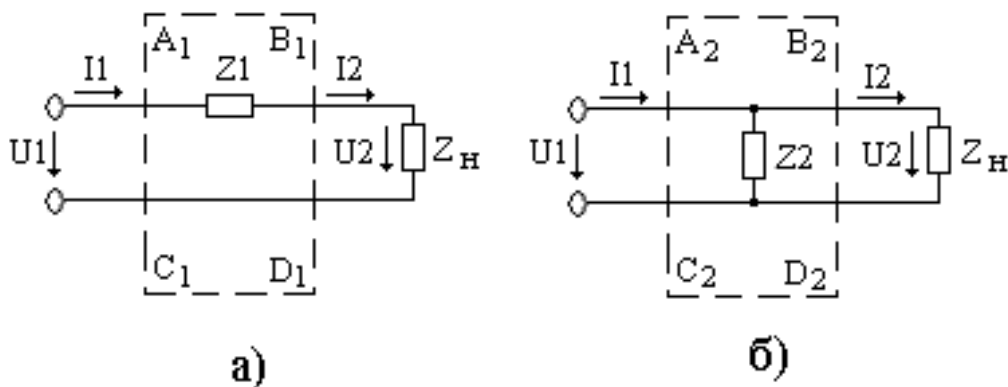


Рисунок 3 – Схемы элементарных четырехполюсников

Коэффициент  $B$  любого четырехполюсника есть сопротивление передачи  $Z_{\Pi}$  по току в режиме короткого замыкания и представляет собой отношение входного напряжения четырехполюсника к его выходному току короткого замыкания. Коэффициент  $C$  четырехполюсника имеет размерность проводимости и представляет собой отношение входного тока четырехполюсника в режиме холостого хода к его выходному напряжению.

Для схемы четырехполюсника (рисунок 3, а) справедливо:  $B1 = Z1$ ;  $C1 = 0$ .

Для схемы четырехполюсника (рисунок 3, б):  $B2 = 0$ ;  $C2 = 1/Z2$ .

***Расчет удельного активного сопротивления двухпроводной рельсовой линии.***

Для переменного тока удельное активное сопротивление  $r$  может быть представлено следующим уравнением:

$$r = 2(r_a(a) + \sum_{i=1}^n n \cdot r_{ct}(ct)) , \text{ Ом/км} \quad (1)$$

Здесь:  $r_a$  – активное сопротивление целого рельса длиной 1 км.,

$r_{ct}$  – активное сопротивление проводящего стыка (место механического и электрического соединений двух рельсовых звеньев длиной 25 м каждый), которое при расчетах принимается равным сопротивлению трехметрового целого рельса;

$n$  – количество стыков на одной рельсовой нити, длиной 1 км (при расчетах длиной стыка пренебрегаем).

Если учесть, что количество стыков на одной нити на 1 меньше количества уложенных рельсовых звеньев, то формулу (1) легко преобразовать к виду:

$$r = 2,234 \cdot r_a, \text{ Ом/км.} \quad (2)$$

Для определения сопротивления  $r_a$  используем формулу Неймана:

$$r_a = \frac{l \cdot \sqrt{(\mu_0 \cdot \mu_{er}) \cdot \rho \cdot \omega_c}}{u}, \text{ Ом/км.} \quad (3)$$

Здесь:  $l = 1000$  м – длина 1 км целого рельса в м;

$u$  – периметр поперечного сечения проводника, мм;

$\rho$  – удельное сопротивление рельсовой стали, Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$\omega_c$  – угловая частота сигнального тока, рад/с;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха, Ом/м;

$\mu_{er}$  – относительная магнитная проницаемость рельсовой стали.

Подставляя результаты вычисления по формуле (3) в формулу (2), найдем значение удельного активного сопротивления двухпроводной рельсовой петли для заданной частоты сигнального тока и типа рельса.

### ***Расчет удельного индуктивного сопротивления двухпроводной рельсовой линии.***

Полную удельную индуктивность двухпроводной линии  $L_n$  можно представить в следующем виде:

$$L_n = L_e + 2 \cdot \left( L_i + \sum_1^n [L_{ст}] \right) \cdot I \quad \text{Гн/км.} \quad (4)$$

Здесь:  $L_i$  – внутренняя удельная индуктивность целой рельсовой нити, Гн/км;

индуктивность стыковых соединителей, приходящихся на 1 км рельсовой нити, Гн/км;

$L_e$  – внешняя удельная индуктивность рельсовой линии, Гн/км.

Таблица 3 – Значения индуктивности стыковых соединителей  $r_{ст}$

$L_{ст}$ , Гн/км·10 <sup>-6</sup>	Варианты заданий по предпоследней цифре шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Приварные соединители	1,3	-	1,3	-	1,3	-	1,3	-	1,3	-
Штепсельные соединители	-	1,9	-	1,9	-	1,9	-	1,9	-	1,9

Величина внутренней индуктивности может быть определена из уравнения

$$L_i = \frac{0,6 \cdot l \sqrt{\mu_0 \cdot \mu_{ст} \cdot \rho}}{u \sqrt{\omega \epsilon}} = \frac{0,6 \cdot r_a}{\omega \epsilon}, \text{ Гн/км} \quad (5)$$

Удельная внешняя индуктивность двухпроводной однородной линии зависит только от геометрических размеров и может быть определена по формуле

$$L_e = 0,4 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\ln(a - b)}{b}, \text{ Гн/км} \quad (6)$$

Здесь:  $a$  – расстояние между осями рельсовых нитей, см;

$b = \frac{u}{2\pi}$  – радиус эквивалентного проводника, имеющего длину окружности, равную периметру рельса, см. Значение  $a$  приведено в таблице 2, а значение  $b$  зависит от заданного типа рельса и приведено в таблице 1.

Учитывая, что на одной нити длиной 1000 м укладывается 80 25-метровых рельсовых звеньев, то число стыков равно 79, следовательно, формулу 4 можно представить в следующем виде:

(7)

$$L_{п} = L_e + 2 \cdot \quad \text{Гн/км.}$$

**Расчет полного удельного сопротивления  $Z_{п}$  рельсовой петли переменному току.**

Расчет осуществляется по следующей формуле

$$z_{\Pi} = r + j \cdot L_{\Pi} = |z_{\Pi}| \cdot e^{j \varphi_{\Pi}} \quad (8)$$

$$|z_{\Pi}| = \sqrt{r^2 + (L_{\Pi})^2}; \quad \varphi_{\Pi} = \arctg \frac{L_{\Pi}}{r} \quad (9)$$

Двухпроводную рельсовую линию можно представить в виде четырёхполюсника с коэффициентами  $ABCD$ , которые в нормальном режиме зависят от первичных и вторичных параметров распределенной электрической цепи.

К первичным параметрам относится вычисленное значение  $z_{\Pi}$  и минимальное удельное сопротивление изоляции  $r_{\text{и.мин}}$ , которое при расчетах нормального режима принимается равным 1 Ом·км.

К волновым параметрам рельсового четырехполюсника в нормальном режиме относится волновое сопротивление  $Z_{\text{в}}$  рельсовой линии и коэффициент распространения  $\gamma$  электромагнитной волны в рельсовой линии, которые вычисляются по типовым формулам теории линейных электрических цепей:

$$\gamma, \text{ Ом}; \quad (10)$$

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{|z_{\Pi}| \cdot e^{j \varphi_{\Pi}}}, \text{ 1/км}. \quad (11)$$

Если заменить аппаратуру приемного конца рельсовой цепи четырехполюсником типа  $K$  с коэффициентами  $A_k, B_k, C_k, D_k$ , то при известной нагрузке  $Z_p$  в виде сопротивления обмотки приемного реле переменному току и известном рабочем токе реле  $I_p$ , номинальное значение которого в нормальном режиме должно обеспечиваться при самых неблагоприятных условиях работы рельсовой цепи, можно найти выражение для входного сопротивления  $Z_{\text{вх.к}}$  приемника:

$$Z_{\text{вх.к}} = \frac{A_k Z_p + B_k}{C_k Z_p + D_k} \quad (12)$$

Из теории линейных электрических цепей известно, что при изменении направления энергии коэффициенты  $A$  и  $D$  четырехполюсников меняются местами. При представлении аппаратуры питающего конца в виде четырехполюсника типа  $H$  с коэффициентами  $A_H, B_H, C_H, D_H$ , можно по формуле (12) определить обратное входное сопротивление, используя соответствующие коэффициенты и сопротивление нагрузки  $Z_r$  при передаче энергии в обратном направлении:

$$Z'_{вх.н} = \frac{D_H Z_r + B_H}{C_H Z_r + A_H} \quad (13)$$

Так как источник питания рельсовой цепи можно отнести к генератору напряжения, то очевидно  $Z_r$  можно принять равным 0, и формула (13) преобразуется к виду:

$$Z'_{вх.н} = \frac{B_H}{A_H} \quad (14)$$

При исследовании нормального и шунтового режимов задаемся равными модулями сопротивлений  $|Z_{вх.к}| = |Z'_{вх.н}| = |Z_{вх.о}|$ . В качестве аргумента входных сопротивлений по концам принимаем произвольное положительное значение при котором наихудшие условия шунтовой чувствительности имеют место при наложении поездного шунта на релейный или питающий конец.

При синтезе рельсовых цепей используется, как правило, основная схема замещения рельсовой цепи, состоящая из рельсового четырехполюсника с соответствующими коэффициентами, который по выходу нагружен на сопротивление  $Z_{вх.о}$ . Со стороны входа к рельсовому четырехполюснику подключен генератор эквивалентной э.д.с.  $E_э$  с внутренним сопротивлением, равным  $Z_{вх.о}$ . Сопротивление передачи основной схемы замещения в нормальном режиме  $Z_{по}$  равно отношению э.д.с. эквивалентного генератора  $E_э$  к току  $I_k$  на выходе рельсового четырехполюсника.

Значение тока  $I_k$  определяется по формуле:

$$I_k = (C_k \cdot Z_p + D_k) \cdot I_p \quad (15)$$

Значение  $Z_{вх.о}$  определяется по формуле:

$$Z_{по} = A \cdot Z_{вх.о} + B + (C Z_{вх.о} + D) \cdot Z_{вх.о} \quad (16)$$

Учитывая, что для симметричной рельсовой линии в нормальном режиме справедливо равенство:  $A = D$ , выражение (16) можно представить в следующем виде:

$$Z_{\text{по}} = CZ_{\text{вх.о}}^2 + 2A \cdot Z_{\text{вх.о}} + B. \quad (17)$$

Расчетное сопротивление передачи основной схемы замещения рельсовой цепи в шунтовом режиме  $Z_{\text{пшо.р}}$  при нахождении нормативного поездного шунта ( $R_{\text{шн}} = 0,06 \text{ Ом}$ ) на приемном конце по своей структуре похоже на выражение (16):

$$Z_{\text{пшо.р}} = A_{\text{шр}} \cdot Z_{\text{вх.о}} + B_{\text{шр}} + (C_{\text{шр}} \cdot Z_{\text{вх.о}} + D_{\text{шр}}) \cdot Z_{\text{вх.о}}, \quad (18)$$

где  $A_{\text{шр}} = 1 + zl/R_{\text{шн}}$ ;  $B_{\text{шр}} = zl$ ;  $C_{\text{шр}} = 1/R_{\text{шн}}$ ;  $D_{\text{шр}} = 1$  коэффициенты рельсового четырехполюсника в шунтовом режиме при неблагоприятных условиях работы рельсовой цепи и нахождении нормативного поездного шунта на выходном конце рельсовой линии;  $l$ - длина рельсовой линии.

Расчетное сопротивление передачи основной схемы замещения рельсовой цепи в шунтовом режиме  $Z_{\text{пшо.л}}$  при нахождении нормативного поездного шунта ( $R_{\text{шн}} = 0,06 \text{ Ом}$ ) на питающем конце имеет следующий вид:

$$Z_{\text{пшо.л}} = A_{\text{шл}} \cdot Z_{\text{вх.о}} + B_{\text{шл}} + (C_{\text{шл}} \cdot Z_{\text{вх.о}} + D_{\text{шл}}) \cdot Z_{\text{вх.о}}, \quad (19)$$

где  $A_{\text{шл}} = 1$ ;  $B_{\text{шл}} = zl$ ;  $C_{\text{шл}} = 1/R_{\text{шн}}$ ;  $D_{\text{шл}} = 1 + zl/R_{\text{шн}}$  коэффициенты рельсового четырехполюсника в шунтовом режиме при неблагоприятных условиях работы рельсовой цепи и нахождении нормативного поездного шунта на входном конце рельсовой линии.

Преобразуем выражения (18) и (19) к следующему общему виду:

$$Z_{\text{пшо}} = 2 \cdot Z_{\text{вх.о}} + zl + Z_{\text{вх.о}}^2 / R_{\text{шн}} + zl \cdot Z_{\text{вх.о}} / R_{\text{шн}} \quad (20)$$

Значения входных сопротивлений на концах рельсовой линии по условиям строгого обеспечения шунтового и нормального режимов определяется обычно в результате решения следующего уравнения:

$$(21)$$

где  $K_{\text{шн}}$  – коэффициент чувствительности рельсовой линии к нормативному шунту при наложении его в месте минимальной шунтовой чувствительности (в нашем случае – при наложении на одном из концов рельсовой линии);

$|Z_{\text{пшо мин}}|$  - модуль минимального сопротивления передачи в шунтовом режиме;

$|Z_{\text{по макс}}|$  - модуль максимального сопротивления передачи в шунтовом режиме;

$N=$  – аппаратный коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей источника питания и путевого реле;

$K_3$  – коэффициент запаса по току путевого реле, равный отношению рабочего тока реле к току его срабатывания;

$K_{\text{н}}$  – коэффициент нестабильности источника питания рельсовой цепи, равный отношению максимального значения напряжения эквивалентного генератора основной схемы замещения рельсовой цепи к его минимальному значению;

$K_{\text{вн}}$  – коэффициент надежного возврата якоря путевого реле, равный отношению тока надежного отпадания якоря путевого реле к его току срабатывания.

Расчетные значения вышеуказанных коэффициентов и аргумента входного сопротивления  $Z_{\text{вх.о}}$  приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Расчетные значения коэффициентов

Коэффици- циенты	Варианты значений выбираются по предпоследней цифре шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$K_3$	1	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,1
$K_{\text{н}}$	1,2	1,18	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,04	1,02
$K_{\text{вн}}$	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49
	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28

Из выражения (21) следует, что условие строгого выполнения шунтового и нормального режимов рельсовой цепи можно записать в виде строгого равенства:

$$|Z_{\text{пшо мин}}| = |Z_{\text{по макс}}| \cdot N \quad (22)$$

*Построение графика зависимости от длины рельсовой цепи модуля максимального сопротивления передачи  $Z_{\text{по макс}}$  основной схемы замещения электрической рельсовой цепи в нормальном режиме для разных сопротивлений по концам рельсовой линии.*



Для каждого значения модуля входного сопротивления  $Z_{\text{вх.о}}$ , начиная с 0,2 Ом, строим график  $|Z_{\text{по макс}}| \cdot N = F(l)$ . Значения коэффициентов рельсового четырехполюсника в нормальном режиме определяем по следующим формулам:

$$A = D = \text{ch}(\gamma \cdot l); B = Z_{\text{в}} \cdot \text{sh}(\gamma \cdot l); C = \text{sh}(\gamma \cdot l) / Z_{\text{в}} \quad (23)$$

Гиперболические функции от комплексной переменной  $(\gamma \cdot l)$  определяем по следующим формулам:

$$\text{ch}(\gamma \cdot l) = \text{ch}(\alpha \cdot l + j\beta \cdot l) = \text{ch}(\alpha \cdot l) \cdot \cos(\beta \cdot l) + j \text{sh}(\alpha \cdot l) \cdot \sin(\beta \cdot l) \quad (24)$$

$$\text{sh}(\gamma \cdot l) = \text{sh}(\alpha \cdot l + j\beta \cdot l) = \text{sh}(\alpha \cdot l) \cdot \cos(\beta \cdot l) + j \text{ch}(\alpha \cdot l) \cdot \sin(\beta \cdot l) \quad (25)$$

Здесь:  $\alpha$  – километрический коэффициент затухания;

$\beta$  – километрический коэффициент фазы.

Выражения (24) и (25) есть алгебраическая форма записи комплексного числа в виде  $C_1 + jC_2$  (представление комплексной переменной в комплексной плоскости). Представлению комплексной переменной в фазовой плоскости соответствует показательная форма записи комплексного числа  $C \cdot e^{j\varphi_c}$ , где  $C =$

$\sqrt{C_1^2 + C_2^2}$  – модуль комплексного числа, а  $\varphi_c = \arctg \frac{C_2}{C_1}$  – аргумент комплексного

числа. Переход от показательной формы записи к тригонометрической требуется при сложении нескольких комплексных чисел в показательной форме и осуществляется путем применения следующей формулы:

$$A_1 \cdot e^{j\varphi_1} = A_1 \cdot \cos\varphi_1 + jA_1 \cdot \sin\varphi_1 .$$

***Построение графика зависимости от длины рельсовой цепи модуля минимального сопротивления передачи  $|Z_{\text{пшо мин}}|$  основной схемы замещения электрической рельсовой цепи в шунтовом режиме при нахождении нормативного шунта на релейном конце рельсовой цепи и для разных сопротивлений по концам рельсовой линии.***

Для каждого значения модуля входного сопротивления  $Z_{\text{вх.о}}$ , начиная с 0,2 Ом, строим график  $|Z_{\text{пшо мин}}| = F(l)$ . Значения коэффициентов рельсового

четырёхполюсника в шунтовом режиме при нахождении нормативного шунта на релейном конце определяем по следующим формулам:

$$A_{шр} = 1 + z_{п} \cdot l / R_{шн}; \quad B_{шр} = z_{п} \cdot l; \quad C_{шр} = 1 / R_{шн}; \quad D_{шр} = 1 \quad (26)$$

Оба графика строим в одной системе координат, тогда длина рельсовой линии, при которой происходит пересечение двух графиков, представляет собой предельную первого рода длину  $l_{пр}$  рельсовой линии, при которой строго выполняются нормальный и шунтовой режимы работы рельсовой цепи при наиболее неблагоприятных условиях ее работы. Значение сопротивления по концам рельсовой линии, при котором строился график является оптимальным для данной длины рельсовой цепи.

Изменяя значение модуля входного сопротивления  $Z_{вх.о}$  с шагом 0,05 Ом в диапазоне от 0,2 Ом до 0,4 Ом и строя графики зависимостей  $|Z_{по макс}| \cdot N = F(l)$  и  $|Z_{пшо мин}| = F(l)$ , находим предельные длины  $l_{пр}$  и соответствующие им модули оптимальных сопротивлений по концам  $|Z_{вх.о}|$ .

В заключение строим зависимость  $|Z_{вх.о}| = F(l_{пр})$  и делаем выводы.

Следующий этап синтеза рельсовой цепи заключается в определении коэффициента трансформации дроссель-трансформатора и параметров аппаратуры релейного и питающего концов рельсовой цепи, подключаемой к дополнительной обмотке соответствующих дроссель-трансформаторов.

В настоящем курсовом проекте необходимо определить входные сопротивления аппаратуры релейного  $Z_{вх}$  и питающего  $Z_{вх}'$  концов, подключаемых к дроссель-трансформатору, если коэффициенты четырёхполюсника, замещающего схему дроссель-трансформатора известны.

По аналогии с выражениями (12) и (13) можно написать:

для релейного конца:

$$(27)$$

для питающего конца:

$$(28)$$

Из выражения (27) находим искомое значение  $Z_{вх}$ :

$$(29)$$

Из выражения (28) находим искомое значение  $Z_{вх}'$ :

$$Z_{вх}' = \frac{B_{дп} - Z_{вх.о} \cdot A_{дп}}{C_{дп} \cdot Z_{вх.о} - D_{дп}} \quad (30)$$

В таблице 5 приведены значения коэффициентов четырехполосников дроссель-трансформаторов питающего и релейного концов типа ДТ-0,6 для разных частот, соответствующих вариантам, представленным в табл. 1.

Таблица 5 – Значения коэффициентов четырехполосников дроссель-трансформаторов питающего и релейного концов

Коэффициенты	Варианты значений выбираются по последней цифре шифра									
	1 n = 3	2 n = 15	3 n = 3	4 n = 3	5 n = 3	6 n = 3	7 n = 3	8 n = 3	9 n = 3	0 n = 3
$A_{дп}$	1,03; - 3,0°	1,08; - 4°	0,95; - 1,2°	0,97; - 1,5°	0,96; - 2,6°	0,96; - 2,9°	0,97; - 2,9°	0,96; - 3,2°	1,02; - 3,2°	1,12; - 2,5°
$B_{дп}$	0,12; 72°	0,2; 88°	0,33; 42,3°	0,46; 46,8°	0,59; 51,3°	0,72; 55°	0,86; 60°	1,01; 66°	1,07; 69,5°	0,07; 57,5°
$C_{дп}$	0,23; - 81°	0,01; - 80°	0,10; - 80,6°	0,07; - 84,3°	0,06; - 86,9°	0,05; - 88,1°	0,05; - 89,2°	0,04; - 90,7°	0,03; - 91,2°	0,41; - 82,5°
$D_{дп}$	0,13; 2°	0,01; 2°	0,14; - 6,9°	0,14; - 6,8°	0,15; - 5,9°	0,15; - 5,3°	0,15; - 4,7°	0,15; - 2,8°	0,14; - 1,7°	0,12; - 2,5°
$A_{др}$	0,13; 2°	0,01; 2°	0,14; - 6,9°	0,14; - 6,8°	0,15; - 5,9°	0,15; - 5,3°	0,15; - 4,7°	0,15; - 2,8°	0,14; - 1,7°	0,12; - 2,5°
$B_{др}$	0,12; 72°	0,2; 88°	0,33; 42,3°	0,46; 46,8°	0,59; 51,3°	0,72; 55°	0,86; 60°	1,01; 66°	1,07; 69,5°	0,07; 57,5°
$C_{др}$	0,23; - 81°	0,01; - 80°	0,10; - 80,6°	0,07; - 84,3°	0,06; - 86,9°	0,05; - 88,1°	0,05; - 89,2°	0,04; - 90,7°	0,03; - 91,2°	0,41; - 82,5°
$D_{др}$	1,03; - 3°	1,08; - 4°	0,95; - 1,2°	0,97; - 1,5°	0,96; - 2,6°	0,96; - 2,9°	0,97; - 2,9°	0,96; - 3,2°	1,02; - 3,2°	1,12; - 2,5°

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

1. Улахович Д.А. Основы теории линейных электрических цепей: Учебное пособие –СПб.: БВХ-Петербург, 2009. – 816с.: ил. – (Учебная литература для вузов.
2. Волков Е.А., Санковский Э.И., Сидорович. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под общей ред. проф. В.А. Кудряшова. – М.: Маршрут, 2005. -509с.