

УДК 004.492

**Д. С. Марков, канд. техн. наук**  
**М. Б. Соколов, канд. техн. наук**  
**В. Б. Соколов, канд. техн. наук**

*Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,  
Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I, Санкт-Петербург*

## **ФОРМАЛИЗОВАННАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ**

На основе дискретной аппроксимации непрерывного сигнала приведена формализованная схема имитационной модели рельсовой линии как основного компонента базы знаний гибридной экспертной системы анализа работы тональной рельсовой цепи. Дана дискретная модель непрерывного входного сигнала и аналитические выражения его преобразования выделенными элементами рельсовой линии в виде массивов точечных значений аппроксимированного сигнала. Предложено деление рельсовой линии на отрезки, представленные в имитационной модели схемами замещения. Это обеспечило адекватность моделирования шунтового и контрольного режимов работы рельсовой цепи.

В формализованной схеме на аналитическом и алгоритмическом уровне учтено влияние смежных и соседних рельсовых цепей бесстыкового пути. Математическая схема позволила использовать метод процессного моделирования для синтеза имитационной модели обработки непрерывного сигнала в рельсовой линии. Чтобы обеспечить адекватность процессной имитационной модели, в формализованную схему рельсовой линии введены аналитические выражения для учета мешающих факторов. На базе приведенных в работе аналитических выражений предложено множество операторов и логических условий алфавита логических схем алгоритмов. С использованием предлагаемого алфавита разработано формализованное описание функционирования рельсовой линии в различных режимах работы (нормальном, шунтовом, контрольном, автоматической локомотивной сигнализации и короткого замыкания) на языке логических схем алгоритмов. Он обеспечивает сравнительную простоту процедур перехода к программной реализации процессной имитационной модели рельсовой линии бесстыковых тональных рельсовых цепей.

Процессное моделирование, тональная рельсовая цепь, рельсовая линия, схема замещения, формализованное описание, гибридная экспертная система

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-204-221

### **Введение**

Рельсовые цепи — одни из самых распространенных и сложных устройств железнодорожной автоматики. При современном проектировании систем автоблокировки и электрической централизации предпочтение отдается тональным рельсовым цепям (ТРЦ). Актуальны задачи, направленные на повышение надежности и эффективности технической эксплуатации, обучение, совершенствование методов анализа схемных решений и расчета регулировочных характеристик, развитие систем мониторинга и диагностики технического состояния тональных рельсовых цепей.

Анализу работы тональных рельсовых цепей посвящены [1–6, 25–30] и др. Вопросы автоматизации процесса их проектирования рассмотрены в [7–9]. О проблемах экспертизы и испытаний на безопасность систем железнодорожной автоматики и телемеханики см. [10–12]. При этом практически нет публикаций на тему интеллектуализации решения задач анализа и оптимизации параметров рельсовых цепей в различных режимах работы.

В связи с этим актуальной представляется разработка гибридной экспертной системы анализа работы тональной рельсовой цепи (ГЭС ТРЦ). Основа базы знаний данной ГЭС — имитационная модель ТРЦ (ИМ ТРЦ), предложенная авторами в [13]. Данная имитационная модель является процессной, непрерывной, детерминированной и структурно-функциональной. Авторы предложили для нее название — «Процессная модель тональной рельсовой цепи» (ПМТРЦ).

В ее основе воспроизведение процесса преобразования непрерывного сигнала функциональными блоками [14] рельсовой цепи как электрической схемы: блоки рельсовой линии, путевого генератора, путевого фильтра, кабельной линии на питающем и релейном концах, аппаратуры согласования и защиты, элементов подключения схемы кодирования.

С точки зрения обеспечения адекватности ПМТРЦ самым сложным представляется функциональный блок рельсовой линии. Она обладает следующими особенностями:

- зависимостью от параметров соседних и смежных линий;
- зависимостью от параметров рельсовой линии параллельного пути;
- неравномерно распределенными параметрами;
- влиянием мешающих факторов воздействия внешней среды (климатических, мощных электромагнитных воздействий и т. д.).

В ранее разработанной процессной модели рельсовой линии (ПМРЛ) недостаточно внимания уделялось моделированию влияния соседних рельсовых цепей и неисправностей рельсовой линии. Данная работа направлена на устранение указанных недостатков и совершенствование ПМРЛ. В соответствии с этим предлагается формализованная схема процессной имитационной модели рельсовой линии, включающей аналитические модели ее элементов в различных режимах функционирования, объединенных в единую имитационную модель моделирующим алгоритмом, формализованным на языке логических схем алгоритмов (ЛСА). Такая форма представления алгоритмов обеспечивает сравнительную простоту последующей программной реализации.

## 1. Основные положения

Основу процессной модели рельсовой линии составляют методология и алгоритмы дискретного представления и преобразований непрерывного сигнала в рельсовой линии [13]. Она представляет собой длинную линию с распределенными параметрами [3], для которой наиболее характерны процессы затухания

и фазового сдвига сигнала. Тогда рельсовая линия представляется в виде классической схемы замещения (рис. 1), где выделены блоки, отображающие процессы затухания (рис. 1,  $RL$ -контур) и фазового сдвига (рис. 1,  $RC$ -контур) сигнала [15, 16].

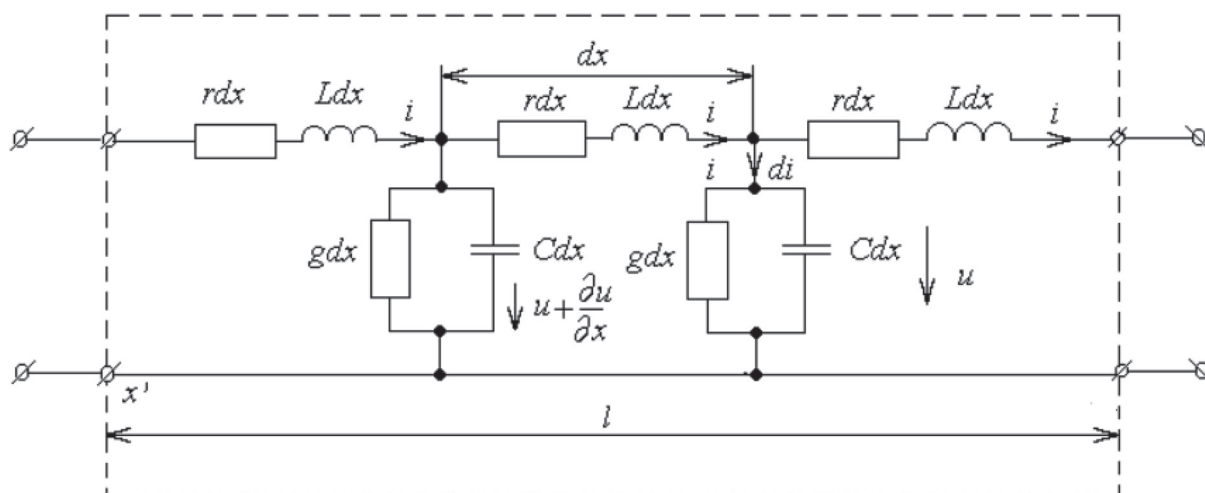
Для обеспечения адекватности процессной модели рельсовой линии по отношению к натурным измерениям в контрольном, шунтовом режимах, а также режиме автоматической локомотивной сигнализации (АЛС), целесообразно разделить линию на элементы  $dx$ , каждый из которых изображается схемой замещения и в ПМРЛ представляется как функциональный блок. Необходимое количество элементов  $dx$  определяется требуемой точностью отображения непрерывного сигнала в процессной модели рельсовой линии.

Модель непрерывного сигнала рельсовой линии представляется в виде множества значений уровней напряжений, рассчитываемых по аналитическим выражениям. Формирование модели непрерывного сигнала производится на основе первичных (сопротивление рельсов  $r$ , Ом/км, проводимость изоляции  $g$ , См/км, удельная индуктивность рельсов  $L$ , Гн/км, емкость рельсовой петли  $C$ , Ф/км), вторичных (волновое или характеристическое сопротивление цепи  $Z_в$ , Ом, коэффициент распространения волны  $\gamma = \alpha + j\beta$ , фазовая скорость  $v$ , длина волны  $\lambda$ ) параметров рельсовой линии.

Весь интервал моделирования разбивается на точки (отсчеты времени), для которых рассчитываются значения уровней напряжений. Согласно теореме Котельникова, любой непрерывный сигнал может быть восстановлен без потерь по своим дискретам, взятым с частотой не менее удвоенной максимальной частоты спектра этого сигнала. На примере ТРЦЗ максимальная частота равняется 780 Гц, поэтому период дискретизации составляет:

$$T_{\text{ДИСКР}} \leq \frac{5}{2 \cdot F_{\text{МАХ}}} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ [с]},$$

где  $F_{\text{МАХ}}$  — верхняя частота в спектре сигналов.



**Рис. 1.** Схема замещения рельсовой линии

## 2. Алгоритм моделирования рельсовой линии в нормальном режиме

Алгоритм моделирования непрерывного сигнала рельсовой линии предполагает наличие следующих условий.

1. Непрерывный сигнал на входе каждого элемента  $dx$  представляется в виде массива значений уровней напряжений.

2. Использование для расчета всех возможных режимов рельсовой цепи общих исходных данных:

- длины рельсовой линии;
- удельного сопротивления рельсов;
- удельного сопротивления изоляции рельсовой линии;
- несущей и манипулирующей частот;
- напряжения и тока срабатывания реле;
- сопротивления путевого приемника;
- длины кабеля;
- удельного сопротивления кабеля;
- длины элементарного участка  $dx$ .

3. Построение модели элемента  $dx$ :

– элемент  $dx$  (рис. 1) представлен схемой замещения как функциональный блок, преобразование в котором определяется аналитическими выражениями, описывающими изменение сигнала в схеме элемента  $dx$  [17].

4. Построение модели рельсовой линии:

- модель рельсовой линии строится как цепочечное соединение элементов  $dx$ , при этом выходной массив значений уровней напряжения предыдущего элемента  $dx$  является входным массивом последующего элемента  $dx$ ;
- количество элементов  $dx$  определяется длиной линии.

5. Учет влияющей рельсовой линии:

- влияющий сигнал распространяется в зоне дополнительного шунтирования на границе двух рельсовых линий;
- исходя из условий максимального значения длины зоны дополнительного шунтирования рельсовой цепи на минимальной частоте несущего сигнала, зона влияния принимается длиной 40 м;
- значения из массива сигнала влияющей рельсовой линии суммируются со значениями из массива сигнала моделируемой рельсовой линии в зоне дополнительного шунтирования, искажая и меняя его форму и сдвигая фазу.

6. Преобразование непрерывного сигнала рельсовой линии в различных режимах работы рельсовой цепи.

В шунтовом режиме работы рельсовой цепи:

- значения элементов массива непрерывного сигнала рельсовой цепи (уровень сигнала) на расстоянии  $(n \cdot dx)$  наложения шунта изменяются под влиянием сопротивления 0,06 Ом; с учетом полученного массива значений определяется уровень непрерывного сигнала рельсовой цепи на приемном конце.

В контрольном режиме работы рельсовой цепи:

— значения элементов массива непрерывного сигнала рельсовой цепи на расстоянии ( $n \cdot dx$ ) обрыва или излома рельса изменяются под влиянием критического сопротивления изоляции в контрольном режиме; с учетом полученного массива значений определяется уровень непрерывного сигнала рельсовой цепи на приемном конце.

В режиме автоматической локомотивной сигнализации (АЛС):

— использование аналитических выражений для моделирования нормативного шунта и частотного сигнала АЛСН;

— значения элементов массива непрерывного сигнала рельсовой цепи на расстоянии ее длины изменяются под влиянием сопротивления 0,06 Ом; с учетом полученного массива значений определяется уровень сигнала автоматической локомотивной сигнализации на приемном конце.

В режиме короткого замыкания:

— значения элементов массива непрерывного сигнала рельсовой цепи на питающем конце изменяются под влиянием сопротивления 0,06 Ом; с учетом полученного массива значений определяется уровень непрерывного сигнала рельсовой цепи на приемном конце.

Исходя из вышеперечисленных условий, рассмотрим описание алгоритма моделирования рельсовой линии в нормальном режиме с использованием языка ЛСА [18].

Алгоритм моделирования непрерывного сигнала рельсовой линии предполагает наличие следующих операторов (А) и логических условий ( $\acute{\alpha}$ ):

A1 — оператор «начало моделирования»;

$\acute{\alpha}2$  — условие выбора ветви алгоритма для рассчитываемой либо влияющей рельсовой цепи;

A3–A6 — операторы ввода исходных данных модели: уровень входного сигнала РЛ ( $U_{ВХ}$ ), характеристическое сопротивление рельсовой линии ( $Z_{РЛ}$ ), сопротивление изоляции РЛ ( $r_{И}$ ), длина РЛ ( $l_{РЛ}$ ), несущая частота входного сигнала РЛ ( $f$ ), элементарный интервал времени ( $\Delta t$ ), временной интервал работы модели ( $T_M$ ), единичный отсчет значения входного сигнала ( $j$ ), единичный элементарный участок  $dx$  ( $k$ ), количество участков  $dx$  ( $K$ ), длина участка  $dx$ ;

A7 — оператор задания начальных значений  $j$  и  $k$ ;

$\acute{\alpha}8$  — условие, определяющее цикл;

A9, A10,  $\acute{\alpha}11$ , A12, A13 A14 — операторы и условия, составляющие тело цикла. Выполняют расчет значений входного сигнала моделированной либо влияющей рельсовой линии ( $U(j) = U_{ВХ} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot j)$ ), формирование массива значений входного сигнала ( $U_{ВХj} = U(j \cdot \Delta t)$ ), хранение массива значений ( $U_{ВХj} \in U_j$ ).

Сигнал на входе рельсовой линии будет ослаблен на величину падения напряжения в соединительных  $R_{СП}$  проводах и на защитном резисторе  $R_3$ . Кроме того, сигнал на выходе питающего конца распространяется в обе стороны бесстыковой рельсовой цепи, и появляется необходимость учета потерь тока на входе рельсовой

линии. Значение потерь зависит от волновых сопротивлений смежной и соседней линий,  $Z_{B\_CM}, Z_{B\_C}$ , входных сопротивлений релейного (РК) и питающего (ПК) концов соседней и смежной рельсовых цепей,  $Z_{ВХ\_РК\_С}, Z_{ВХ\_ПК\_СМ}$ , входных сопротивлений смежной и соседней рельсовых линий  $Z_{ВХ\_РЛ\_СМ}, Z_{ВХ\_РЛ\_С}$  [19–24].

Учитывая, что нагрузкой питающего конца является последовательно-параллельное соединение сопротивлений ответвлений А и В (см. рис. 2.), найдем их значения по выражениям:

$$\begin{aligned}
 A &= Z_{\text{МОД}} + \frac{z_{\text{ВХ.ПК}} \cdot z_{\text{ВХ.ПК.С}}}{z_{\text{ВХ.ПК.С}} + z_{\text{ВХ.ПК}}} \text{ [Ом]}, \\
 B &= Z_{\text{СМ}} + \frac{z_{\text{ВХ.ПК.СМ}} \cdot z_{\text{В.С}_2}}{z_{\text{В.С}_2} + z_{\text{ВХ.ПК.СМ}}} \text{ [Ом]}, \\
 C &= Z_{\text{С}} + \frac{z_{\text{ВХ.ПК.С}} \cdot z_{\text{В.С}_1}}{z_{\text{ВХ.ПК.С}} + z_{\text{В.С}_1}} \text{ [Ом]},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $Z_{\text{МОД}}, Z_{\text{СМ}}, Z_{\text{С}}$  — удельные сопротивления соответственно моделируемой, смежной и соседней рельсовых линий.

Значение эквивалентного сопротивления  $Z_{\text{ЭКВ}}$  определяется по выражению:

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \frac{A \cdot B \cdot C}{A \cdot B + B \cdot C + C \cdot A} \text{ [Ом]}.
 \tag{2}$$

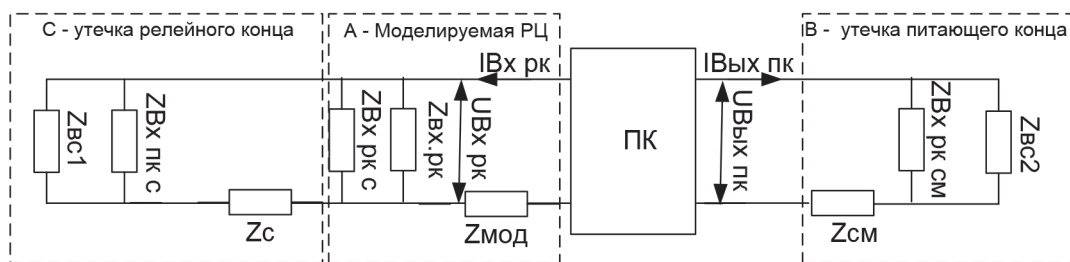
Определим форму непрерывного сигнала на входе рельсовой линии с учетом потерь тока и напряжения:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{ВХ\_РЛ\_ПОТЕРИ}}(t) &= \frac{u_{\text{ВЫХ\_ТР}}(t) \cdot e^{\left(i \cdot \arg(U_{\text{ТР}}) - \frac{\pi}{180}\right)}}{R_{\text{СП}} + R_3 + |Z_{\text{ЭКВ}}|} \text{ [А]} \\
 U_{\text{ВХ\_РЛ\_ПОТЕРИ}}(t) &= I_{\text{ВХ\_РЛ\_ПОТЕРИ}}(t) \cdot |Z_{\text{ЭКВ}}| \text{ [В]}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Сформируем модель непрерывного входного сигнала в виде массива отсчетов непрерывного сигнала:

$$U_i = u_{\text{ВЫХ.РЛ}}(i \cdot dt) \text{ [В]}.
 \tag{4}$$

A15 — оператор задания начальных значений  $j$ .



**Рис. 2.** Схема замещения относительно эквивалентного сопротивления нагрузки РЛ  $Z_{\text{ЭКВ}}$



α16 — условие формирования массива значений выходного сигнала одного участка  $dx$  (блок, определяющий цикл).

α17, A18, A19, A20, A21, A23, A24, A25, A26 — операторы и условия, составляющие тело цикла. Выполняют расчет значений выходного массива участка  $dx$ :

$$u_{\text{ВЫХ\_РЛ}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{РЛ}}) = e^{\alpha_{\text{РЛ}} L_{\text{РЛ}}} \cdot \frac{1}{3,5 \tau_{\text{РЛ}}} \int_{t - \frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}}^{t + \frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}} U_{\text{ВХ\_РЛ\_ПОТЕРИ}}(t_{\text{РЛ}} - \tau_{\text{РЛ}}) dt_{\text{РЛ}} \text{ [В]}. \quad (5)$$

α22 — условие записи массива значений выходного сигнала РЛ.

α27 — условие, определяющий цикл.

α28, A29, A30, A31, A32, A33 — операторы и условия, составляющие тело цикла. Определяют выбор одного из массивов значений выходных сигналов участка  $dx$  и его подстановку в качестве входного массива сигнала последующего участка  $dx$  ( $U_{\text{ВЫХ}kj} \leq U_{\text{ВХ}j}$ ).

A34 — оператор формирования выходного массива непрерывного сигнала рельсовой линии ( $U_{\text{ВЫХ}j}$ ).

α35 — условие, выполняющее сравнение длины оставшегося до выходного конца рельсовой линии участка с длиной зоны влияния (не более 35–40 метров). Исходя из поставленного условия, значение выходного массива участка  $dx$  формируется с учетом сформированного операторами 36–40 сигнала влияющей рельсовой линии.

A36–A40 — операторы формирования массива сигнала влияющей рельсовой линии.

A41 — оператор суммирования сигнала влияющей и рассчитываемой рельсовых линий для дальнейшей обработки.

При использовании бесстыкового пути необходим учет на границе двух соседних рельсовых линий смешанного сигнала, состоящего из суммы сигналов моделируемой и соседней рельсовых цепей:

$$U_{\text{СУМ\_ВЫХ\_РЛ}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, L_{\text{РЛ}}) = \\ = u_{\text{ВЫХ\_РЛ}}(t, \beta_{\text{РЛ\_МОД}}, L_{\text{РЛ\_МОД}}) + u_{\text{ВЫХ\_РЛ}}(t, \beta_{\text{РЛ\_С}}, L_{\text{РЛ\_С}}) \text{ [В]}. \quad (6)$$

A42 — оператор формирования выходного массива непрерывного сигнала рельсовой линии ( $U_{\text{ВЫХ\_ВЛИЯНИЕ}}$ ) на расстоянии зоны влияния от приемного конца линии.

A43 — оператор расчета и формирования выходного сигнала рассчитываемой рельсовой линии с учетом модели сигнала влияющей рельсовой линии на приемном конце.

A44 — представление полученного в операторе A42 сигнала в виде массива точек для дальнейшего построения графика.

A45 — представление полученного в операторе A43 сигнала в виде массива точек для дальнейшего построения графика  $U_{\text{ВЫХ}}(\Delta\tau)$ . В блоке осуществляется преобразование массива значений непрерывного сигнала:

$$U(t) = U_{\text{floor}\left(\frac{t}{dt}\right)} \text{ [B]}, \quad (7)$$

где *floor* возвращает целое снизу и целое сверху от вычисляемого аргумента; *U* — массив отсчетов из оператора A43.

A46 — оператор «окончание моделирования».

Ниже представлено описание алгоритма моделирования рельсовой линии в нормальном режиме на языке ЛСА:

$$\begin{aligned} U = & A1 \alpha 2(1) \uparrow^1 A3 A4 \omega \uparrow^1 A5 A6 \downarrow^1 A7 \downarrow^2 \alpha 8(0) \uparrow^2 A9 A10 \alpha 11(1) \uparrow^3 A12 \\ & \omega \uparrow^3 A13 \downarrow^3 A14 \omega \uparrow^2 \uparrow^2 A15 \downarrow^4 \downarrow^7 \downarrow^9 \alpha 16(0) \uparrow^4 \alpha 17(1) \uparrow^5 A18 \omega \uparrow^5 A19 \downarrow^5 \\ & A20 A21 \alpha 22(1) \uparrow^6 A23 \omega \uparrow^6 A24 \downarrow^6 A25 A26 \omega \uparrow^4 \uparrow^4 \alpha 27(0) \uparrow^7 \alpha 28(1) \uparrow^8 A29 \quad (8) \\ & \omega \uparrow^8 A30 \downarrow^8 A31 A32 A33 \omega \uparrow^7 \uparrow^7 A34 \alpha 35(0) \omega \uparrow^9 A36 A37 A38 A39 A40 A41 \\ & A42 A43 A44 A45 A46. \end{aligned}$$

### 3. Особенности моделирования рельсовой линии в режимах шунтовом, контрольном и автоматической локомотивной сигнализации

#### 3.1. Шунтовой режим

Математическое описание работы рельсовой линии в шунтовом режиме отличается от описания нормального режима изменением в операторах и условиях 16–24 алгоритма (8) модели рельсовой линии выражениями 9–12 для описания сигнала в месте наложения нормативного шунта:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{РЛ}} &= \frac{\beta_{\text{РЛ}} \cdot L_{\text{НШ}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НЕС}}} \\ u_{\text{ВХ\_Ш}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{НШ}}) &= \\ &= e^{\alpha_{\text{РЛ}} L_{\text{НШ}}} \cdot \frac{1}{3,5 \tau_{\text{РЛ}}} \int_{t - \frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}}^{t + \frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}} U_{\text{ВХ\_РЛ\_ПОТЕРИ}}(t_{\text{РЛ}} - \tau_{\text{РЛ}}) dt_{\text{РЛ}} \quad \text{[B]}. \quad (9) \end{aligned}$$

Значение тока при наложении шунта определяют по закону Ома для участка цепи:

$$i_{\text{Ш}} = \frac{u_{\text{ВХ\_Ш}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{НШ}})}{R_{\text{Ш}} + R_{\text{Д}}} \text{ [A]}. \quad (10)$$

Уровень непрерывного сигнала при наложении шунта определяют по выражению:

$$u_{\text{Ш}} = i_{\text{Ш}} \cdot R_{\text{Ш}} \text{ [B]}. \quad (11)$$

Выражения, определяющие результирующий сигнал на выходе рельсовой линии, будет иметь вид:

$$\tau_{\text{РЛ}} = \frac{\beta_{\text{РЛ}} \cdot L_{\text{НШ1}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НЕС}}}$$



$$u_{\text{ВХ\_Ш}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{НШ1}}) = e^{\alpha_{\text{РЛ}} L_{\text{НШ1}}} \cdot \frac{1}{3,5\tau_{\text{РЛ}}} \int_{t-\frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}}^{t+\frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}} U_{\text{Ш}}(t_{\text{РЛ}} - \tau_{\text{РЛ}}) dt_{\text{РЛ}} \text{ [В]}. \quad (12)$$

### 3.2. Контрольный режим

Математическое описание контрольного режима отличается от описания нормального режима добавлением в операторах и условиях 16–24 алгоритма (8) выражений 13–16 для описания непрерывного сигнала на выходе рельсовой линии при изломе рельса.

$$\tau_{\text{РЛ}} = \frac{\beta_{\text{РЛ}} \cdot L_{\text{К}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НЕС}}}$$

$$u_{\text{ВХ\_К}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{К}}) = e^{\alpha_{\text{РЛ}} L_{\text{К}}} \cdot \frac{1}{3,5\tau_{\text{РЛ}}} \int_{t-\frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}}^{t+\frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}} u_{\text{ВХ\_РЛ\_ПОТЕРИ}}(t_{\text{РЛ}} - \tau_{\text{РЛ}}) dt_{\text{РЛ}} \text{ [В]}. \quad (13)$$

Значение тока в рельсах при контрольном режиме рассчитывается по закону Ома для участка цепи:

$$i_{\text{К}} = \frac{u_{\text{ВХ\_К}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{К}})}{|Z_{\text{Р}}| + R_{\text{Д}} + |Z_{\text{Э}}|} \text{ [А]}, \quad (14)$$

где  $Z_{\text{Э}}$  — эквивалентное сопротивление изоляции (в месте излома) [Ом], уровень непрерывного сигнала при изломе рассчитывается по выражению:

$$u_{\text{К}} = i_{\text{К}} \cdot |R_{\text{Э}}| \text{ [В]}. \quad (15)$$

Выражения, определяющие результирующий сигнал на выходе рельсовой линии, будут иметь вид:

$$\tau_{\text{РЛ}} = \frac{\beta_{\text{РЛ}} \cdot L_{\text{К1}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НЕС}}}$$

$$u_{\text{ВЫХ\_К}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{К1}}) = e^{\alpha_{\text{РЛ}} L_{\text{К1}}} \cdot \frac{1}{3,5\tau_{\text{РЛ}}} \int_{t-\frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}}^{t+\frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}} u_{\text{К}}(t_{\text{РЛ}} - \tau_{\text{РЛ}}) dt_{\text{РЛ}} \text{ [В]}. \quad (16)$$

### 3.3. Режим автоматической локомотивной сигнализации

Формирование сигнала автоматической локомотивной сигнализации представлено выражениями 17, а математическое описание прохождения непрерывного сигнала АЛС — выражениями 18, 19.

$$u_a(t) = u_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{\text{АЛС}} \cdot t) \text{ [В]},$$

$$U_{sr1} = \text{if}(0 < t < 0,35, 1, 0) \text{ [В]},$$

$$\begin{aligned}
 U_{sr2} &= \text{if}(0,47 < t < 0,69, 1,0) \text{ [V]}, \\
 U_{sr3} &= \text{if}(0,81 < t < 1,03, 1,0) \text{ [V]}, \\
 U_{sr4} &= \text{if}(1,84 < t < 2,19, 1,0) \text{ [V]}, \\
 U_{sr} &= U_{sr1} + U_{sr2} + U_{sr3} + U_{sr4} \text{ [V]}.
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Расчет уровня непрерывного сигнала кодового тока и напряжения на выходе кодирующей цепи выполняется по выражениям:

$$\begin{aligned}
 i(t) &= \frac{u_a}{R_u + XC_u + R_{\text{РОБС}}} \text{ [A]} \\
 u(t) &= (R_u + XC_u) \cdot i(t) \text{ [V]}.
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Форма непрерывного сигнала в месте наложения нормативного шунта определяется выражениями:

$$\begin{aligned}
 \tau_{\text{РЛ}} &= \frac{\beta_{\text{РЛ}} \cdot L_{\text{Ш\_АЛС}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НЕС}}} \\
 u_{\text{ВХ\_АЛС}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{Ш\_АЛС}}) &= \\
 &= e^{\alpha_{\text{РЛ}} L_{\text{Ш\_АЛС}}} \cdot \frac{1}{3,5 \tau_{\text{РЛ}}} \int_{t - \frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}}^{t + \frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}} u_{\text{ВХ\_РЛ\_АЛС}}(t_{\text{РЛ}} - \tau_{\text{РЛ}}) dt_{\text{РЛ}} \text{ [V]}.
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Полученный после преобразований (18, 19) сигнал шунтируется нормативным шунтом  $R_{\text{Ш}}$ . Ток, получаемый при этом, рассчитывается по закону Ома для участка цепи:

$$i_{\text{АЛС}} = \frac{u_{\text{ВХ\_АЛС}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{Ш\_АЛС}})}{R_{\text{Ш}}} \text{ [A]}.
 \tag{20}$$

Режим короткого замыкания как частный случай шунтового режима содержит расчетные выражения для сравнения мощности, потребляемой питающим трансформатором при коротком замыкании с его максимальной расчетной мощностью (шунтирование с питающего конца), следовательно, не использует элементов рельсовой линии. Описание данного режима по этой причине в статье опущено.

#### 4. Моделирование мешающих факторов рельсовой линии

Процессные модели отказов элементов рельсовой линии — это воспроизведение в модели совокупности процессов, происходящих в линии при отказах ее элементов или критических изменениях значений параметров рельсовой линии. Отказы представлены в виде функциональных схем отказов (ФСО) [13].

Цель использования таких моделей — получить форму и уровень непрерывного сигнала рельсовой линии в промежуточных точках под воздействием мешающих факторов.

Таблица 1. Мешающие факторы рельсовой линии

1	Добавление сопротивления (на входе РЛ) (блок 16–23)	$I_{ВХ\_РЛ} = \frac{u_{ВЫХ\_ТР}(t) \cdot e^{\left(i \cdot \arg(U_{ВЫХ}) \cdot \frac{\pi}{180}\right)}}{R_{СП} + R_3 + Z_{ЭКВ}}$ $R_Д$
2	Сложение с сигналом (грозовое перенапряжение) (блок 35)	$U_{СУМ\_ВЫХ\_РЛ}(t, \beta_{РЛ}, L_{РЛ}) = u_{ВЫХ\_РЛ}(t, \beta_{РЛ\_МОД}, L_{РЛ\_МОД}) +$ $+ u_{ВЫХ\_РЛ}(t, \beta_{РЛ\_С}, L_{РЛ\_С}) + u_{ГРОЗА}(t)$
3	Сложение с сигналом высокой амплитуды — гроза (блок 35)	$U_{СУМ\_ВЫХ\_РЛ}(t, \beta_{РЛ}, L_{РЛ}) = u_{ВЫХ\_РЛ}(t, \beta_{РЛ\_МОД}, L_{РЛ\_МОД}) +$ $+ u_{ВЫХ\_РЛ}(t, \beta_{РЛ\_С}, L_{РЛ\_С}) + u_{ГРОЗЫ}(t)$ $A_{ГРОЗЫ}(t) = -\sin(\sigma^{-\phi t} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t + \phi))$ — грозовой спектр $U_{ВЛИЯНИЯ}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n \left( \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \right) \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t + \phi)$ — влияющее напряжение
4	Потеря шунта: загрязнение поверхностей головок рельсов, следование подвижных единиц с плохим шунтовым эффектом (блок 16–23)	$i_{Ш} = \frac{u_{ВХ\_Ш}(t, \beta_{РЛ}, l_{НШ})}{R_{Ш} + R_Д}, \text{ при } R_{Ш} \rightarrow \infty$ $u_{Ш} = i_{Ш} \cdot R_{Ш},$ $\tau_{РЛ} = \frac{\left( \beta_{РЛ} \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot L_{НШ1}}{2 \cdot \pi \cdot f_{НЕС}}$ $u_{ВЫХ\_Ш}(t, \beta_{РЛ}, l_{НШ1}) =$ $= e^{\alpha_{РЛ} L_{НШ1}} \cdot \frac{1}{3,5 \tau_{РЛ}} \int_{t - \frac{\tau_{РЛ}}{2}}^{t + \frac{\tau_{РЛ}}{2}} U_{Ш}(t_{РЛ} - \tau_{РЛ}) dt_{РЛ}$

Примеры реализации функциональных схем отказов для часто встречающихся (по статистике) отказов рельсовой линии представлены в таблице 1.

## Заключение

Тональные рельсовые цепи на железных дорогах России сейчас и в перспективе являются основным средством контроля свободности (занятости) элементов путевого плана станций и перегонов и целостности рельсовых линий. Актуальность работ, направленных на повышение качества их технической эксплуатации, очевидна. Эффективным средством решения этой задачи является разработка процессной имитационной модели и на ее основе — гибридной экспертной системы тональных рельсовых цепей. Как инструментальное средство экспертная система может использоваться в качестве обучающей

системы, подсистемы систем удаленного мониторинга технического состояния аппаратуры тональных рельсовых цепей, для расчета регулировочных характеристик. Однако предложенные направления применения гибридной экспертной системы возможны только при условии обеспечения и контроля адекватности имитационной модели. Контроль адекватности выполняется процедурами верификации имитационной модели и валидации в отдельности по каждому из указанных направлений применения. Данная работа направлена на повышение адекватности модели основного элемента тональных рельсовых цепей – рельсовой линии, для чего были:

- определены свойства рельсовой линии как объекта моделирования;
- сформулированы требования к построению алгоритма процессной модели рельсовой линии;
- выполнена корректировка содержания отдельных операторов алгоритма для учета влияния смежных рельсовых цепей во всех режимах работы моделируемой тональной рельсовой цепи;
- предложена корректировка содержания отдельных операторов алгоритма с учетом мешающих факторов;
- показана целесообразность разработки процесса моделирования рельсовой линии как элемента базы знаний гибридной экспертной системы для анализа функционирования тональной рельсовой цепи;
- разработан алгоритм моделирования рельсовой линии, основанный на дискретном представлении непрерывного сигнала с учетом внесенных корректировок по п. п. 3, 4.
- реализация алгоритма моделирования рельсовой линии на языке ЛСА обеспечивает контроль его полноты и корректности.

Реализация дальнейших работ по синтезу гибридной экспертной системы с использованием доработанной по требованиям обеспечения адекватности процесса моделирования рельсовой линии предполагает:

- разработку программной реализации алгоритма процесса моделирования рельсовой линии и мешающих факторов;
- повышение адекватности процессной модели тональной рельсовой цепи в целом за счет уточнения процесса моделирования рельсовой линии;
- оценку адекватности процессной модели тональной рельсовой цепи;
- верификацию процессной модели тональной рельсовой цепи.
- валидацию процессной модели тональной рельсовой цепи для использования в качестве базы знаний гибридной экспертной системы тональных рельсовых цепей различного назначения;
- разработку функциональной и информационной структуры гибридной экспертной системы тональных рельсовых цепей;
- разработку программного обеспечения гибридной экспертной системы тональных рельсовых цепей как автоматизированного обучающего комплекса и тренажера по поиску неисправностей тональных рельсовых цепей.

**Библиографический список**

1. *Воронин В. А.* Техническое обслуживание тональных рельсовых цепей: учебное пособие / В. А. Воронин, В. А. Коляда, Б. Г. Цукерман. — М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. — 93 с.
2. *Шаманов В. И.* Помехи на аппаратуру рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Средства защиты: учеб. пособие / В. И. Шаманов. — М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. — 303 с.
3. *Брылеев А. М.* Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. А. Шишляков. — М.: Транспорт, 1978. — 344 с.
4. *Леушин В. Б.* Особенности структур рельсовых цепей автоблокировки: учебное пособие / В. Б. Леушин. — Самара: Изд-во СамГУПС, 2009. — 136 с.
5. *Кравцов Ю. А.* Работоспособность путевых приемников рельсовых цепей тональной частоты при воздействии сетевого тока электропоезда «Сапсан» / Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Вестник транспорта Поволжья. — 2013. — № 3. — С. 14–19.
6. *Ватулин Я. С.* Диагностирование рельсовых соединений. Системы автоматизированного проектирования на транспорте / Я. С. Ватулин, А. И. Дергачев, С. Н. Чуян // Тезисы докладов V Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Федеральное агентство железнодорожного транспорта. — СПб.: ПГУПС, 2014. — С. 9–15.
7. *Денисов Б. П.* Методы контроля корректности построения схем замещения тональных рельсовых цепей в АРМ-ТРЦ / Б. П. Денисов, В. Б. Культин, С. Н. Растегаев, Н. Ю. Воробей // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2010. — Вып. 4 (25). — С. 110–119.
8. *Воробей Н. Ю.* Автоматизация построения схем замещения тональных рельсовых цепей с использованием формализованного описания / Н. Ю. Воробей // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2011. — Вып. 3 (28). — С. 47–53.
9. *Растегаев С. Н.* Автоматизация формирования схем замещения для расчета ТРЦ / С. Н. Растегаев, Н. Ю. Воробей // Автоматика, связь, информатика: научно-популярный производственно-технический журнал. — М.: ОАО «РЖД», 2011. — № 4. — С. 12–13.
10. *Сапожников В. В.* Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Талалаев и др.; под ред. Вл. В. Сапожникова. — М.: Транспорт, 1997. — 288 с.
11. *Булавский П. Е.* Формализация алгоритмического описания систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики / П. Е. Булавский, Д. С. Марков, В. Б. Соколов, Т. Ю. Константинова // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1, № 4. — С. 418–432.
12. *Марков Д. С.* Понятийный аппарат экспертизы и испытаний железнодорожной автоматики на безопасность / Д. С. Марков, О. А. Наседкин, Д. А. Васильев, М. А. Бутузов // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4, № 1. — С. 30–45.
13. *Соколов М. Б.* Методы и алгоритмы процессного моделирования тональных рельсовых цепей в системах управления движением поездов: дис. ... канд. техн. наук, специальность: 05.22.08 / М. Б. Соколов. — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2013. — 184 с.

14. *Боглаев Ю. П.* Вычислительная математика и программирование / Ю. П. Боглаев. — М.: Высшая школа, 1990. — 267 с.
15. *Разевиг В. Д.* Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7 / В. Д. Разевиг. — М.: Горячая линия — Телеком, 2003. — 368 с.
16. *Крылов В. В.* Основы теории цепей для системотехников / В. В. Крылов, С. Я. Корсаков. — М.: Высшая школа, 1990. — 224 с.
17. Информационная база преподавателя электротехники и электроники Electrical4U. — URL: <https://www.electrical4u.com/> (дата обращения: 09.01.2020).
18. *Лазарев В. Г.* Синтез управляющих автоматов / В. Г. Лазарев, Е. И. Пийль. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 328 с.
19. *Тарасов Е. М.* Математическое моделирование рельсовых цепей с распределенными параметрами рельсовых линий: учеб. пособие / Е. М. Тарасов. — Самара: СамГАПС, 2003. — 118 с.
20. *Василенко М. Н.* Расчет параметров и проверка работоспособности бесстыковых тональных рельсовых цепей / М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, В. Б. Культин, С. Н. Расстегаев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2006. — Вып. 2. — С. 104–112.
21. *Hill R. J.* Modelling of nonlinear rail impedance in ac traction power systems / R. J. Hill, D. C. Carpenter // IEEE Trans on Power Delivery. — 1991. — Vol. 6, N 4. — P. 1755–1761.
22. *Hill R. J.* Determination of rail internal impedance for electric railway traction system simulation / R. J. Hill, D. C. Carpenter // IEE Proceedings B — Electric Power Applications. — 1991. — Vol. 138, N 6. — P. 311–321.
23. *Brown J. C.* Calculation and measurement of rail impedances applicable to remote short circuit fault currents / J. C. Brown, J. Allan, B. Mellit // IEE Proceedings B — Electric Power Applications. — 1992. — Vol. 139, N 4. — P. 295–302.
24. Calculating Induced Voltages and Current in Practical Cases. — Switzerland, Geneva: CCITT Directive, 1989. — Vol. II. — 606 p.
25. *Theeg G.* Railway Signalling & Interlocking: 3ed Edition / G. Theeg, S. Vlasenko. — Germany, Leverkusen: PMC Media House GmbH, 2020. — 552 p.
26. *Hall C.* Modern Signalling: 5th Edition / C. Hall. — UK, Shepperton: Ian Allan Ltd, 2016. — 144 p.
27. *Shamanov V.* Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control / V. Shamanov // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). — Russia, Kazan, 2018. — P. 140–146. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524676.
28. *Zasov V.* Stability Verification of Statistical Methods for Signal Separation / V. Zasov // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). — Russia, Kazan, 2018. — P. 803–807. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524683.
29. *Sedykh D.* Analysis of the Amplitude and Phase-Manipulated Signals of Automation Devices via Bluetooth Technology / D. Sedykh, M. Gordon, D. Zuyev, A. Skorokhodov // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). — Russia, Kazan, 2018. — P. 703–710. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524605.
30. *Efanov D. V.* Diagnostics of Audio-Frequency Track Circuits in Continuous Monitoring Systems for Remote Control Devices: Some Aspects / D. V. Efanov, G. V. Osadchy, V. V. Khóroshev, D. A. Shestovitskiy // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019). — Batumi, Georgia, 2019. — P. 162–170. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884416.



**D. S. Markov**  
**M. B. Sokolov**  
**V. B. Sokolov**

*The department of "Automation and Remote Control on the Railway",  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

## **FORMALIZED SCHEME FOR THE RAILWAY LINE SIMULATION MODELING PROCESS**

A formalized scheme of a railway line simulation model was demonstrated on the basis of continuous signal discrete approximation; the former being the key component of the intelligent database of the hybrid expert system for audio frequency track circuit performance analysis. A discrete model of continuous input signal was presented, as well as the analytic expression of its transformation by the selected items of the railway track given in the form of array-based pointwise values of an approximated signal. It was suggested to divide the railway line into segments, presented in the simulation model by equivalent circuits. The latter provided adequacy of shunt and control operation modes of the track circuit.

The influence of adjacent and neighboring railway circuits of continuous welded rail track was taken into consideration in the formalized scheme on reflective and algorithmic levels. The mathematical scheme made it possible to use the method of process modeling for synthesis of a continuous signal processing simulation model in the railway line. Analytic expressions were introduced for accounting purposes of interfering factors in order to provide adequacy of the process simulation model, in the formalized scheme of the railway line. A multitude of operators and logical conditions of alphabet of logical algorithm schemes were introduced on the basis of analytic expressions introduced in the article. A formalized description of the railway line operation in different modes (normal, shunt, control, automatic train control and short-circuit) was developed using the introduced alphabet based on the language of logical algorithm schemes. It provides relative simplicity of transition to software implementation of the railway line process simulation model for continuous welded rails.

Process modeling, audio frequency track circuit, railway line, equivalent circuit, formalized description, hybrid expert system

### **References**

1. *Vornin V. A., Kolyada V. A. & Tsukerman B. G. (2007) Tekhnicheskoye obsluzhivaniye tonalnykh relsovykh tsepey [Technical maintenance for audio frequency track circuits]. Uchebnoye posobiye [Teaching aid]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 93 p. (In Russian)*
2. *Shamanov V. I. (2019) Pomekhy na apparaturu relsovykh tsepey i avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii. Sredstva zashchity [Noise disturbance in track circuit equipment and automatic cab signaling. Interference protection facilities]. Uchebnoye posobiye [Teaching aid] Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 303 p. (In Russian)*
3. *Bryleev A. M., Kravstov Yu. A. & Shishlyakov A. A. (1978) Teoriya, ustroystvo i rabota relsovykh tsepey [Theory, structure and operation of track circuits]. Moscow, Transport Publ., 344 p. (In Russian)*

4. *Leushin V. B.* (2009) *Osobennosti struktur relsovykh tsepey avtoblokirovki* [*Design specificities of track circuits of automatic block system*]. Uchebnoye posobiye [Teaching aid]. Samara, SamGUPS [Samara State Transport University] Publ., 136 p. (In Russian)
5. *Kravtsov Yu. A., Arkhipov E. V., Antonov A. A. & Bakin M. E.* (2013) Rabotosposobnost putevykh priemnikov relsovykh tsepey tonalnoy chastity pry vozdeistvii setevogo toka elektropoezda “Sapsan” [Operating capacity of audio frequency track circuit receivers during line current effect of the electric train “Sapsan”]. *Vestnik transporta Povolzhya* [*Bulletin of the Volga region transport*], no. 3, pp. 14–19. (In Russian)
6. *Vatulin Ya. S., Dergachev A. I. & Chuyan S. N.* (2014) *Diagnostirovaniye relsovykh soyedineniy. Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya na transporte* [*Diagnosis of rail bonds. Computer-aided design systems for transport*]. Tezisy dokladov V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Federalnoye agenstvo zheleznodorozhnogo transporta [Brief outline reports of the fifth International Research and Training Conference for students, postgraduates and young scholars. Federal Railway Transport Agency]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., pp. 9–15. (In Russian)
7. *Denisov B. P., Kultin V. B., Rastegaev S. N. & Vorobey N. Yu.* (2010) Metody kontrolya korrektnosti postroyeniya skhem zameshcheniya tonalnykh relsovykh tsepey v ARM-TRTs [Testing methods for the design validity of equivalent circuits for audio frequency track circuits in ARM-TRTs (Automated Work Station-Audio Frequency Track Circuits)]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., iss. 4 (25), pp. 110–119. (In Russian)
8. *Vorobey N. Yu.* (2011) Avtomatizatsiya postroyeniya skhem zameshcheniya tonalnykh relsovykh tsepey s ispolzovaniyem formalizovannogo opisaniya [Design automation of equivalent circuits for audio frequency track circuits involving formal description]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., iss. 3 (28), pp. 47–53. (In Russian)
9. *Rastegaev S. N. & Vorobey N. Yu.* (2011) Avtomatizatsiya formirovaniya skhem zameshcheniya dlya rascheta TRTs [Automation of equivalent circuit formation for TRTs calculation]. *Avtomatika, svyaz, informatika: nauchno-populyarniy proizvodstvenno-tekhnicheskij zhurnal* [*Automation, communication, information technology: educational industrial and engineering journal*]. Moscow, OAO “Russian Railways” Publ., no. 4, pp. 12–13. (In Russian)
10. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Talalaev V. I. et al.* (1997) Sertifikatsiya i dokazatelstvo bezopasnosti system zheleznodorozhnoy avtomatiki [Security certification and validation of railway automation systems]. Ed. by Vl. V. Sapozhnikov. Moscow, Transport Publ., 288 p. (In Russian)
11. *Bulavskiy P. E., Markov D. S., Sokolov V. B. & Konstantinova T. Yu.* (2015) Formalizatsiya algoritmicheskogo opisaniya system obespecheniya zhiznennogo tsikla zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Algorithmic description characterization of the lifecycle supporting systems of railway automation and remote control]. *Avtomatika na transporte* [*Transport automation*], vol. 1, no. 4, pp. 418–432. (In Russian)
12. *Markov D. S., Nasedkin O. A., Vasiliev D. A. & Butuzov M. A.* (2018) Ponyatiyniy apparat ekspertizy i ispytaniy zheleznodorozhnoy na bezopasnost [Conceptual framework for security examination and testing of railway automation]. *Avtomatika na transporte* [*Transport automation*], vol. 4, no. 1, pp. 30–45. (In Russian)

13. Sokolov M. B. (2013) *Metody i algoritmy protsessnogo modelirovaniya tonalnykh relsovykh tsepey v sistemakh upravleniya dvizheniyem poezdov* [Methods and algorithms of process modeling of audio frequency track circuits in railway traffic management systems]. Diss. ... Cand. Sci. in Engineering, speciality: 05.22.08. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., 184 p. (In Russian)
14. Boglaev Yu. P. (1990) *Vychislitel'naya matematika i programmirovaniye* [Computational mathematics and computer programming]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 267 p. (In Russian)
15. Razevig V. D. (2003) *Skhemotekhnicheskoye modelirovaniye s pomoshchyu Micro-Cap 7* [Circuit simulation via Micro-Cap 7]. Moscow, Goryachya liniya — Telekom Publ., 368 p. (In Russian)
16. Krylov V. V. & Korsakov S. Ya. (1990) *Osnovy teorii tsepey dlya sisemotekhnikov* [Theoretical analysis of circuit analysis for system designers]. Moscow, Vysshaya shkola [Higher school] Publ., 224 p. (In Russian)
17. *Informatsionnaya baza prepodavatelya elektrotekhniki i elektroniki Electrical4U*. [Informational background for an instructor of electrical engineering and electronics Electrical4U]. URL: <https://www.electrical4u.com/> (accessed: 09.01.2020).
18. Lazarev V. G. & Piyl E. I. (1989) *Sintez upravlyayushchikh avtomatov* [Control automata synthesis]. Moscow, Energoatomizdat, 328 p. (In Russian)
19. Tarasov E. M. (2003) *Matematicheskoye modelirovaniye relsovykh tsepey s raspredelitel'nyy parametry relsovykh liniy* [Mathematical simulation of track circuits with distributed parameters of railway lines]. Uchebnoye posobiye [Teaching aid]. Samara, SamGUPS [Samara State Transport University] Publ., 118 p. (In Russian)
20. Vasilenko M. N., Denisov B. P., Kultin V. B. & Rasstegeev S. N. (2006) *Raschet parametrov i proverka rabotosposobnosti besstykovykh tonalnykh relsovykh tsepey* [Computation of parameters and efficiency check of jointless audio frequency track circuits]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., iss. 2, pp. 104–112. (In Russian)
21. Hill R. J. & Carpenter D. C. (1991) Modelling of nonlinear rail impedance in ac traction power systems. *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 6, no. 4, pp. 1755–1761.
22. Hill R. J. & Carpenter D. C. (1991) Determination of rail internal impedance for electric railway traction system simulation. *IEE Proceedings B — Electric Power Applications*, vol. 138, no. 6, pp. 311–321.
23. Brown J. C., Allan J. & Mellit B. (1992) Calculation and measurement of rail impedances applicable to remote short circuit fault currents. *IEE Proceedings B — Electric Power Applications*, vol. 139, no. 4, pp. 295–302.
24. (1989) *Calculating Induced Voltages and Current in Practical Cases*. Switzerland, Geneva, CCITT Directive, vol. II, 606 p.
25. Theeg G. & Vlasenko S. (2020) *Railway Signalling & Interlocking*. 3ed Edition. Germany, Leverkusen, PMC Media House GmbH, 552 p.
26. Hall C. (2016) *Modern Signalling*. 5<sup>th</sup> Edition. UK, Shepperton, Ian Allan Ltd Publ., 144 p.
27. Shamanov V. (2018) *Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control*. Proceedings of 16<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). Russia, Kazan, pp. 140–146. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524676.
28. Zasov V. (2018) *Stability Verification of Statistical Methods for Signal Separation*. Proceedings of 16<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). Russia, Kazan, pp. 803–807. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524683.

29. *Sedykh D., Gordon M., Zuyev D. & Skorokhodov A. (2018) Analysis of the Amplitude and Phase-Manipulated Signals of Automation Devices via Bluetooth Technology. Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). Russia, Kazan, pp. 703–710. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524605.*
30. *Efanov D. V., Osadchy G. V., Khóroshev V. V. & Shestovitskiy D. A. (2019) Diagnostics of Audio-Frequency Track Circuits in Continuous Monitoring Systems for Remote Control Devices: Some Aspects. Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019). Batumi, Georgia, pp. 162–170. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884416.*

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. И. Шамановым  
Поступила в редакцию 26.02.2020, принята к публикации 24.03.2020*

*МАРКОВ Дмитрий Спиридонович* — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
e-mail: MDS1945@yandex.ru

*СОКОЛОВ Михаил Борисович* — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
e-mail: SMB5@yandex.ru

*СОКОЛОВ Вадим Борисович* — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
e-mail: SVB9@yandex.ru

© Марков Д. С., Соколов М. Б., Соколов В. Б., 2020