

УДК 656.259.12

Д. Д. МЕДВЕДЕВ, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОНТРОЛЬНОГО РЕЖИМА ПЕРЕГОННЫХ ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

Работа посвящена проблеме анализа рельсовой линии при изломе рельса в тональных рельсовых цепях, применяемых в централизованных системах автоблокировки. Выполнен анализ существующих методов расчета  $A$ -параметров эквивалентного четырехполосника рельсовой линии. Разработана компьютерная математическая модель для получения численных значений  $A$ -параметров эквивалентного четырехполосника рельсовой линии. Предложено использовать метод эквивалентного сопротивления для анализа рельсовой линии при изломе рельса в тональных рельсовых цепях. Представлены обобщенные уравнения для рельсового четырехполосника перегонных рельсовых цепей при изломе рельса.

Для обеспечения надежной и устойчивой работы тональной рельсовой цепи (ТРЦ) при выполнении ею основных функций, таких как обнаружение подвижной единицы на участке железнодорожного пути и своевременному обнаружению излома рельса при отсутствии подвижной единицы на контролируемом участке пути необходимо выполнить расчет регулировочных характеристик. Расчет производится двумя способами: первый – по заданным напряжению и току на входе путевого приемника (ПП) находят необходимые для этих условий напряжение и ток путевого генератора (ГП) [1–3]. Второй способ представляет собой решение обратной задачи: по известному напряжению и току ГП рассчитывают фактическое значение напряжения и ток на входе ПП [3]. При решении таких задач используют известные математические выражения, описывающие зависимости между входными и выходными искомыми величинами [1–5]. Основная математическая модель, используемая при анализе ТРЦ в основных режимах её работы (нормальном, шунтовом, АЛС и контрольном) основана на каскадном соединении четырехполосников [1–5]. Расчет первых трех режимов работы ТРЦ не вызывает особых трудностей так как выражения, описывающие зависимости напряжений и токов в данных режимах, широко известны [1, 2] и достаточно неплохо поддаются автоматизации с использованием специализированного математического программного обеспечения. В свою очередь математическая модель контрольного режима более-менее описана в литературе для рельсовых цепей с одним путевым приемником и при наличии изолирующих стыков [1, 2]. В [1, 2] также приводятся математические модели рельсовых цепей, не ограниченных изолирующими стыками, но данные модели не позволяют учесть влияние смежных рельсовых цепей. Множество научных работ посвящено поиску математических моделей рельсовых цепей сложной структуры, но данный вопрос в настоящее время не является окончательно решенным.

В настоящее время при расчете контрольного режима используются две известные методики.

Первая методика определения коэффициентов четырехполосника рельсовой линии при изломе рельса описана в [1, 2] и заключается в получении аналитических выражений для  $A$ -параметров четырехполосника на основании решения уравнений однородной линии,

составленных по граничным условиям, относительно постоянных интегрирования для конкретного случая. Количество постоянных интегрирования в свою очередь напрямую зависит от топологии рассматриваемого участка рельсовой цепи.

Вторая методика основана на использовании правила Крамера (метода обратной матрицы) для решения системы линейных алгебраических, реализованного прикладным математическим пакетом [5]. При помощи данного метода, так же как и по методике [2], необходимо составлять систему линейных уравнений по граничным условиям, но нет необходимости аналитически решать данную систему для определения постоянных интегрирования. Рационально применять данную методику только при анализе рельсовых цепей со сложной топологией.

Основной особенностью перегонных ТРЦ является наличие изолирующих стыков только в рельсовых цепях, ограничивающих перегон, а в рельсовых цепях, расположенных между ними изолирующие стыки отсутствуют. Тогда в общем случае перегонные ТРЦ справедливо разделить на три вида (рисунок 1): а) бесстыковая ТРЦ; б) ТРЦ, ограниченная с релейного конца; в) ТРЦ, ограниченная с питающего конца. На рисунке 1 приняты следующие обозначения: УЗС – устройства защиты и согласования; АЛС – устройства подключения аппаратуры кодирования; ФПМ – путевой фильтр; ГП – путевой генератор; ПП – путевой приемник;  $l_{см1}$  – длина смежной рельсовой линии со стороны питающего конца;  $l_{см2}$  – длина смежной рельсовой линии со стороны релейного конца;  $l_1$  – длина рельсовой линии от питающего конца до места обрыва рельса;  $l_2$  – длина рельсовой линии от релейного конца до места обрыва рельса;  $l_{рл}$  – общая длина рельсовой линии рассматриваемой ТРЦ ( $l_{рл} = l_1 + l_2$ );  $Z_{см1}$  – эквивалентное входное сопротивление аппаратуры смежной рельсовой цепи со стороны питающего конца;  $Z_{см2}$  – эквивалентное входное сопротивление аппаратуры смежной рельсовой цепи со стороны релейного конца.

Для определения  $A$ -параметров рельсового четырехполосника перегонных ТРЦ в контрольном режиме воспользуемся основной схемой замещения (рисунок 2).

Схема замещения рельсовой цепи в контрольном режиме представляет собой каскадное соединение двух четырехполосников  $N_{11}$  и  $N_{12}$ . Где первый четырехполосник  $N_{11}$  замещает участок рельсовой линии между источником питания и местом обрыва, а второй  $N_{12}$  – между местом обрыва и нагрузкой.

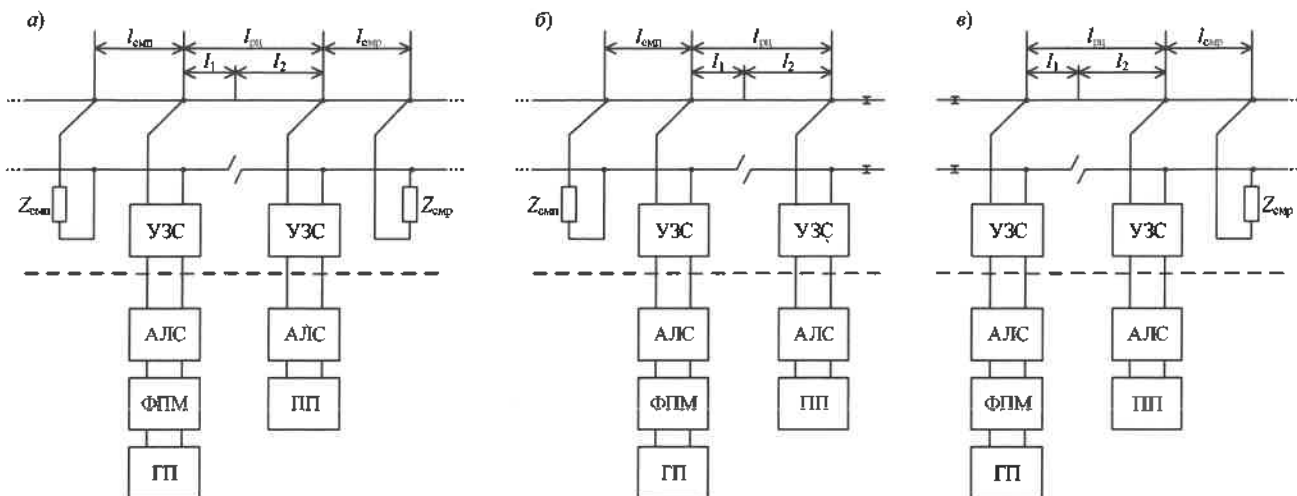


Рисунок 1 – Основные виды тональных рельсовых цепей на перегоне:  
 а – бесстыковая; б – ограниченная с релейного конца; в – ограниченная с питающего конца

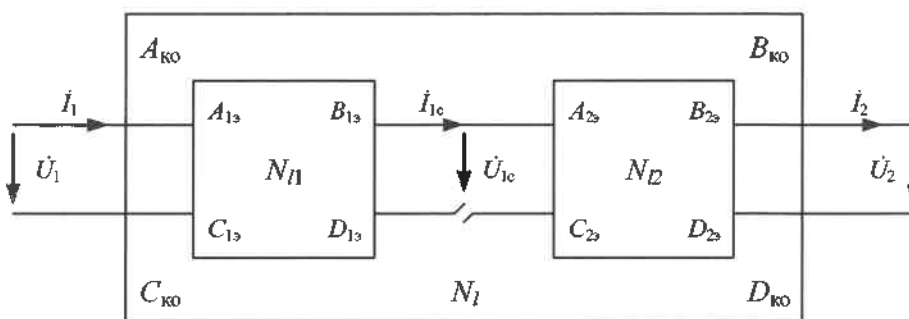


Рисунок 2 – Основная схема замещения рельсовой цепи в контрольном режиме

Для определения  $A$ -параметров каждого из этих четырехполосников необходимо по законам Кирхгофа записать уравнения, связывающие напряжение и ток от источника сигнала до места обрыва (для питающего конца) и от места обрыва до нагрузки (релейный конец). Для получения связывающих уравнений воспользуемся схемами замещений участка рельсовой линии, изображенной в [4, рисунок 3.13] для бесстыковой рельсовой цепи, учитывающей влияние одной смежной рельсовой цепи, и схемой замещения участка рельсовой линии, изображенной в [2, рисунок IV.4, а], для рельсовой цепи с изолирующими смычками (рисунок 3, б, в). На рисунках приняты следующие обозначения:  $\dot{U}_{1с}, \dot{I}_{1с}$  – напряжение и ток в месте излома рельса относительно земли;  $\dot{U}_1, \dot{I}_1$  – напряжение и ток в месте подключения источника питания рельсовой цепи;  $\dot{U}_2, \dot{I}_2$  – напряжение и ток в месте подключения нагрузки;  $\dot{U}'_{1н}, \dot{U}'_{1к}, \dot{U}'_{2н}, \dot{U}'_{2к}$  – напряжение в первом рельсе относительно земли в начале («н») и в конце («к») и во втором рельсе относительно земли в начале («н») и в

конце («к») участков рельсовой линии  $l_1, l_{смп}$  и бесконечно длинного короткозамкнутого участка;  $\dot{U}'_{2н}, \dot{U}'_{2к}$  – то же для второго рельса;  $\dot{I}'_{1н}, \dot{I}'_{1к}, \dot{I}'_{2н}, \dot{I}'_{2к}$  – ток в первом рельсе относительно земли в начале («н») и в конце («к») участков рельсовой линии  $l_1, l_{смп}$  и бесконечно длинного короткозамкнутого участка;  $\dot{I}'_{1н}, \dot{I}'_{1к}, \dot{I}'_{2н}, \dot{I}'_{2к}$  – то же для второго рельса;  $Z_{вхп}$  – эквивалентное обратное входное сопротивление аппаратуры питающего конца;  $Z_{вкк}$  – эквивалентное входное сопротивление аппаратуры релейного конца;  $Z_{смп}, Z_{ср}$  – эквивалентное входное сопротивление аппаратуры смежной рельсовой цепи со стороны питающего и релейного конца соответственно;  $Z_{нвк}, Z_{квк}$  – сопротивление между точкой идеального автотрансформатора и землей в начале и конце рельсовой линии.

Пусть начало координат для рисунка 3, а будет в точке подключения питающего конца, а положительное направление оси  $x$  – в сторону смежной рельсовой цепи. Граничные условия имеют следующий вид:

<p>при <math>x = -l_1</math>:</p> $\begin{aligned} \dot{I}'_{1к} &= \dot{I}'_{1с}; \\ \dot{U}'_{1к} &= \dot{U}'_{1с}; \\ \dot{I}'_{2к} &= 0; \end{aligned}$	<p>при <math>x = 0</math>:</p> $\begin{aligned} \dot{U}'_{1к} - \dot{U}'_{1н} &= 0; \\ \dot{U}'_{2к} - \dot{U}'_{2н} &= 0; \\ \dot{I}'_{1к} + \dot{I}'_{2к} - \dot{I}'_{1н} - \dot{I}'_{2н} &= 0; \end{aligned}$	<p>при <math>x = l_{смп}</math>:</p> $\begin{aligned} \dot{U}'_{1к} - \dot{U}'_{1н} &= 0; \\ \dot{U}'_{2к} - \dot{U}'_{2н} &= 0; \\ \dot{I}'_{1к} + \dot{I}'_{2к} - \dot{I}'_{1н} - \dot{I}'_{2н} &= 0; \\ \dot{I}'_{1н} - \dot{I}'_{1к} + \dot{I}'_{2к} - \dot{I}'_{2н} + (2 / Z_{смп})(\dot{U}'_{1н} - \dot{U}'_{2н}) &= 0; \end{aligned}$	<p>при <math>x = \infty</math>:</p> $\begin{aligned} \dot{I}'_{1н} + \dot{I}'_{2н} &= 0; \\ \dot{U}'_{1н} - \dot{U}'_{2н} &= 0; \end{aligned}$
---	--	--	--

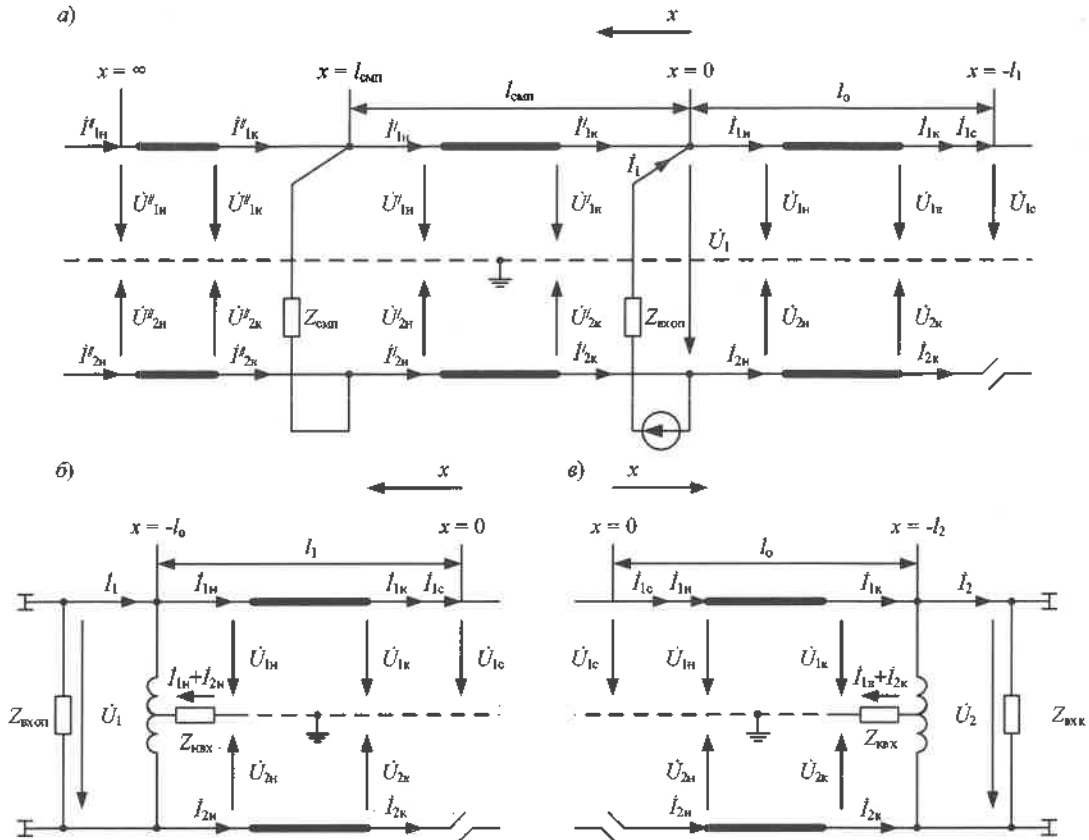


Рисунок 3 – Схема замещения участка рельсовой линии:  
 а – между питающим концом и местом обрыва рельса бесстыковой (а) и ограниченной (б) ТРЦ;  
 рельсным концом и местом обрыва рельса ограниченной ТРЦ (в)

Если принять ограничение, что рельсовая линия является симметричной, в соответствии с [2] уравнения для определения коэффициентов четырехполосника будут иметь вид

$$A_1 \operatorname{ch}(\gamma_1 l_0) - A_2 \operatorname{sh}(\gamma_1 l_0) + A_3 \operatorname{ch}(\gamma_2 l_0) - A_4 \operatorname{sh}(\gamma_2 l_0) = \dot{U}_{1c}; \quad (1)$$

$$y_{21}(A_2 \operatorname{ch}(\gamma_1 l_0) - A_1 \operatorname{sh}(\gamma_1 l_0)) - y_{22}(A_4 \operatorname{ch}(\gamma_2 l_0) - A_3 \operatorname{sh}(\gamma_2 l_0)) = \dot{I}_{1c}; \quad (2)$$

$$y_{21}(A_2 \operatorname{ch}(\gamma_1 l_0) - A_1 \operatorname{sh}(\gamma_1 l_0)) + y_{22}(A_4 \operatorname{ch}(\gamma_2 l_0) - A_3 \operatorname{sh}(\gamma_2 l_0)) = 0; \quad (3)$$

$$A_1' - A_1 - A_3 + A_3' = 0; \quad (4)$$

$$A_3 - A_3' - A_1' + A_1 = 0; \quad (5)$$

$$2y_{21}A_2' - 2y_{21}A_2 = 0; \quad (6)$$

$$A_1'' \operatorname{ch}(\gamma_1 l_{\text{смп}}) + A_2'' \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{\text{смп}}) + A_3'' \operatorname{ch}(\gamma_2 l_{\text{смп}}) + A_4'' \operatorname{sh}(\gamma_2 l_{\text{смп}}) - A_1' \operatorname{ch}(\gamma_1 l_{\text{смп}}) - A_2' \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{\text{смп}}) - A_3' \operatorname{ch}(\gamma_2 l_{\text{смп}}) - A_4' \operatorname{sh}(\gamma_2 l_{\text{смп}}) = 0; \quad (7)$$

$$A_1'' \operatorname{ch}(\gamma_1 l_{\text{смп}}) + A_2'' \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{\text{смп}}) - A_3'' \operatorname{ch}(\gamma_2 l_{\text{смп}}) - A_4'' \operatorname{sh}(\gamma_2 l_{\text{смп}}) - A_1' \operatorname{ch}(\gamma_1 l_{\text{смп}}) - A_2' \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{\text{смп}}) +$$

$$+ A_3' \operatorname{ch}(\gamma_2 l_{\text{смп}}) + A_4' \operatorname{sh}(\gamma_2 l_{\text{смп}}) = 0; \quad (8)$$

$$-2y_{21}(A_1' \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{\text{смп}}) + A_2' \operatorname{ch}(\gamma_1 l_{\text{смп}})) = 0; \quad (9)$$

$$-2y_{21}(A_1' \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{\text{смп}}) + A_2' \operatorname{ch}(\gamma_1 l_{\text{смп}})) + 2y_{22}(A_3'' \operatorname{sh}(\gamma_2 l_{\text{смп}}) + A_4'' \operatorname{ch}(\gamma_2 l_{\text{смп}})) - 2y_{22}(A_3' \operatorname{sh}(\gamma_2 l_{\text{смп}}) + A_4' \operatorname{ch}(\gamma_2 l_{\text{смп}})) + \frac{2}{Z_{\text{смп}}}(A_3' \operatorname{ch}(\gamma_2 l_{\text{смп}}) + A_4' \operatorname{sh}(\gamma_2 l_{\text{смп}})) = 0; \quad (10)$$

$$A_1'' + A_2'' = 0; \quad (11)$$

$$A_3'' + A_4'' = 0. \quad (12)$$

Для выражений (1)–(12)

$$y_{11} = \frac{1}{Z_{\text{в1}}}; \quad y_{12} = \frac{1}{Z_{\text{в2}}};$$

$$y_{21} = y_{11}; \quad y_{22} = -y_{12},$$

где  $Z_{\text{в1}} = 0,5EZ_{\text{в}}\sqrt{1+2p}$  – волновое сопротивление земляного тракта для симметричной рельсовой линии;  $Z_{\text{в2}} = 0,5Z_{\text{в}}$  – волновое сопротивление фазового тракта для симметричной рельсовой линии;  $E$  – постоянная земляного тракта;  $Z_{\text{в}} = \sqrt{Zr_{\text{н}}}$  – волновое сопротивление рельсовой линии;  $\gamma = \sqrt{\frac{Z}{r_{\text{н}}}}$  – коэффициент распро-

странения волны для симметричной рельсовой линии;

$$\gamma_1 = \frac{E\gamma}{\sqrt{1+2p}} - \text{коэффициент распространения волны}$$

земляного тракта рельсовой линии;  $\gamma_2 = \gamma$  – коэффициент распространения волны фазового тракта рельсовой линии;  $Z$  – удельное сопротивление рельсовой линии;  $r_n$  – удельное сопротивление изоляции рельсовой линии;  $p$  – коэффициент поверхностной проводимости.

На основании законов Кирхгофа напряжение  $\dot{U}_1$  и ток  $\dot{I}_1$  выражаются уравнениями:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1н} - \dot{U}_{2н}; \quad (13)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{2}(\dot{I}_{1н} - \dot{I}'_{1к} + \dot{I}'_{2к} - \dot{I}_{2н}). \quad (14)$$

С учетом выражений для напряжений и токов в первом и втором рельсе [2] уравнения (13) и (14) примут следующий вид:

$$\dot{U}_1 = 2A'_3; \quad (15)$$

$$\dot{I}_1 = y_{22}(A'_4 - A_4). \quad (16)$$

Выражений (1)–(12), (15), (16) и численных значений  $Z, r_n, p$ , напряжения и тока на выходе эквивалентного четырехполосника  $\dot{U}_{1с}, \dot{I}_{1с}$  будет достаточно чтобы получить численные значения  $A$ -параметров четырехполосника  $N_{11}$  согласно методике, изложенной в [5] или используя вычислительный блок *Given / Find* системы компьютерной алгебры *Mathcad 15*. Причем в обоих случаях следует задаваться двумя парами численных значений  $\dot{U}_{1с}, \dot{I}_{1с}$  имитирующими режимы холостого хода и короткого замыкания согласно [5].

Четырехполосник  $N_{12}$  при рассмотрении бесстыковой ТРЦ (см. рисунок 1, а) будет аналогичен четырехполоснику  $N_{11}$ , поэтому для нахождения численных значений  $A$ -параметров  $N_{12}$  справедливо будет воспользоваться выражениями (1)–(14) с заменой в них  $l_1$  на  $l_2, l_{смп}$  на  $l_{смп}$  и  $Z_{смп}$  на  $Z_{смп}$ . При этом необходимо

учесть, что в четырехполоснике  $N_{12}$ , направление передачи сигнала будет противоположным по сравнению с  $N_{11}$ , поэтому коэффициенты  $A$  и  $D$  следует поменять местами.

Выражения для определения параметров четырехполосников для участков, ограниченных изолирующими стыками (см. рисунок 3, б, в) достаточно полно описаны в [1, 2].

Коэффициенты четырехполосника  $N_{12}$  для ТРЦ, ограниченной с релейного конца (см. рисунок 3, б), имеют вид [2]:

$$\left. \begin{aligned} A_{23} &= 0,5E\sqrt{1+2p} \operatorname{sh}(\gamma l_2) + 0,5 \operatorname{ch}(\gamma l_2); \\ B_{23} &= 0,5E\sqrt{1+2p} \operatorname{ch}(\gamma l_2) + \frac{Z_B}{2} \operatorname{sh}(\gamma l_2); \\ C_{23} &= \frac{2 \operatorname{sh}(\gamma l_2)}{Z_B}; \\ D_{23} &= 2 \operatorname{ch}(\gamma l_2). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Коэффициенты четырехполосника  $N_{11}$  для ТРЦ, ограниченной с питающего конца (см. рисунок 3, в), можно получить из (17) с учетом обратного направления (меняются местами  $A$  и  $D$ ) и с заменой  $l_2$  на  $l_1$ .

К плюсам методики расчета контрольного режима с помощью вычислительного блока *Given / Find* системы компьютерной алгебры *Mathcad 15* можно отнести простоту конструкций и несложную реализацию после получения системы линейных уравнений. Данная методика может применяться для анализа ТРЦ любой топологии. Основным недостатком вышеописанных методик является необходимость составления системы линейных уравнений по граничным условиям.

В [1, 2] также известна эквивалентная схема замещения рельсовой цепи в контрольном режиме, представленная на рисунке 4.

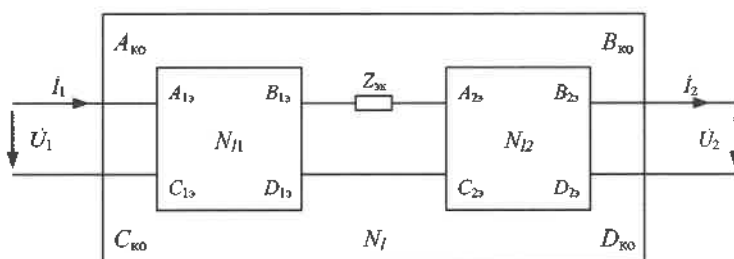


Рисунок 4 – Эквивалентная схема замещения неразветвленной рельсовой контрольным режиме

В данной схеме общий четырехполосник поврежденной линии  $A_{ко}, B_{ко}, C_{ко}, D_{ко}$  представляет собой каскадно включенные четырехполосники рельсовой линии РЛ<sub>1</sub> длиной  $l_1$ , некоего эквивалентного сопротивления  $Z_{эк}$ , включенного в месте повреждения рельса и рельсовой линии РЛ<sub>2</sub> длиной  $l_2$ . Четырехполосники РЛ<sub>1</sub> и РЛ<sub>2</sub> будут являться четырехполосниками обычной рельсовой линии вторичные параметры которых соответствуют наилучшим условиям контрольного режима (сопротивление рельсов минимальное, а сопротивление изоляции – критическое).

Выражения коэффициентов  $A_{ко}, B_{ко}, C_{ко}, D_{ко}$  получим перемножением четырехполосников РЛ<sub>1</sub>,  $Z_{эк}$ , РЛ<sub>2</sub>

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} A_{ко} & B_{ко} \\ C_{ко} & D_{ко} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \operatorname{ch}(\gamma l_1) & Z_B \operatorname{sh}(\gamma l_1) \\ \operatorname{sh}(\gamma l_1) & \operatorname{ch}(\gamma l_1) \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & Z_{эк} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \operatorname{ch}(\gamma l_2) & Z_B \operatorname{sh}(\gamma l_2) \\ \operatorname{sh}(\gamma l_2) & \operatorname{ch}(\gamma l_2) \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (18)$$

Согласно [1, 2]  $Z_{ЭК}$  выражается следующим образом:

$$Z_{ЭК} = 2EZ_B \sqrt{1 + 2p}. \quad (19)$$

Схема замещения, представленная на рисунке 4 и выражения (18), (19) справедливы только при рассмотрении рельсовой цепи, ограниченной изолирующими стыками с обеих сторон.

Для анализа перегонных ТРЦ, представленных на ри-

сунке 1, предлагается дополнить схему замещения, представленную на рисунке 4, сопротивлениями  $Z_{ВХ.СМП}$  и  $Z_{ВХ.СМР}$ , которые учитывают утечки в смежные рельсовые цепи со стороны питающего и релейного конца соответственно и наличие за смежными рельсовыми цепями бесконечно длинного и замкнутого накоротко в начале участка. С учетом вышесказанного эквивалентные схемы рельсовых линий для перегонных ТРЦ (см. рисунок 1) представлены на рисунке 5.

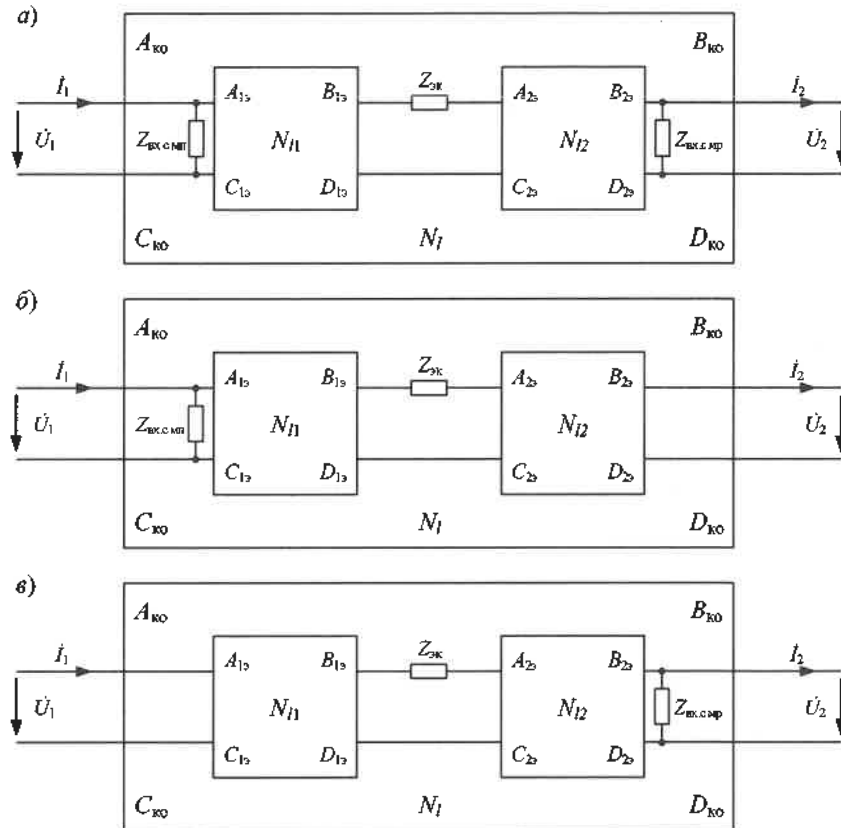


Рисунок 5 – Эквивалентные схемы замещения тональных рельсовых цепей на перегоне:  
а – бесстыковая; б – ограниченная с релейного конца; в – ограниченная с питающего конца

Выражения коэффициентов  $A_{КО}$ ,  $B_{КО}$ ,  $C_{КО}$ ,  $D_{КО}$  для схем замещения, представленных на рисунке 5, будут иметь следующий вид:

– для бесстыковой рельсовой цепи с учетом смежных участков

$$\begin{vmatrix} A_{КО} & B_{КО} \\ C_{КО} & D_{КО} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{ВХ.СМП}} & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \text{ch}(\gamma l_1) & Z_B \text{sh}(\gamma l_1) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l_1)}{Z_B} & \text{ch}(\gamma l_1) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & Z_{ЭК} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \text{ch}(\gamma l_2) & Z_B \text{sh}(\gamma l_2) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l_2)}{Z_B} & \text{ch}(\gamma l_2) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{ВХ.СМР}} & 1 \end{vmatrix}; \quad (20)$$

– для рельсовой цепи ограниченной с релейного конца

$$\begin{vmatrix} A_{КО} & B_{КО} \\ C_{КО} & D_{КО} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{ВХ.СМП}} & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \text{ch}(\gamma l_1) & Z_B \text{sh}(\gamma l_1) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l_1)}{Z_B} & \text{ch}(\gamma l_1) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & Z_{ЭК} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \text{ch}(\gamma l_2) & Z_B \text{sh}(\gamma l_2) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l_2)}{Z_B} & \text{ch}(\gamma l_2) \end{vmatrix}; \quad (21)$$

– для рельсовой цепи ограниченной с питающего конца

$$\begin{vmatrix} A_{КО} & B_{КО} \\ C_{КО} & D_{КО} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \text{ch}(\gamma l_1) & Z_B \text{sh}(\gamma l_1) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l_1)}{Z_B} & \text{ch}(\gamma l_1) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & Z_{ЭК} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \text{ch}(\gamma l_2) & Z_B \text{sh}(\gamma l_2) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l_2)}{Z_B} & \text{ch}(\gamma l_2) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{ВХ.СМР}} & 1 \end{vmatrix}. \quad (22)$$

После перемножения и преобразования с учетом формул для  $\text{sh}(\pm)$  и  $\text{ch}(\pm)$  и выражения (19) получим следующие обобщенные уравнения для рельсового четырехполосника перегонных рельсовых цепей:

$$\left. \begin{aligned} A_{\text{ко}} &= \text{ch}(\gamma l) + 2E\sqrt{1+2p}\text{ch}(\gamma l_1)\text{sh}(\gamma l_2) + S_1; \\ B_{\text{ко}} &= Z_{\text{в}}[\text{sh}(\gamma l) + 2E\sqrt{1+2p}\text{ch}(\gamma l_1)\text{ch}(\gamma l_2)]; \\ C_{\text{ко}} &= \frac{1}{Z_{\text{в}}}\left[\text{sh}(\gamma l) + 2E\sqrt{1+2p}\text{sh}(\gamma l_1)\text{sh}(\gamma l_2)\right] + S_3 + S_4; \\ D_{\text{ко}} &= \text{ch}(\gamma l) + 2E\sqrt{1+2p}\text{sh}(\gamma l_1)\text{ch}(\gamma l_2) + S_2. \end{aligned} \right\} (23)$$

$$\text{где } S_1 = \frac{Z_{\text{в}}}{Z_{\text{вх.смп}}}\left[\text{sh}(\gamma l) + 2E\sqrt{1+2p}\text{ch}(\gamma l_1)\text{ch}(\gamma l_2)\right];$$

$$S_2 = \frac{Z_{\text{в}}}{Z_{\text{вх.смп}}}\left[\text{sh}(\gamma l) + 2E\sqrt{1+2p}\text{ch}(\gamma l_1)\text{ch}(\gamma l_2)\right];$$

$$S_3 = \frac{1}{Z_{\text{вх.смп}}}\left[\text{ch}(\gamma l) + 2E\sqrt{1+2p}\text{ch}(\gamma l_1)\text{sh}(\gamma l_2)\right];$$

$$S_4 = \frac{1}{Z_{\text{вх.смп}}}\left[\text{ch}(\gamma l) + 2E\sqrt{1+2p}\text{sh}(\gamma l_1)\text{ch}(\gamma l_2) + S_2\right].$$

Причем при расчете ТРЦ, ограниченной со стороны питающего конца  $S_2 = 0$  и  $S_3 = 0$ , а для ТРЦ, ограниченной со стороны релейного конца соответственно  $S_1 = 0$  и  $S_4 = 0$ .

Для учета бесконечно длинного и замкнутого накопителя в начале участка, находящегося за смежной рельсовой цепью, необходимо при расчете  $A$ -параметров рельсового четырехполосника воспользоваться выражением (VII.4) из [2]:

$$\left. \begin{aligned} A_{\text{рл.смп}} &= \text{ch}(\gamma' l_{\text{смп}}) + \text{sh}(\gamma' l_{\text{смп}}); \\ B_{\text{рл.смп}} &= Z_{\text{в}}\text{sh}(\gamma' l_{\text{смп}}); \\ C_{\text{рл.смп}} &= \frac{1}{Z_{\text{в}}}\left[\text{sh}(\gamma' l_{\text{смп}}) + \text{ch}(\gamma' l_{\text{смп}})\right]; \\ D_{\text{рл.смп}} &= \text{ch}(\gamma' l_{\text{смп}}). \end{aligned} \right\} (24)$$

Тогда входное сопротивление смежной рельсовой цепи со стороны питающего конца

$$Z_{\text{вх.смп}} = \frac{A_{\text{рл.смп}}Z_{\text{смп}} + B_{\text{рл.смп}}}{C_{\text{рл.смп}}Z_{\text{смп}} + D_{\text{рл.смп}}}. \quad (25)$$

Для расчета входного сопротивления смежной рельсовой цепи со стороны релейного конца необходимо в (24) заменить  $l_{\text{смп}}$  на  $l_{\text{смп}}$ , а в (24)  $Z_{\text{смп}}$  на  $Z_{\text{смп}}$ .

Для проверки корректности предложенного метода был произведен расчет  $A$ -параметров рельсового четырехполосника бесстыковой ТРЦ методом численного решения системы линейных уравнений с помощью вычислительного блока *Given / Find* системы компьютерной алгебры *Mathcad 15* и методом вносимого сопротивления. Параметры исследуемой ТРЦ:  $l_{\text{рл}} = 0,5$  км;  $l_{\text{смп}} = l_{\text{смп}} = 0,7$  км;  $l_1 = l_2 = 0,25$  км; частота сигнального тока  $f = 420$  Гц;  $Z_{\text{смп}} = Z_{\text{смп}} = 0,42e^{j46,8}$ .

Дополнительно сравнивались результаты расчета, полученные двумя различными способами при одном

произвольном наборе исходных данных. Расчет относительной погрешности полученных результатов для оценки результатов расчета, выполненного различными способами по следующей формуле:

$$\delta = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \cdot 100\%, \quad (26)$$

где  $X_1, X_2$  – коэффициенты ( $A, B, C$  или  $D$ ) рельсового четырехполосника полученные методами численного решения системы линейных уравнений [1, 2, 4, 5] и вносимого сопротивления.

С помощью выражения (26) была выполнена оценка результатов расчета  $A$ -параметров по методу вносимого сопротивления относительно  $A$ -параметров, рассчитанных методом численного решения системы линейных уравнений, для 10 000 точек с различными исходными данными.

Наибольшее значение погрешности составляет  $4,249 \cdot 10^{-14}\%$ , что в свою очередь подтверждает корректность применения метода вносимого сопротивления для получения  $A$ -параметров рельсового четырехполосника перегонных ТРЦ в контрольном режиме.

Так как физически очень затруднительно провести исследование работы рельсовой цепи в контрольном режиме, необходимо при составлении регулировочных таблиц иметь математические модели, достаточно точно описывающие физические процессы, которые происходят при изломе рельса.

Рассмотренные методики получения численных значений  $A$ -параметров рельсового четырехполосника [1, 2, 4, 5] позволяют достаточно точно оценить пути растекания сигнального тока вдоль рельсовой линии. Однако недостатком данных методик является необходимость составления системы линейных уравнений на основании граничных условий для последующего определения значений постоянных интегрирования. Количество уравнений в свою очередь зависит от топологии рассматриваемого участка.

Применение же предложенного способа расчета контрольного режима методом вносимого сопротивления в свою очередь позволяет отказаться от составления громоздких уравнений. При анализе перегонной ТРЦ методом вносимого сопротивления достаточно знать ее топологию для того, чтобы при помощи обобщенного выражения (23) получить численные значения  $A$ -параметров рельсового четырехполосника.

Стоит отметить, что в классических математических моделях [1, 2, 4, 5] расчет ТРЦ производится только в установившемся состоянии, без учета искажения спектра при его прохождении через устройства ТРЦ. Сигнал ТРЦ имеет довольно сложную форму, и при расчетах дополнительно следует учитывать его частотные составляющие при помощи метода рядов Фурье [3].

Метод вносимого сопротивления для анализа контрольного режима может быть использован для со-

ставления регулировочных таблиц перегонных ТРЦ, при составлении классификаторов состояний рельсовых линий и при необходимости может быть дополнен методом рядов Фурье [3] для учета частотной и временной составляющей сигнала ТРЦ.

#### Список литературы

1 Котляренко, Н. Ф. Электрические рельсовые цепи / Н. Ф. Котляренко. – М. : Трансжелдориздат, 1961. – 327 с.

2 Брылеев, А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – М. : Транспорт, 1978. – 344 с.

3 Медведев, Д. Д. Анализ искажений амплитудно-манипулированного сигнала контроля рельсовых линий / Д. Д. Медведев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2024. – № 1 (48). – С.17–23.

4 Щербина, А. Е. Способ повышения устойчивости функционирования рельсовых цепей тональной частоты : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / А. Е. Щербина; Московский гос. ун-т путей сообщения. – М., 2011. – 24 с.

5 Щербина, А. Е. Методика получения А-параметров эквивалентного четырехполюсника рельсовой линии при изломе рельса без аналитического решения дифференциальных уравнений / А. Е. Щербина, Е. Г. Щербина // Автоматика на транспорте. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 123–154.

Получено 11.11.2024

#### **D. D. Medvedev. Methods of calculation of control mode of overpass tonal rail circuits.**

The paper is devoted to the problem of rail line analysis at rail fracture in tone rail circuits used in centralized autoblocking systems. The existing methods of calculation of A-parameters of the equivalent four-pole of the rail line are analyzed. A computer mathematical model for obtaining numerical values of A-parameters of the equivalent four-pole pole of a rail line is developed. It is proposed to use the method of equivalent impedance to analyze the rail line at rail fracture in tone rail circuits. The generalized equations for the rail quadrupole of tunnel rail circuits at rail fracture are presented.