

УДК 656.259.12

## МОДЕЛИ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ ДЛЯ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ С АДАПТИВНЫМ ПРИЁМНИКОМ

© 2010 Ф. Р. Ахмадуллин

Самарский государственный университет путей сообщения

Рассматриваются модели рельсовых линий, которые могут быть использованы для анализа и расчёта адаптивных рельсовых цепей, приводятся критерии оценки состояния адаптивных рельсовых цепей, схемы замещения типовой рельсовой цепи с сосредоточенным шунтом адаптивной рельсовой цепью с сосредоточенным и распределенным шунтами. Описанные модели рельсовых линий используются для исследования методов контроля адаптивных рельсовых цепей.

*Модель, рельсовая линия, рельсовая цепь, адаптивная рельсовая цепь, схема замещения, шунт.*

Одним из достоинств находящихся в эксплуатации типовых рельсовых цепей [1] является большая длина, но имеются и недостатки – это наличие изолирующих стыков, самых ненадежных элементов рельсовых цепей (РЦ), отсутствие достоверного контроля состояния РЛ при пониженном сопротивлении изоляции, сравнительно низкое значение нормативного шунта по сравнению с шунтами других стран. Поэтому становится актуальным вопрос о разработке такой рельсовой цепи, которая смогла бы обеспечить надёжный и достоверный контроль состояния рельсовой цепи при длине рельсовой линии 1 – 2 км и снижении сопротивления изоляции до 0,1 – 0,2 Ом·км, что позволит значительно уменьшить затраты на строительство, эксплуатацию систем интервального регулирования движения поездов (ИРДП) и, что особенно важно, повысить безопасность движения поездов. Такие РЦ были разработаны – адаптивные рельсовые цепи (АРЦ). АРЦ – это РЦ, контроль состояния которой осуществляется с учётом сопротивления изоляции в текущий момент времени [2].

Для анализа рельсовых цепей с адаптивным приёмником приходится учитывать состояние (наличие шунтов, величину сопротивления изоляции каждой РЛ, динамику и диапазон изменения этого сопротивления и т.д.) нескольких рельсовых цепей одновременно, их взаимное влияние друг на друга.

В условиях, когда контроль состояния каждой РЦ зависит от состояния рельсовых линий других участков, необходимо исследовать модель, которая бы представляла совокупность рельсовых линий. Такую совокупность назовем контролируемой зоной (КЗ). Исследование таких рельсовых цепей существенно отличается от исследования рельсовых цепей с приёмниками релейного действия.

Сложность контроля РЛ состоит в том, что одновременно должны анализироваться напряжения приёмных концов двух или более рельсовых линий КЗ. Для анализа работы АРЦ составлена математическая модель: схема замещения РЦ, аналитические выражения, алгоритм расчёта и программа, которая учитывает токораспределение по всей длине КЗ. Кроме модели РЛ КЗ должен быть разработан и алгоритм контроля их состояния. Для реализации такого алгоритма может быть использована ЭВМ при помощи программы, соответствующей выбранному способу контроля состояния РЛ. Поэтому составным элементом АРЦ, наряду с приборами питающих и приёмных концов и рельсовыми линиями КЗ, является многоходовой приёмник с программой контроля состояния адаптивных рельсовых цепей (ПАРЦ). Для анализа достоверности работы АРЦ необходимо исследовать комплекс, состоящий из РЛ КЗ и многоходового приёмника с ПАРЦ. Каждая рельсовая линия КЗ может быть представлена четырехполюсниками (рис. 1), которые в отличие от четырехполюсников

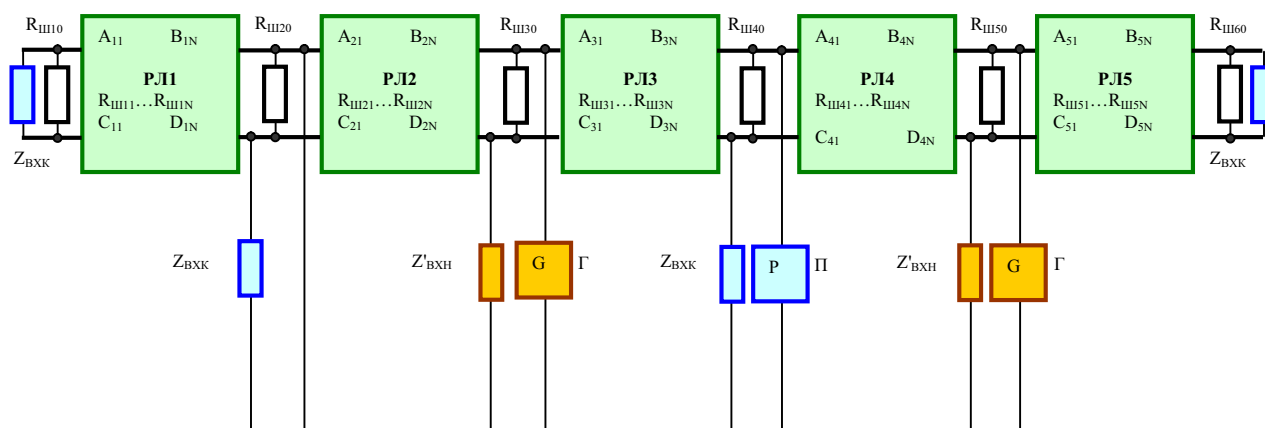


Рис. 1. Расчётная базовая схема замещения рельсовых цепей контролируемой зоны

рельсовых цепей с пороговым приемником имеют существенные отличия. При определении порога переключения приёмника учитывается изменение сопротивления изоляции и наличие продольной асимметрии.

Контролируемой зоной может быть совокупность компактно расположенных рельсовых линий станции или перегона, контролируемых совместно посредством одного многовходового приёмника. Рельсовые линии контролируемой зоны могут быть свободны или частично заняты, поэтому электрическая модель контролируемой зоны для анализа АРЦ должна учитывать такую ситуацию. В адаптивных рельсовых цепях нормальный и шунтовой режимы не могут рассматриваться отдельно, так как контроль состояния РЛ зависит от параметров РЛ, в т. ч. и от шунтов, размещённых на них (контрольный режим в этом случае не рассматривается в связи с тем, что по сравнению с другими режимами он наступает реже, и в большинстве случаев это происходит под проходящим поездом, который в этом режиме защитить, а также выявить этот режим практически не представляется возможным, так как гальваническая связь между лопнувшими рельсами присутствует практически всегда). Более того, рельсовые линии КЗ для основных режимов (нормального, шунтового) должны быть представлены единой схемой замещения. Первым шагом к созданию обобщённой модели является схема замещения, представляющая рельсовую линию КЗ в нормальном и шунтовом режимах. Одной из таких моделей является

рельсовая линия, представленная рядом четырёхполюсников, которые эквивалентны коротким участков (от пяти до пятидесяти метров) и поездным шунтам. Кроме того, учитывается влияние смежных рельсовых линий, как с поездными шунтами, так и без них. В зависимости от частоты сигнального тока и сопротивления изоляции возможно влияние шунтов, расположенных на значительных расстояниях от исследуемой рельсовой линии.

Для исследований РЦ с адаптивным приёмником необходимо разработать новую модель рельсовой линии, т.к. известная модель не учитывает изменение сопротивления изоляции, продольную асимметрию.

Схему замещения АРЦ с учётом влияния смежных РЦ можно представить в соответствии с рис. 2 – 5, где  $A_{C11}$ ,  $B_{C11}$ ,  $C_{C11}$ ,  $D_{C11}$  и  $A_{C12}$ ,  $B_{C12}$ ,  $C_{C12}$ ,  $D_{C12}$  – коэффициенты четырёхполюсников рассматриваемой РЛ,  $A_{шс}$ ,  $B_{шс}$ ,  $C_{шс}$ ,  $D_{шс}$  – коэффициенты четырёхполюсника РЛ с расположенным на нём распределённым шунтом,  $Z_{ВХЛ}$  и  $Z_{ВХП}$  представляют собой эквивалентное сопротивление левых и правых смежных рельсовых цепей,  $Z'_{ВХН}$  – обратное входное сопротивление начала РЦ,  $Z_{ВХК}$  – входное сопротивление конца РЦ,  $R_{шс}$  – сопротивление шунта, расположенного на рассматриваемой РЛ,  $U_E$  – напряжение эквивалентного генератора.

Схема замещения типовой РЦ представлена на рис. 2. В этой РЦ имеется сосредоточенный шунт. Расчёт нормального и шунтового режимов производится для наихудших значений сопротивления изоляции, т. е. для минимальных и

максимальных соответственно, и не учитывает отражённой волны (согласованности нагрузки).

Для АРЦ этот расчёт является неполным и не отвечает критериям безопасности, так как здесь учитывается текущее значение  $r_n$ , которое и является наихудшим (мы не измеряем  $r_n$ , а по напряжению определяем его), и по нему, строго говоря, производятся все расчёты режимов. И с тем, чтобы не ошибиться, учитывается изменение балласта за время движения поезда. Это и есть диапазон изменения  $r_n$ . И чем он уже, тем больше длина РЦ (в идеале, если он равен нулю, то длина равна бесконечности). А чем больше время занятости участка, тем дольше учитывается этот диапазон, т.к. за это время балласт мог измениться (намокнуть или высохнуть). К тому же, если в обычной РЦ наихудшим шунтом был шунт одиночного вагона, то в АРЦ его нет, им может быть любой шунт. Любое значение шунта может создать опасную ситуацию, поэтому должно учитываться любое значение шунта.

Схема замещения адаптивной РЦ, где предусматривается распределённый шунт, изображена на рис. 3.

Аналогично представляются и смежные РЦ, так при контроле состояния РЛ рассматриваемой РЦ в АРЦ учитываются и состояния смежных РЛ.

Схемы замещения левых и правых смежных рельсовых цепей с сосредоточенным шунтом приведены на рис. 4,а и 4,б, где  $A_{Л11}, B_{Л11}, C_{Л11}, D_{Л11}, A_{Л12}, B_{Л12}, C_{Л12}, D_{Л12}$  и  $A_{П11}, B_{П11}, C_{П11}, D_{П11}, A_{П12}, B_{П12}, C_{П12}, D_{П12}$  – коэффициенты четырёхполюсников первых левой и правой смежных РЦ соответственно,  $R_{ШЛ1}$  и  $R_{ШП1}$  – сопротивление шунта, расположенного на РЛ первых левой и правой смежных РЦ соответственно,  $A_{Л21}, B_{Л21}, C_{Л21}, D_{Л21}, A_{Л22}, B_{Л22}, C_{Л22}, D_{Л22}$  и  $A_{П21}, B_{П21}, C_{П21}, D_{П21}, A_{П22}, B_{П22}, C_{П22}, D_{П22}$  – коэффициенты четырёхполюсников вторых левой и правой смежных РЦ соответственно,  $R_{ШЛ2}$  и  $R_{ШП2}$  – сопротивление шунта, расположенного на РЛ вторых левой и правой смежных РЦ соответственно,  $Z_B$  – волновое сопротивление.

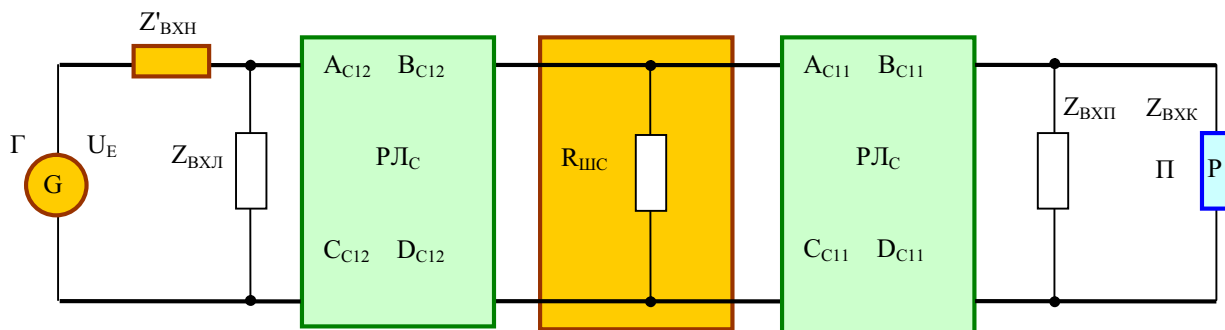


Рис. 2. Схема замещения рассматриваемой рельсовой цепи с сосредоточенным шунтом

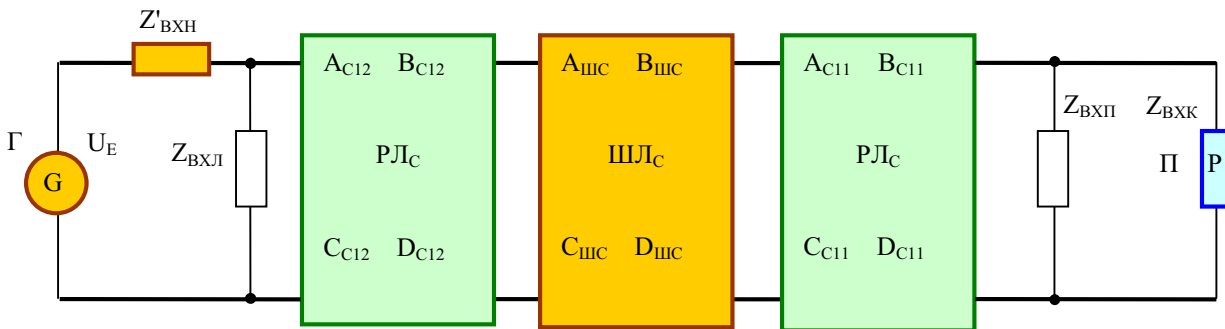


Рис. 3. Схема замещения рассматриваемой рельсовой цепи с распределённым шунтом

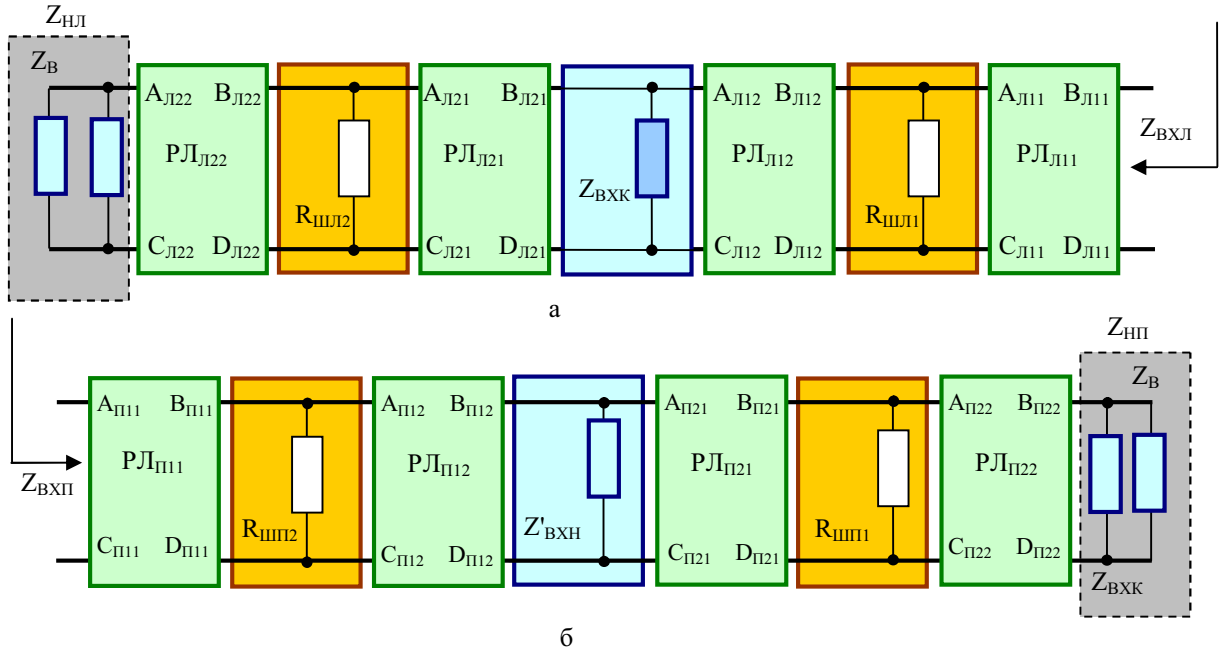


Рис. 4. Схемы замещения левых и правых смежных рельсовых цепей с сосредоточенным шунтом

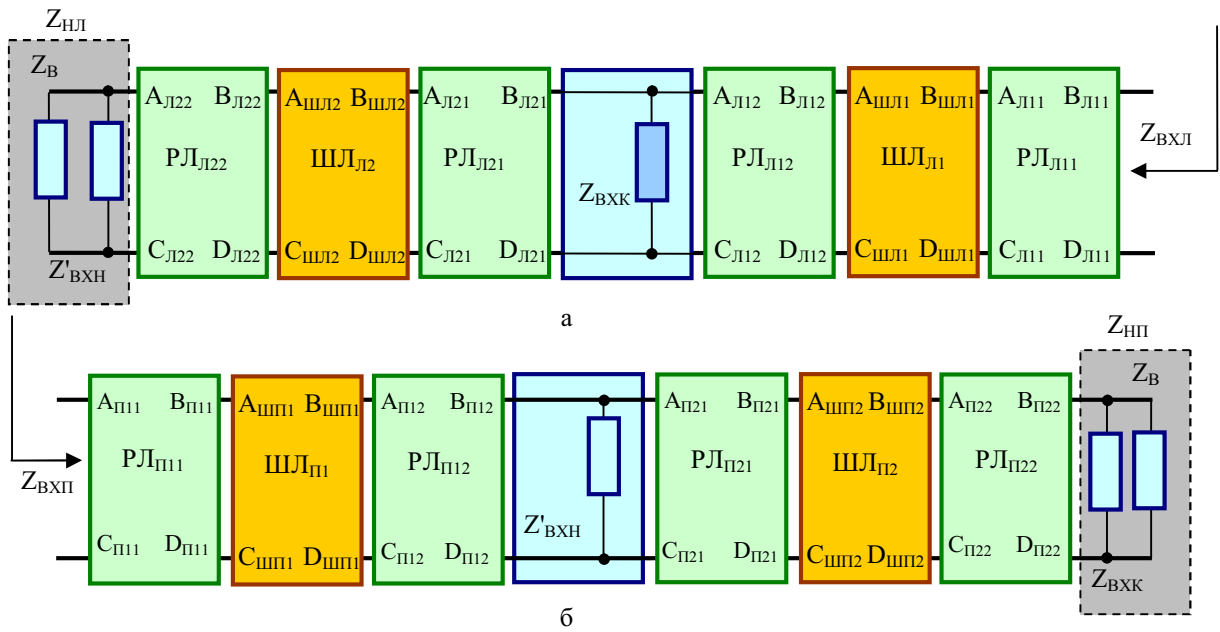


Рис. 5. Схемы замещения левых и правых смежных рельсовых цепей с распределённым шунтом

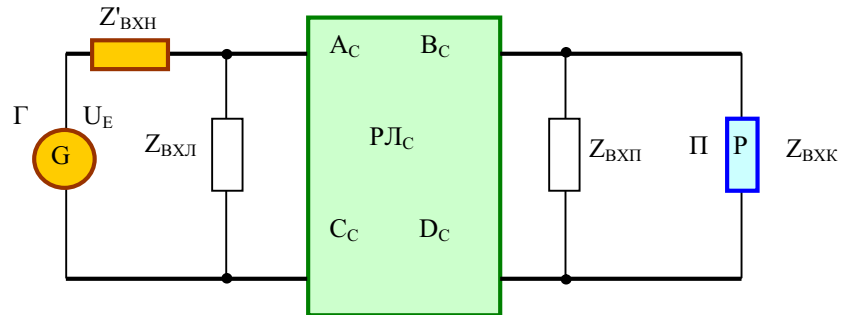


Рис. 6. Общая схема замещения рельсовой цепи

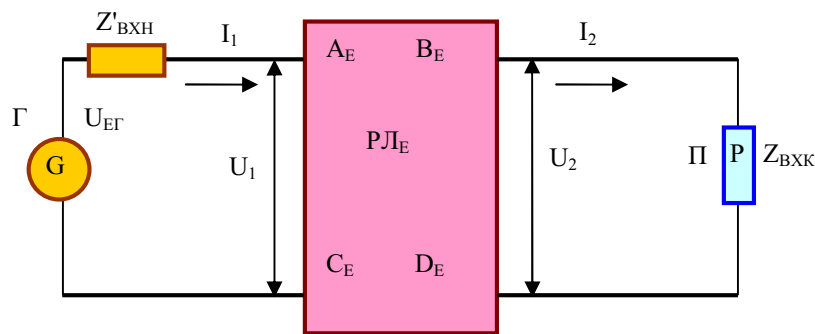


Рис. 7. Эквивалентная схема замещения адаптивной рельсовой цепи

Схемы замещения левых и правых смежных рельсовых цепей с распределенным шунтом представлены на рис. 5, где  $A_{шл1}, B_{шл1}, C_{шл1}, D_{шл1}$  и  $A_{шл2}, B_{шл2}, C_{шл2}, D_{шл2}$  – коэффициенты четырёхполюсников РЛ с расположенным на них распределённым шунтом на левых смежных РЦ;  $A_{шп1}, B_{шп1}, C_{шп1}, D_{шп1}$  и  $A_{шп2}, B_{шп2}, C_{шп2}, D_{шп2}$  – коэффициенты четырёхполюсников РЛ с расположенным на них распределённым шунтом на правых смежных РЦ.

Общая схема замещения адаптивной рельсовой цепи будет иметь вид, изображенный на рис. 6.

Эквивалентная схема замещения адаптивной рельсовой цепи с учётом влияния смежных рельсовых цепей ( $Z_{ВХЛ}$  и  $Z_{ВХП}$ ) примет вид, показанный на рис. 7.

Коэффициенты четырёхполюсника рельсовой линии можно представить следующими уравнениями:

$$A=D=ch(\gamma l) ; B=Z_B \times sh(\gamma l) ; C=\frac{sh(\gamma l)}{Z_B} - \text{ для}$$

РЛ с распределёнными параметрами и наличием изолирующих стыков;

$$A=D=ch(\gamma l)+sh(\gamma l) ; B=Z_B \times sh(\gamma l) ;$$

$$C=\frac{2 \times [ch(\gamma l)+sh(\gamma l)]}{Z_B} - \text{ для РЛ с}$$

распределенными параметрами и при отсутствии изолирующих стыков,

$$\text{где } \gamma = \sqrt{\frac{z}{r_{uu}}}, Z_B = \sqrt{z \times r_{uu}}.$$

Зависимость между напряжениями и токами по концам рельсовой цепи имеет вид:

$$U_1 = U_2 \times A_E + I_2 \times B_E ; I_1 = U_2 \times C_E + I_2 \times D_E ,$$

$$\text{где } A_E = A_C + \frac{B_C}{Z_{ВХП}} ; B_E = B_C ;$$

$$C_E = C_C + \frac{A_C}{Z_{ВХЛ}} + \frac{I}{Z_{ВХП}} \times \left( D_C + \frac{B_C}{Z_{ВХЛ}} \right) ;$$

$$D_E = D_C + \frac{B_C}{Z_{ВХЛ}} - \text{ коэффициенты}$$

эквивалентного четырёхполюсника (рис. 7);  $U_1$  и  $I_1$  – напряжение и ток на питающем конце;  $U_2$  и  $I_2$  – напряжение и ток на приёмном конце.

Определим входное сопротивление левых смежных рельсовых цепей с сосредоточенным шунтом (РЛ<sub>Л1</sub>, РЛ<sub>Л2</sub> и  $Z_{НЛ}$ ). По рис. 4,а матрица четырёхполюсника РЛ<sub>Л</sub> представляет собой каскадное соединение четырёхполюсников РЛ<sub>Л1</sub>, РЛ<sub>Л2</sub> и  $Z_{НЛ}$ . Для определения коэффициентов четырёхполюсников РЛ<sub>Л</sub> перемножим матрицы всех четырёхполюсников:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} A_L & B_L \\ C_L & D_L \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{Л22} & B_{Л22} \\ C_{Л22} & D_{Л22} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{Л21} & B_{Л21} \\ C_{Л21} & D_{Л21} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{Л12} & B_{Л12} \\ C_{Л12} & D_{Л12} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{Л11} & B_{Л11} \\ C_{Л11} & D_{Л11} \end{vmatrix} , \end{aligned}$$

$$\text{где } Z_{НЛ} = \frac{Z_B \times Z'_{ВХН}}{Z_B + Z'_{ВХН}}.$$

Входное сопротивление четырёхполюсника РЛ<sub>Л</sub> вычислим по следующему уравнению:

$$Z_{ВХЛ} = \frac{Z_{НЛ} \times A_L + B_L}{Z_{НЛ} \times C_L + D_L}, \text{ где } Z_{НЛ} = \frac{Z_B \times Z'_{ВХН}}{Z_B + Z'_{ВХН}}. \quad (1)$$

При  $I_2=0$  получим  $Z_{BXL} = \frac{A_L}{C_L}$ . (2)

Аналогичные вычисления с учётом рис. 4,б сделаем для правых смежных рельсовых цепей (РЛ<sub>П1</sub>, РЛ<sub>П2</sub> и Z<sub>НП</sub>):

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} A_{П} & B_{П} \\ C_{П} & D_{П} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{П22} & B_{П22} \\ C_{П22} & D_{П22} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{П21} & B_{П21} \\ C_{П21} & D_{П21} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{П12} & B_{П12} \\ C_{П12} & D_{П12} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{П11} & B_{П11} \\ C_{П11} & D_{П11} \end{vmatrix}, \end{aligned}$$

где  $Z_{НП} = \frac{Z_B Z_{BХК}}{Z_B + Z_{BХК}}$ .

Входное сопротивление четырёхполюсника РЛ<sub>П</sub> вычислим по следующему уравнению:

$$Z_{BХП} = \frac{Z_{НП} \times A_{П} + B_{П}}{Z_{НП} \times C_{П} + D_{П}}, \text{ где } Z_{НП} = \frac{Z_B \times Z_{BХК}}{Z_B + Z_{BХК}}. \quad (3)$$

При  $I_2=0$  получим  $Z_{BХП} = \frac{A_{П}}{C_{П}}$ . (4)

Теперь определим входное сопротивление левых смежных рельсовых цепей с распределённым шунтом (РЛ<sub>Л1</sub>, РЛ<sub>Л2</sub> и Z<sub>НЛ</sub>). По рис. 5,а матрица четырёхполюсника РЛ<sub>Л</sub> также представляет собой каскадное соединение четырёхполюсников РЛ<sub>Л1</sub>, РЛ<sub>Л2</sub> и Z<sub>НЛ</sub>. Для определения коэффициентов четырёхполюсников РЛ<sub>Л</sub> перемножим матрицы всех четырёхполюсников:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} A_L & B_L \\ C_L & D_L \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{Л22} & B_{Л22} \\ C_{Л22} & D_{Л22} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} A_{ШЛ2} & B_{ШЛ2} \\ C_{ШЛ2} & D_{ШЛ2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{Л21} & B_{Л21} \\ C_{Л21} & D_{Л21} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{Л12} & B_{Л12} \\ C_{Л12} & D_{Л12} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{Л11} & B_{Л11} \\ C_{Л11} & D_{Л11} \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

$$\times \begin{vmatrix} A_{ШЛ1} & B_{ШЛ1} \\ C_{ШЛ1} & D_{ШЛ1} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{Л11} & B_{Л11} \\ C_{Л11} & D_{Л11} \end{vmatrix}.$$

Входное сопротивление четырёхполюсника РЛ<sub>Л</sub> вычислим (1). При  $I_2=0$  получим (2).

Аналогичные вычисления с учётом рис. 5,б сделаем для правых смежных рельсовых цепей (РЛ<sub>П1</sub>, РЛ<sub>П2</sub> и Z<sub>НП</sub>):

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} A_{П} & B_{П} \\ C_{П} & D_{П} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{П22} & B_{П22} \\ C_{П22} & D_{П22} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} A_{ШП2} & B_{ШП2} \\ C_{ШП2} & D_{ШП2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{П21} & B_{П21} \\ C_{П21} & D_{П21} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{П12} & B_{П12} \\ C_{П12} & D_{П12} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} A_{ШП1} & B_{ШП1} \\ C_{ШП1} & D_{ШП1} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{П11} & B_{П11} \\ C_{П11} & D_{П11} \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Входное сопротивление четырёхполюсника РЛ<sub>П</sub> вычислим по (3). При  $I_2=0$  получим (4).

Для средней рельсовой линии (РЛ<sub>С</sub>) с сосредоточенным шунтом с учётом рис. 2 матрица четырёхполюсника примет вид:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} A_C & B_C \\ C_C & D_C \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} A_{C11} & B_{C11} \\ C_{C11} & D_{C11} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{C12} & B_{C12} \\ C_{C12} & D_{C12} \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Аналогично для средней рельсовой линии (РЛ<sub>С</sub>) с распределённым шунтом с учётом рис. 3 матрица четырёхполюсника будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} A_C & B_C \\ C_C & D_C \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} A_{C11} & B_{C11} \\ C_{C11} & D_{C11} \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} A_{ШС} & B_{ШС} \\ C_{ШС} & D_{ШС} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_{C12} & B_{C12} \\ C_{C12} & D_{C12} \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Недостатком новой модели является достаточно громоздкая структура.

Вышеприведённые модели рельсовых линий могут быть использованы вместо старых моделей, которые не учитывают изменение сопротивления изоляции и продольную асимметрию для анализа и расчёта адаптивных рельсовых цепей.

**Библиографический список**

1. Котляренко, Н. Ф. Путевая блокировка и авторегулировка [Текст]: учебник для вузов / Н. Ф. Котляренко, А. В. Шишляков, Ю. В. Соболев, И. З. Скряпин, В. А. Шишляков. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.
2. Полевой, Ю. И. Совершенствование устройств контроля состояния железнодорожных путевых участков [Текст] / Ю. И. Полевой. – Самара: СамГАПС, 2005. – 134 с.

**References**

1. Kotlyarenko, N. F. Track blocking and autoregulation: textbook for higher schools / N. F. Kotlyarenko, A. V. Shishlyakov, Yu. V. Sobolev, I. Z. Skrypin, V. A. Shishlyakov. – Moscow: Transport, 1983. – 408 p.
2. Polevoy, Yu. I. Improving the devices of railway track section state control / Yu. I. Polevoy. – Samara: Samara State University of Means of Communication, 2005. – 134 p.

**RAIL LINE MODELS FOR ADAPTIVE RECEIVER TRACK CIRCUITS**

© 2010 F. R. Akhmadullin

Samara State University of Means of Communication

The paper deals with models of rail lines that can be used to analyse and calculate adaptive track circuits. Criteria of evaluating the state of adaptive track circuits are given. Adaptive track circuits with concentrated and distributed shunts are shown to substitute for typical rail lines with a concentrated shunt. The models described are used to analyse the methods of controlling adaptive track circuits.

*Model, rail line, track circuit, adaptive track circuit, equivalent circuit, shunt.*

**Информация об авторах**

Ахмадуллин Фанис Ринатович, преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения, [fanis83ar@mail.ru](mailto:fanis83ar@mail.ru). Область научных интересов: исследование и разработка методов контроля железнодорожных путевых участков.

**Akhmadullin Fanis Rinatovitch**, teacher of the department “Automation, telemechanics and communication in railway transport”, Samara State University of Means of Communication, [fanis83ar@mail.ru](mailto:fanis83ar@mail.ru). Area of research: analysis and development of methods of railway track section control.