

Е. Н. Розенберг, В. С. Кузьмин, А. В. Озеров

ОБ УСЛОВИЯХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОПАСНЫХ ОТКАЗОВ В НЕОГРАНИЧЕННЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЯХ С ЛОКОМОТИВНЫМ ПРИЕМНИКОМ В ШУНТОВОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Аннотация. Полноценное решение задачи определения пространственных координат единиц тягового подвижного состава основными устройствами безопасности на основе анализа сигналов автоматической локомотивной сигнализации в современных системах регулирования движения поездов на базе неограниченных рельсовых цепей невозможно без установления условий возникновения опасных отказов в шунтовом режиме работы. Это имеет важное прикладное значение, поскольку наряду с получением несоответствующей поездной ситуации приказа разрешения на движение основные устройства безопасности не будут иметь возможности уточнять пространственные координаты единицы тягового подвижного состава в границах рассматриваемой рельсовой цепи по сигналам, принимаемым из рельсовой линии. В статье на основе математического аппарата теории рельсовых цепей с использованием метода четырехполюсников получены основные расчетные выражения для определения величины поездного критерия по безопасности для шунтового режима работы. Получена характерная зависимость, позволяющая судить о протяженности опасной зоны при наихудших условиях для неограниченных рельсовых цепей с локомотивным приемником. Полученные результаты являются основой для формирования алгоритмов работы перспективной системы регулирования движения поездов без путевых приемников.

Ключевые слова: рельсовая цепь, основные устройства безопасности, локомотивный приемник, шунтовой режим работы, опасный отказ, ложная свободность, двойное шунтирование, пространственные координаты, позиционирование.

Для цитирования: Розенберг, Е. Н. Об условиях возникновения опасных отказов в неограниченных рельсовых цепях с локомотивным приемником в шунтовом режиме работы / Е. Н. Розенберг, В. С. Кузьмин, А. В. Озеров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 161–167. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_161.

Введение

Определение пространственных координат единиц тягового подвижного состава является одним из важнейших этапов при реализации ответственного технологического процесса регулирования движения поездов. Его осуществление в современных системах возложено как на напольную аппаратуру, так и на основные локомотивные устройства безопасности. При этом в настоящее время ведется разработка новых способов определения пространственных координат в границах эксплуатационной длины отдельной рельсовой цепи как на основе анализа изменения входного сопротивления рельсовой линии [1], так и с использованием бортовых средств регистрации силы тока, протекающего в первой колесной паре единицы тягового подвижного состава [2]. Следует отметить, что разработка новых методов связана с потребностью в обеспечении систем регулирования движением поездов точными сведениями о пространственных координатах единиц тягового подвижного состава, в том числе в условиях действия средств радиоэлектронной борьбы [3].

Параллельно с указанными выше способами развивается направление, в рамках которого предложено определять пространственные координаты единиц тягового подвижного состава на основе анализа уровня сигнала автоматической локомотивной сигнализации. При этом указанный анализ могут выполнять штатные микропроцессорные основные локомотивные устройства безопасности, а уточнение пространственных координат на значительном удалении от питающего конца рельсовой цепи при необходимости может быть реализовано на основе комплексирования с данными от датчика пути и скорости.

В рамках данного направления существенный интерес представляет решение задачи установления условий возникновения опасных отказов в шунтовом режиме работы, поскольку они способны приводить не только к получению более разрешающего сигнала, но и к искажению сведений о пространственных координатах. С учетом этого в качестве цели настоящей работы выбрана разработка

математического аппарата для анализа условий возникновения опасных отказов в шунтовом режиме работы неограниченных рельсовых цепей с локомотивным приемником.

Материалы и методы

Для определения условий возникновения опасных отказов используется математический аппарат теории рельсовых цепей на базе метода четырехполюсников. При этом рассматривается перспективная система регулирования движения поездов без путевых приемников. В качестве поездного критерия по безопасности рассматривается общепринятый критерий $k_{\text{ЛШН}}$ [4, 5], рассчитываемый по формуле (1):

$$k_{\text{ЛШН}} = \frac{|Z_{\text{ЛПОШН}}|}{N_A |Z_{\text{ЛПО}}|}, \quad (1)$$

где $|Z_{\text{ЛПОШН}}|$ – модуль комплексного сопротивления передачи основной схемы замещения рельсовой цепи с локомотивным приемником в шунтовом режиме при неблагоприятных условиях;

$|Z_{\text{ЛПО}}|$ – модуль комплексного сопротивления передачи основной схемы замещения рельсовой цепи с локомотивным приемником в нормальном режиме работы при неблагоприятных условиях;

N_A – аппаратный коэффициент, учитывающий разброс параметров аппаратуры и колебания напряжения источника питания рассматриваемой рельсовой цепи.

Для расчета величин модулей указанных комплексных сопротивлений следует рассмотреть поездные ситуации, соответствующие нормальному (показана на рис. 1, а) и шунтовому режиму работы данной рельсовой цепи (рис. 1, б).

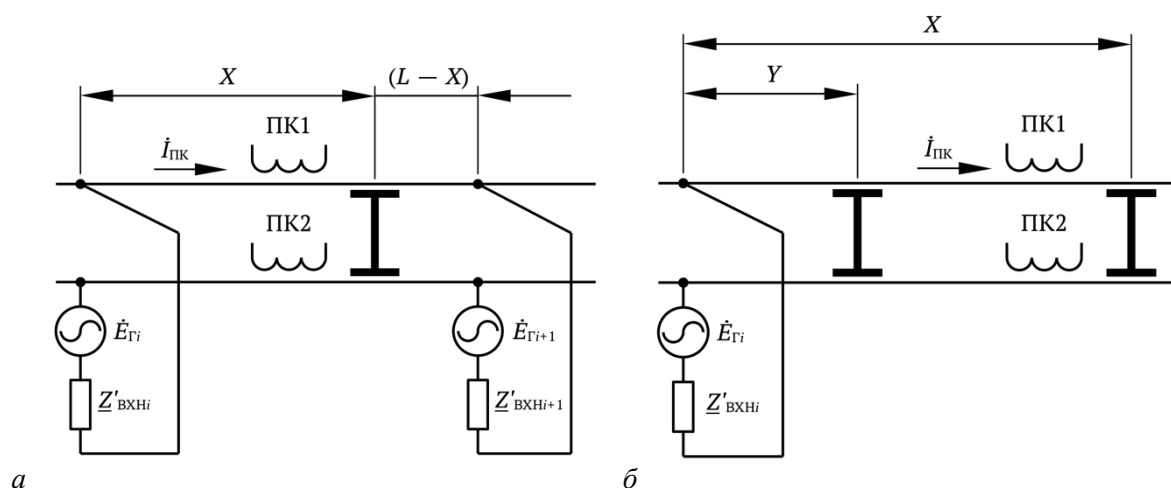


Рис. 1. Поездная ситуация:

а – в нормальном режиме работы рельсовой цепи;

б – в шунтовом режиме работы рельсовой цепи

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

$\dot{E}_{Gi}$ – комплексное значение напряжения, эквивалентное питающему элементу рельсовой цепи i ;

$\dot{E}_{Gi+1}$ – комплексное значение напряжения, эквивалентное питающему элементу рельсовой цепи $i + 1$;

Z'_{BXi} – обратное (со стороны рельсовой линии) входное сопротивление аппаратуры питающего конца рельсовой цепи i ;

Z'_{BXi+1} – обратное (со стороны рельсовой линии) входное сопротивление аппаратуры питающего конца рельсовой цепи $i + 1$;

$\dot{I}_{\text{ПК}}$ – комплексный ток автоматической локомотивной сигнализации под приемными катушками рассматриваемой единицы тягового подвижного состава;

ПК1, ПК2 – приемные катушки рассматриваемой единицы тягового подвижного состава;

X – ордината рассматриваемой единицы тягового подвижного состава (поездного шунта) относительно точки подключения аппаратуры питающего конца рельсовой цепи;

Y – ордината единицы тягового подвижного состава (поездного шунта), являющейся переменным препятствием, относительно точки подключения аппаратуры питающего конца рельсовой цепи;

L – расстояние между точками подключения аппаратуры питающих концов смежных рельсовых цепей (конструктивная длина рельсовой цепи i).

Результаты и обсуждения

С учетом особенностей рассматриваемых поездных ситуаций были составлены схемы замещения (рис. 2). При этом для шунтового режима работы (рис. 2, б) схема составлена с учетом наихудших условий, указанных в [5]. На схемах рис. 2 дополнительно приняты следующие обозначения:

ЧП АПК РЦ i – четырехполюсник аппаратуры питающего конца рельсовой цепи i с локомотивным приемником с параметрами A_H, B_H, C_H, D_H ;

ЧП РЛ НРР X – четырехполюсник рельсовой линии между точками подключения аппаратуры питающего конца рассматриваемой рельсовой цепи и наложения поездного шунта рассматриваемой единицы тягового подвижного состава;

ЧП РЛ НРР $(L - X)$ – четырехполюсник рельсовой линии между точками наложения поездного шунта рассматриваемой единицы тягового подвижного состава и подключения аппаратуры питающего конца смежной рельсовой цепи;

ЧП РЛ ШРР – четырехполюсник рельсовой линии в шунтовом режиме работы;

Z_B – волновое сопротивление рельсовой линии (в т. ч. смежной);

γ – коэффициент распространения волны в линии;

$Z_{ш}$ – сопротивление поездного шунта рассматриваемой единицы тягового подвижного состава;

$Z'_{ш}$ – сопротивление поездного шунта единицы тягового подвижного состава, являющейся переменным препятствием (принято равным нормативному).

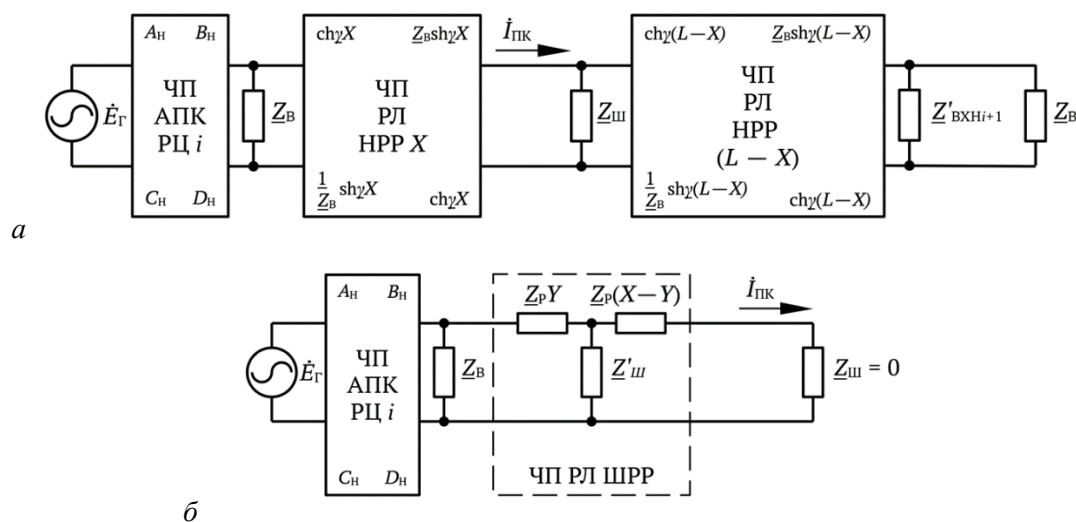


Рис. 2. Схемы замещения для рассматриваемых ситуаций:

а – в нормальном режиме работы; б – в шунтовом режиме работы

Для определения условий возникновения опасных отказов в рельсовых цепях с локомотивным приемником при наихудших условиях в шунтовом режиме работы на основе схем замещения, приведенных на рис. 2, а и б, были получены расчетные выражения для величин комплексных сопротивлений $Z_{ЛПО}$ (2) и $Z_{ЛПОшн}$ (3):

$$Z_{ЛПО} = B_{АЛС НРР} + Z'_{ВХН} D_{АЛС НРР}, \quad (2)$$

где $B_{АЛС НРР} = K_1 K_3 + B_H K_4$,

$$D_{АЛС НРР} = K_2 K_3 + D_H K_4,$$

$$K_1 = A_H + \frac{B_H}{Z_B},$$

$$K_2 = C_H + \frac{D_H}{Z_B},$$

$$\underline{K}_3 = \underline{Z}_B \text{sh} \gamma \underline{X}_{\text{ш}},$$

$$\underline{K}_4 = \text{ch} \gamma \underline{X}_{\text{ш}},$$

$$\underline{Z}_{\text{ЛПОШН}} = \underline{B}_{\text{АЛС ШРР}} + \underline{Z}'_{\text{ВХН}} \underline{D}_{\text{АЛС ШРР}}, \quad (3)$$

$$\text{где } \underline{B}_{\text{АЛС ШРР}} = \underline{H}_1 \underline{H}_3 + \underline{B}_{\text{Н}} \underline{H}_4,$$

$$\underline{D}_{\text{АЛС ШРР}} = \underline{H}_2 \underline{H}_3 + \underline{D}_{\text{Н}} \underline{H}_4,$$

$$\underline{H}_1 = \underline{A}_{\text{Н}} + \frac{\underline{B}_{\text{Н}}}{\underline{Z}_{\text{В}}},$$

$$\underline{H}_2 = \underline{C}_{\text{Н}} + \frac{\underline{D}_{\text{Н}}}{\underline{Z}_{\text{В}}},$$

$$\underline{H}_3 = \left[1 + \frac{\underline{Z}_{\text{Р}} \underline{Y}}{\underline{Z}'_{\text{ш}}} \right] \underline{Z}_{\text{Р}} (\underline{X} - \underline{Y}) + \underline{Z}_{\text{Р}} \underline{Y},$$

$$\underline{H}_4 = 1 + \frac{\underline{Z}_{\text{Р}} (\underline{X} - \underline{Y})}{\underline{Z}'_{\text{ш}}}.$$

Представленные выражения составлены с учетом следующих ограничений и допущений:

- рельсовая линия представляет собой однородную длинную линию;
- приемные катушки единицы тягового подвижного состава размещаются одинаково относительно осей соответствующих ходовых рельсов и имеют одинаковые электрические параметры.

С учетом полученных выражений было выполнено моделирование зависимости величины поездного критерия по безопасности $k_{\text{ЛШН}}$ от взаимного расположения в границах конструктивной длины ординат наложения поездных шунтов, являющихся переменным препятствием Y и рассматриваемой единицей тягового подвижного состава X (рис. 3). В рамках моделирования рассматривалась рельсовая цепь с несущей частотой 25 Гц с конструктивной длиной 2,6 км.

Согласно полученным результатам моделирования величина поездного критерия по безопасности $k_{\text{ЛШН}}$ для шунтового режима работы рельсовой цепи с локомотивным приемником по мере приближения к неподвижному локомотивному приемнику ординаты Y наложения поездного шунта, являющегося переменным препятствием, линейно убывает. С уменьшением ординаты наложения поездного шунта рассматриваемой единицы тягового подвижного состава величина $k_{\text{ЛШН}}$ снижается при неизменной ординате наложения шунта, являющегося переменным препятствием.

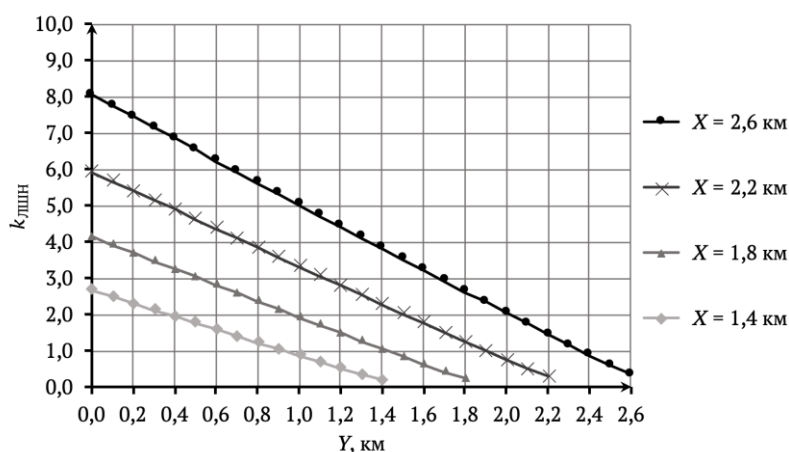


Рис. 3. Зависимость величины поездного критерия по безопасности $k_{\text{ЛШН}}$ от ординаты Y места наложения поездного шунта, являющегося переменным препятствием, при различных ординатах X местоположения рассматриваемой единицы тягового подвижного состава

При движении единицы тягового подвижного состава вдоль рельсовой линии и фиксированных значениях ординаты Y наложения поездного шунта, рассматриваемого как переменное препятствие, наблюдается постепенное снижение величины поездного критерия по безопасности $k_{\text{ЛШН}}$ для шунтового режима работы рельсовой цепи с локомотивным приемником (рис. 4).

Наибольший интерес представляют максимальная величина протяженности опасной зоны $L_{\text{ОШ}}$, возникающей за переменным препятствием в виде поездного шунта перед движущимся вдоль рельсовой линии локомотивным приемником, и соответствующая зависимость от ординаты Y места наложения поездного шунта, рассматриваемого как переменное препятствие (рис. 5). По результатам моделирования максимальная протяженность опасной зоны $L_{\text{ОШ}}$ составляет 765 м и достигается при наложении поездного шунта, являющегося переменным препятствием, на питающем конце соответствующей рельсовой цепи.

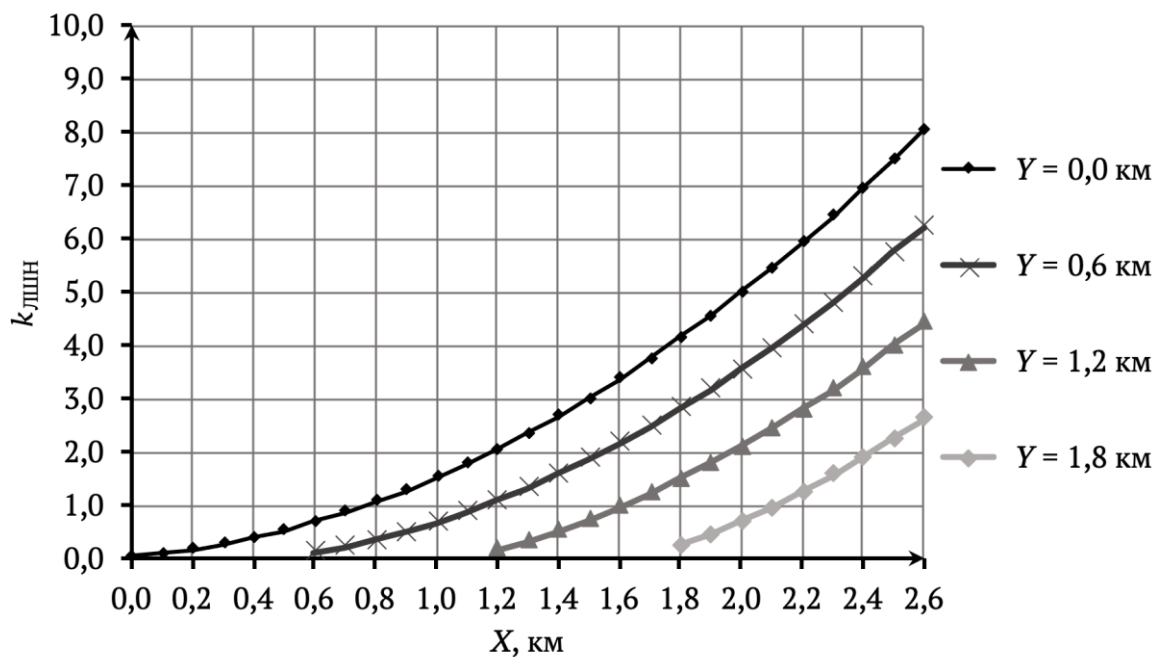


Рис. 4. Зависимость величины поездного критерия по безопасности $k_{\text{лпшн}}$ от ординаты X рассматриваемой единицы тягового подвижного состава при различных ординатах Y места наложения поездного шунта, являющегося переменным препятствием

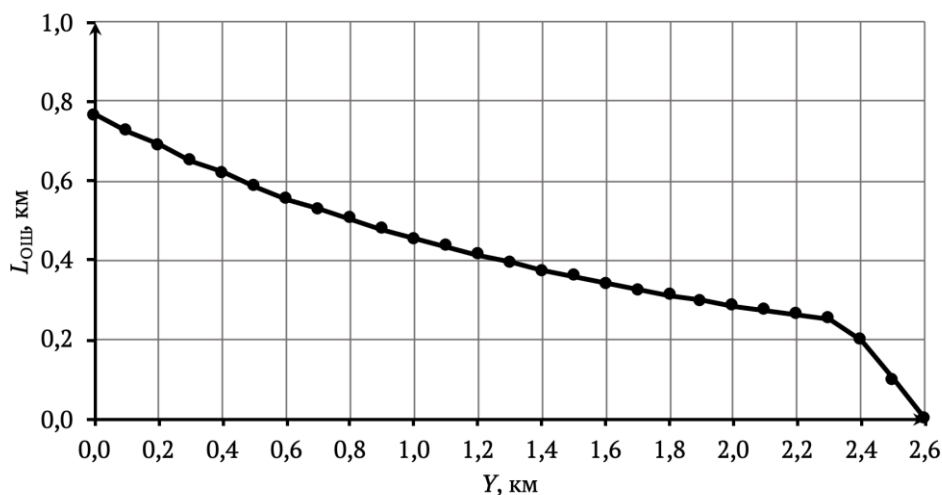


Рис. 5. Зависимость протяженности опасной зоны $L_{\text{ОШ}}$ от ординаты Y места наложения поездного шунта, рассматриваемого как переменное препятствие

Для парирования опасных отказов, связанных с движением единицы тягового подвижного состава в границах опасной зоны $L_{\text{ОШ}}$, возможно использовать данные о пройденном пути, получаемые из других источников, в частности от датчика угла поворота.

Заключение

В рамках статьи представлены результаты разработки математического аппарата для анализа условий возникновения опасных отказов в шунтовом режиме работы неограниченных рельсовых цепей с локомотивным приемником. Получены следующие основные результаты:

1 Результаты моделирования позволяют утверждать, что при наихудших условиях в неограниченных рельсовых цепях с локомотивным приемником имеет место эффект двойного шунтирования. При этом величины поездного критерия по безопасности $k_{\text{лшн}}$ и протяженности $L_{\text{ош}}$ опасной зоны существенно зависят от взаимного расположения поездных шунтов, соответствующих переменному препятствию и рассматриваемой единице тягового подвижного состава.

2 Наибольшая протяженность $L_{\text{ош}}$ опасной зоны достигается при наложении поездного шунта, соответствующего переменному препятствию, на питающем конце рассматриваемой рельсовой цепи и составляет 765 м. С увеличением ординаты наложения поездного шунта, соответствующего переменному препятствию, протяженность $L_{\text{ош}}$ опасной зоны сокращается.

3 Опасные отказы, связанные с возникновением эффекта двойного шунтирования, могут быть парированы за счет комплексирования данных, получаемых основными устройствами безопасности по результатам анализа сигналов автоматической локомотивной сигнализации, с данными от других источников, в частности от датчика угла поворота.

Полученные результаты являются основой для создания новых систем регулирования движения поездов без путевых приемников на базе современных микропроцессорных локомотивных устройств безопасности. Дополнительные исследования в данной области следует сосредоточить вокруг рассмотрения ситуации, когда поездной шунт, соответствующий переменному препятствию, располагается в зоне дополнительного шунтирования со стороны питающего конца рассматриваемой рельсовой цепи.

Список литературы

- 1 **Соколов, М. М.** Использование входного сопротивления путевого участка для позиционирования подвижной единицы / М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 9. – С. 15–17. – DOI 10.62994/AT.2025.9.9.001.
- 2 **Соколов, С. В.** Решение задачи автономного высокоточного позиционирования железнодорожных подвижных единиц на основе измерения рельсовых токов / С. В. Соколов, Д. В. Швалов // Автоматика на транспорте. – 2025. – Т. 11, № 3. – С. 201–209. – DOI 10.20295/2412-9186-2025-11-03-201-209.
- 3 Определение местоположения поезда в условиях работы систем РЭБ / О. Ю. Куприенко, В. В. Батраев, С. В. Маршов, С. В. Ипатов // Железнодорожный транспорт. – 2025. – № 7. – С. 36–39. – ISSN 0044-4448.
- 4 **Брылеев, А. М.** Электрические рельсовые цепи / А. М. Брылеев, Н. Ф. Котляренко. – 2-е изд. – Москва : Транспорт, 1970. – 256 с.
- 5 Об условиях возникновения опасных отказов в ограниченных рельсовых цепях с локомотивным приемником / В. С. Кузьмин, Л. И. Стряпкин, Р. Е. Володькин, А. О. Филиппочкина // Интеллектуальные транспортные системы : материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. – Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. – С. 617–625. – DOI 10.30932/9785002446094-2024-617-625.

References

- 1 **Sokolov, M. M.** Using the input resistance of a track section for positioning a moving unit / M. M. Sokolov, A. G. Khodkevich // Automation, communications, informatics. – 2025. – No. 9. – P. 15–17. – DOI 10.62994/AT.2025.9.9.001.
- 2 **Sokolov, S. V.** Solution of the problem of autonomous high-precision positioning of railway rolling units based on measuring track currents / S. V. Sokolov, D. V. Shvalov // Automation in transport. – 2025. – Vol. 11, No. 3. – P. 201–209. – DOI 10.20295/2412-9186-2025-11-03-201-209.
- 3 Determining the location of a train under conditions of electronic warfare systems operation / O. Yu. Kuprienko, V. V. Batraev, S. V. Marshov, S. V. Ipatov // Railway transport. – 2025. – No. 7. – P. 36–39. – ISSN 0044-4448.
- 4 **Bryleev, A. M.** Electric track circuits / A. M. Bryleev, N. F. Kotlyarenko. – 2nd ed. – Moscow : Transport, 1970. – 256 p.
- 5 On the conditions for the occurrence of dangerous failures in limited track circuits with a locomotive receiver / V. S. Kuzmin, L. I. Stryapkin, R. E. Volodkin, A. O. Filippochkina // Intelligent transport systems : Proceedings of the III International scientific and practical conference, Moscow, May 30, 2024. – Moscow : Russian University of Transport (MIIT), 2024. – P. 617–625. – DOI 10.30932/9785002446094-2024-617-625.

E. N. Rosenberg, V. S. Kuzmin, A. V. Ozerov

**ON THE CONDITIONS FOR THE OCCURENCE OF HAZARDOUS FAILURES
IN UNLIMITED TRACK CIRCUITS WITH A LOCOMOTIVE RECEIVER
IN SHUNT MODE OPERATION**

Abstract. A comprehensive solution to the problem of determining the spatial coordinates of traction rolling stock units by primary safety devices based on the analysis of automatic locomotive signaling signals in modern train control systems based on unlimited track circuits is impossible without establishing the conditions for the occurrence of hazardous failures in shunt mode. This is of significant practical importance, since, in addition to receiving a clearance order inappropriate for the train situation, primary safety devices will not be able to refine the spatial coordinates of a traction rolling stock unit within the boundaries of the track circuit in question using signals received from the track line. In this article, based on the mathematical apparatus of track circuit theory and the four-terminal method, basic calculation expressions are derived for determining the value of the train safety criterion for shunt mode. A characteristic dependence has been obtained that allows one to estimate the extent of the danger zone under worst-case conditions for unlimited track circuits with a locomotive receiver. The obtained results form the basis for developing operating algorithms for a prospective train control system without trackside receivers.

Keywords: track circuit, primary safety devices, locomotive receiver, shunt mode operation, dangerous failure, false vacancy, double shunting, spatial coordinates, positioning.

For citation: Rosenberg, E. N. On the conditions for the occurrence of hazardous failures in unlimited track circuits with a locomotive receiver in shunt mode operation / E. N. Rosenberg, V. S. Kuzmin, A. V. Ozerov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 161–167. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_4_161.

Сведения об авторах

Розенберг Ефим Наумович

АО «НИИАС»,

доктор технических наук, профессор,
первый заместитель генерального директора,
e-mail: info@vniias.ru

Кузьмин Владислав Сергеевич

АО «НИИАС»,

кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник Отдела научно-исследовательской
работы Центра интеллектуальных
и программных решений Научно-технического
комплекса интеллектуальных систем контроля
и управления,
e-mail: info@vniias.ru

Озеров Алексей Валерьевич

АО «НИИАС»,

начальник Международного управления –
начальник Центра управления
интеллектуальной собственностью,
e-mail: a.ozerov@vniias.ru

Information about the authors

Rosenberg Efim Naumovich

JSC “NIIAS”,

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
First Deputy General Director,
e-mail: info@vniias.ru

Kuzmin Vladislav Sergeevich

JSC “NIIAS”,

Candidate of Engineering Sciences,
Leading Researcher of the Research Department
of the Center for Intelligent and Software
Solutions of the Scientific and Technical
Complex of Intelligent Monitoring and Control
Systems,
e-mail: info@vniias.ru

Ozerov Alexey Valerievich

JSC “NIIAS”,

Head of International Department, Head of
Intellectual Property Management Centre,
e-mail: a.ozerov@vniias.ru