



УДК 681.5.01+656.259.12

АВТОМАТ ДЛЯ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ: АДАПТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ И ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА НА ОСНОВЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

МУДРАЯ Наталия Георгиевна, соискатель кафедры¹; e-mail: mydrayanatali@mail.ru
МАРЮХНЕНКО Виктор Сергеевич, д-р техн. наук, профессор²; e-mail: viktor.maryuhnenko@yandex.ru

¹ Кафедра «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск

² Военная академия ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, Балашиха

В статье предложена архитектура и принцип работы адаптивного управляющего автомата для контроля рельсовых цепей, использующего широкополосные сигналы с линейной частотной модуляцией и методы цифровой обработки сигналов. Для стимулирования применяются зондирующие линейно-частотно-модулированные сигналы, что позволяет совмещать функции передачи информации и диагностики. Основные научные и практические результаты включают разработку структурной схемы управляющего автомата, создание математического аппарата для точной локализации дефектов. Предложен адаптивный алгоритм динамической коррекции порога срабатывания, который снижает количество ложных тревог за счет учета изменяющихся условий эксплуатации (сопротивления балласта, влажности, температуры). Показано, что применение управляющего автомата обеспечивает высокую помехоустойчивость за счет корреляционной обработки широкополосных сигналов, автоматическую подстройку под параметры рельсовой линии и точное определение характера и местоположения повреждения. Разработанный метод позволяет сократить время диагностики неисправностей рельсовых цепей и минимизировать влияние человеческого фактора при обслуживании. Решение может быть интегрировано в современные системы железнодорожной автоматики для повышения безопасности движения.

Ключевые слова: рельсовая цепь; широкополосные сигналы; линейно-частотная модуляция; сопротивление балласта; диагностика; цифровая обработка сигналов; управляющий автомат.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-332-341

▼ Введение

От стабильности и непрерывности работы рельсовых цепей (РЦ) напрямую зависит общая функциональная готовность и безопасность систем управления движением поездов [1].

В условиях стремительного роста интенсивности железнодорожных перевозок, ужесточения требований к безопасности и надежности, а также перехода отрасли к цифровым и интеллектуальным системам управления традиционные методы контроля рельсовых цепей оказываются недостаточно эффективными [2].

Инновационное решение по обеспечению локализации отказа, помехоустойчивости и оперативности диагностики предложено в виде адаптивного управляющего автомата с цифровой обработкой сигналов и широкополосной модуляцией.

Важность обеспечения высокой надежности работы РЦ и достоверности контроля их состояния объясняется, с одной стороны, существенным влиянием их состояния на безопасность перевозок и тяжелыми условиями эксплуатации — с другой.

Тяжелые условия эксплуатации РЦ создаются нагрузками различного характера:

- механическими — от проходящих поездов;
- температурными — обусловленными суточными и сезонными изменениями погоды;
- электрическими — из-за протекания тяговых токов, воздействия блуждающих токов, токов перенапряжений и электромагнитных помех.

Кроме того, влажность балластного слоя и его загрязненность сыпучими грузами постоянно изменяются, что существенно влияет на прохождение сигналов вдоль рельсовой линии [3, 4].

Особенно подвержены воздействиям неблагоприятных факторов соединительные и изоляционные элементы, применяемые в РЦ. Они имеют ограниченный запас механической прочности и работают на пределе своих электрических характеристик, не имея существенного резерва для их компенсации в случае деградации под влиянием внешних факторов [5].

Анализ отказов показывает, что более 30 % всех отказов устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) приходится на РЦ [6]. Большинство отказов в РЦ происходит по причине неисправностей рельсовых линий. Они проявляются изменениями электрического сопротивления из-за обрывов, коротких замыканий, влияния влажности и загрязнений на импеданс балласта [7].

Существующие системы контроля и методы обслуживания не обладают необходимой адаптивностью и оперативностью для эффективного реагирования на динамически меняющиеся условия эксплуатации. Отсутствие точной диагностики не позволяет локализовать отказы и своевременно предотвращать аварии [8].

Авторы предлагают решение, позволяющее применять широкополосные сигналы (ШПС) для контроля параметров РЦ и алгоритм выявления неисправности. В [9–11] доказано, что использование ШПС в качестве стимулирующего сигнала, посыпанного в РЦ с целью контроля ее состояния, целесообразно. Стимулирующий сигнал — это диагностический зондирующий сигнал, целенаправленно генерируемый и подаваемый в рельсовую линию с целью получения отклика, по анализу которого производится оценка текущего состояния параметров цепи.

Следует выделить, что те же сигналы можно использовать для передачи информационных сигналов системам ЖАТ. При этом достигается ряд преимуществ:

- повышается помехоустойчивость РЦ;
- улучшается электромагнитная совместимость с другими устройствами и системами;
- уменьшаются энергозатраты на контроль РЦ.

Целью статьи является разработка управляющего автомата для реализации адаптивного устройства контроля параметров рельсовых цепей с применением ШПС с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

1. Управляющий автомат для рельсовых цепей

Управляющий автомат системы контроля РЦ с применением ШПС представляет собой дискретную логическую систему с замкнутым контуром управления и взаимодействующими блоками (рис. 1), предназначенными для:

- генерирования исходного гармонического сигнала на несущей частоте $f_0 = \text{const}$ с амплитудой $U_m = \text{const}$ и с неизменной начальной фазой $\phi_0 = 0$;
- формирования широкополосного частотно-модулированного сигнала с заданной девиацией частоты F_c ;
- согласованной передачи в рельсовой линии широкополосного стимулирующего сигнала;
- приема и обработки выходного с рельсовой линии контрольного сигнала;
- принятия решения о результатах контроля рельсовой линии.

К основным компонентам управляющего автомата относятся:

- генератор ЛЧМ-сигнала;
- аналого-цифровой преобразователь;
- цифровой согласованный фильтр;
- блок диагностики и адаптации;
- система управления.

Генератор ЛЧМ-сигнала формирует стимулирующий прямоугольный импульсный ШПС длительностью $\tau_{\text{шпс}}$ на несущей частоте f_0 , модулированной по линейному закону с девиацией частоты F_c и шириной спектра $\Delta F_{\text{шпс}} \gg F_c$. Такой сигнал

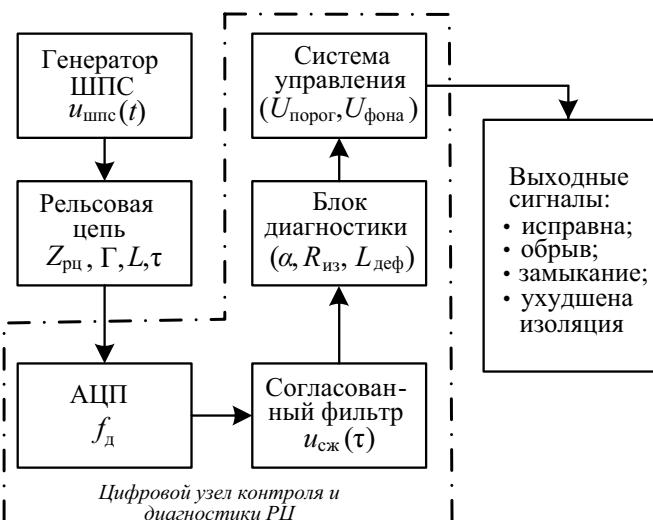


Рис. 1. Структурная схема управляющего автомата для диагностики РЦ с ШПС

за счет широкополосности обеспечивает высокую помехоустойчивость системы контроля.

Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует аналоговый выходной сигнал с рельсовой линии в цифровую форму для обеспечения применения цифровой обработки и фильтрации. АЦП характеризуется высокой разрядностью и частотой дискретизации.

Цифровой согласованный фильтр реализует оптимальную обработку ЛЧМ сигнала, снимаемого с выхода рельсовой линии. В результате формируется цифровой образ отклика фильтра в виде импульса длительностью

$$\tau_{\text{вых}} = \frac{\tau_{\text{шпс}}}{k_{\text{сж}}},$$

где $k_{\text{сж}}$ — коэффициент сжатия:

$$k_{\text{сж}} = \tau_{\text{шпс}} \Delta F_{\text{шпс}}.$$

Благодаря сжатию принятого сигнала сформированный согласованной фильтрацией отклик на фоне шумов и помех превышает отношение сигнал/шум до согласованной фильтрации в $k_{\text{сж}}$ раз.

Блок диагностики и адаптации предназначен для анализа параметров рельсовой цепи (затухание, сопротивление балласта, наличие обрывов) и автоматически корректирует пороги срабатывания в зависимости от условий эксплуатации.

Система управления координирует работу всех блоков и формирует принятие решения о состоянии РЦ (исправна или неисправна) и передает данные далее по сети передачи данных связи.

2. Обработка сигналов и адаптивная диагностика неисправностей

Сгенерированный ЛЧМ-сигнал $u_{\text{шпс}}(t)$ подается в РЦ через путевой трансформатор. Процесс инициирования и генерация зондирующего сигнала начинается по истечении временного интервала ΔT или при получении внешней команды. В этом случае система формирует детерминированный зондирующий сигнал — ЛЧМ [11]. Его аналитическая модель описывается уравнением

$$u_{\text{шпс}}(t) = A \cdot \text{rect}[U(t/T)] \cdot \cos[2\pi \cdot (f_0 t + (\beta/2) \cdot t^2)], \quad (1)$$

где A — амплитуда;

$\text{rect}[U(t/T)]$ — прямоугольный импульс длительностью T ;

f_0 — начальная частота, $\beta = (f_1 - f_0)/T$ — скорость изменения частоты.

Рельсовая линия представляет собой длинную линию передачи с распределенными параметрами. Волновое сопротивление рельсовой линии:

$$Z_{\text{пл}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (2)$$

где R — погонное сопротивление рельса (активное), Ом/м;

L — погонная индуктивность рельсовой линии, Гн/м;

$G = 1/R_{\text{из}}$ — погонная проводимость изоляции, где $R_{\text{из}}$ — погонное сопротивление изоляции, Ом/м;

C — погонная емкость между рельсом и землей, Ф/м;

$\omega = 2\pi f$ — циклическая частота, рад⁻¹.

При распространении сигнал встречает неоднородности, вызывающие отражение части энергии, такие как стыки рельсов, балласт, дефекты: обрывы, замыкания, коррозия [12].

Коэффициент отражения Γ на границе двух участков с разными $Z_{\text{пл}}$:

$$\Gamma = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1), \quad (3)$$

где Z_1 — волновое сопротивление до неоднородности, Ом;

Z_2 — волновое сопротивление после неоднородности, Ом.

По значению коэффициента отражения можно сделать вывод о состоянии РЦ контролируемого участка. При обрыве рельса $Z_2 \rightarrow \infty$. В месте обрыва происходит полное отражение контрольного сигнала без инверсии фазы, $\Gamma = +1$.

При коротком замыкании $Z_2 \rightarrow 0$. Происходит отражение с инверсией фазы $\Gamma = -1$.

При значениях $-0,5 < \Gamma < +0,5$ можно говорить об ухудшении изоляции, где происходит частичное отражение.

Локализацию дефекта возможно определить по формуле:

$$L = \frac{v \cdot \tau}{2}, \quad (4)$$

где L — расстояние до места отражения, м;

v — скорость распространения сигнала в РЦ, м/с;

τ — задержка между переданным и отраженным сигналом, с.

Скорость v зависит от погонных параметров рельса, то есть определяется инерционными (L) и емкостными (C) свойствами линии:

$$v = 1 / \sqrt{LC}. \quad (5)$$

Чем выше индуктивность L , тем медленнее меняется ток и скорость падает, или чем больше емкость C , тем дольше заряжаются участки линии, значит, скорость также падает. Формула выводится из телеграфных уравнений. Данное выражение допустимо при:

- достаточно высокой частоте ($f > 1$ кГц) ввиду того, что можно пренебречь R и G , так как ωL и ωC доминируют;
- хорошем состоянии РЦ (малое $R_{\text{пц}}$, сухой балласт).

При частоте ниже 1 кГц скорость распространения сигнала характеризуется выражением:

$$v = \sqrt{\frac{2\omega^2 LC}{(\omega^2 LC)^2 + (RC + GL)^2 \omega^2}}, \quad (6)$$

ввиду того что на низких частотах $\omega L \approx R$ омические потери сравнимы с индуктивным сопротивлением, а ток утечки сравним с емкостным током, так как $\omega C \approx G$.

Задержка τ измеряется путем параллельного корреляционного сравнения, принимаемого в конце линии отраженного сигнала $u_{\text{вх}}(t)$ и K копий исходного контрольного ЛЧМ сигнала $u_{\text{шпс}}(t)$, который подается в начало линии с временными сдвигами τ_k , $k = 1, 2, 3, \dots, K$.

Отраженный сигнал $u_{\text{вх}}(t)$, характеризующийся уравнением

$$u_{\text{вх}}(t) = \Gamma \cdot u_{\text{шпс}}(t - \tau_k), \quad (7)$$

поступает на АЦП и дискретизируется

$$u_{\text{вх}}(n) = u_{\text{вх}}\left(n/f_d\right), \quad (8)$$

где f_d — частота дискретизации, Гц;
 n — номер отсчетов.

Для выделения полезного сигнала на фоне шумов и измерения задержки τ применяется метод параллельного корреляционного сравнения. Принятый сигнал $u_{\text{вх}}(n)$ сравнивается с K копиями исходного ЛЧМ-сигнала $u_{\text{шпс}}(n)$, каждая из которых имеет временной сдвиг k .

Выходной сигнал для каждого из K каналов коррелятора (комплексная огибающая корреляционной функции) рассчитывается по формуле [13]:

$$y_k[n] = \sum_{k=0}^{K-1} u_{\text{вх}}[m] \cdot u_{\text{шпс}}[m - n + k], \quad (9)$$

где $u_{\text{шпс}}[m - n + k]$ — комплексно-сопряженная копия исходного сигнала;

k — индекс канала (временной сдвиг контрольной копии сигнала);

$y_k[n]$ — выходная корреляционная функция в k -ом канале;

m — переменная суммирования.

Пик на выходе $y_k[n]$ соответствует моменту прихода отраженного сигнала. Максимум $y_k[n]$ возникает при k_{\max} , где k_{\max} — номер канала с максимальной амплитудой.

Задержка τ между зондирующими и принятыми сигналами определяется по положению этого максимума:

$$\tau = k_{\max} / f_d. \quad (10)$$

Затухание сигнала показывает, как сильно сигнал ослабляется в рельсе и характеризуется формулой:

$$\alpha = \frac{20}{L} \lg \left(\frac{U_{\text{шпс}}}{U_{\text{вх}}} \right). \quad (11)$$

Сопротивление изоляции определяет качество изоляции рельса:

$$R_{\text{из}} \approx \frac{(U_{\text{шпс}} - U_{\text{вх}})}{I_{\text{вх}} \cdot K_{\text{тр}}}, \quad (12)$$

где $I_{\text{вх}}$ — входной ток (А), подаваемый в РЦ;
 $K_{\text{тр}}$ — коэффициент трансформации.

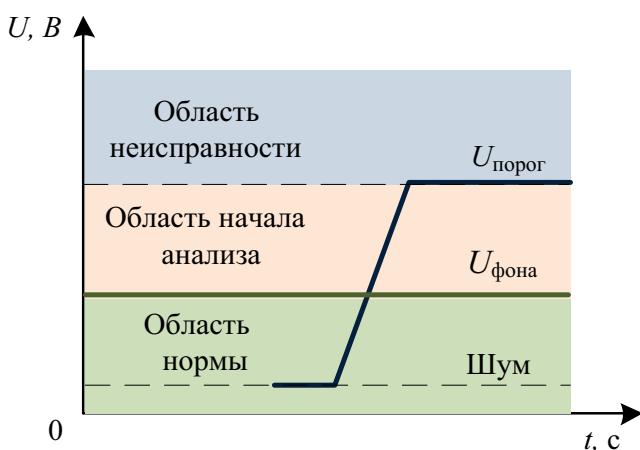


Рис. 2. Адаптивное определение неисправности в рельсовой цепи

Данные параметры служат для диагностирования состояния РЦ.

Алгоритм адаптивной коррекции порогов срабатывания реализует динамическую адаптацию порога детектирования неисправностей в РЦ на основе статистического анализа сигнальной среды (рис. 2). Система в реальном времени вычисляет два ключевых параметра: фоновый уровень сигнала — среднее значение напряжения в исправной цепи и уровень шумов — среднеквадратическое отклонение флуктуаций сигнала.

Пограничное значение для детектирования неисправностей определяется как:

$$U_{\text{порог}} = U_{\text{фона}} + v \cdot \sigma_{\text{шума}}, \quad (13)$$

где $U_{\text{фона}}$ — фоновый уровень сигнала;
 $\sigma_{\text{шума}}$ — среднеквадратическое отклонение флуктуаций сигнала;
 v — коэффициент, который выбирается исходя из требуемого уровня достоверности обнаружения (чем больше k , тем выше запас по помехам).

Фоновый уровень сигнала характеризуется уравнением:

$$U_{\text{фона}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i, \quad (14)$$

где U_i — мгновенное значение напряжения в i -й момент времени, В;
 N — количество учитываемых отсчетов.

В памяти хранится массив из N последних значений U_i . При каждом новом измерении: прошлый отсчет удаляется, новый добавляется в конец, пересчитывается сумма и $U_{\text{фона}}$.

Фоновой уровень сигнала $U_{\text{фона}}$ является постоянной величиной в идеальных условиях и изменяется под воздействием сопротивления балласта, зависящего от его загрязнений, а также от влажности, температуры, разброса характеристик разных участков пути, дрейфа параметров РЦ [14, 15].

Адаптивный расчет $U_{\text{фона}}$ создает математический базис для автоматической подстройки под текущие условия, что позволяет снизить количество ложных срабатываний и повысить чувствительность к реальным неисправностям РЦ. Напряжение $U_{\text{фона}}$ является расчетной базовой величиной. Она определяет «нормальное» состояние системы и позволяет адаптивно настраивать порог детектирования, компенсировать внешние воздействия.

Формирование диагностических сигналов происходит следующим образом:

1. При превышении $U_{\text{вх}} > U_{\text{порог}}$ система регистрирует неисправность.
2. При выполнении условий $\tau \approx 0$, $\alpha \approx 0$ принимается решение о замыкании рельсовой линии.
3. Если входное напряжение $U_{\text{вх}}$ значительно ниже фонового уровня $U_{\text{фона}}$ (например, близко к нулю или ниже минимально допустимого порога) и корреляционный пик на выходе каналов $y_k [n]$ отсутствует либо его амплитуда ничтожно мала, что указывает на отсутствие полезного сигнала, принимается решение об обрыве рельсовой линии.
4. Если $R_{\text{из}} < R_{\text{порог}}$, то принимается решение об ухудшении изоляции.

Адаптивное определение неисправности в РЦ представлено на рис. 2.

3. Концепция программы контроля рельсовых цепей

На основе предоставленного технического описания можно перейти к созданию концепции для визуальной программы, которая демонстрирует предложенный адаптивный метод контроля РЦ с использованием ЛЧМ-сигналов.

Рассматриваемая программа состоит из нескольких процессов (рис. 3):

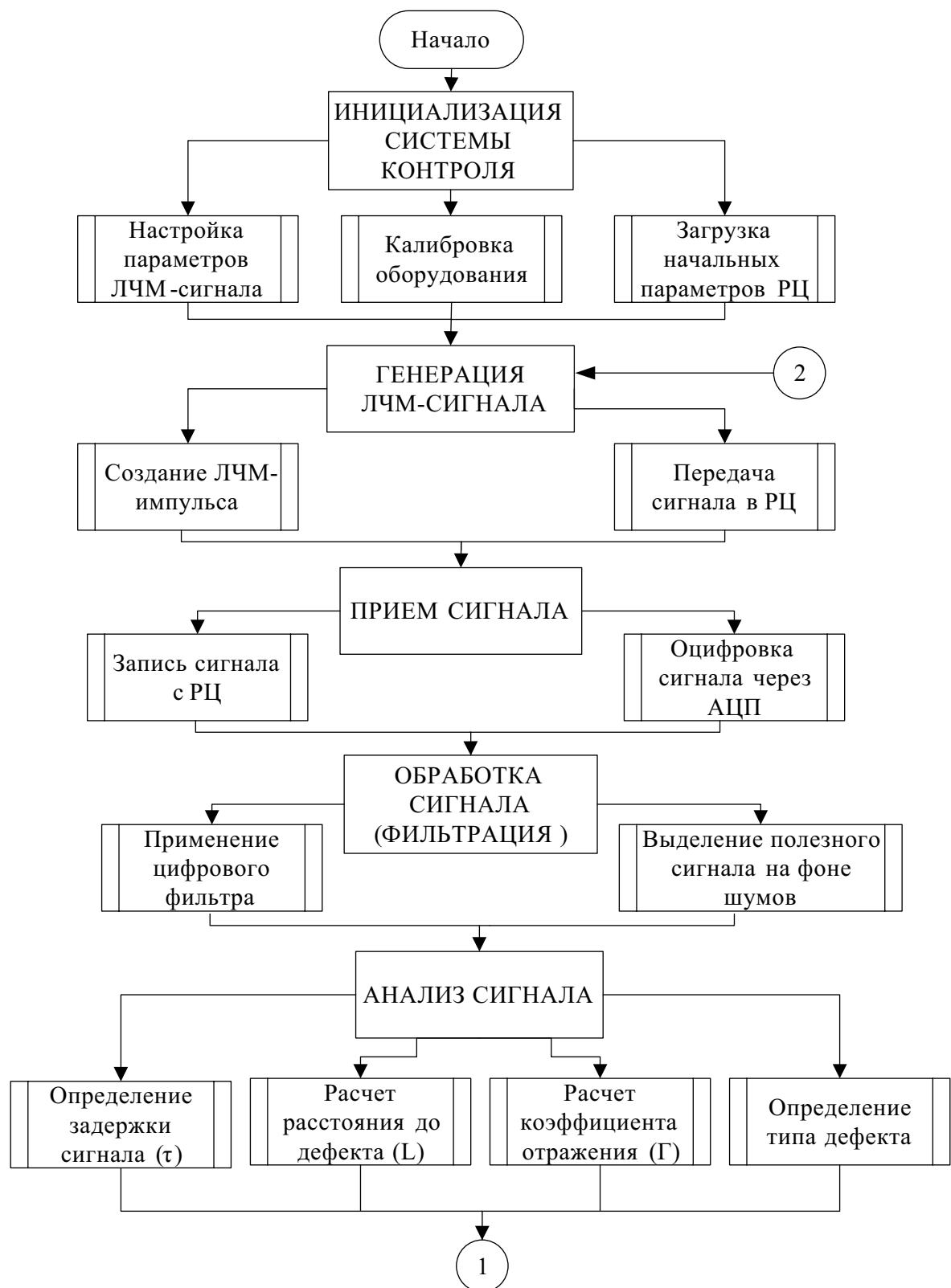


Рис. 3. Блок-схема программы контроля рельсовых цепей (начало)

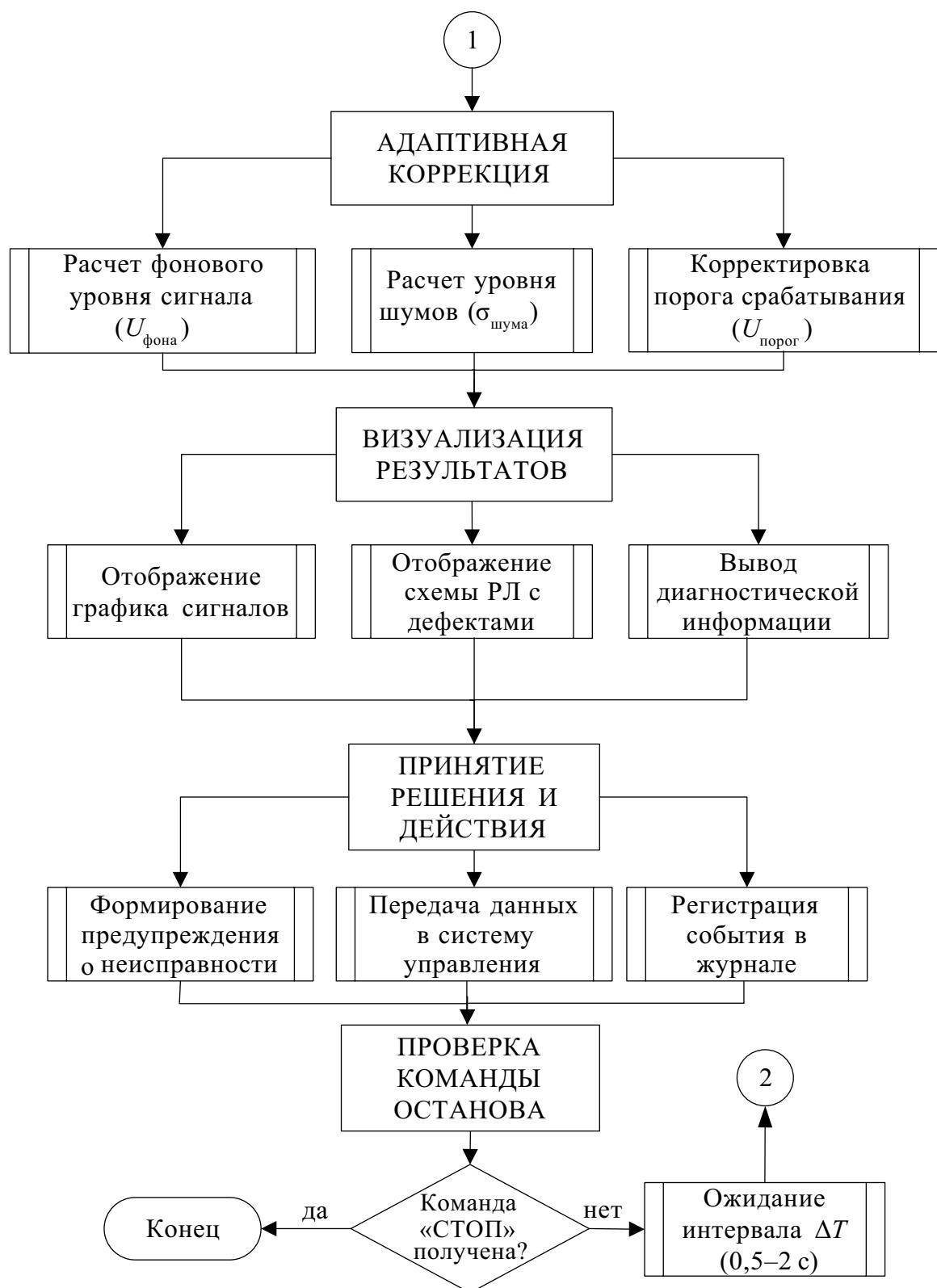


Рис. 4. Блок-схема программы контроля рельсовых цепей (окончание)

1. *Инициализация.* Настройка параметров и подготовка оборудования к работе.
2. *Генерация сигнала.* Создание «зондирующего» (или «стимулирующего») сигнала (ЛЧМ), который отправляется в РЦ.
3. *Прием сигнала.* Система принимает сигнал и оцифровывает его.
4. *Анализ.* Разбор полученного сигнала, определяя: есть ли дефект, какого типа дефект (обрыв, короткое замыкание, ухудшение изоляции), где расположен дефект.
5. *Адаптация.* Автоматическая подстройка под текущие условия (влажность, температура и пр.), чтобы уменьшить количество ложных срабатываний.
6. *Визуализация.* Отображение результатов на экране в виде графиков и схем (мнемосхема).
7. *Действия.* Формирование предупреждения и передача информации в систему управления.
8. *Цикл.* Повторение процесса с заданным интервалом для непрерывного контроля.

Программа работает автоматически, постоянно отслеживая состояние РЦ и адаптируясь к изменяющимся условиям окружающей среды. Алгоритм реализации программы контроля показан на рис. 3, 4.

Реализация метода предусматривает два варианта архитектуры системы:

1. Активная диагностика с дополнительным зондирующим сигналом, при которой ШПС используется в качестве дополнительного стимулирующего воздействия, параллельного основному сигнальному току. Это обеспечивает диагностику без модификации базового протокола передачи данных.

2. Сквозная диагностика, предполагающая синтез основного сигнального тока РЦ на основе ШПС. В этом случае информационные и стимулирующие функции совмещаются в одном физическом носителе, что создает основу для построения адаптивных и самодиагностируемых РЦ.

Выводы

Управляющий автомат выступает ядром системы контроля, обеспечивающей непрерывный мониторинг состояния РЦ в реальном времени и автоматическое принятие решений для поддержания их исправности. Адаптивное

управление обеспечивает надежный контроль состояния РЦ за счет применения современных методов цифровой обработки сигналов: эффективно фильтрует и компенсирует внешние помехи, снижает энергозатраты при сохранении высокой точности диагностики.

Принцип работы основан на корреляционном анализе ШПС, что обеспечивает высокую точность измерений даже в условиях сильных помех. Математический аппарат позволяет количественно оценивать состояние РЦ по трем ключевым параметрам:

- расстоянию до дефекта;
- затуханию;
- сопротивлению изоляции.

К преимуществам предложенного решения относятся:

- адаптивность к изменению параметров РЦ;
- высокая помехоустойчивость;
- быстрое обнаружение неисправностей;
- возможность самодиагностики.

Реализация такого автомата позволяет:

- существенно повысить безопасность железнодорожных перевозок;
- оптимизировать процессы технического обслуживания;
- снизить эксплуатационные затраты. ▲

Список источников

1. Марюхненко В. С. Критические и предотказные состояния на транспорте / В. С. Марюхненко, М. Г. Комогорцев // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. — 2007. — Т. 1. — № 4. — С. 3–4.
2. Сперанский Д. В. Задачи оптимизации ресурсов в области технической эксплуатации систем автоматики и телемеханики / Д. В. Сперанский, А. В. Горелик, А. В. Орлов // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 2. — С. 184–203. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-184-203.
3. Радковский С. А. Корреляционный анализ влияния погодных условий на рельсовые цепи / С. А. Радковский, А. В. Сацюк, Е. Г. Воевода // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. — 2022. — № 65. — С. 4–12.
4. Марюхненко В. С. Физико-технические аспекты изменения сопротивления балласта железнодорожных путей / В. С. Марюхненко, Н. Г. Мудрая // Вопросы естествознания. — 2016. — № 1(9). — С. 25–34.
5. Шаманов В. И. Влияние условий эксплуатации на электрические и магнитные параметры рельсовых линий / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. — 2025. — Т. 11. — № 2. — С. 109–119. — DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-02-109-119.

6. Соколов М. М. Классификации состояния рельсовой цепи на основании значения ее входного сопротивления / М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич // Известия Транссиба. — 2023. — № 1(53). — С. 45–53.
7. Соколов М. М. Построение условного алгоритма диагностирования станционных рельсовых цепей тональной частоты / М. М. Соколов // Известия Транссиба. — 2018. — № 2(34). — С. 150–158.
8. Бушуев А. В. Рельсовые цепи: теоретические основы и эксплуатация: монография / А. В. Бушуев, В. И. Бушуев, С. В. Бушуев. — Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2014. — 311 с.
9. Марюхненко В. С. Алгоритмизация первичной обработки радиосигналов / В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад // Системный анализ в проектировании и управлении: труды X Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 28 июня — 10 июля 2006 г.) / С. Е. Воронько, Л. А. Прус. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2006. — 218 с. — С. 98–101.
10. Мудрая Н. Г. Применение шумоподобных сигналов для контроля сопротивления балласта железнодорожных путей / Н. Г. Мудрая, В. С. Марюхненко; науч. ред. В. Н. Бондаренко; отв. за вып. А. А. Левицкий // Современные проблемы радиоэлектроники: сборник научных трудов. — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. — 628 с. — С. 84–87.
11. Мудрая Н. Г. Алгоритм выявления неисправности рельсовой цепи в системе контроля с применением шумоподобных сигналов / Н. Г. Мудрая, В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 2(62). — С. 141–150. — DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).141-150.
12. Савушкин С. А. Методы оценки стоимости адаптации железнодорожной инфраструктуры к изменению климата / С. А. Савушкин, В. Г. Горбунов, А. В. Лемешкова // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. — 2023. — № 2(21). — С. 8–13. — DOI: 10.47501/ITNOU.2023.2.08-13.
13. Зачиняев Ю. В. Анализ и классификация формирователей линейно-частотно-модулированных радиосигналов с точки зрения уменьшения длительности формируемых сигналов / Ю. В. Зачиняев // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 5. — С. 118.
14. Oukhellou L. Fault diagnosis in railway track circuits using Dempster—Shafer classifier fusion / L. Oukhellou, A. Debillolles, T. Denceux, P. Aknin // Engineering Applications of Artificial Intelligence. — 2010. — Vol. 23. — Pp. 117–128. — DOI: 10.1016/j.engappai.2009.06.005.
15. de Bruin T. Railway Track Circuit Fault Diagnosis Using Recurrent Neural Networks / T. de Bruin, K. Verbert, R. Babuska // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. — 2016. — Vol. 28. — Pp. 1–11. — DOI: 10.1109/TNNLS.2016.2551940.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 4, pp. 332–341

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-332-341

Railway Circuit Controller: Adaptive Control and Digital Processing Based on Broadband Signals

Information about authors

Mudraya N. G., Applicant of the Department¹. E-mail: viktor.maryuhnenko@yandex.ru

Maryukhnenko V. S., Doctor of Engineering, Professor².

E-mail: viktor.maryuhnenko@yandex.ru

¹Department of "Automation of Production Processes", Irkutsk State Transport University, Irkutsk

²Peter the Great Military Academy of Strategic Rocket Troops, Balashikha

Abstract: This research presents a framework and principles of functioning of an adaptive control device designed to monitor railway circuits. This device utilizes broadband signals featuring linear frequency modulation, along with advanced digital signal processing techniques. By utilizing linearly frequency-modulated probing signals as stimuli, it facilitates the integration of information transmission and diagnostic functions. Significant scientific and practical contributions include the formulation of a structural diagram of the control device and the establishment of a mathematical framework for accurate fault localisation. Additionally, an adaptive algorithm for dynamic threshold adjustment has been proposed to minimize false alarm occurrences, taking into consideration fluctuating operating conditions such as ballast resistance, humidity and temperature. The research has demonstrated that the use of this automatic controller can ensure high interference immunity through the correlated processing of broadband signals, automatic adjustment to varying railway parameters, and precise identification of both the nature and location of damage. The developed method will enable reduced diagnostic time for railway circuit faults and minimized impact of human factors during maintenance. This solution can be integrated into contemporary railway automation systems to enhance traffic safety.

Keywords: Railway circuit; broadband signals; linear frequency modulation; ballast resistance; diagnostics; digital processing of signals; controller.

References

1. Maryukhnenko V. S., Komogortsev M. G. Kriticheskie i predotkaznye sostoyaniya na transporte [Critical and pre-failure states in transport]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. 2007, vol. 1, Iss. 4, pp. 3–4. (In Russian)
2. Speransky D. V., Gorelik A. V., Orlov A. V. Zadachi optimizatsii resursov v oblasti tekhnicheskoy ekspluatatsii sistem avtomatiki i telemekhaniki [Tasks of resource optimization in the field of technical operation of automation and telemechanics systems]. *Avtomatika na transporte* [Automation in Transport]. 2020, vol. 6, Iss. 2, pp. 184–203. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-184-203. (In Russian)
3. Radkovsky S. A., Satsyuk A. V., Voevoda E. G. Korrelyatsionnyy analiz vliyaniya pogodnykh usloviy na rel'sovye tsepi [Correlation analysis of the influence of weather conditions on track circuits]. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proceedings of Donetsk Institute of Railway Transport]. 2022, Iss. 65, pp. 4–12. (In Russian)
4. Maryukhnenko V. S., Mudraya N. G. Fiziko-tehnicheskie aspekty izmeneniya sопrotivleniya ballasta zheleznodorozhnykh putey [Physical and technical aspects of changes in the ballast resistance of railway tracks]. *Voprosy estestvoznaniya* [Issues of Natural Science]. 2016, Iss. 1(9), pp. 25–34. (In Russian)
5. Shamanov V. I. Vliyanie usloviy ekspluatatsii na elektricheskie i magnitnye parametry rel'sovykh linii [Influence of operating conditions on electrical and magnetic parameters of track circuits]. *Avtomatika na transporte* [Automation in Transport]. 2025, vol. 11, Iss. 2, pp. 109–119. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-02-109-119. (In Russian)
6. Sokolov M. M., Khodkevich A. G. Klassifikatsii sostoyaniya rel'sovoy tsepi na osnovanii znacheniya yeye vkhodnogo sопrotivleniya [Classification of track circuit state based on its input resistance value]. *Izvestiya Transsibba* [Trans-Siberian Bulletin]. 2023, Iss. 1(53), pp. 45–53. (In Russian)
7. Sokolov M. M. Postroyeniye uslovnogo algoritma diagnostirovaniya stantsionnykh rel'sovykh tsepey tonal'noy chastoty [Construction of a conditional algorithm for

- diagnosing station track circuits of tonal frequency]. *Izvestiya Transsiba* [Trans-Siberian Bulletin]. 2018, Iss. 2(34), pp. 150–158. (In Russian)
8. Bushuev A. V., Bushuev V. I., Bushuev S. V. *Rel'sovye tsepi: teoreticheskie osnovy i eksploatatsiya: monografiya* [Track circuits: theoretical foundations and operation: monograph]. Yekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvenny universitet putey soobshcheniya Publ., 2014, 311 p. (In Russian)
 9. Maryukhnenko V. S., Mukhopad Yu. F. Algoritmizatsiya pervichnoy obrabotki radiosignalov [Algorithmization of primary radio signal processing]. *Sistemnyy analiz v proyektirovaniyu i upravlenii: trudy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* (Sankt-Peterburg, 28 iyunya — 10 iyulya 2006 g.) [System Analysis in Design and Management: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference (Saint Petersburg, June 28 — July 10, 2006)]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvenny politekhnicheskiy universitet Publ., 2006, 218 p., pp. 98–101. (In Russian)
 10. Mudraya N. G., Maryukhnenko V. S., sci. ed. Bondarenko V. N.; exec. ed. Levitsky A. A. Primeneniye shumopodobnykh signalov dlya kontrolya sопротивления ballasta zhelezodorozhnykh putey [Application of noise-like signals for monitoring ballast resistance of railway tracks]. *Sovremennye problemy radioelektroniki: sbornik nauchnykh trudov* [Modern Problems of Radio Electronics: Collection of Scientific Papers]. Krasnoyarsk: Sibirs'kiy federal'nyy universitet Publ., 2015, 628 p., pp. 84–87. (In Russian)
 11. Mudraya N. G., Maryukhnenko V. S., Mukhopad Yu. F. Algoritm vyyavleniya neispravnosti rel'sovoy tsepi v sisteme kontrolya s primeneniem shumopodobnykh signalov [Algorithm for detecting track circuit faults in a monitoring system using noise-like signals]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2019, Iss. 2(62), pp. 141–150. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).141-150. (In Russian)
 12. Savushkin S. A., Gorbunov V. G., Lemeshkova A. V. Metody otsenki stoimosti adaptatsii zhelezodorozhnoy infrastruktury k izmeneniyu klimata [Methods for assessing the cost of adapting railway infrastructure to climate change]. *ITNOU: Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii* [ITNOU: Information Technologies in Science, Education and Management]. 2023, Iss. 2(21), pp. 8–13. DOI: 10.47501/ITNOU.2023.2.08-13. (In Russian)
 13. Zachinyaev Yu. V. Analiz i klassifikatsiya formirovateley lineyno-chastotno-modulirovannykh radiosignalov s tochki zreniya umen'sheniya dlitel'nosti formiruyemykh signalov [Analysis and classification of linear frequency-modulated radio signal generators from the viewpoint of reducing signal duration]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2012, Iss. 5, p. 118. (In Russian)
 14. Oukhellou L., Debiolles A., Deneoux T., Aknin P. Fault diagnosis in railway track circuits using Dempster — Shafer classifier fusion. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, vol. 23, pp. 117–128. DOI: 10.1016/j.engappai.2009.06.005.
 15. De Bruin T., Verbert K., Babuska R. Railway Track Circuit Fault Diagnosis Using Recurrent Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2016, vol. 2