

УДК 629.42.077

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И МОДЕЛИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВТОРЫМ ЛОКОМОТИВОМ ПРИ ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКЕ

БАРАНОВ Леонид Аврамович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Управление и защита информации»; e-mail: baranov.miit@gmail.com

БЕСТЕМЬЯНОВ Петр Филимонович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»; e-mail: bestpetr4@gmail.com

БАЛАКИНА Екатерина Петровна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление и защита информации»; e-mail: balakina_e@list.ru

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы»; e-mail: olegper@mail.ru

Российский университет транспорта (МИИТ), Москва

Рассмотрены модель системы автоматического управления локомотивом второго поезда при виртуальной сцепке и способы анализа качества управления. Управляемой величиной является рассчитываемое в процессе движения поездов расстояние между «хвостом» первого и «головой» второго поезда, обеспечивающее безопасность движения при экстренном торможении первого поезда. Это расстояние названо «длиной виртуальной сцепки». Введена формализация, позволяющая учесть отсутствие синхронизации при передаче информации о координате и скорости первого локомотива и такта работы цифровой системы управления вторым локомотивом. Рассмотрены погрешности измерений скорости и координат, связанные с запаздыванием при передаче информации, возможностью отказа от декодирования получаемой информации по радиоканалу приемником второго локомотива. При определении длины виртуальной сцепки рассмотрены различные способы ее верхней оценки, выбран способ, учитывающий измерение скорости движения и координаты обоих поездов, путь экстренного торможения первого поезда, возможность начала экстренного торможения первого поезда в начале цикла передачи информации, методические и инструментальные погрешности измерения. В качестве оператора, преобразующего рассогласования при выборе управления вторым локомотивом, рассмотрен цифровой пропорциональный интегральный дифференцирующий закон управления. Разработана модель системы автоматического управления, относящаяся к классу импульсных систем, особенностью которой является расчет управляющего воздействия в процессе движения поездов. Параметрический синтез системы автоматического управления рекомендуется проводить методами имитационного моделирования. Выбраны критерии качества управления.

Ключевые слова: виртуальная сцепка; экстренное торможение; служебное торможение; система автоматического управления; радиоканал; длина виртуальной сцепки; модель системы; имитационное моделирование; закон управления; погрешности измерений; вычисление длины виртуальной сцепки; критерии качества управления.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-377-388

▼ Введение

Одним из возможных направлений повышения пропускной способности железнодорожных линий является использование «виртуальной сцепки», при которой по радиоканалу первым ведущим поездом передается второму поезду информация о своей координате и скорости. Второй поезд выбирает свой режим движения таким образом, чтобы при экстренном торможении первого поезда не произошло аварийного столкновения. Эта технология

является развитием направления, связанного с движением соединенных поездов, имеющих физическое объединение, реализованное сцепкой локомотива второго поезда с последним вагоном первого.

13 сентября 1972 г. первый соединенный поезд, в СССР оборудованный телемеханической системой «Братск 1», передающей команды управления локомотиву второго поезда, был успешно проведен на участке Вихоревка — Чуна Восточно-Сибирской железной дороги.

Эта система разработана в Московском институте инженеров железнодорожного транспорта (ныне Российский университет транспорта — РУТ (МИИТ)), использовала для обмена информацией между локомотивами высокочастотный канал связи по контактной сети и была реализована еще на навесных полупроводниковых элементах [1]. В 1973 г. уже на микросхемах модернизированный вариант системы (Братск 1 м.), выполненный на интегральных микросхемах, прошел успешные испытания на участке Россось — Лихая Юго-Восточной железной дороги. Это был первый опыт в нашей стране использования интегральной микросхемотехники на подвижном составе [2]. В дальнейшем технологией и системой управления соединенных поездов занимались ООО «АВП Технологии», АО «ВНИИЖТ», АО «Московский тормозной завод ТРАНСМАШ», ООО «НПО САУТ».

Ограниченность длины станционных путей создает трудности при формировании и разъединении соединенных поездов, что приводит к занятию горловин и перегонов. Этим недостатком лишена технология виртуальной сцепки. Информация при виртуальной сцепке о координате и скорости ведущего поезда передается по радиоканалу. Работы в этом направлении ведутся как в нашей стране, так и за рубежом [3–7]. При внедрении виртуальной сцепки необходимо решить ряд задач, связанных с обеспечением безопасности движения. В частности, необходимо разработать систему контроля целостности состава [8, 9], контроля исправности рельсов, реализуемой в современных системах в рамках «контрольного режима» [10], использовать радиоканал с высоким уровнем достоверности и защиты при обмене цифровой информацией, реализовать систему точного определения координат движущихся поездов, разработать систему автоматического управления движением второго поезда с определенными характеристиками качества управления и парированием с нормированной высокой вероятностью опасных отказов. Должны быть решены технологические проблемы, определяемые согласованием числа поездов с виртуальной сцепкой с количеством станционных путей [3].

В рамках данной статьи решается круг вопросов, связанных с принципами построения

системы автоматического управления движением второго из виртуально сцепленных поездов, разработки модели системы и методики анализа качества управления.

Целью системы управления второго поезда при виртуальной сцепке является обеспечение во время движения такого расстояния между «головой» второго и «хвостом» первого поезда, при котором экстренная остановка первого поезда не приводит к столкновению поездов. В дальнейшем для упрощения описания будем называть это расстояние длиной виртуальной сцепки — L . При создании системы управления необходимо выбрать оператора, преобразующий рассогласования Δ заданной и измеренной длиной виртуальной сцепки в сигнал управления режимами локомотива второго поезда. При тяговом приводе постоянного тока управление — это номер позиции управления N (тяговой, тормозной, выбег), при тяговом приводе на асинхронных двигателях — это сила тяги F_T , торможения $F_{\text{торм}}$ либо выбег.

Модель системы автоматического управления

Для описания модели управления используем следующие обозначения: пусть время $t = (m + \varepsilon)T$ для первого локомотива. Здесь $m = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq \varepsilon \leq 1$ (рис. 1, а), T — шаг временной дискретизации при измерении координаты «головы» S_1^* и скорости V_1 первого поезда. Аналогично для второго поезда $t = (n + \varepsilon)T$, $n = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq \varepsilon \leq 1$ (рис. 1, б), S_2 — координата «головы» и скорость V_2 второго поезда.

Такая формализация позволяет учесть отсутствие синхронизации при измерении координаты пути и скорости поездов. Шаг временной дискретизации T должен быть согласован с временем доставки информации по радиоканалу от первого локомотива ко второму. Так, если время передачи пакета незначительно меньше T , то координата пути и скорость первого локомотива, соответствующая моменту времени mT , получены вторым локомотивом в момент $(m + 1)T = (n + \varepsilon_1)T$ и, следовательно, запаздывают на T , что вносит дополнительную погрешность от запаздывания при определении рассогласования.

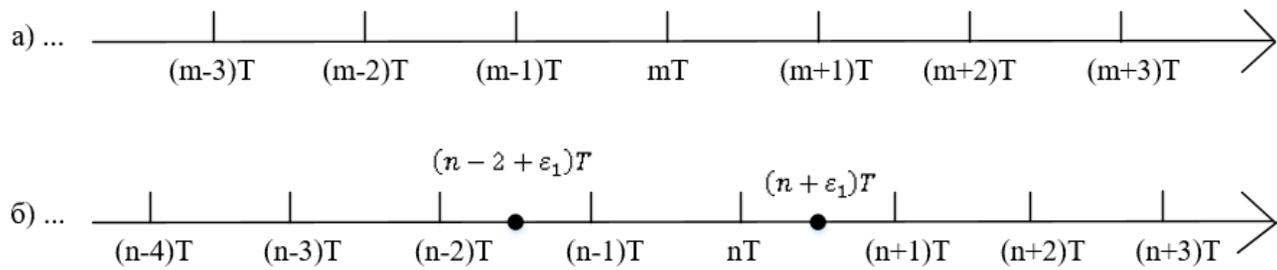


Рис. 1. Введение дискретного времени

Пусть l — длина первого поезда. Обозначим координату его «хвоста» как $S_1 = S_1^* - l$. Тогда в момент времени nT в системе управления второго поезда известны значение координаты «хвоста» первого поезда, измеренной в момент времени $(m-1)T = (n-2 + \varepsilon_1)T$, и погрешность от запаздывания равна:

$$\Delta S_1[nT] = S_1[nT] - S_1[(n-2 + \varepsilon_1)T]. \quad (1)$$

Эта величина соответствует ситуации, когда все последовательно передаваемые пакеты с первого локомотива принимаются вторым локомотивом и отсутствуют случаи отказа приемника от декодирования при обнаружении ошибки. Если первая передаваемая кодовая серия не принимается приемником, то

$$\Delta S_1[nT] = S_1[nT] - S_1[(n-3 + \varepsilon_1)T]. \quad (2)$$

В общем случае, когда непринятыми могут быть подряд k кодовых серий:

$$\Delta S_{1,k}[nT] = S_1[nT] - S_1[(n-2-k + \varepsilon_1)T]. \quad (3)$$

Аналогично погрешность от запаздывания при учете времени передачи информации составляет:

$$\Delta V_1[nT] = V_1[nT] - V_1[(n-2-k + \varepsilon_1)T]. \quad (4)$$

Максимальные значения погрешностей соответствуют $\varepsilon_1 = 0$ и $k = k_{\max}$. Пусть P — вероятность отказа от декодирования кодовых серий. События отказа от декодирования статистически независимы. Тогда вероятность того, что будет принята $(k+1)$ -я кодовая серия,

составляет $P^k(1-P)$. Величина k_{\max} , следовательно, и максимальная оценка погрешности от запаздывания могут быть приняты с определенной вероятностью. Данное рассмотрение соответствует ситуации, когда вероятность трансформации кодовой серии пренебрежимо мала. Современные методы помехозащищенного кодирования позволяют решить эту задачу.

Кроме погрешностей ΔS_1 и ΔV_1 , определяемых запаздыванием, связанных с передачей информации с первого локомотива, имеют место методические и инструментальные погрешности измерения скорости и координаты. Пусть ΔS_{1a} , ΔS_{2a} , ΔV_{1a} , ΔV_{2a} — соответственно значения этих погрешностей измерения скорости и координаты первого и второго поездов. Погрешности ΔV_{1a} и ΔS_{1a} суммируются с погрешностями ΔS_1 и ΔV_1 . В частности, методическая погрешность измерения скорости определяется квантованием по уровню и погрешностью от запаздывания [11, 12].

Последняя объясняется тем, что измеряется средняя скорость поезда за время измерения $T_v < T$ [11, 12].

Анализ величины погрешностей измерительных тактов особенно существен, так как они определяют показатели качества системы управления и не парируются обратной связью. Модель измерительных тактов системы управления длиной виртуальной сцепки приведена на рис. 2. Так как информация о координате и скорости первого поезда используется в системе управления вторым поездом с запаздыванием, определяемом временем передачи, в модели включены соответствующие звенья с запаздыванием на $(k+2 - \varepsilon_1)T$.

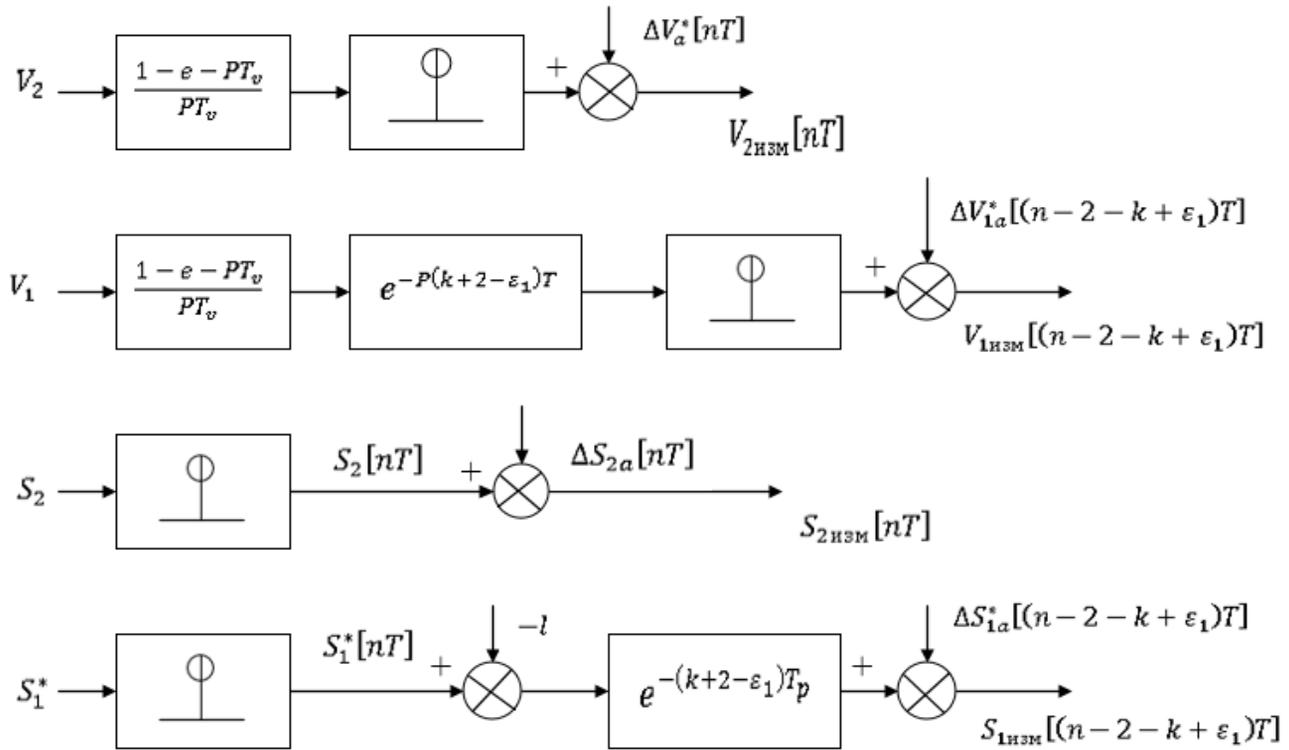


Рис. 2. Модель измерительных тактов

В измерительных тактах скорости звена с передаточными функциями $\frac{1 - e^{-pT_v}}{pT_v}$ определяют усреднение за время T_v при измерении скорости [11, 12], импульсный элемент моделирует временную дискретизацию — преобразование функции непрерывного аргумента t в функцию дискретного аргумента nT , $n = 0, 1, 2, \dots$. Аналогичны тракты измерения координат. Отдельно рассмотрим составляющие погрешности измерения скорости. Сумму методической погрешности квантования по уровню и инструментальными погрешностями обозначим как ΔV_{1a}^{MI} или ΔV_{2a}^{MI} . Вместе с тем наличие звена $\frac{1 - e^{-pT_v}}{pT_v}$, частотная характеристика которого $\frac{1 - e^{-j\omega T_v}}{j\omega T_v} = \frac{\sin \frac{\omega T_v}{2}}{\frac{\omega T_v}{2}} e^{-j\omega \frac{T_v}{2}}$ говорит о запаздывании на $\frac{T_v}{2}$ в тракте измерения

и, следовательно, дополнительной погрешности от запаздывания. Эту погрешность можно оценить сверху [11, 12] как $a_{\max} \frac{T_v}{2}$, где a_{\max} — максимальное ускорение или замедление поезда. Тогда $\Delta V_{1a}^* \leq \Delta V_{1a}^{MI} + a_{\max} \frac{T_v}{2}$ и $\Delta V_{2a}^* \leq \Delta V_{1a}^{MI} + \frac{a_{\max} T_v}{2}$. При аналитических оценках длины виртуальной сцепки из условий обеспечения безопасности будем считать, что сумма $\Delta V_{1a}^{MI} + a_{\max} \frac{T_v}{2}$ и $V_{2a}^{MI} + \frac{a_{\max} T_v}{2}$ равны соответственно ΔV_{1a}^{\max} и ΔV_{2a}^{\max} . При имитационном моделировании функционирования системы отдельно моделируется звено $\frac{1 - e^{-pT_v}}{pT_v}$, а составляющие ΔV_{1a}^{MI} и ΔV_{2a}^{MI} задаются своими законами распределения плотности вероятности.

В качестве оператора управления выберем цифровой ПИД (пропорциональный, интегральный, дифференцирующий) закон управления. Управление u в этом случае определяется выражением:

$$u = k_1 \Delta[nT] + k_2 \sum_{m=0}^n \Delta[mT] + k_3 \Delta[nT] - \Delta[(n-1)T], \quad (5)$$

где k_1, k_2, k_3 — коэффициенты;

$\Delta[nT]$ — величина рассогласования;

$\Delta[nT] - \Delta[(n-1)T]$ — обратная первая разность рассогласования;

$\sum_{m=0}^n \Delta[mT]$ — эквивалент интегрирования

рассогласования $\Delta[mT]$.

Величина рассогласования:

$$\Delta[nT] = L[nT] - L_{\text{изм}}[nT], \quad (6)$$

где $L[nT]$ — заданная в момент nT требуемая длина виртуальной сцепки;

$L_{\text{изм}}[nT]$ — измеренная на втором локомотиве в момент времени nT длина виртуальной сцепки.

$$L_{\text{изм}}[nT] = S_{2\text{изм}}[nT] - S_{1\text{изм}}[nT], \quad (7)$$

где $S_{2\text{изм}}[nT]$ — известная в момент nT координата «головы» второго локомотива;

$S_{1\text{изм}}[nT]$ — полученное значение устройством управления второго локомотива из канала в момент времени nT значения координаты «хвоста» первого поезда, измеренное на первом локомотиве в момент времени $(n-k-1-\varepsilon_1)T$.

Способы преобразования величины u при дискретном управлении тягой и торможением в номер N позиции управления является самостоятельной задачей. В этом случае появляется дополнительное требование — уменьшение числа переключений позиций управления тяговым приводом при выполнении заданных показателей качества функционирования системы автоматического управления.

Выбор длины виртуальной сцепки

Длина виртуальной сцепки $L[nT]$ — выбирается из условий обеспечения безопасности движения при экстренном торможении первого поезда. Для идеального случая, когда отсутствуют погрешности измерений скорости и координаты поездов:

$$L[nT] = S_1^*[nT] - l - S_2[nT] + S_{1\text{эторм}}(V_1) \geq S_{2\text{слторм}}(V_2), \quad (8)$$

где $S_{1\text{эторм}}(V_1)$ — путь экстренного торможения первого поезда, движущегося со скоростью V_1 ;

$S_{2\text{слторм}}(V_2)$ — путь служебного торможения второго поезда, движущегося со скоростью V_2 .

Учитывая наличие погрешностей от запаздывания, методических, аппаратных погрешностей при измерении скоростей и координат поездов, разброс в задании путей экстренного и служебного торможения, величина L выбирается для «худших условий» — максимальных величин погрешностей.

Максимальная величина погрешностей запаздывания $\Delta S_{1,k}[nT]$ определяется из (3) при $\varepsilon_1 = 0$ и величине k , при которой $P^k(1-P) \leq 10^{-8}$ согласно SIL 4.

Оттуда:

$$k \geq -\frac{8 + \lg(1-P)}{\lg P}. \quad (9)$$

Оценку сверху погрешности от запаздывания вычислим как путь, пройденный первым поездом при максимальной скорости за максимальное время запаздывания:

$$\Delta S_{1,k}^{\max} = (k+2)TV_{1\max}. \quad (10)$$

Тогда оценка максимальной погрешности координаты первого поезда, используемой для управления вторым поездом, определяется выражением:

$$\Delta S_{1\max} = \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{1,k}^{\max} \leq \Delta S_{1a}^{\max} + (k+2)TV_{1\max}, \quad (11)$$

где ΔS_{1a}^{\max} — максимум модуля погрешности ΔS_{1a} .

Оценка сверху погрешности измерения координаты второго поезда определяется только методическими и инструментальными составляющими:

$$\Delta S_{2\max} = \Delta S_{2a}^{\max},$$

где ΔS_{2a}^{\max} — максимум модуля погрешности ΔS_{2a} .

Тогда:

$$L \geq S_{2\text{торм}}(V_{2\max}) - S_{1\text{э}}(V_1) + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l + (k+2)TV_{1\max}, \quad (12)$$

где Δl — погрешность в задании длины первого поезда.

Для верхней оценки величины L можно не учитывать путь экстренного торможения первого поезда и принять:

$$L \geq S_{2\text{торм}}(V_{2\max}) + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l. \quad (13)$$

Величина $S_{2\text{торм}}(V_{2\max})$ может определяться следующим образом:

$$S_{2\text{торм}}(V_{2\max}) = \frac{V_{2\max}^2}{2g_{\max}}, \quad (14)$$

где g_{\max} — максимальное замедление второго поезда при служебном торможении.

В выражениях (12) и (13) погрешность от запаздывания при передаче информации о координате первого поезда учитывается оценкой сверху, что соответствует управлению вторым поездом с запасом по условиям безопасности. Вместе с тем эту погрешность нужно учитывать при имитационном моделировании всей системы управления для анализа изменений длины виртуальной сцепки в процессе движения.

Полученная верхняя оценка длины виртуальной сцепки не учитывает погрешностей, возникающих в системе автоматического управления вторым поездом, анализ которых проводится методами имитационного моделирования. После разработки адекватной математической модели системы, верифицированного программного обеспечения модели проводится параметрический синтез системы. Задачей параметрического синтеза является выбор значений

коэффициентов k_1, k_2, k_3 закона управления, при которых обеспечиваются заданные показатели качества управления. Учитывая, что при функционировании системы автоматического управления длины виртуальной сцепки имеются динамические и статические погрешности, требуемая величина L должна быть увеличена на максимальное значение суммарной погрешности системы.

Описанный выше способ определения минимальной длины виртуальной сцепки и управления вторым поездом по этой длине не единственен. Рассмотрим вычисления длины L с учетом известной скорости V_2 второго поезда и управления без учета пути экстренного торможения первого поезда. В этом случае на каждом такте управления может быть вычислена величина L по выражению (13) после замены $S_{2\text{торм}}(V_{\max})$ на $S_{2\text{торм}}[V_{2\text{изм}}[nT] + \Delta V_{2a}^{\max}]$, где ΔV_{2a}^{\max} — максимальная величина погрешности измерения скорости второго поезда, и $S_{2\text{торм}}$ вычисляется по (14) после замены $V_{2\max}$ на $[V_{2\text{изм}}[nT] + \Delta V_{2a}^{\max}]$. При этом допустимая величина L уменьшается. Следующий способ уменьшения длины виртуальной сцепки является учет пути экстренного торможения первого поезда, движущегося со скоростью V_1 . Длина пути возможного экстренного торможения первого поезда при $V_{1\text{изм}}[nT] - \Delta V_{1a}^{\max}$ вычисляется на борту этого поезда и передается в общем пакете вместе с координатой и скоростью второму поезду, где и учитывается при вычислении L согласно (12). При этом расчет первого слагаемого в (12) зависит от выбора одного из двух способов, описанных выше.

Вместе с тем расчет пути экстренного торможения первого поезда должен учитывать возможность уменьшения его скорости за время $(k+2)T$ передачи информации второму поезду (рассматриваем длительность передачи для худшего случая). За время $(k+2)T$ скорость первого поезда перед экстренным торможением может уменьшиться с V_1 до $V_1 - g_{\max}(k+2)T$, где g_{\max} — максимальное замедление поезда. Следовательно, путь экстренного торможения первого поезда, движущегося со скоростью V_1 , для гарантии безопасности должен быть уменьшен с учетом возможного уменьшения его скорости и определяться выражением:

$$S_{1a} [V_1 - g_{\max} (k+2)T] = \frac{[V_1 - \Delta V_{1a}^{\max} - g_{\max} (k+2)T]^2}{2g_3}, \quad (15)$$

где g_{\max} — максимальное замедление, которое можно выбрать равное g_3 .

Приведем анализ различных способов вычисления L — длины виртуальной сцепки. Для дальнейшего рассмотрения введем обозначения этих способов:

1-й способ — для расчета L используется путь служебного торможения второго поезда от скорости $V_{2\max}$, путь экстренного торможения первого поезда принимается равным 0;

2-й способ — для расчета L используется путь служебного торможения второго поезда с учетом начала торможения от скорости $V_{2\text{изм}}[nT] + \Delta V_{2a}^{\max}$, путь экстренного торможения первого поезда принимается равным 0;

3-й способ — путь служебного торможения второго поезда определяется от скорости начала торможения $V_{2\max}$ (так же как и в первом способе), учитывается путь экстренного торможения от скорости $V_{1\text{изм}}[nT] - \Delta V_{1a}^{\max}$ первого поезда;

4-й способ — путь служебного торможения 2-го поезда определяется от скорости $V_{2\text{изм}}[nT] + \Delta V_{2a}^{\max}$ (так же как и во втором способе), учитывается путь экстренного торможения от скорости $V_{1\text{изм}}[nT] - \Delta V_{1a}^{\max}$ первого поезда.

Выражение для определения длины виртуальной сцепки для рассмотренных четырех способов сведены в табл. 1.

Из качественных соображений очевидно, что минимальную из рассмотренных способов определения длину виртуальной сцепки обеспечивает 4-й способ при обеспечении условий безопасности одинаковых максимальных погрешностях трактов измерения и методах передачи информации.

Для получения численных результатов зададим следующие исходные данные: $\Delta S_{1a}^{\max} = 10$ м; $\Delta S_{2a}^{\max} = 10$ м; $\Delta V_{1a}^{\max} = 1$ км/ч; $\Delta V_{2a}^{\max} = 1$ км/ч, $k = 10$, $T = 140$ мс; $g_{\text{сл}} = 0,6$ м/с²; $g_3 = 0,7$ м/с²; $g_{\max} = 0,7$ м/с²; $V_{2\max} = 80$ км/ч. В выбранных данных $T = 140$ мс при передаче сообщения длиной 24 байта по радиоканалу на частоте 160 МГц. При использовании радиоканала на частоте 2130 МГц время передачи 24 информационных байта составляет 70 мс. Результаты расчета сведены в табл. 2.

Обратим внимание, что допустимая длина виртуальной сцепки для второго способа, когда $V_{2\text{изм}} = V_{2\max} = 80$ км/ч превышает соответствующую величину для первого способа. Это вызвано тем, что $V_{2\text{изм}} = 80$ км/ч известно с погрешностью, равной 1 км/ч. При выборе L в соответствии с первым и третьим способами величина $V_{2\max}$ известна точно.

Анализ результатов третьего способа определения L говорит о том, что его использование

Таблица 1. Выражения для расчета длины виртуальной сцепки

Способ	$L > 0$	
1	$L \geq \frac{V_{2\max}^2}{2g_{\text{сл}}} + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l$	(16)
2	$L \geq \frac{(V_{2\text{изм}}[nT] + \Delta V_{2a}^{\max})^2}{2g_{\text{сл}}} + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l$	(17)
3	$L \geq \frac{V_{2\max}^2}{2g_{\text{сл}}} + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l - \frac{[V_{1\text{изм}}[nT] - \Delta V_{1a}^{\max} - a_{\max}(k+2)T]^2}{2g_3}$	(18)
4	$L \geq \frac{(V_{2\text{изм}}[nT] + \Delta V_{2a}^{\max})^2}{2g_{\text{сл}}} + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l - \frac{[V_{1\text{изм}}[nT] - \Delta V_{1a}^{\max} - a_{\max}(k+2)T]^2}{2g_3}$	(19)

Таблица 2. Допустимая длина виртуальной сцепки

Способ	L			
	$V_{2\max} = 80$ км/ч	$V_{2\text{изм}} = 80$ км/ч	$V_{2\text{изм}} = 60$ км/ч	$V_{2\text{изм}} = 40$ км/ч
1	441,4 м	—	—	—
2	—	451,75 м	269,13 м	108,11 м
3	140,05 м при $V_{1\text{изм}} = 80$ км/ч	150,52 м при $V_{1\text{изм}} = 80$ км/ч	281,11 м при $V_{1\text{изм}} = 60$ км/ч	377,88 м при $V_{1\text{изм}} = 40$ км/ч
4	—	150,4 м при $V_{1\text{изм}} = 80$ км/ч	108,84 м при $V_{1\text{изм}} = 60$ км/ч	44,59 м при $V_{1\text{изм}} = 40$ км/ч

приводит к увеличению допустимой величины длины виртуальной сцепки при низких скоростях движения за счет уменьшения пути экстренного торможения первого поезда при завышенной верхней оценке пути служебного торможения второго поезда. Перспективным для использования в автоматической системе управления вторым поездом можно считать четвертый способ, учитывающий значения измеренных координат и скоростей первого и второго поездов, при выполнении:

$$\frac{[V_{2\text{изм}} + \Delta V_{2a}^{\max}]^2}{2g_{\text{сл}}} + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l > \frac{[V_{1\text{изм}} - \Delta V_{1a}^{\max} - g_{\text{э}}(k+2)T]^2}{2g_{\text{э}}}. \quad (20)$$

Условие (20) выполняется, так как в противном случае скорость второго поезда настолько мала, что его путь служебного торможения меньше пути экстренного торможения первого поезда. Следовательно, система управления может увеличить скорость второго поезда и приблизить его к первому. При равенстве скоростей движения величина L приведена в табл. 2. Результаты расчета количественно показывают, как изменяется длина виртуальной сцепки при учете пути экстренного торможения первого поезда.

Проанализируем дополнительно выражение (19) для четвертого способа вычисления длины виртуальной сцепки. После несложных преобразований получаем:

$$L \geq \frac{V_{2\text{изм}}^2}{2g_{\text{сл}}} - \frac{V_{1\text{изм}}^2}{2g_{\text{э}}} + L_0 + L_1, \quad (21)$$

где $L_0 = \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l$;

$$L_1 = V_{2\text{изм}} \frac{\Delta V_{2a}^{\max}}{g_{\text{сл}}} + V_{1\text{изм}} \frac{\Delta V_{1a}^{\max} + g_{\text{э}}(k+2)T}{g_{\text{э}}}.$$

Величина L_0 определяется только максимальными погрешностями измерений и известна заранее.

Величина L_1 зависит как от максимальных погрешностей измерений, так и от измеренных значений скорости и возможного максимального уменьшения скорости первого поезда во время передачи информации. L_1 можно оценить сверху, приняв $V_{2\text{изм}} = V_{2\max}$, $V_{1\text{изм}} = V_{1\max}$. Тогда верхняя оценка этой составляющей

$$L_1^* = V_{2\max} \frac{\Delta V_{2a}^{\max}}{g_{\text{сл}}} + V_{1\max} \frac{\Delta V_{1a}^{\max} + g_{\text{э}}(k+2)T}{g_{\text{э}}}$$

и

$$L \geq \frac{V_{2\text{изм}}^2}{2g_{\text{сл}}} - \frac{V_{1\text{изм}}^2}{2g_{\text{э}}} + L_0 + L_1^*. \quad (22)$$

Сумму величин $L_0 + L_1^*$ по существу можно определить как длину защитного промежутка при сближении поездов. Для приведенных выше исходных данных $L_0 + L_1^* = 80,37$ м.

Таким образом, длина виртуальной сцепки в соответствии с выражением (22) определяется как сумма, разность путей служебного торможения второго и экстренного торможения первого поездов при измеренных значениях их скоростей и длины защитного промежутка.

3. Блок-схема модели

Блок-схема модели для анализа функционирования системы управления вторым поездом в условиях применения виртуальной сцепки

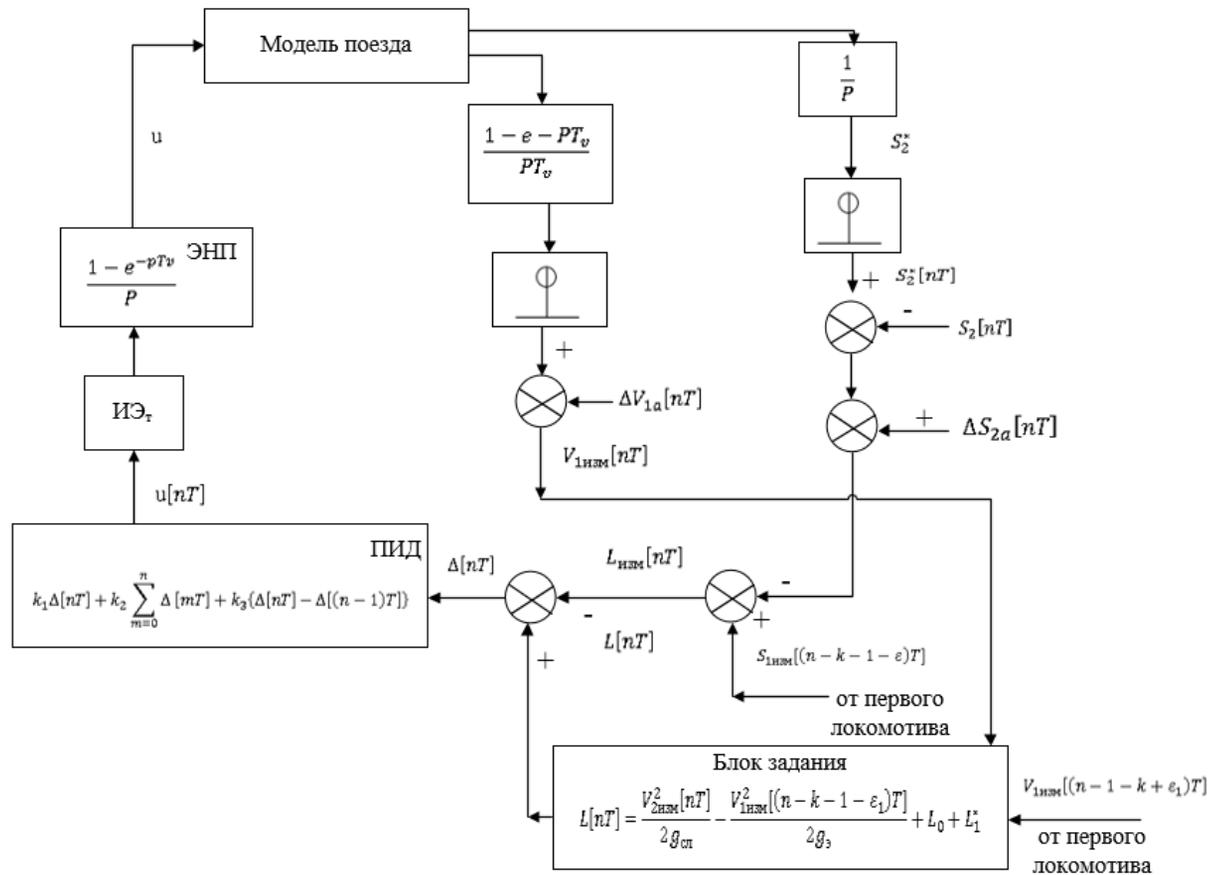


Рис 3. Блок-схема модели

при заданном управлении $u_1(t)$ первого поезда приведена на рис. 3.

Модель поезда задается системами известных дифференциальных уравнений [13]. В частности, поезд может рассматриваться как материальная точка, «нерастяжимая нить» [14]. Возможно, использование более сложных моделей, если исследователя интересует продольная динамика поезда [15–19]. Модели измерительных трактов координат и скоростей поездов с учетом запаздывания при передаче информации соответствуют описанным выше и приведенным на рис 2. Закон управления реализуется блоком ПИД, моделирующим преобразование рассогласования $\Delta[nT]$ в управление $u[nT]$. Идеальный импульсный элемент ИЭ_Т преобразует функцию дискретного аргумента $u[nT]$ в решетчатую функцию — последовательность δ -функций с весами $u[nT]$. Решетчатая функция экстраполятором нулевого порядка ЭНП, передаточная функция

которого $1 - \frac{e^{-PT}}{P}$, преобразуется в ступенчатый сигнал управления u , поступающий на вход объекта — вход управления локомотивом.

Задаваемая системе управления величина длины виртуальной сцепки вычисляется в «Блоке задания» при известных измеренных величинах $V_{изм}[nT]$, $V_{изм}[(n-k-1-\epsilon_1)T]$ и заданных L_0 и L_1^* в соответствии с выражением (22). Измеренное в момент времени значение длины виртуальной сцепки $L_{изм}[nT]$ вычисляется как разность $S_{изм}[(n-k-1-\epsilon)T]$ и $S_{2изм}[nT]$. Величина рассогласования $\Delta[nT]$ вычисляется как разность $L[nT] - L_{изм}[nT]$.

Качество управления системы характеризуют:

– $L_g[nT] = S_1[nT] - S_2[nT]$ — зависимость действительной длины виртуальной сцепки от времени получаемой при различных временах хода первого поезда по заданному участку, где $S_1[nT]$ — зависимость координаты пути «хвоста» первого поезда от времени;

$S_2[nT]$ — зависимость координаты «головы» второго поезда от времени;

— $\Delta[nT] = L[nT] - L_g[nT]$ — зависимость погрешности реализации заданной длины виртуальной сцепки от действительной, получаемой при различных временах хода первого поезда по заданному участку;

— максимальные, средние и среднеквадратические оценки $L[nT]$ и $\Delta[nT]$ по времени при движении по заданному участку;

— усредненные по времени и по множеству средние и среднеквадратические оценки $L_g[nT]$ и $\Delta[nT]$ при движении по различным участкам;

— число переключений управления при релейно-контакторном управлении привода локомотива;

— обязательное отсутствие случаев $\Delta[nT] < 0$, что определяет удовлетворение условий безопасности.

Таким образом, разработанная модель позволяет создать алгоритмическое и программное обеспечение для проведения имитационных экспериментов функционирования системы автоматического управления вторым локомотивом при виртуальной сцепке. По результатам имитационных экспериментов при выбранных показателях качества управления проводится параметрический синтез системы и вычисляются характеристики ее функционирования.

Заключение

Повышение использования пропускной способности участков железных дорог возможно при использовании технологии виртуальной сцепки. Реализация этой технологии связана с решением сложных технических и технологических задач.

Существенной проблемой при внедрении технологии виртуальной сцепки является, в частности, создание системы автоматического управления движением второго локомотива при передаче информации по радиоканалу по скорости и координате первого локомотива.

Предложенные принципы построения системы автоматического управления движением второго локомотива при виртуальной сцепке, разработка математической модели

системы, выбор показателей качества управления являются фундаментальным для решения задачи параметрического синтеза этой системы, определения характеристик ее функционирования.

Описанные в данной статье результаты исследований являются определенным этапом, предшествующим разработке алгоритмического программного и информационного обеспечения цифрового двойника технологии виртуальной сцепки. ▲

Библиографический список

1. Баранов Л. А. Система автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. И. Астрахан и др.; под ред. Л. А. Баранова. — М.: Транспорт, 1984. — 311 с.
2. Баранов Л. А. 35 лет кафедре «Автоматика и телемеханика» / Л. А. Баранов // Автоматическое управление технологическими процессами на транспорте. Юбилейный сборник научных трудов. — М.: МИИТ, 1996. — Вып. 892. — С. 3–8.
3. Бушуев С. В. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки / С. В. Бушуев, К. В. Гундырев, Н. С. Голочалов // Автоматика на транспорте. — 2021. — № 1. — С. 7–20. — DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20.
4. Климова Е. Е. Технология виртуальной сцепки поездов как инструмент, повышения пропускной и провозной способности линии / Е. Е. Климова, Л. Е. Пилинушка, В. С. Рябов // Транспортная инфраструктура сибирского региона: материалы десятой Международной научно-практической конференции. — 2019. — С. 60–64.
5. Flammini F. Towards Railway Virtual Coupling / F. Flammini, S. Marrone, R. Nardone et al. // International Conference of Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference. — 2019.
6. Mitchell I. Train Convoys or Virtual Coupling / I. Mitchell, E. Goddard, F. Montes // IRSE news. Institution of railway signal engineers. — 2016. — Iss. 219.
7. Goikoetxea J. Roadmap Towards the Wireless Virtual Coupling of Trains / J. Goikoetxea // Springer International Publishing Switzerland. — 2016. — Pp. 3–9.
8. Никитин А. Б. Результаты исследования технических средств контроля целостности поездов / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. — 2020. — № 4. С. 411–434. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-411-434.
9. Quante F. Контроль полноставности грузовых поездов / F. Quante // Железные дороги мира. — 2005. — № 2. — С. 43–48.
10. Bestem`yanov P. F. Energy efficient algorithms assessment of the Rail circuit operation / P. F. Bestem`yanov // Russian Electrical Engineering. — 2017. — Vol. 88. — № 9. — С. 557–562.

11. Баранов Л. А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления / Л. А. Баранов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 306.
12. Баранов Л. А. Микропроцессорные системы автоведения поездов / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев и др.; под ред. Л. А. Баранова. — М.: Транспорт, 1990. — С. 272.
13. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров; под ред. И. П. Исаева. — М.: Транспорт, 1995. — С. 294.
14. Баранов Л. А. Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Милешин и др.; под ред. Л. А. Баранова. — М.: МИИТ, 2011. — С. 164.
15. Лисицын А. Л. Нестационарные режимы тяги (Тяговое обеспечение перевозочного процесса) / А. Л. Лисицын, Л. А. Мугинштейн. — М.: Интекст, 1996. — 159 с.
16. Gao G. of longitudinal forces of coupler devices in emergency braking process for heavy haul trains / G. Gao, W. Chen, J. Zhang et al. // J. Cent. South Univ. — 2017. — № 24. Pp. 2449–2457. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3656-9>
17. Pugi L. Modelling the longitudinal dynamics of long freight trains during the braking phase. / L. Pugi, D. Fioravanti, A. Rindi // 12th IFToMM World Congress. Besancon, France. — 2007. Pp. 1–6.
18. Cole C. Longitudinal train dynamics / C. Cole, S. Iwnicki (ed.) // Handbook of railway vehicle dynamics. Taylor & Francis. — London, 2006. — Pp. 239–278.
19. Wu Q. A review of dynamics modelling of friction draft gear / Q. Wu, C. Cole, S. Luo et al. // Veh Syst Dyn. — 2014. № 52(6). Pp. 733–758.

Благодарность РФФИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001.

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund «Talent and success», project number 20-37-51001.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 4, pp. 377–388
DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-377-388

Design Principles and Models of Automatic Control System for Second Locomotive at Virtual Assessment

Information about authors

Baranov L. A., Doctor in Engineering, Professor, Professor of the Department of “Information Management and Protection”.
E-mail: baranov.miit@gmail.com

Bestemyanov P. F., Doctor in Engineering, Professor, Professor of the Department of “Automation, Remote Control and Communication in Railway Transport”. E-mail: bestpetr4@gmail.com

Balakina E. P., PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of “Information Management and Protection”. E-mail balakina_e@list.ru

Pudovikov O. E., Doctor in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of “Electric Trains and Locomotives”. E-mail: olegep@mail.ru

Russian University of Transport (MIIT), Moscow

Abstract: Automatic control system model of second train locomotive at virtual assessment as well as control quality analysis approaches have been considered. The controlled value represents being calculated in train traffic process the distance between “tail” of a first train and “head” of a second one, providing traffic safety at emergency braking of a first train. This distance is called “virtual replacer length”. Formalization has been introduced allowing to account for synchronization absence at transfer of information on the coordinate and speed of a first locomotive and the control digital system work cycle of a second one. Speed and coordinate measurement errors have been considered which’re connected with lagging at information transfer and possibility of failing in decoding of received by radio channel information by second locomotive receiver. At virtual length assessment, various ways of its upper assessment have been consid-

ered, the way has been chosen, taking into account motion speeds and the coordinates of both trains, emergency braking path of a first train, the possibility of emergency braking of a first train at the beginning of the cycle of information transfer, measurement methodological and instrumental errors. Digital proportional integral differentiating control law has been considered as an operator, transforming mismatches at the choice of a control of a second locomotive. Automatic control system model has been developed which relates to impulse system class and which feature is the calculation of control action in train traffic process. The parametric synthesis of automatic control system is recommended to be held by simulation modelling methods. Control quality criteria have been chosen.

Keywords: virtual replacer; emergency braking; service braking; automatic control system; radio channel; virtual replacer length; system model; simulation modelling; control law; measurement errors; virtual replacer length calculation; control quality criteria.

References

1. Baranov L. A., Erofeev E. V., Astrakhan V. I., Golovicher Ya. M., Maksimov V. M., Solyus P. G. *Sistema avtomaticheskogo i telemekhanicheskogo upravleniya elektro-podvizhom sostavom* [System of automatic and telemechanical control of electric rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1984. 311 p. (In Russian)
2. Baranov L. A. 35 let kafedre «Avtomatika i telemekhanika» [35 years of the department “Automation and telemechanics”. Automatic control of technological processes in transport]. *Avtomaticheskoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami na transporte/ Yubileynyy sbornik nauchnykh trudov* [Anniversary collection of scientific papers]. I. 892. Moscow: MIIT Publ., 1996, pp. 3–8. (In Russian)
3. Bushuev S. V., Gundyrev K. V., Golochalov N. S. Povyshenie propusknoy sposobnosti uchastka zheleznoy dorogi s primeneniem tekhnologii virtual'noy stseпки [Increasing the capacity of a railway section using virtual coupler technology]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. I. 1, 2021, pp. 7–20. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20. (In Russian)

4. Klimova E. E., Pilinushka L. E., Ryabov V. S. Tekhnologiya virtual'noy stseпки poezdov kak instrument, povysheniya propusknoy i provoznoy sposobnosti linii [The technology of virtual train coupling as a tool to increase the throughput and carrying capacity of the line]. *Transportnaya infrastruktura sibirskogo regiona: Materialy desyatoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transport infrastructure of the Siberian region: Proceedings of the tenth International scientific and practical conference]. 2019, pp. 60–64. (In Russian)
5. Flammini F., Marrone S., Nardone R., Petrillo A., Santini S., Vittorini V. Towards Railway Virtual Coupling. – International Conference of Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference. 2019.
6. Mitchell I., Goddard E., Montes F., Stanley P., Muttram R., Coenraad W., Pore J., Andrews S., Lochman L. ERTMS Level 4, Train Convoys or Virtual Coupling. Institution of railway signal engineers, IRSE news issue 219. 2016.
7. Goikoetxea J. Roadmap Towards the Wireless Virtual Coupling of Trains. Springer International Publishing Switzerland, 2016, pp. 3–9.
8. Nikitin A. B., Kushpil' I. V. Rezul'taty issledovaniya tekhnicheskikh sredstv kontrolya tselostnosti poezdov [Results of the study of technical means for monitoring the integrity of trains]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. I. 4, 2020, pp. 411–434. DOI 10.20295/2412-9186-2020-6-4-411-434. (In Russian)
9. Quante F. Kontrol' polnosostavnosti gruzovykh poezdov [Control of the completeness of freight trains]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world]. 2005, I. 2, pp. 43–48. (In Russian)
10. Bestem'yanov P. F. Energy efficient algorithms assessment of the Rail circuit operation. *Russian Electrical Engineering*. 2017, vol. 88, I. 9, pp. 557–562. (In Russian)
11. Baranov L. A. *Kvantovanie po urovnyu i vremennaya diskretizatsiya v tsifrovyykh sistemakh upravleniya* [Level quantization and temporal discretization in digital control systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. P. 306. (In Russian)
12. Baranov L. A., Golovicher Ya. M., Erofeev E. V., Maksimov V. M. *Mikroprotsessornye sistemy avtovedeniya poezdov* [Microprocessor-based systems of automatic train guidance]. Moscow: Transport Publ., 1990, p. 272. (In Russian)
13. Rozenfel'd V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of Electric Traction]. Moscow: Transport Publ., 1995, p. 294. (In Russian)
14. Baranov L. A., Erofeev E. V., Mileschin I. S., Chin' L. M. *Optimizatsiya upravleniya dvizheniem poezdov* [Optimization of train traffic control]. Moscow: MIIT Publ., 2011, p. 164. (In Russian)
15. Lisitsyn A. L. *Nestatsionarnye rezhimy tyagi (Tyagovoe obespechenie perevozhnogo protsesssa)* [Non-stationary traction modes (Traction support for the transportation process)]. Moscow: Intekst Publ., 1996. 159 p. (In Russian)
16. Gao, G., Chen, W., Zhang, J. et al. Analysis of longitudinal forces of coupler devices in emergency braking process for heavy haul trains. *J. Cent. South Univ.* 2017, pp. 2449–2457. DOI: 10.1007/s11771-017-3656-9
17. Pugi L., Fioravanti D., & Rindi A. Modelling the longitudinal dynamics of long freight trains during the braking phase. 12th IFToMM World Congress. Besancon, France. 2007, pp. 1–6.
18. Cole C. Longitudinal train dynamics. In: Iwnicki S (ed) *Handbook of railway vehicle dynamics*. Taylor & Francis, London. 2006, pp 239–278.
19. Wu Q., Cole C., Luo S., Spiriyagin M. A review of dynamics modelling of friction draft gear. *Veh Syst Dyn.* 2014, I. 52(6), pp. 733–758.