

Транспортные системы Transport systems

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 629.421.4(045)
doi: 10.30987/2782-5957-2023-9-37-44

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВА

Сергей Николаевич Журавлев^{1✉}

¹ Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, Россия
¹ zhuravlev-sn@vnikti.com

Аннотация

Описан опыт развития систем автоматического управления маневровыми локомотивами на сортировочной станции. Приведена структурная схема взаимодействия бортовых систем тепловоза с функцией автоматического управления. Представлен алгоритм работы режима поддержания заданной скорости и дано его описание. Отображены

результаты имитационного моделирования надвига и роспуска состава на сортировочную горку с реализацией указанного алгоритма (с различными скоростями движения и массами состава).

Ключевые слова: локомотив, управление, скорость, движение, моделирование, надвиг и роспуск составов.

Ссылка для цитирования:

Журавлев С.Н. Система автоматического регулирования скорости движения маневрового локомотива / С.Н. Журавлев // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 09. – С. 37-44. doi: 10.30987/2782-5957-2023-9-37-44.

Original article
Open Access Article

AUTOMATIC SPEED OF MOVEMENT CONTROL SYSTEM FOR SHUNTING LOCOMOTIVE

Sergey Nikolaevich Zhuravlev^{1✉}

¹ Scientific Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock, Russia
¹ zhuravlev-sn@vnikti.com

Abstract

The experience of developing automatic control systems for switchers at a marshalling yard is described. The structural diagram of the interaction of the locomotive onboard systems with the automatic control function is given. The algorithm of the mode of maintaining a given speed is presented and its description is

given. The results of simulation modeling of the train pushing and splitting on the gravity hump with the implementation of the specified algorithm (with different speeds and weights of the train) are displayed.

Keywords: locomotive, control, speed, movement, modeling, train pushing and splitting.

Reference for citing:

Zhuravlev SN. Automatic speed of movement control system for shunting locomotive. Transport Engineering. 2023;9:37-44. doi: 10.30987/2782-5957-2023-9-37-44.

Введение

В настоящее время для всех видов транспорта активно разрабатываются технологии для реализации беспилотного управления, железнодорожный транспорт не является исключением. Преимущества

внедрения данных систем очевидны: увеличение эффективности и производительности, а также обеспечение безопасности движения с помощью передовых технологий и исключение человеческого фактора

(поскольку в отличие от людей, искусственный интеллект лишен эмоциональности, усталости и отвлечений). Холдинг ОАО «РЖД» не остается в стороне от внедрения систем автоматического управления и автоматизации технологических процессов. Реализована технология управления локомотивом без помощника машиниста, в опытной эксплуатации находится технология дистанционного управления локомотивом, включая работу локомотива в автоматическом режиме по замкнутому кругу «без участия машиниста». Разработка и внедрение таких автоматизированных систем управления поездами осуществляются в рамках проекта «Цифровая железная дорога» [1, 2]. Станция Лужская Ок-

тябрьской дороги является самой современной системой сортировки вагонов на всей территории России и лидером новейших технологий. Сегодня на ней эксплуатируются три тепловоза ТЭМ7А, оборудованные микропроцессорной системой управления и диагностики с функцией автоматического управления, разработанной АО «ВНИКТИ» по заказу ОАО «РЖД». Данные локомотивы эксплуатируются в парке приема станции Лужская по замкнутому циклу в автоматическом режиме, выполняя операции надвига, роспуска состава, следования в тупик, заезда на занятый путь и прицепки к составу для дальнейшего роспуска (рис. 1). Все операции выполняются по командам диспетчера.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Автоматическое управление локомотивом и ведение его по маршруту осуществляется системами управления перевозочным процессом (системами верхнего уровня) [3-5]. Для реализации автоматического управления локомотив должен быть оборудован: микропроцессорной системой управления и диагностики, системой машинного зрения, комплексной системой безопасности, имеющей надежные каналы коммуникации с инфраструктурой железной дороги (структурная схема взаимодействия бортовых систем локомотива приведена на рис. 2). Для взаимодействия си-

стем предусмотрено два интерфейса – *Ethernet* и *CAN*. Команды с диспетчерского центра на локомотив, передача параметров работы тепловоза и видеопоток с камер наружного наблюдения на диспетчерский центр осуществляется по каналу Ethernet через блоки криптографической защиты информации СКЗИ по радиоканалу *LTE*.

С точки зрения автоматического управления локомотивом, при работе на сортировочной станции одной из важнейших задач является поддержание заданной скорости движения с высокой точностью при переменной массе состава.



Рис. 1. Замкнутый цикл работы локомотивов в парке приема станции Лужская сортировочная Октябрьской железной дороги
 Fig. 1. A closed locomotive duty cycle at the Luzhskaya Sortirovochnaya station receiving yard of the Otyabrskaya Railway

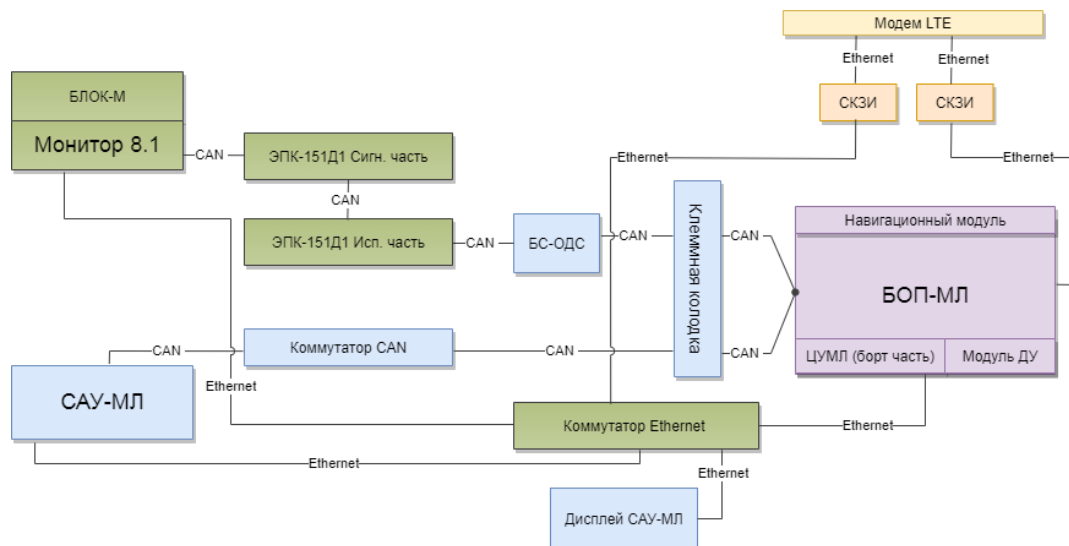


Рис. 2. Структурная схема взаимодействия бортовых систем локомотива
 Fig. 2. Flow chart of onboard locomotive systems interface

Для ее решения был разработан уникальный алгоритм регулятора скорости движения локомотива с переменной массой состава (рис. 3), отличающийся от известных алгоритмов поддержания заданной скорости [6-9].

где $U(t)$ – функция; P – пропорциональная составляющая; I – интегральная составляющая; $e(t)$ – текущая ошибка; K_p – пропорциональный коэффициент; K_i – интегральный коэффициент.

Для оценки эффективности управленческого процесса использовались интегральные оценки качества управления, которые как правило применяются для сравнения и выбора различных методов и алгоритмов.

$$I = \int_0^{\infty} f_0[X(t), t] dt. \quad (2)$$

Для лучшего определения эффективности системы интегральная оценка (2) определяется путем выбора подынтегральная функция f_0 . Чтобы интеграл был сходящимся, в функцию f_0 вводят не абсолютное значение $X(t)$, а ее отклонение от установившихся значений. Простейшей интегральной оценкой является линейная интегральная оценка

$$I_1 = \int_0^{\infty} [X(\infty) - X(t)] dt = \int_0^{\infty} \Delta X dt. \quad (3)$$

В данной работе для оценки качества регулирования применяется квадратичный интегральный критерий I_2 (4) поскольку при роспуске состава осуществляется изменение веса состава (за счет отцепа груп-

В основе алгоритма регулятора скорости движения локомотива лежит пропорционально-интегральный закон регулирования [10]:

$$U(t) = P + I = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt, \quad (1)$$

пы вагонов) имеют место переходные колебательные процессы [11]

$$I_2 = \int_0^{\infty} (\Delta X)^2 dt. \quad (4)$$

Алгоритм работы регулятора скорости движения локомотива изображен на рис. 3.

В блоке 1 алгоритма система автоматического управления скоростью получает от систем верхнего уровня заданную скорость ($V_{зад}$), массу поезда ($m_{поезд}$), степень торможения ($ST_{торм}$), а также интенсивность разгона ($V'(t)$). В блоке 2 в зависимости от массы поезда выбираются соответствующие коэффициенты K_p и K_i . Для нахождения оптимальных коэффициентов K_p и K_i использовался численный метод Монте-Карло. В блоке 3 производится измерение скорости движения локомотива. В блоке 4 анализируется заданная степень торможения от системы верхнего уровня. При заданной степени больше 0 в блоках 5 и 6 осуществляется сброс тяговой позиции и реализация заданных степеней торможения. В блоке 7 анализируется заданная скорость движения локомотива и при нулевом в блоке 14 осуществляется реализация второй степени торможения для удержания

жания состава на месте. В блоке 8 реализован пропорционально-интегральный закон регулирования для расчета $U_{зад}$. Блок 9 необходим для перевода локомотива в режим «тяга». В блоках 11 и 12 реализуются регулятор мощности и регулятор напряжения соответственно. Основная задача регулятора мощности – выбор позиции контроллера машиниста, соблюдение ограничений тягового генератора по току, напря-

жению и мощности в зависимости от заданной позиции контроллера машиниста. При этом регулятор напряжения является подчиненным звеном регулятору мощности. В нем определяется величина рассогласования (dU) между заданным и фактическим значением напряжения. По значению (dU) осуществляется регулирование напряжения через задание угла открытия тиристор.

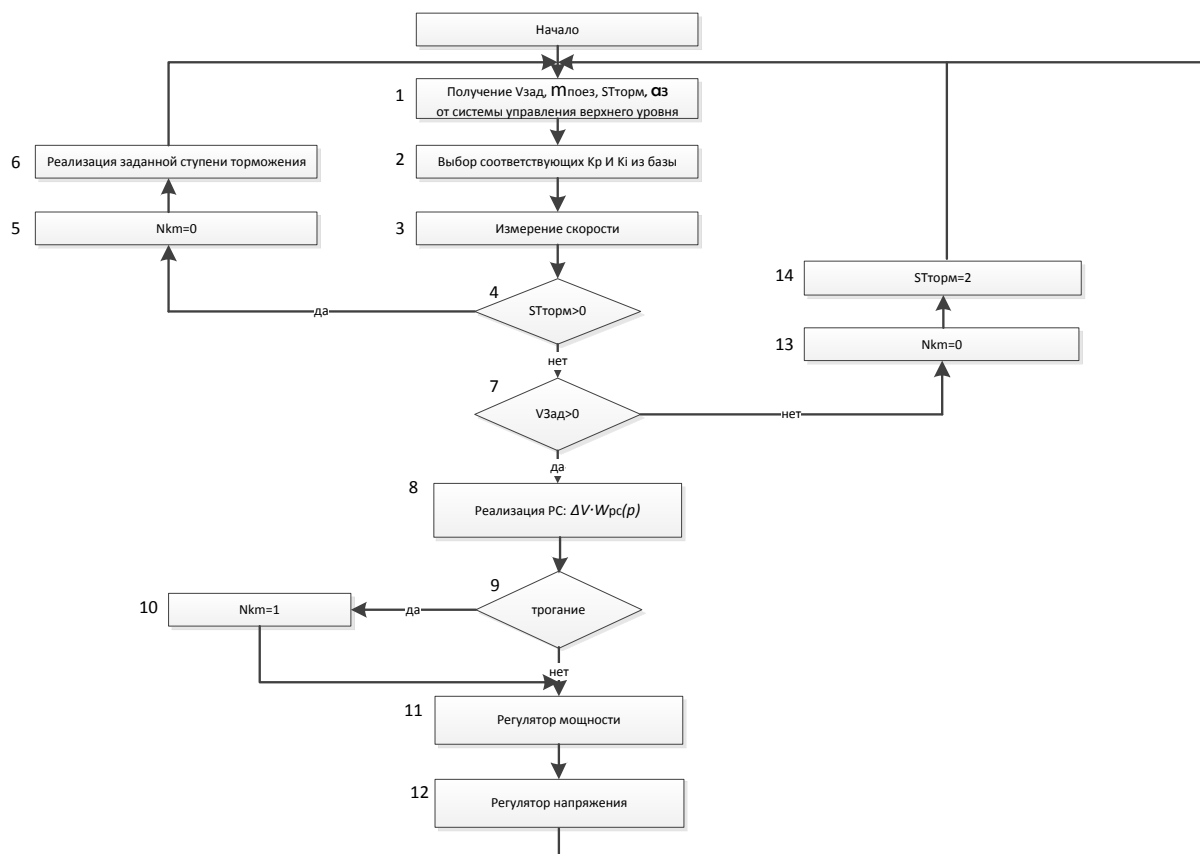


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления тепловозом в режиме поддержания скорости
 Fig. 3. Flowchart of the diesel locomotive speed control algorithm

Описанный алгоритм адаптивного регулятора скорости маневрового локомотива был реализован в математической модели электропривода маневрового локомотива включающей в себя: передачу мощности, модуль реализации силы тяги, регулятор частоты вращения коленчатого

вала дизеля, управляемый выпрямитель возбуждения тягового генератора, задатчик профиля пути надвига, микропроцессорную систему управления МСУ, в ПО которого реализован представленный алгоритм поддержания заданной скорости.

Результаты моделирования

В качестве примера на рис. 4-7 отображены результаты математического моделирования надвига и роспуска состава на сортировочную горку.

На рис. 4 изображены полученные зависимости напряжения $U_{ТГ}$ и тока $I_{ТГ}$ тя-

гового генератора, а также скорости V в зависимости от времени при надвиге и роспуске состава с заданной скоростью 5 км/ч для состава из 20 вагонов массой по 80 тонн каждый.

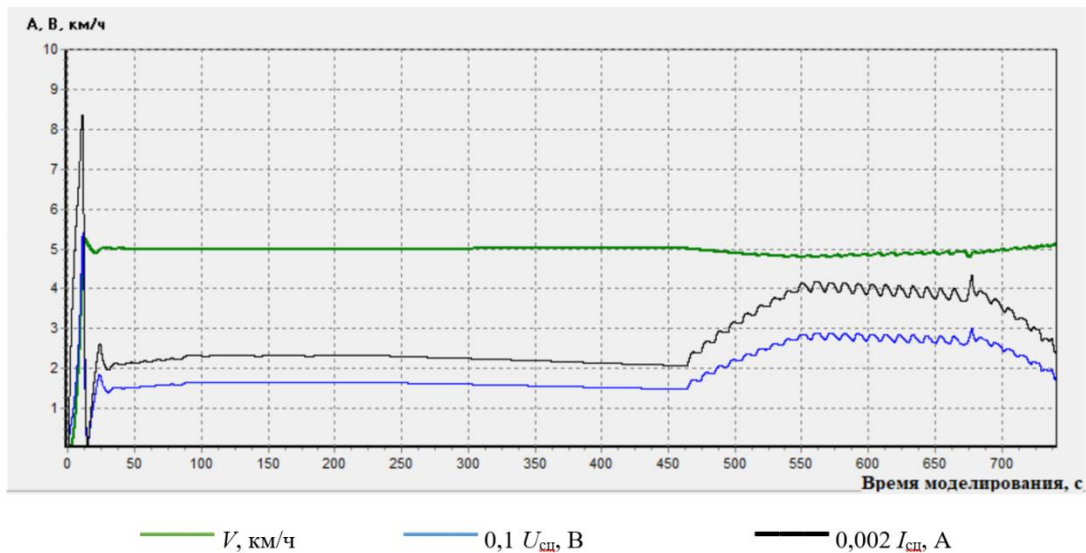


Рис. 4. Осциллограмма результатов математического моделирования процесса разгона, надвига и роспуска состава массой 1600 т. тепловозом ТЭМ7А
Fig. 4. Oscillograph chart of the mathematical modeling results for the process of speeding-up, humping and splitting-up of 1600 t train by TEM7A diesel locomotive

Операция надвига состава на сортировочную горку переходит в операцию роспуск в момент времени $t = 550$ с. имеют место переходные колебательные процессы (поскольку осуществляется отцеп груп-

пы вагонов). Значения параметров регулятора скорости $K_p = 20$, $K_i = 0,008$ обеспечивают минимум функции $I_2 = 336,9$, процесс разгона более подробно представлен на рис. 5.

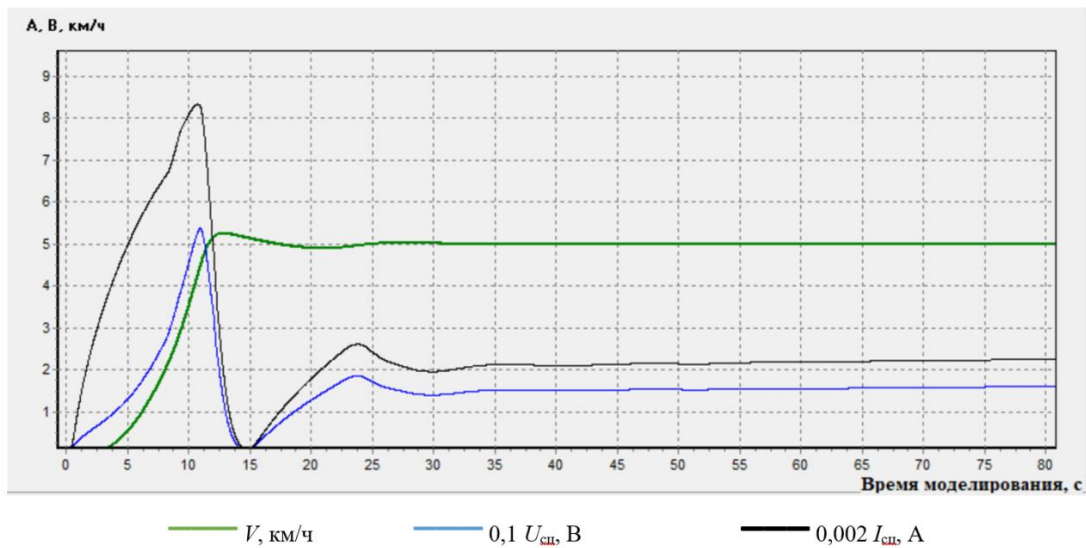


Рис. 5. Осциллограмма результатов математического моделирования процесса разгона состава массой 1600т. тепловозом ТЭМ7А
Fig. 5. Oscillograph chart of the mathematical modeling results for the splitting-up process of 1600 t train by TEM7A diesel locomotive

На рис. 6 изображены полученные зависимости напряжения $U_{ТГ}$ и тока $I_{ТГ}$ тягового генератора, а также скорости V в зависимости от времени при надвиге и роспуске состава с заданной скоростью 6 км/ч для состава из 50 вагонов массой по 80 тонн каждый. Операция надвига состава на сортировочную горку переходит в опе-

рацию роспуск в момент времени $t = 470$ с. и имеют место переходные колебательные процессы (поскольку осуществляется отцеп группы вагонов). Значения параметров регулятора скорости $K_p = 25$, $K_i = 0,0065$ обеспечивают минимум функции $I_2 = 494,8$, процесс разгона более подробно представлен на рис. 7.

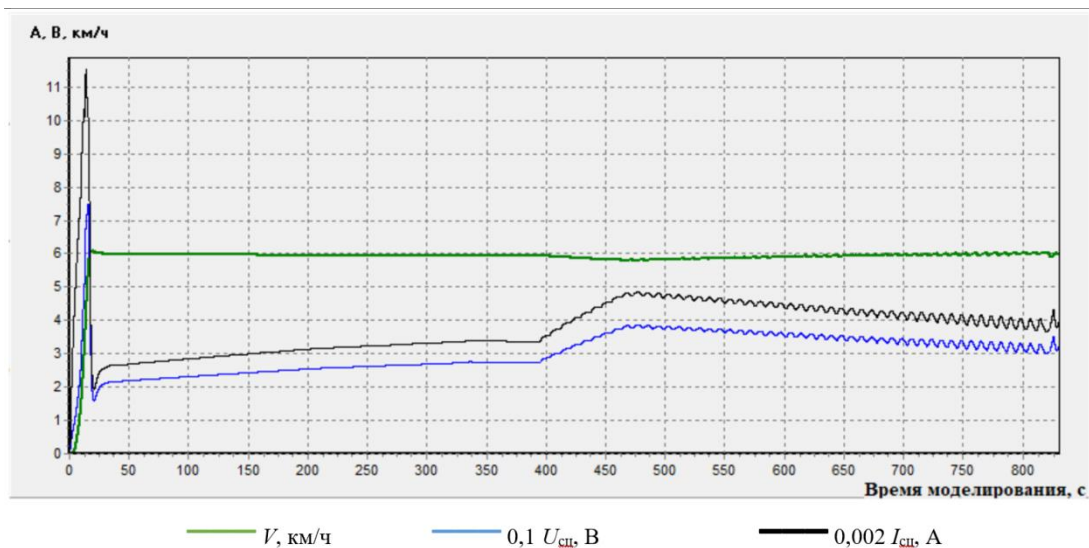


Рис. 6. Осциллограмма результатов математического моделирования процесса разгона, надвига и роспуска состава массой 4000 т. тепловозом ТЭМ7А
Fig. 6. Oscillograph chart of the mathematical modeling results for the process of speeding-up, humping and splitting-up of 4000 t train by a TEM7A diesel locomotive

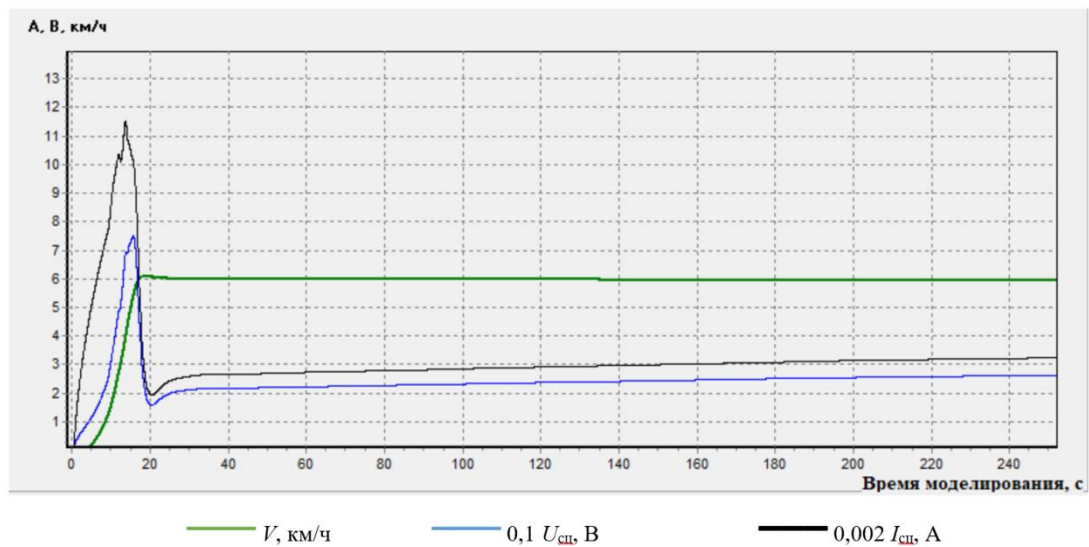


Рис. 7. Осциллограмма результатов математического моделирования процесса разгона состава массой 4000т. тепловозом ТЭМ7А
Fig. 7. Oscillograph chart of the mathematical modeling results for the splitting-up process of 1600 t train by TEM7A diesel locomotive

Система автоматического регулирования скорости локомотива эффективно обрабатывает возмущения, возникающие за счет изменении веса состава (при опе-

рации роспуск состава), при этом максимальная динамическая ошибка не превышает 0,15 км/ч, установившаяся же ошибка асимптотически стремится к нулю.

Выводы

В результате проведенных исследований разработан уникальный алгоритм работы системы автоматического управления скоростью тепловоза ТЭМ7А в режиме горочной работы. Математическое моделирование процессов роспуска и надвига состава на сортировочную горку показало, что выбранные коэффициенты K_p , K_i про-

порционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора), найденные с помощью метода оптимизации Монте-Карло, обеспечивают минимум интегральной ошибки скорости второго порядка, а динамическая ошибка не превышает 0,15 км/ч (соответствует требованиям системам управления верхнего уровня к точности поддержания

заданной скорости локомотивом). Данный алгоритм может быть рекомендован к применению на маневровых тепловозах ТЭМ7А, оборудованных микропроцессорными системами управления и диагности-

ки, которые эксплуатируются в автоматическом режиме (по замкнутому циклу) на сортировочной станции нового поколения Лужская.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шелухин В.И. Автоматизация и механизация сортировочных горок. М.: Маршрут, 2005. 240 с.
2. Коваленко Н.А., Бородин А.А. О расчете оптимальной величины отцепки при роспуске составов на сортировочных горках // Железнодорожный транспорт. 2021. № 3. С. 40-43.
3. Nikitin D., Nikitin A., Manakov A., Popov P., Kotenko A. Automatic locomotive signalization system modification with weightbased sum codes // Proceedings of 2017 IEEE 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2017). 2017. P. 374-378.
4. Журавлев С.Н. Система управления силовой установкой маневрового тепловоза с алгоритмом автоматического регулирования скорости // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2021. № 3–4. С. 31–38.
5. To the issue of creating a “smart” locomotive = К вопросу создания “умного” локомотива) / Babkov Yu.V., Kim S.I., Zhuravlev S.N., Pronin A.A. = Бабков Ю.В., Ким С.И., Журавлев С.Н., Пронин А.А. // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2389. Iss. 1. 7 p.
6. Патент № 2616111 Российская Федерация, МПК В60L 15/20 (2006.01), В60L 11/02 (2006.01). Способ регулирования скорости движения теп-

- ловоза с электрической передачей: № 2016103650: заявл. 04.02.2016: опубл. 12.04.2017 / Ким С.И., Журавлев С.Н., Пронин А.А., Воронкова Л.М., Харитонов В.И., Грачев В.В.; заявитель ОАО «РЖД». 9 с.
7. Ким С.И., Пронин А.А., Журавлев С.Н., Харитонов В.И., Грачев В.В., Базилевский Ф.Ю., Курилкин Д.Н. Система автоматического поддержания заданной скорости горочного локомотива // Вестник ВНИКТИ. – 2017. – № 100. – С. 80-86.
8. Ким С.И., Журавлев С.Н., Фомин А.Ю. Расчет тормозных характеристик и структура системы регулирования электрической передачи в режиме электрического тормоза модуля тормозного МТ-01 // Вестник ВНИКТИ. – 2018. – № 101. – С.73-75.
9. Pudovikov O.E., Murov S.A. A microprocessor system of automatic control by pneumatic braking of freight long trains // Russian Electrical Engineering. 2014. № 85. P. 505-508.
10. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559-576.
11. Зайцев А.П. Основы теории автоматического управления. Томск, 2000. С. 83-84.

REFERENCES

1. Shelukhin VI. Automation and mechanization of gravity humps. Moscow: Marshrut; 2005.
2. Kovalenko NA, Borodin AA. On the calculation of the optimal value of uncoupling during splitting of trains on gravity humps. Zheleznodorozhny Transport. 2021;3:40-43.
3. Nikitin D, Nikitin A, Manakov A, Popov P, Kotenko A. Automatic locomotive signalization system modification with weightbased sum codes. Proceedings of 2017 IEEE 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2017); 2017. p. 374-378.
4. Zhuravlev SN. Power equipment control system of shunting locomotive with automatic speed control algorithm. Automation and Modeling in Design and Management. 2021;3-4:31-38.
5. Babkov YuV, Kim SI, Zhuravlev SN, Pronin AA. To the issue of creating a “smart” locomotive. AIP Conference Proceedings. 2021;2389(1):7.
6. Kim CI, Zhuravlev SN, Pronin AA, Voronkova LM, Kharitonov VI, Grachev VV. Patent No. 2616111 Russian Federation, IPC B60L 15/20

- (2006.01), B60L 11/02 (2006.01). Method of regulating the speed of a locomotive with an electric transmission. 2017 Apr 12.
7. Kim SI, Pronin AA, Zhuravlev SN, Kharitonov VI, Grachev VV, Bazilevsky FYu, Kurilkin DN. The system of automatic maintenance of the stipulated rate of a hump locomotive. Vestnik VNIKTI. 2017;100:80-86.
8. Kim SI, Zhuravlev SN, Fomin AYU. Calculation of braking characteristics and structure of the electric transmission control system in the electric brake mode of МТ-01 torsion module. Vestnik VNIKTI. 2018;101:73-75.
9. Pudovikov OE, Murov S.A. A microprocessor system of automatic control by pneumatic braking of freight long trains. Russian Electrical Engineering. 2014;85:505-508.
10. Ang KH, Chong G, Li Y. PID control system analysis, design, and technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005;13(4):559-576.
11. Zaitsev AP. Fundamentals of the theory of automatic control. Tomsk; 2000.

Информация об авторах:

Журавлев Сергей Николаевич – заместитель главного инженера АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт по-

движного состава» (АО «ВНИКТИ»), 8 (496) 618-82-48, доб. 11-54.

Zhuravlev Sergey Nikolaevich - Deputy Chief Engineer of Scientific Research and Design-Technological

Institute of Rolling Stock (VNIKTI), phone: 8 (496) 618-82-48, extension number 11-54.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 16.05.2023; одобрена после рецензирования 18.08.2023; принята к публикации 28.08.2023. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 16.05.2023; approved after review on 18.08.2023; accepted for publication on 28.08.2023. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.