

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 629.421.4(045)

DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_144

*С. Н. Журавлев***К ВОПРОСУ ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАННОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ
МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВА ПРИ РАБОТЕ НА СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКЕ**

Аннотация. Рассматривается реализация проекта автоматического управления маневровыми локомотивами при работе на сортировочной станции. Приведена информация о реализованном проекте модернизации тепловозов ТЭМ7А для возможности диагностирования оборудования локомотива при работе в беспилотном режиме. Представлена структурная схема бортового оборудования маневрового тепловоза ТЭМ7А, имеющего возможность эксплуатироваться в автоматическом режиме под управлением систем верхнего уровня, а также осциллограммы результатов математического моделирования процессов надвига и роспуска составов. Приведены результаты опытных поездок локомотива с разработанным алгоритмом на сортировочной станции Лужская Октябрьской ж. д. (с различными скоростями движения и массами состава).

Ключевые слова: маневровый локомотив, беспилотное управление, поддержание заданной скорости движения, математическое моделирование, надвиг и роспуск составов, результаты испытаний маневровых локомотивов при работе в автоматическом режиме, круиз-контроль для локомотива.

Для цитирования: Журавлев, С. Н. К вопросу поддержания заданной скорости движения маневрового локомотива при работе на сортировочной горке / С. Н. Журавлев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 144–151. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_144.

Введение

Развитие беспилотного управления на железнодорожном транспорте является одной из важных тенденций современности. Эта технология предлагает новые возможности для повышения безопасности и эффективности железнодорожных перевозок. Автоматические системы могут оптимизировать скорость и расписание поездов, избегая заторов и минимизируя время на простой поездов. Это позволяет сократить время в пути и улучшает общую производительность транспортной системы. В холдинге ОАО «РЖД» также ведутся работы по внедрению систем беспилотного управления. Пилотным проектом по применению систем автоматического управления является сортировочная станция нового поколения – станция Лужская Октябрьской железной дороги [1–2].

Одной из задач в комплексе работ по внедрению беспилотных локомотивов является задача по автоматизации подвижного состава (локомотивов). Экспериментальными локомотивами для отработки технических решений по автоматизации подвижного состава стали три локомотива ТЭМ7А № 534, 542 и 543, построенные на Людиновском тепловозоремонтном заводе и оборудованные системой автоматического управления горочным локомотивом. При реализации проекта и формировании требований к выполняемым функциям при работе в автоматическом режиме архитектура оборудования тепловоза и его системы подверглись значительным изменениям. В ходе последнего этапа дооснащения тепловоза ТЭМ7А № 543 на тепловоз был установлен ряд дополнительного оборудования:

- регулятор ЭРЧВ – для повышения управляемости и диагностируемости ДГУ;
- кран 224Д – для обеспечения управления локомотивным прямодействующим тормозом и его диагностики;
- клапаны продувки ТМ – для обеспечения выполнения операции продувки ТМ при объединении тормозов с составом;
- блок управления стояночным тормозом (БУСТ), блок сбора и обработки диагностических сигналов (БС ОДС) – для обеспечения безопасного состояния тепловоза при нештатных ситуациях;
- реализован протокол взаимодействия с БОПМЛ для снижения скорости и остановки при обнаружении препятствий, а также обеспечения управления локомотивом от ЦАМР (центр автоматизации маневровой работы) и ЦУМЛ (центр управления маневровым локомотивом) в режимах автоматического и дистанционного управления.

Структура бортового оборудования тепловоза ТЭМ7А с установленным и демонтированным оборудованием представлена на рис. 1.

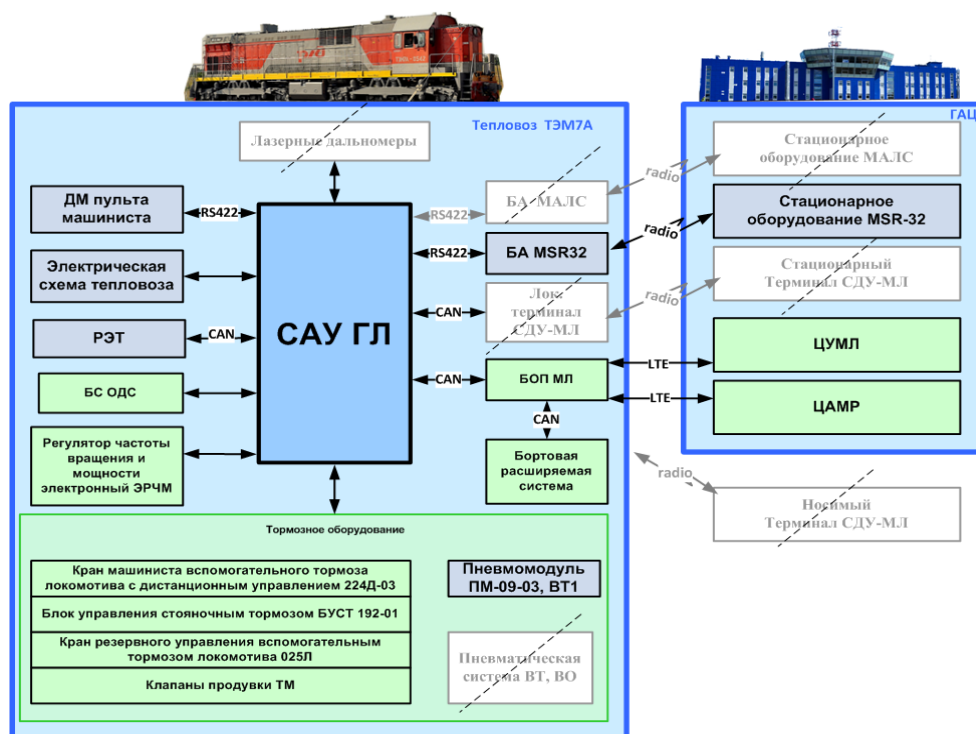


Рис. 1. Структура бортового оборудования тепловоза ТЭМ7А в 2023 году:

ДМ – дисплей машиниста, *САУ ГЛ* – система автоматического управления горочным локомотивом, *РЭТ* – регулятор электрического тормоза, *БС ОДС* – блок сбора и обработки диагностических сигналов, *ТМ* – тормозная магистраль, *БОП МЛ* – блок обнаружения препятствий маневрового локомотива, *ЦУМЛ* – центр управления маневровым локомотивом, *ЦАМР* – центр автоматизации маневровой работы, *СДУ-МЛ* – система дистанционного управления маневровым локомотивом, *БА МАЛС* – бортовая аппаратура маневровой автоматической локомотивной сигнализации, *БА MSR-32* – бортовая аппаратура системы управления сортировочным процессом

Для работы в автоматическом режиме особые требования предъявляются и к алгоритмам управления тепловозом, поскольку необходимо безопасно управлять скоростью и тормозами локомотива, так как даже небольшая неисправность или сбой в работе оборудования локомотива, при отсутствии машиниста на борту, может привести к крушению или прерыванию выполняемого технологического процесса с ожиданием вмешательства дежурной локомотивной бригады. Для снижения количества выходов из автоматического режима по причине неисправности в программном обеспечении системы управления реализованы предрейсовые тесты, позволяющие диагностировать неисправности тепловоза. Перед выдачей тепловоза в работу прохождение предрейсовой диагностики в части управления сборкой схемы тяги, схемы ЭДТ, ослаблением возбуждения тяговых электродвигателей, прохождение тестов управления локомотивным и поездным тормозом является обязательным.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Для реализации задачи автоматического управления скоростью движения локомотива обусловленной безопасностью (не превышение допустимой скорости) и чрезвычайно жесткими требованиями к поддержанию заданной скорости движения при надвиге и роспуске составов (особенность системы управления сортировочным процессом MSR-32 отклонение скорости от заданной не должно превышать 0,18 км/ч в диапазоне скоростей 1,8–21,6 км/ч) [3–4] была разработана математическая модель электропривода тепловоза ТЭМ7А и уникальный алгоритм поддержания заданной скорости движения, упрощенная функциональная схема которой представлена на рис. 2 [5–6].

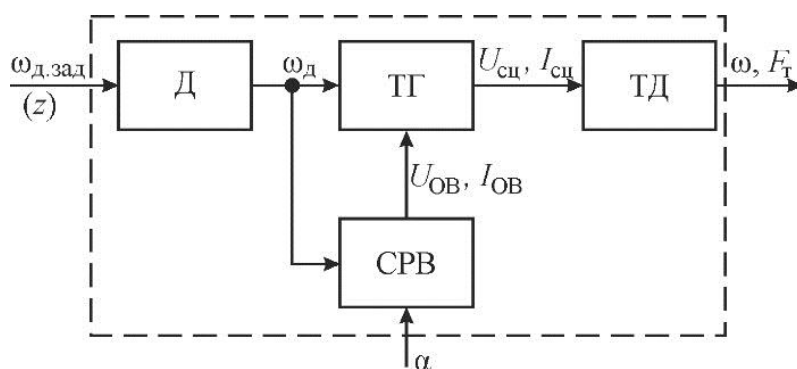


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема электропередачи тепловоза ТЭМ7А:

Д – дизель, *ТГ* – тяговый генератор, *ТД* – тяговый двигатель, *СРВ* – система регулирования возбуждения *ТГ*; $\omega_{д,зад}$, $\omega_{д}$ – заданная частота вращения вала *Д* и фактическая частота вращения вала *Д*, z – выход штока силового сервомотора регулятора частоты вращения, $U_{сц}$, $I_{сц}$ – напряжение и ток обмотки якоря *ТГ*, $U_{ОВ}$, $I_{ОВ}$ – напряжение и ток обмотки возбуждения *ТГ*, α – угол открытия тиристорov управляемого выпрямителя, ω – частота вращения вала *ТД*, F_T – сила тяги

В основе алгоритма регулятора скорости движения локомотива лежит пропорционально-интегральный закон регулирования (1), для нахождения оптимальных коэффициентов K_p и K_i в соответствии с весом состава использовался численный метод Монте-Карло [7–8]:

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

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

Поскольку при роспуске состава осуществляется изменение веса состава (за счет отцепя группы вагонов) и имеют место переходные колебательные процессы, для оценки качества регулирования применяется квадратичный интегральный критерий I_2 (2) [9–10].

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

Осциллограммы результатов математического моделирования надвига и роспуска состава на сортировочную горку приведены на рис. 3.

На рис. 3, *а* 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 5 км/ч для состава из 20 вагонов массой по 80 тонн каждый. Операция надвига состава на сортировочную горку переходит в операцию роспуск в момент времени $t = 550$ с., имеют место переходные колебательные процессы (поскольку осуществляется отцеп группы 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. 3, *б*.

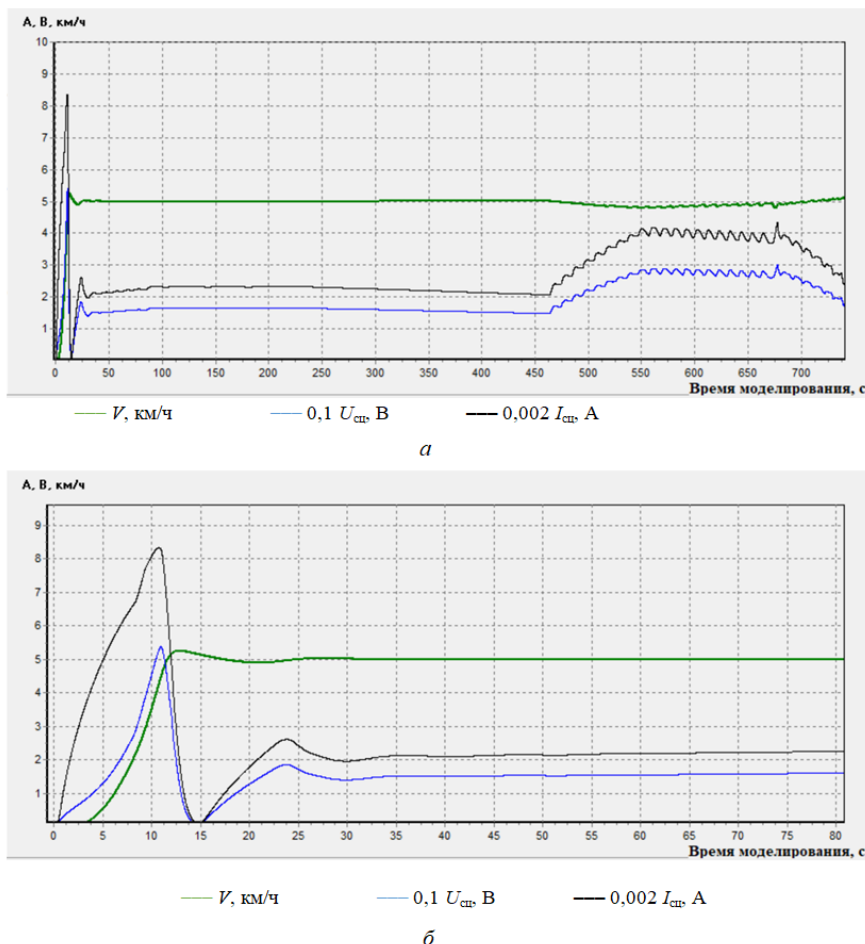


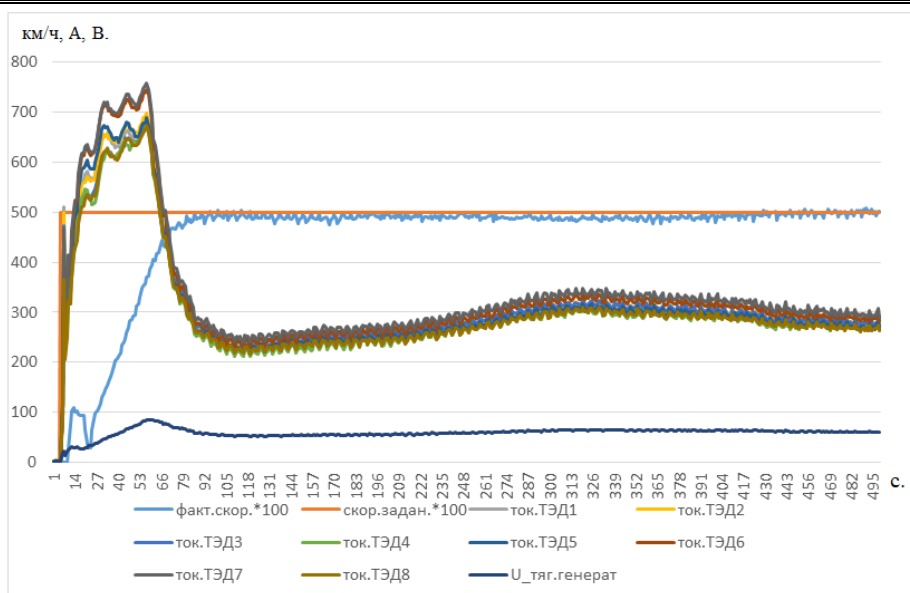
Рис. 3. Осциллограммы результатов математического моделирования:

а – осциллограмма результатов математического моделирования процесса разгона, надвига и роспуска состава массой 1600 т тепловозом ТЭМ7А; *б* – осциллограмма результатов математического моделирования процесса разгона состава массой 1600 т тепловозом ТЭМ7А

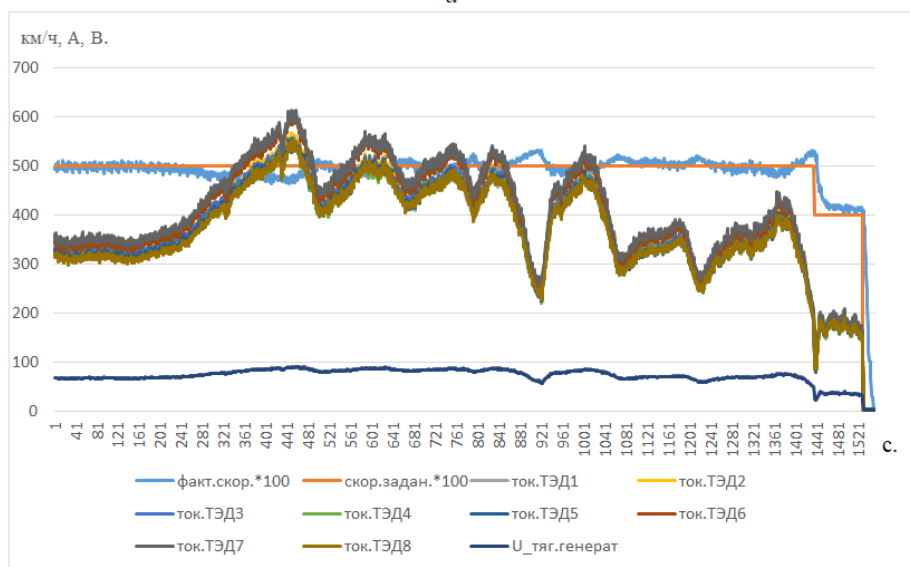
Для верификации разработанной математической модели электропривода тепловоза ТЭМ7А и проверки разработанного алгоритма поддержания заданной скорости в июле 2023 года на станции Лужская Октябрьской ж. д. проведены опытные поездки. В ходе испытаний маневровым тепловозом ТЭМ7А № 543 в автоматическом режиме осуществлялся надвиг и роспуск составов различных масс (от 900 т до 5200 т) под управлением системы верхнего уровня (система управления сортировочным процессом MSR32) с различными заданными скоростями движения (от 2 до 15 км/ч).

На рис. 4, *а* и *б* представлены осциллограммы зависимости напряжения тягового генератора, тока тяговых двигателей и скорости в зависимости от времени при опытной поездке тепловоза ТЭМ7А с составом массой 5100 т. На рис. 4, *а* процесс разгона состава и надвиг состава на сортировочную горку с заданной скоростью 5 км/ч. Процесс роспуска данного состава представлен на рис. 4, *б* (роспуск начинается при $t = 400$ с), при этом возникающие колебательные процессы связаны с групповыми отцепками вагонов (изменение массы состава). В конце роспуска от системы управления верхнего уровня происходит изменение заданной скорости с 5 км/ч до 4 км/ч, регулятор обрабатывает данное задание с необходимой точностью.

На рис. 5, *а*, *б* и *в* представлены осциллограммы зависимости напряжения тягового генератора, тока тяговых двигателей и скорости в зависимости от времени при опытной поездке тепловоза ТЭМ7А с составом массой 940 т. На рис. 5, *а* процесс разгона состава и надвиг состава на сортировочную горку с заданной скоростью 5 км/ч. На рис. 5, *б* представлена работа регулятора скорости при изменении заданной скорости с 5 до 3 км/ч, как видно регулятор обрабатывает данное задание с необходимой точностью. Процесс роспуска данного состава начинается при $t = 680$ с. На рис. 5, *в* представлен процесс трогания локомотива после остановки при роспуске роспуска состава (при перекрытии горочного светофора).



а



б

Рис. 4. Осциллограммы результатов математического моделирования:
 а – осциллограмма результатов математического моделирования процесса разгона состава массой 5100 т тепловозом ТЭМ7А; б – осциллограмма результатов математического моделирования процесса роспуска состава массой 5100 т тепловозом ТЭМ7А



Рис. 5. Осциллограммы результатов математического моделирования:

а – осциллограмма результатов математического моделирования процессов разгона и надвига составов массой 940 т тепловозом ТЭМ7А; *б* – осциллограмма результатов математического моделирования процессов надвига и роспуска состава массой 940 т тепловозом ТЭМ7А с изменением заданной скорости с 5 км/ч до 3 км/ч.; *в* – осциллограмма результатов математического моделирования процесса роспуска состава массой 940 т тепловозом ТЭМ7А

Выводы

Результатом работы является уникальный алгоритм управления скоростью тепловоза ТЭМ7А при работе на сортировочной горке в режиме надвига и роспуска состава. По результатам математического моделирования с помощью метода оптимизации Монте-Карло выбраны коэффициенты K_p , K_i для пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора), при которых обеспечивается 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). Проведены опытные поездки на станции Лужская Октябрьской железной дороги, по результатам получена достаточная сходимость расчетных показателей с данными по испытаниям тепловозов ТЭМ7А верификации цифровой модели электропривода локомотива (расхождение не более 8 %). Данный алгоритм может быть рекомендован к применению на маневровых тепловозах ТЭМ7А, оборудованных микропроцессорными системами управления и диагностики, которые будут эксплуатироваться в автоматическом режиме.

Список литературы

1 **Zhuan, X.** Cruise control Scheduling of Heavy Haul Trains / X. Zhuan, X. Xia // IEEE Transactions on control system technology. – 2006. – Vol. 14. – No. 4. – С. 757–766. – ISSN 1558-0865.

References

1 **Zhuan, X.** Cruise control Scheduling of Heavy Haul Trains / X. Zhuan, X. Xia // IEEE Transactions on control system technology. – 2006. – Vol. 14. – No. 4. – P. 757–766. – ISSN 1558-0865.

2 Концептуальная проработка удаленного рабочего места машиниста-оператора электропоезда ЭС2Г как еще один шаг на пути к беспилотному вождению поездов / А. С. Куренков, С. А. Дмитриев, А. В. Сорокин, К. А. Суслов // Журнал Локомотив. – 2021. – № 3. – С. 9–10. – ISSN 0869-8147.

3 **Шелухин, В. И.** Автоматизация и механизация сортировочных горок / В. И. Шелухин. – Москва : Маршрут, 2005. – 240 с. – ISBN 5-89035-239-3.

4 Требования к радиуправляемому локомотиву. Станция Лужская-сортировочная. (Lokanforderungen_Luz) RU_Henning, 2012 – 17 с.

5 **Журавлев, С. Н.** Система автоматического управления скоростью локомотива / С. Н. Журавлев, О. Е. Пудовиков // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 2. – С. 181–194. – ISSN 2223-9987.

6 **Пудовиков, О. Е.** Система автоматического управления скоростью грузового поезда с распределенной тягой / О. Е. Пудовиков, В. Г. Сидоренко [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 9. – С. 47–54. – ISSN 0013-5860.

7 **Журавлев, С. Н.** Система управления силовой установкой маневрового тепловоза с алгоритмом автоматического регулирования скорости / С. Н. Журавлев // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2021. – № 3–4. – С. 31–38. – ISSN 2658-3488.

8 Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways / Hairong Dong, Bin Ning, Baigen Cai, Zhongsheng Hou // IEEE circuits and systems magazine. – 2010. – Vol. 10. – Issue 2. – P. 6–18 – ISSN 1558-0830.

9 **Зайцев, А. П.** Основы теории автоматического управления : учебное пособие / А. П. Зайцев. – Томск, 2000. – С. 83–84.

10 **Баранов, Л. А.** Системы автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1984. – 312 с.

2 Conceptual development of the remote workplace of the driver-operator of the electric train ES2G as another step towards unmanned train driving / A. S. Kurenkov, S. A. Dmitriev, A. V. Sorokin, K. A. Suslov // Journal Locomotive. – 2021. – No. 3. – P. 9–10. – ISSN 0869-8147.

3 **Shelukhin, V. I.** Automation and mechanization of sorting slides / V. I. Shelukhin. – Moscow : Marshrut, 2005. – 240 p. – ISBN 5-89035-239-3.

4 Trebovaniya k radiupravlyаемому lokomotivu. Stanciya Luzhskaya-sortirovochnaya. (Lokanforderungen_Luz) RU_Henning, 2012 – 17 p.

5 **Zhuravlev, S. N.** Automatic locomotive speed control system / S. N. Zhuravlev, O. E. Pudovikov // Bulletin of scientific research results. – 2023. – No. 2. – P. 181–194. – ISSN 2223-9987.

6 **Pudovikov, O. E.** Automatic speed control system of a freight train with distributed traction / O. E. Pudovikov, V. G. Sidorenko [et al.] // Electrical Engineering. – 2019. – No. 9. – P. 47–54. – ISSN 0013-5860.

7 **Zhuravlev, S. N.** Control system of a shunting locomotive power plant with an algorithm for automatic speed control / S. N. Zhuravlev // Automation and modeling in design and management. – 2021. – No. 3–4. – P. 31–38. – ISSN 2658-3488.

8 Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways / Hairong Dong, Bin Ning, Baigen Cai, Zhongsheng Hou // IEEE circuits and systems magazine. – 2010. – Vol. 10. – Issue 2. – P. 6–18 – ISSN 1558-0830.

9 **Zaitsev, A. P.** Fundamentals of the theory of automatic control : a textbook / A. P. Zaitsev. – Tomsk, 2000. – P. 83–84.

10 **Baranov, L. A.** Systems of automatic and telemechanic control of electric vehicles / L. A. Baranov, E. V. Erofeev, V. M. Maksimov [et al.]. – Moscow : Transport, 1984. – 312 p.

S. N. Zhuravlev

THE QUESTION OF KEEPING A SPECIFIED SPEED OF A SHUNTING LOCOMOTIVE WHEN OPERATING AT MARSHALLING YARDS

Abstract. The paper describes the project implementation of shunting locomotives automatic control when operating at marshaling yard. It is provided the information about the implemented project of TEM7A diesel locomotives modernization for the possibility of diagnosing locomotive equipment when operating in unmanned mode. It is presented a block diagram of the on-board equipment of the TEM7A shunting diesel locomotive, which is equipped to operate in automatic

mode under the control of top-level systems. And it is given the oscillogram records of mathematical modeling results of the train pushing and breaking up processes. The results of the locomotive test trips with the developed algorithm at the Luzhskaya marshaling yard of the Oktyabrskaya railway are given (with different speeds and masses of the train).

Keywords: shunting locomotive, unmanned control, keeping a specified speed, mathematical modeling, train pushing and breaking up, test results of shunting locomotives when operating in automatic mode, cruise control for a locomotive.

For citation: Zhuravlev, S. N. The question of keeping a specified speed of a shunting locomotive when operating at marshaling yards / S. N. Zhuravlev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 144–151. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_144.

Сведения об авторах

Журавлев Сергей Николаевич

акционерное общество
«Научно-исследовательский и
конструкторско-технологический институт
подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»),
заместитель главного инженера,
e-mail: zhuravlev-sn@vnikti.com

Information about the authors

Zhuravlev Sergey Nikolayevich

Joint Stock «Company Scientific-Research
and Design-Technology Institute of Rolling
Stock» (JSC “VNIKTI”),
Deputy Chief Engineer,
e-mail: zhuravlev-sn@vnikti.com