

---

## **Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования**

---

УДК: 629.4.053.3(045)

DOI: 10.30987/2658-6436-2021-3-4-31-38

С.Н. Журавлев

### **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА С АЛГОРИТМОМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ**

*Показана актуальность разработки систем автоматического регулирования скорости маневровых тепловозов. Приведена и проанализирована структура системы управления силовой установкой тепловоза ТЭМ7А. Показан замкнутый цикл работы локомотивов в парке приема станции Лужская Октябрьской ж.д. Синтезирован алгоритм автоматического регулирования скорости надвига и роспуска состава, данный алгоритм реализован на языке программирования Turbo Pascal. Предложен вариант интеграции алгоритма в систему управления силовой установкой. Приведены результаты экспериментальных поездок. Установлено, что применение предложенного алгоритма автоматического регулирования скорости обеспечивает поддержание заданной скорости в диапазоне до 8 км/ч.*

**Ключевые слова:** автоматическое регулирование скорости, маневровый тепловоз, система управления, экспериментальная поездка.

S.N. Zhuravlev

### **POWER EQUIPMENT CONTROL SYSTEM OF A SHUNTING LOCOMOTIVE WITH AUTOMATIC SPEED CONTROL ALGORITHM**

*Work objective is to develop an algorithm for automatic speed regulation and to ensure its integration into the system of adaptive combined control of the power equipment of the locomotive TEM7A. Research methods: methods of the theory of automatic control, modern programming methods, trial trips. Research results and novelty. For the first time, the problem of automatic maintenance of "creeping" train speeds with high accuracy has been solved in the practice of domestic locomotive construction. It is established that the developed algorithm for automatic control of the humping speed and splitting up of shunting locomotive TEM7A allows maintaining a given speed in the range of operating speeds up to 8 km / h. Conclusion. The developed algorithm is integrated into the microprocessor control system of the power equipment of TEM7A shunting locomotive and does not require additional costs when through the locomotive operation. Maintaining a uniform speed of movement can also be used in the mode of manual control of the locomotive by the driver, while the value of the stipulated rate is set by the driver using the display module of the control panel.*

**Keywords:** automatic speed regulation, shunting locomotive, system of control, trial trip.

#### **Введение**

Опыт использования тепловозов показывает, что наименьшую энергоэффективность среди тепловозов всех типов имеют маневровые тепловозы, что объясняется работой их силовых установок в условиях неравномерности нагрузок. При этом большую часть времени силовая установка работает на холостом ходу или в режиме частичных нагрузок, когда ее КПД существенно меньше номинального значения.

Существуют различные пути повышения эффективности работы маневровых тепловозов [1–4]. Одним из возможных вариантов, который также обеспечивает улучшение эксплуатационных показателей тепловоза и автоматизацию его управления, является применение системы управления силовой установкой с реализацией алгоритма автоматического регулирования скорости.

Основной экономический эффект, достигаемый при внедрении маневровых локомотивов, оборудованных системой управления с алгоритмом автоматического регулирования скорости, заключается в сокращении времени переработки вагонов на станции. Основным технический эффект – уменьшение динамических нагрузок на элементы механической и электрической частей тягового привода и всей электропередачи в целом.

Известно, что при работе локомотива на сортировочной горке из-за специфики технологии расформирования составов важным является поддержание локомотивом заданной скорости с высокой точностью, что для работы с «ползучей» скоростью в пределах 3–8 км/ч и переменной нагрузкой локомотива является сложной инженерной и научной задачей [5]. В настоящее время АО «ВНИКТИ» разрабатывает проект маневрового тепловоза ТЭМ7А, оборудованного системой управления горочным локомотивом с реализацией технологии автоматического регулирования скорости надвига и роспуска состава (САУ ГЛ). Данная система управления обеспечивает поддержание «ползучей» скорости. АО «ВНИКТИ» совместно с Брянским машиностроительным заводом уже имеет успешный опыт разработки тепловоза для рельсошлифовального комплекса. На этом тепловозе была обеспечена точность регулирования скорости движения 0,20–0,25 км/ч в диапазоне рабочих скоростей 5–12 км/ч, что практически соответствует требуемой точности для системы управления маневровыми локомотивами. Отметим, что система управления тепловозом была выполнена на дискретной логике.

В данной статье решена задача разработки алгоритма автоматического регулирования скорости и его интеграции в систему адаптивного комбинированного управления силовой установкой тепловоза ТЭМ7А.

### **Система управления тепловоза ТЭМ7А**

На рис. 1 показана структура системы управления тепловоза ТЭМ7А, включающей в себя систему автоматического управления горочным локомотивом САУ ГЛ, маневровую автоматическую локомотивную сигнализацию (МАЛС), MSR32 и др., которые обеспечивают информационную интеграцию «умного» локомотива со стационарным оборудованием систем МАЛС, MSR32 [6].

САУ ГЛ является управляющим ядром локомотива. В САУ ГЛ из электрической схемы локомотива поступают информация от комплекта аналоговых и частотных датчиков, измерительных преобразователей, дискретные сигналы состояния органов управления, расположенных на пульте машиниста, дискретные сигналы состояния исполнительных устройств локомотива. По последовательным каналам связи САУ ГЛ осуществляет дуплексный обмен информацией с дисплейным модулем (ДМ), бортовой аппаратурой МАЛС и MSR-32, лазерными дальномерами по CAN-каналу с регуляторами электрического тормоза и СДУ МЛ.

Три локомотива, оборудованные данными системами, эксплуатируются в парке приема сортировочной станции нового поколения Лужская Октябрьской ж.д.

Технология работы строится следующим образом. При готовности состава к роспуску диспетчер строит маршрут под нужный состав и дает команду на начало движения, локомотив автоматически собирает тяговую схему и начинает движение по маршруту со скоростью, заданной системой верхнего уровня МАЛС. При заезде на занятый путь начинается операция сцепки с составом, локомотив автоматически останавливается на расстоянии 10 м от состава, затем совершает автоматическую сцепку с составом со

скоростью не более 3 км/ч, при этом расстояние до состава контролируется по лазерным дальномерам, установленным на локомотиве [7]. Затем локомотив автоматически проверяет качество сцепки и при положительном результате передает на пульт диспетчера информацию о готовности к началу надвига. Дежурный выстраивает маршрут на горб сортировочной станции и дает команду на начало движения, локомотив автоматически начинает операцию надвига со скоростью, заданной системой верхнего уровня MSR32, при этом скорость надвига и ускорение составом регулируются с высокой точностью микропроцессорной системой по энергооптимальному режиму, поскольку цифровая модель поезда позволяет рассчитывать расстояния до горба горки и выстраивать оптимальную кривую скорости. При достижении первым вагоном горба горки локомотив переходит в режим роспуска состава, и составитель начинает расцеплять вагоны согласно плану. Скорость движения состава рассчитывается системой MSR32 в зависимости от количества отцепляемых вагонов, их пути и состояния САУ ГЛ и горочной инфраструктуры. САУ ГЛ с высокой точностью поддерживает скорость, заданную системой MSR32. После отцепа последнего вагона локомотив автоматически останавливается, дежурный перестраивает маршрут под новый состав, дает команду локомотиву на начало движения, и цикл повторяется (рис. 2).

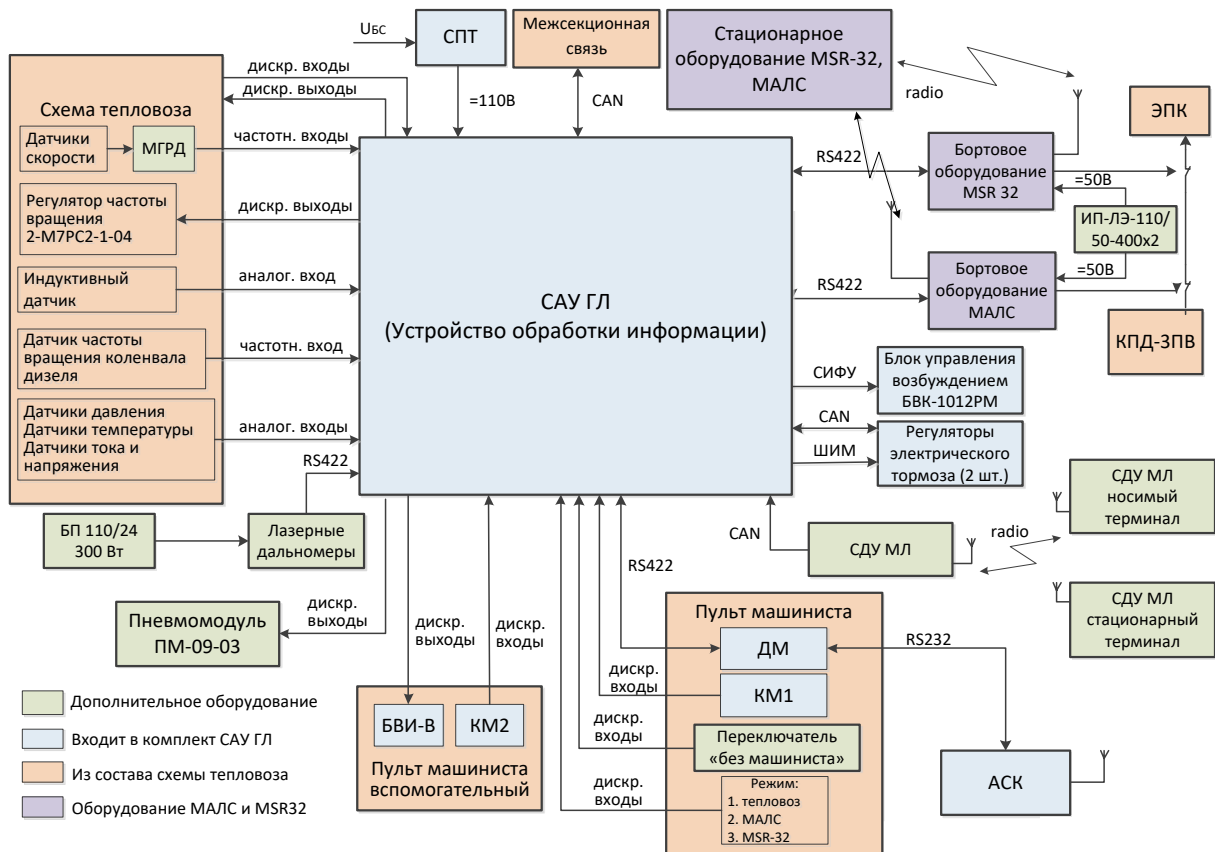


Рис. 1. Структура системы управления тепловоза ТЭМ7А:

МГРД – модуль гальванической развязки датчиков; СПТ – стабилизатор постоянного тока; ЭПК – электропневматический клапан автостопа; КПД-ЗПВ – комплекс средств сбора и регистрации данных (электронный скоростемер); СДУ МЛ – система дистанционного управления маневровым локомотивом; БП – блок питания; КМ1, КМ2 – контроллеры машиниста; БВИ-В – блок вспомогательной индикации; АСК – автоматизированная система контроля параметров работы дизельного подвижного состава и учета дизельного топлива; ИП-ЛЭ – источник электропитания локомотивной электронной аппаратуры

Особенностью системы MSR32 являются чрезвычайно жесткие требования к горочному локомотиву по части точности поддержания скорости при надвиге состава.

Согласно [8], отклонение скорости от заданной не должно превышать 0,18 км/ч в диапазоне скоростей 1,8–21,6 км/ч, при этом значение заданной скорости может изменяться с шагом 0,25 км/ч. Выполнение этих требований является одним из основных условий достижения эффекта от ее применения, заявленного разработчиками системы, – существенного (в разы) повышения производительности горочной работы.

Задача автоматического поддержания «ползучих» скоростей движения состава со столь высокой точностью решалась впервые в практике отечественного тепловозостроения, в связи с чем она потребовала от разработчиков использования целого ряда нестандартных подходов для преодоления возникающих проблем.

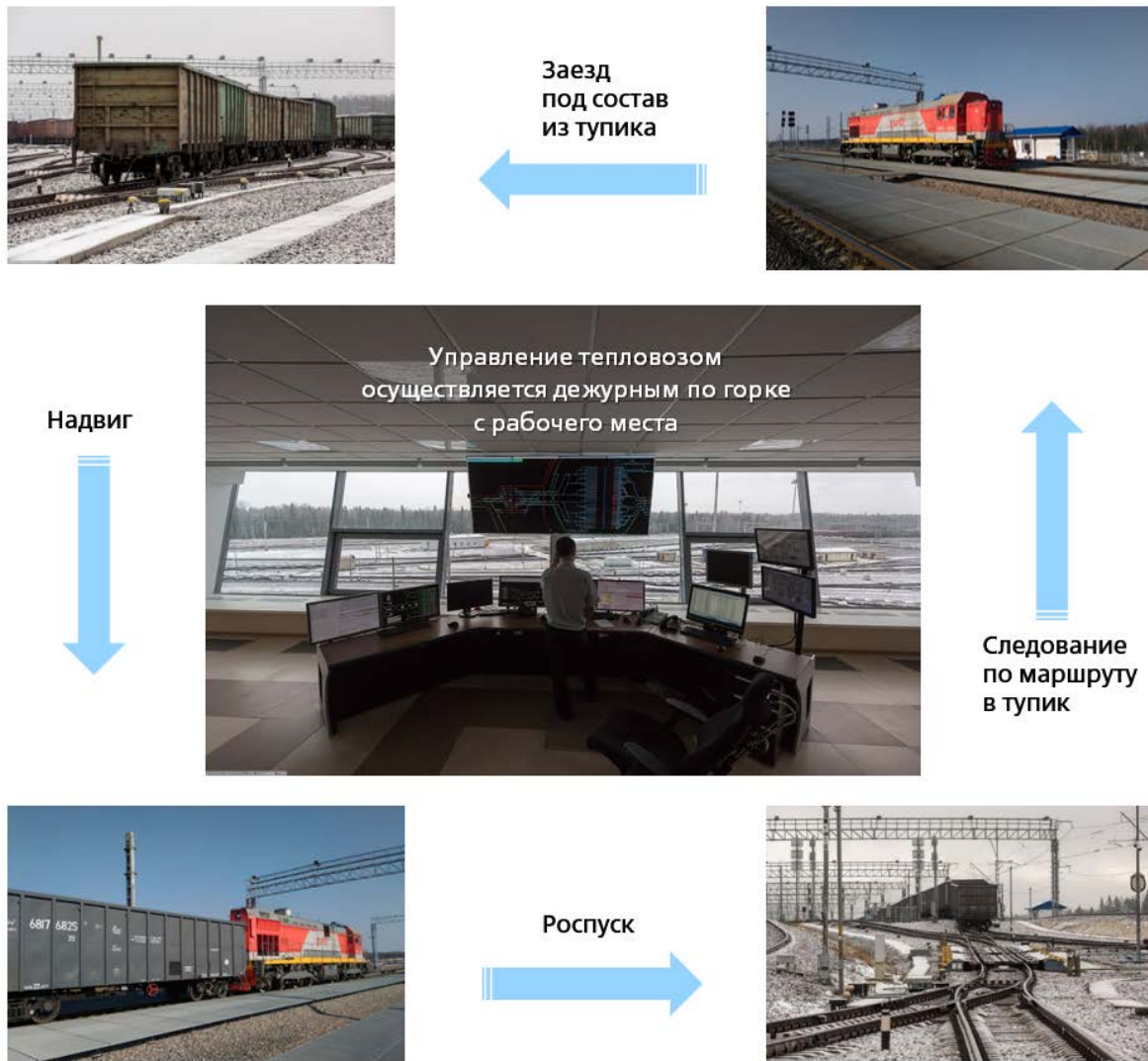


Рис. 2. Замкнутый цикл работы локомотивов в парке приема станции Лужская Октябрьской железной дороги

С целью минимизации ошибки был разработан оригинальный алгоритм адаптивного комбинированного (по возмущению и отклонению регулируемой величины) управления дизель-генераторной установкой тепловоза в режиме автоматического поддержания заданной скорости, схема которого представлена на рис. 3 [9–12]. Данный алгоритм реализован в программе, реализованной на языке программирования Turbo Pascal [13].

Алгоритм включает прогнозный расчет заданного значения напряжения  $U_{дзад}$  и соответствующей ему мощности  $P_{ВУ}$  на выходе выпрямительной установки (ВУ) для текущего значения ее тока  $I_d$  и заданной скорости движения  $V_{зад}$  по формулам:

$$U_{d\text{зад}} = I_d \cdot (R_{\text{СЦ}} + K_{\text{ТЭД}}(V_{\text{зад}}, I_d) \cdot V_{\text{зад}}), \quad (1)$$

$$P_{\text{ВУ}} = U_{d\text{зад}} \cdot I_d, \quad (2)$$

где  $R_{\text{СЦ}}$  – сопротивление силовой цепи, Ом;  $K_{\text{ТЭД}}(V_{\text{зад}}, I_d)$  – коэффициент, учитывающий передаточное отношение тягового редуктора, электромеханическую постоянную ТЭД и его электромеханические характеристики, Ом·ч/км.

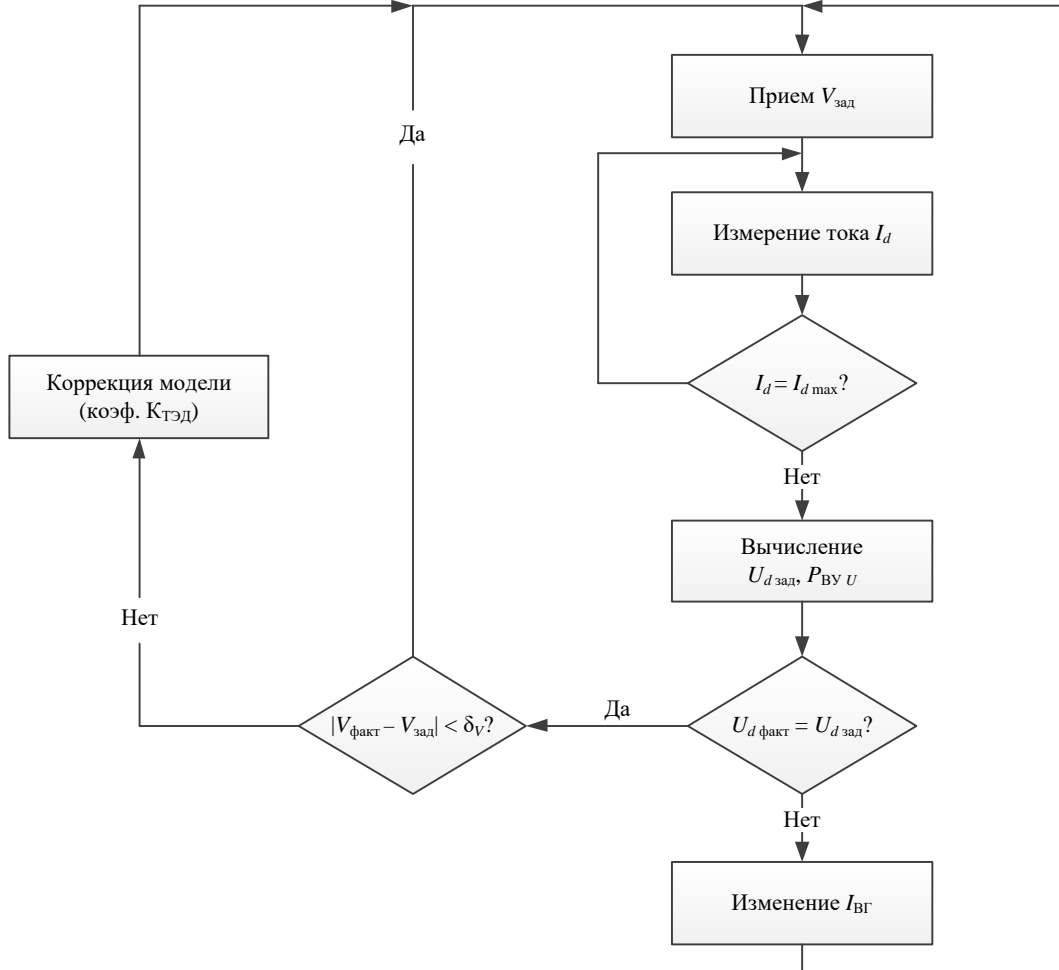


Рис. 3. Схема алгоритма адаптивного комбинированного управления силовой установкой тепловоза в режиме автоматического поддержания заданной скорости

Если величина мощности  $P_{\text{ВУ}}$ , требуемой для работы с заданным напряжением  $U_{d\text{зад}}$ , не превышает мощности, соответствующей тепловозной характеристике дизеля для текущей позиции контроллера, увеличение напряжения тягового генератора осуществляется посредством изменения тока его возбуждения без изменения частоты вращения коленчатого вала дизеля (т.е. по нагрузочной характеристике дизеля), в противном случае увеличивается позиция контроллера (в случае применения электронного регулятора дизеля увеличивается заданная частота вращения коленчатого вала).

При достижении значения  $I_{d\text{max}}$  тока ВУ, предельного для текущей частоты вращения коленчатого вала дизеля (расхода охлаждающего воздуха вентилятором централизованного воздухообеспечения), увеличение напряжения прекращается, разгон продолжается при максимальном токе тяговых электродвигателей (ТЭД), т.е. с максимальным ускорением.

По достижении напряжения  $U_{d\text{зад}}$ , соответствующего заданной скорости движения  $V_{\text{зад}}$ , производится контроль текущей скорости движения  $V_{\text{факт}}$  и проверка выполнения условия:

$$\left| V_{\text{зад}} - V_{\text{факт}} \right| \leq \delta_v, \quad (3)$$

где  $\delta_v$  – допустимое отклонение скорости, км/ч.

Если условие (2) выполняется, работа продолжается в соответствии с описанным алгоритмом. При этом изменение сопротивления движению и увеличение тока приводит к соответствующей дозированной коррекции управляющего воздействия, реализуя таким образом управление по возмущению. Если же при заданном напряжении  $U_{d\text{зад}}$  условие (2) не выполняется, осуществляется коррекция коэффициента  $K_{TЭД}$  в сторону увеличения (при  $V_{\text{факт}} < V_{\text{зад}}$ ) или уменьшения (при  $V_{\text{факт}} > V_{\text{зад}}$ ). После достижения заданной скорости и выполнении условия (2) значение коэффициента  $K_{TЭД}$ , соответствующее текущим значениям  $V_{\text{зад}}$  и  $I_d$ , сохраняется в энергонезависимой памяти системы управления. Таким образом, осуществляются как коррекция управляющего воздействия по отклонению регулируемой величины (скорости движения), так и адаптация эталонной модели объекта регулирования к характеристикам реального объекта [14].

### Результаты и обсуждение

Описанный алгоритм был реализован в программном обеспечении устройства обработки информации (УОИ) систем САУ ГЛ тепловозов ТЭМ7А № 534, 542 и 543, эксплуатирующихся в настоящее время на сортировочной горке станции Лужская Октябрьской ж.д.

На рис. 4 представлены графики изменения параметров работы тепловоза ТЭМ7А № 542 в процессе надвига состава на сортировочную горку. Анализ результатов, представленных на рис. 4, показывает, что после окончания переходного процесса, вызванного изменением задания по скорости со стороны системы MSR32 и связанного с ним неизбежного перерегулирования, система стабильно поддерживает скорость состава в пределах  $\pm 0,05$  км/ч от заданного значения. Верхний предел достигается при работе на повышенных позициях контроллера (6–8) в связи с увеличенной инерционностью составов повышенной массы.

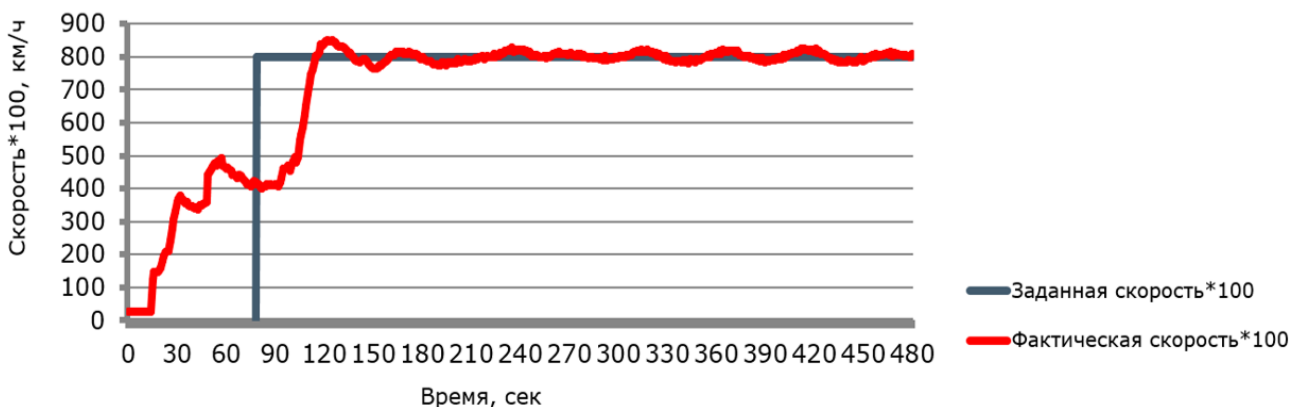


Рис. 4. Изменение фактической и заданной скоростей движения тепловоза ТЭМ7А № 542 в процессе надвига состава на сортировочную горку

Как следует из функции распределения вероятности отклонения скорости от заданной, построенной без учета перерегулирования при смене заданных значений скорости, вероятность реализации требуемой точности поддержания заданной скорости при надвиге (т.е. при непрерывном изменении массы состава и, соответственно, дополнительном сопротивлении движению) превышает 85 %, что является очень хорошим результатом.

Отметим, что функция поддержания постоянной скорости движения может использоваться и в режиме ручного управления тепловозом (машинистом), при этом величина заданной скорости устанавливается машинистом с помощью дисплейного модуля

пульта управления. Опыт эксплуатации тепловозов ТЭМ7А № 534, 542 и 543 на станции Лужская показывает, что достигнутая точность в поддержании скорости при небольшой дискретности изменения задания (0.25 км/ч) обуславливает высокую востребованность этой функции локомотивными бригадами при работе на горке.

### Выводы

Разработанный алгоритм автоматического регулирования скорости надвига и роспуска состава маневрового тепловоза ТЭМ7А позволяет поддерживать заданную скорость в диапазоне рабочих скоростей до 8 км/ч. Данный алгоритм интегрирован в микропроцессорную систему управления силовой установкой маневрового тепловоза ТЭМ7А и не требует дополнительных затрат при обслуживании локомотива. Поддержание постоянной скорости движения может также использоваться в режиме ручного управления тепловозом машинистом, при этом величина заданной скорости устанавливается машинистом с помощью дисплейного модуля пульта управления.

### Список литературы:

1. Грищенко, А.В. Оценка экономической эффективности тепловозной многодизельной энергетической установки с объединенной системой охлаждения / А.В. Грищенко, В.А. Кручек, В.В. Кручек // Известия ПГУПС, 2012. – № 1. – С. 46 – 51.
2. Pugachev, A.A. Efficiency increasing of induction motor scalar control systems / A. Pugachev // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, Russia, 1–5 (16-19 May 2017). – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076317.
3. Воробьев, В.И. Поиск рациональных технических решений тепловоза для восточного полигона / В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, О.В. Измеров, Е.В. Николаев // Вестник Брянского государственного технического университета, 2021. – № 10 (107). – С. 53 – 63.
4. Иньков, Ю.М. Повышение энергоэффективности тяговых электроприводов с асинхронными двигателями и системой векторного управления / Ю.М. Иньков, А.С. Космодамианский, А.А. Пугачев, С.В. Морозов // Электротехника, 2021. – № 9. – С. 10 – 15.
5. Шелухин, В.И. Автоматизация и механизация сортировочных горок / В.И. Шелухин. – М.: Маршрут, 2005. – 240 с.
6. Ким, С.И. Система управления горочным локомотивом с реализацией технологии автоматического регулирования скорости надвига и роспуска (САУ ГЛ) тепловоза ТЭМ7А / С.И. Ким, А.А. Пронин, С.Н. Журавлев // Вестник ВНИКТИ, 2017. – № 100. – С. 76 – 79.
7. Ким, С.И. Маневровый тепловоз и способ его эксплуатации без машиниста / С.И. Ким, В.И. Харитонов, А.А. Пронин, С.Н. Журавлев, А.Б. Федотов, С.В. Ким // Патент RU2630859C1, опубл. 13.09.2017, бюл. № 26.
8. Ким, С.И. Система автоматического поддержания заданной скорости горочного локомотива / С.И. Ким, А.А. Пронин, С.Н. Журавлев, В.И. Харитонов, В.В. Грачев, Ф.Ю. Базилевский, ДН. Курилкин // Вестник ВНИКТИ, 2017. – № 100. – С. 80 – 86.
9. Ким, С.И. Способ регулирования скорости движения тепловоза с электрической передачей / С.И. Ким, С.Н. Журавлев, А.А. Пронин, Л.М. Воронкова, В.И. Харитонов, В.В. Грачев // Патент RU2616111C, опубл. 12.04.2017, бюл. № 11.

### References:

1. Grishchenko, A.V. Evaluation of the economic efficiency of a diesel multiple engine power equipment with a combined cooling system, A.V. Grishchenko, V.A. Kruchek, V.V. Kruchek. Izvestiya of St.Petersburg State Railway University, 2012, no. 1, pp. 46-51.
2. Pugachev, A.A. Efficiency increasing of induction motor scalar control systems / A. Pugachev // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, Russia, 1–5 (16-19 May 2017). – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076317.
3. Vorobyov, V.I. Search for rational engineering solutions of diesel locomotives for the eastern range. Bulletin of Bryansk state technical university, 2021, no. 10, pp. 53-63.
4. Inkov, Yu.M. Efficiency Increasing of Traction Electric Drives with Induction Motors and Vector Control System / Yu.M. Inkov, A.S. Kosmodamianskiy, A.A. Pugachev, S.V. Morozov // Russian Electrical Engineering, 2021, vol. 92, no. 9, pp. 476 – 480. <https://doi.org/10.3103/S1068371221090066>
5. Shelukhin, V.I. Automation and mechanization of humps: textbook for railway transport colleges. Moscow, Marshrut, 2005, 240 p.
6. Kim, S.I. The control system of a mountain locomotive with the implementation of the technology of automatic speed control of the pushing and detaching (CAD GL) of the locomotive TEM7A, S.I. Kim, A.A. Pronin, S.N. Zhuravlev. Vestnik RSRDERSI, 2017, no. 100, pp. 76-79.
7. Kim, S.I. Shunting locomotive and the method of its operation without a driver, S.I. Kim, V.I. Kharitonov, A.A. Pronin, S.N. Zhuravlev, A.B. Fedotov, S.V. Kim. Patent RU2630859C1, publ. 13.09.2017, bul. no. 26.
8. Kim, S.I. The system of automatic maintenance of a stipulated rate of a switcher, S.I. Kim, A.A., Pronin, S.N. Zhuravlev, V.I. Kharitonov, V.V. Grachev, F.Yu. Bazilevsky, DN. Kurilkin. Vestnik RSRDERSI, 2017, no. 100, pp. 80 - 86.
9. Kim, S.I. Method of speed regulation for diesel locomotives with electric transmission, S.I. Kim, S.N. Zhuravlev, A.A. Pronin, L.M. Voronkova, V.I. Kharitonov, V.V. Grachev. Patent RU2616111C, publ. 12.04.2017, bul. no. 11.

10. **Ким, С.И.** Способ регулирования скорости движения тепловоза в режиме электрического торможения / С.И. Ким, В.И. Харитонов, А.А. Пронин, С.Н. Журавлев, С.В. Ким // Патент RU2652481, опубл. 26.04.2018, бюл. № 12.
11. **Ким, С.И.** Устройство для автоматического регулирования скорости тепловоза с электрической передачей / С.И. Ким, С.Н. Журавлев, А.А. Пронин, В.В. Грачев, Ф.Ю. Базилевский, Д.Н. Курилкин // Патент RU2588400, опубл. 27.06.2016, бюл. № 18.
12. **Ким, С.И.** Устройство для автоматического регулирования скорости тепловоза с электрической передачей / С.И. Ким, М.В. Федотов / Патент RU2481202, опубл. 10.05.2013, бюл. № 13.
13. **Фаронов, В.В.** Turbo Pascal / В.В. Фаронов. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2004. – 368 с.
14. **Pudovikov, O.E.** A microprocessor system of automatic control by pneumatic braking of freight long trains / O.E. Pudovikov, S.A. Murov // Russ. Electr. Engin. 85, 505–508 (2014). <https://doi.org/10.3103/S1068371214080094>.
10. Kim, S.I. Method of speed regulation for locomotives when electric braking mode, S.I. Kim, V.I. Kharitonov, A.A. Pronin, S.N. Zhuravlev, S.V. Kim. Patent RU2652481, publ. 26.04.2018, bul. No. 12.
11. Kim, S.I. Automatic speed control device for diesel locomotives with electric transmission, S.I. Kim, S.N. Zhuravlev, A.A. Pronin, V.V. Grachev, F.Y. Bazilevsky, D.N. Kurilkin. Patent RU2588400, publ. 27.06.2016, bul. no. 18.
12. Kim, S.I. Automatic speed control device for diesel locomotives with electric transmission, S.I. Kim, M.V. Fedotov, Patent RU2481202, publ.10.05.2013, bul. no.13.
13. Faronov, V.V. Turbo Pascal, V.V. Faronov. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2004, 368 p.
14. Pudovikov, O.E. A microprocessor system of automatic control by pneumatic braking of freight long trains, O.E. Pudovikov, S.A. Murov. Russ. Electr. Engin. 85, 505–508 (2014). <https://doi.org/10.3103/S1068371214080094>.

*Статья поступила в редколлегию 01.11.2021*

*Рецензент: д-р техн. наук, доц.*

*Брянский государственный технический университет*

*Пугачев А.А.*

*Статья принята к публикации 08.11.2021*

**Сведения об авторах:**

**Журавлев Сергей Николаевич**

заместитель главного инженера

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава»

(АО «ВНИКТИ»)

E-mail: [s\\_zhyravlev@mail.ru](mailto:s_zhyravlev@mail.ru)

**Information about authors:**

**Zhuravlev S.N.**

Deputy Chief Engineer of JSC "Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock" (JSC "VNIKTI")

E-mail: [s\\_zhyravlev@mail.ru](mailto:s_zhyravlev@mail.ru)