

А. А. Агапов, А. А. Зарифьян (мл.)

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ УСЛОВИЯ МАКСИМУМА ФУНКЦИИ ОБОБЩЕННОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА

Аннотация. Рассмотрена возможность использования интеллектуального алгоритма управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и аппарата нечеткой логики в задаче автоматического управления скоростью электровоза нового поколения с асинхронным тяговым двигателем. Построен автоматический регулятор скорости электровоза, проведено моделирование движения пассажирского поезда с локомотивом ЭП20 с заданной скоростью на участках Москва – Рязань и Москва – Адлер с соответствующем профилем пути. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что разработанный интеллектуальный алгоритм управления можно использовать при построении системы автоматического управления (САУ) скоростью электровоза нового поколения с асинхронным тяговым двигателем для обеспечения движения с заданной скоростью в различных режимах работы локомотива в условиях априорно неизвестных воздействий.

Ключевые слова: автоматическое регулирование скорости, интеллектуальный алгоритм управления, условие максимума функции обобщенной мощности, нечеткая логика.

Для цитирования: Агапов, А. А. Возможность использования интеллектуального алгоритма управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности в системе автоматического регулирования скорости электровоза / А. А. Агапов, А. А. Зарифьян (мл.) // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 28–34. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_28.

Введение

Сегодня отрасль железнодорожного транспорта продолжает развиваться в условиях определенных ограничений. Так, после введения санкций [1] крупнейший российский производитель пассажирских вагонов «Трансмашхолдинг» (ТМХ) прекратил выпуск пассажирских электровозов ЭП20, созданных вместе с Alstom, кроме того, есть определенные зоны риска по текущим закупкам инновационных локомотивов. В связи с этим РЖД рассчитывают на появление нового отечественного пассажирского электровоза ЭП40 в 2025 году [2], а НЭВЗ, входящий в состав ТМХ, представил контактно-аккумуляторный маневровый электровоз ЭМКА2 с асинхронными тяговыми двигателями постоянного тока, которые могут питаться от контактной сети или бортового накопителя энергии и способны заряжаться от общепромышленных источников электроэнергии, что позволит снизить текущие эксплуатационные расходы на 40–60 % [3].

Появление новых единиц тягового подвижного состава требует внедрения отечественных элементов вместо импортных, в том числе и программного обеспечения. В «Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» указано, что в транспортных стратегиях стран с высокоразвитыми транспортными системами в качестве одного из приоритетов выбрана задача развития новых технологий и решений: развитие инновационной железнодорожной инфраструктуры, подвижного состава и систем управления, например, автоматических систем управления поездом, в частности автоматического регулирования скорости.

Конструктивным решением задачи автоматического регулирования скорости поезда может быть использование квазиоптимальных методов синтеза законов управления [4] и интеллектуальных алгоритмов на их основе в совокупности с применением аппарата нечеткой логики [5, 6]. Рассмотрим возможность применения разработанного закона управления, представленного в работе [7], в системе автоматического управления (САУ) скоростью электровоза на примере пассажирского электровоза ЭП20.

Построение модели

Уравнение движения поезда в установившемся режиме можно представить в виде [8]:

$$Ma = F_t - R, \quad (1)$$

где $M = 1000 \frac{(P + Q)}{g}$ – масса поезда; P – вес локомотива; Q – вес состава; g – ускорение свободного падения; a – ускорение поезда; F_t – сила тяги/электрического торможения, развиваемая локомотивом, в рассматриваемом случае с одиночной тягой равна силе тяги/электрического торможения единственного локомотива в поезде; R – равнодействующая сил основного и дополнительного сопротивления движению.

Разгон поезда до заданной скорости осуществляется с постоянным ускорением, ограниченным сверху предельным значением $a_{\max} = 0,7 \text{ м/с}^2$, заданным в технических требованиях, предъявляемых заказчиком.

Определим параметры модели поезда. Вес локомотива ЭП20 P равен 1265 кН, вес пассажирского вагона примем равным 637 кН, вес состава, вес и масса поезда в зависимости от количества пассажирских вагонов приведены в таблице.

Вес и масса поезда с локомотивом ЭП20 в зависимости от количества пассажирских вагонов

Количество пассажирских вагонов	Вес состава Q , кН	Вес поезда, кН	Масса поезда, т
10	6370	7635	779
20	12740	14005	1429
30	19110	20375	2079

Определим расчетное сопротивление движению поезда. Удельное сопротивление локомотива равно, Н/кН [9]:

$$w_{\text{лок}} = 2,4 + 0,011v + 0,00035v^2, \quad (2)$$

где v – скорость поезда, км/ч.

Удельное сопротивление пассажирского состава, Н/кН [9]:

$$w_{\text{сост}} = 0,7 + (8 + 0,18v + 0,003v^2) / 160. \quad (3)$$

С учетом (2), (3) полное основное сопротивление поезда имеет вид, Н [9]:

$$W_{\text{осн}}(v) = w_{\text{лок}}(v)P + w_{\text{сост}}(v)Q. \quad (4)$$

Для проведения моделирования будем учитывать дополнительное сопротивление движению, равное сопротивлению, возникающему от уклона профиля пути, тогда равнодействующая сил сопротивления движению R будет равна $W_{\text{осн}}(v)$, Н [9]:

$$R = W_{\text{осн}}(v) + W_{\text{п}}(q), \quad (5)$$

где $W_{\text{п}}(q)$ – сопротивление от уклона профиля пути.

Силы, возникающие от уклона профиля пути, могут быть аппроксимированы тригонометрическими функциями, в частности, синусом угла наклона. Для проведения моделирования движения поезда с локомотивом ЭП20 возьмем участок Москва – Адлер [10] с соответствующим профилем пути, приведенным на рис. 1.

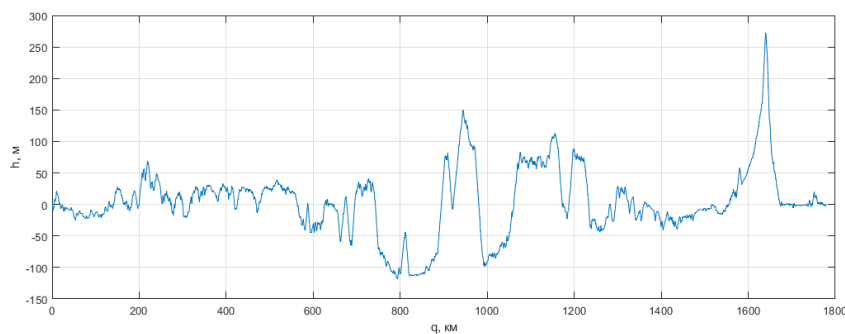


Рис. 1. Профиль пути Москва – Адлер:

q – расстояние относительно начальной точки, км; h – высота относительно начальной точки, м

При составлении модели поезда можно использовать различные подходы, например теорию конечных автоматов [11], рассматривая электропривод как неинерционную систему либо как апериодическое звено первого или второго порядка [12]. Исходя из экспериментальных данных, полученных на обкатном кольце полигона Щербинка, модель тягового электропривода локомотива ЭП20 можно представить в виде апериодического звена второго порядка, характеризующего запаздывание:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 F_{\text{тяги}}}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dF_{\text{тяги}}}{dt} + F_{\text{тяги}} = F_{\text{ref}}, \quad (6)$$

где $T_1 = 1,44$ с, $T_2 = 2,53$ с – значения постоянных времени. Структурная схема электропривода представлена на рис. 2. и включает в себя ограничитель тяги для ЭП20 тяга ограничена величиной 350 кН, а также мощностью

$$N = N_d \cdot n_d, \quad (7)$$

где N_d – мощность одного двигателя, кВт; n_d – количество двигателей; для локомотива ЭП20 $N_d = 1100$ кВт, $n_d = 6$.

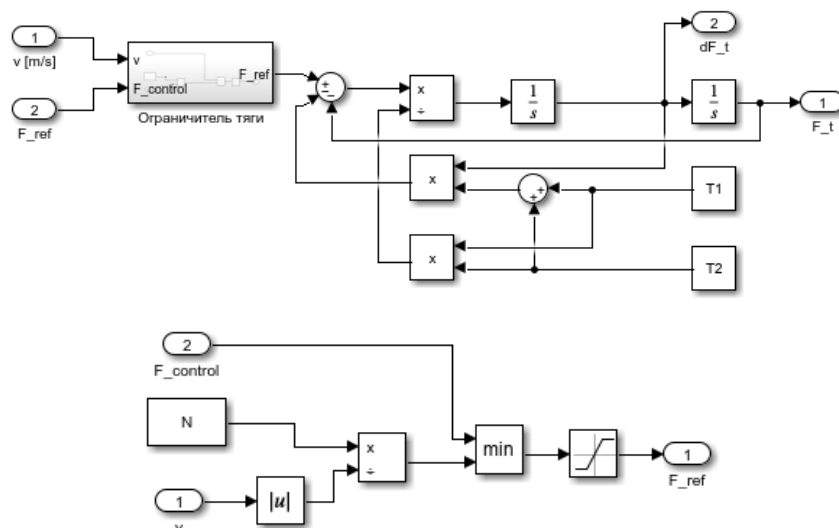


Рис. 2. Структурная схема тягового электропривода (вверху) и ограничитель тяги тягового электропривода, $N = 6600$ кВт (внизу)

Структурная схема разработанной САУ скоростью электровоза ЭП20 представлена на рис. 3 (вверху). САУ скоростью электровоза содержит регулятор скорости (см. рис. 3, по центру), построенный с использованием интеллектуального закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода. Структурная схема нечеткой подсистемы, обеспечивающей адаптивное изменение параметра закона управления, представлена на рис. 3 (внизу).

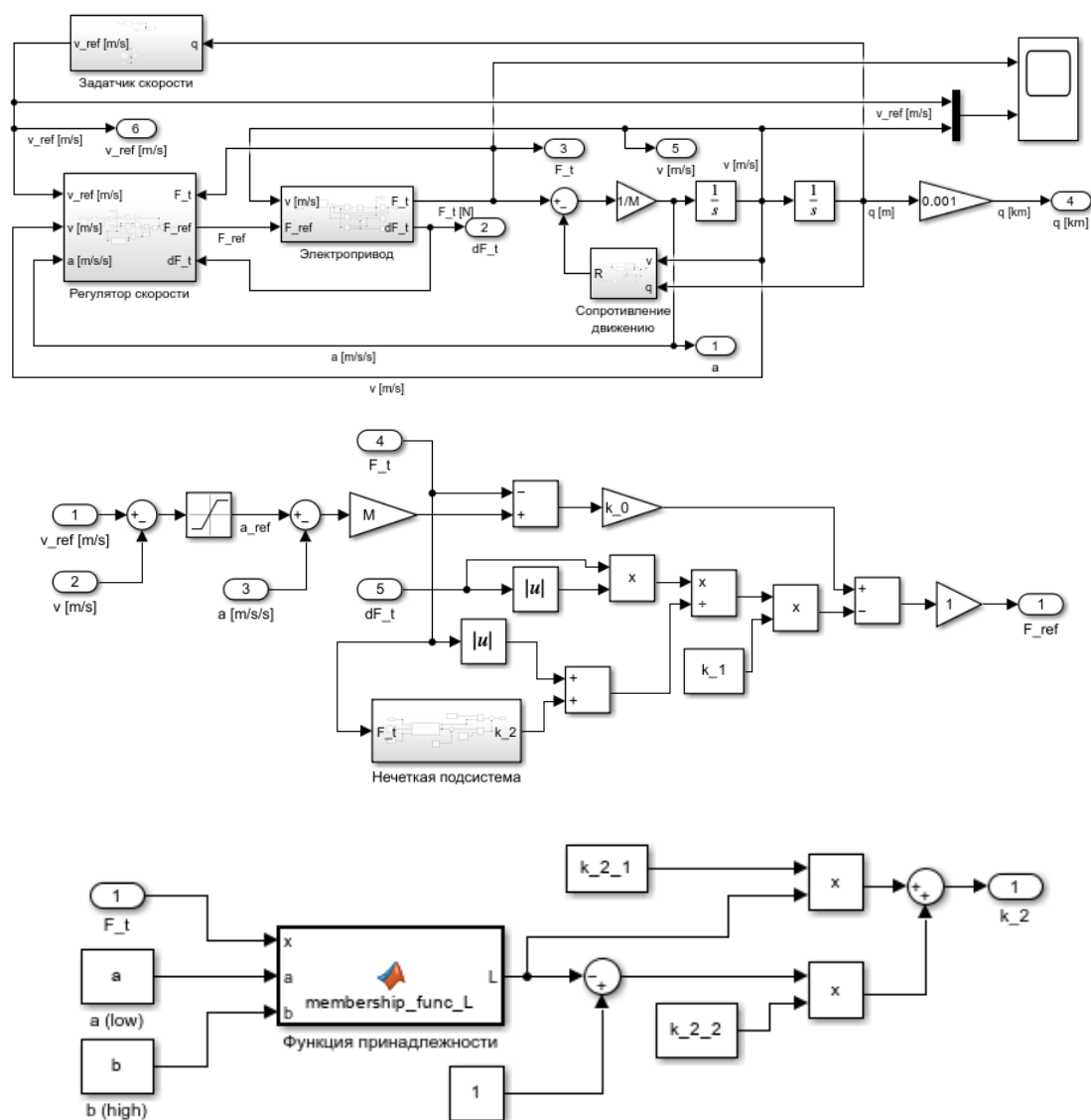


Рис. 3. Структурная схема САУ скоростью электровоза ЭП20 (вверху), структурная схема разработанного блока регулятора скорости электровоза ЭП20 (по центру) и структурная схема нечеткой подсистемы разработанного регулятора скорости электровоза ЭП20 (внизу)

Заметим, что в рассматриваемом случае регулятор скорости не содержит данных о профиле пути участка движения, следовательно, внешние возмущения в виде сопротивления движению поезда являются априорно неизвестными.

Моделирование

Рассмотрим движение поезда с составом из 20 пассажирских вагонов на равнинном участке Москва – Рязань, профиль пути которого представлен на рис. 4. Проведем моделирование разгона поезда с $v_0 = 0$ м/с до $v_1 = 55,5$ м/с с последующим торможением до $v_2 = 0$ м/с при параметрах $k_0 = 1,7$, $k_1 = 3,45$, $k_{21} = 0,1$, $k_{22} = 2$, $a = 10^4$, $b = 9 \cdot 10^4$.

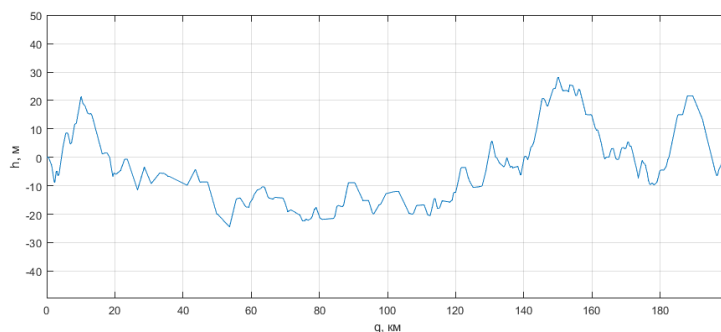


Рис. 4. Профиль пути Москва – Рязань:

q – расстояние относительно начальной точки, км; h – высота относительно начальной точки, м

Результаты моделирования представлены на рис. 5. Разработанная САУ скоростью электровоза ЭП20 на основе полученного интеллектуального закона управления позволяет поддерживать заданную скорость, обеспечивая движение в режимах тяги и рекуперативного торможения.

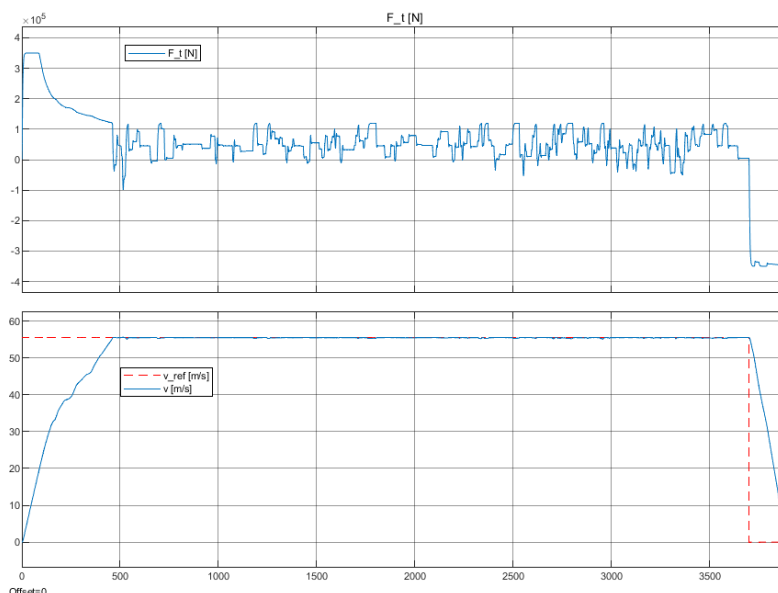


Рис. 5. Результат движения поезда с разгоном и торможением до заданной скорости на участке Москва – Рязань под управлением разработанной САУ скоростью электровоза ЭП20: первый график – тяга локомотива, второй график – заданная (красная линия) и действительная (синяя линия) скорости поезда

Аналогичные результаты получены в результате моделирования на всем участке Москва – Адлер. Разработанная САУ скоростью электровоза позволяет поддерживать заданную скорость, не превышая ее более чем на 1 км/ч, что соответствует требованиям к САУ.

Заключение

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что разработанный интеллектуальный алгоритм управления можно использовать при построении САУ скоростью электровоза нового поколения с асинхронным тяговым двигателем для обеспечения движения с заданной скоростью в различных режимах работы локомотива в условиях априорно неизвестных воздействий.

Список литературы

1 ТМХ прекратил выпуск созданных с Alstom электровозов, но сделает российские // РИА Новости: [сайт]. – 2023. – 24 июля. – URL: <https://ria.ru/20230724/elektrovozy-1885859910.html> (дата обращения: 28.08.2023).

References

1 TMH stopped production of electric locomotives created with Alstom, but will make Russian ones // RIA Novosti: [website]. – 2023. – July 24. – URL: <https://ria.ru/20230724/elektrovozy-1885859910.html> (date of access: 08/28/2023)

2 РЖД ждут от заводов линейку полностью отечественных локомотивов // 1prime.ru : [сайт]. – 2023. – 25 апреля. – URL: <https://1prime.ru/transport/20230425/840470004.html> (дата обращения: 28.08.2023).

3 **Шевченко, А.** ТМХ впервые в РФ представил контактно-аккумуляторный маневровый электровоз / А. Шевченко // neftegaz.ru : [сайт]. – 2023. – 27 августа – URL: <https://neftegaz.ru/news/Oborudovanie/791664-tmkh-vpervye-v-rf-predstavil-kontaktno-akkumulyatornyy-manevrovyuy-elektrovoz> (дата обращения: 28.08.2023).

4 **Костоглотов, А. А.** Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования / А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2021. – Т. 6, № 6. – С. 3–12. – ISSN 1029-3620.

5 **Жданов, А. А.** Применение нечеткой логики в имитационной системе автономного адаптивного управления / А. А. Жданов, М. В. Караваев // Труды ИСП РАН. – 2002. – Т. 3. – С. 121–137. – ISSN 2220-6426.

6 **Савин, М. М.** Теория автоматического управления / М. М. Савин, В. С. Елсуков, О. Н. Пятинина. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2007. – 469 с. – ISBN 978-5-222-11274-8.

7 **Агапов, А. А.** Анализ эффективности квазиоптимальных законов управления с применением аппарата нечеткой логики в задачах интеллектуализации транспортных систем / А. А. Агапов, А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1(89). – С. 126–135. – ISSN 0201-727X.

8 **Кузмич, В. Д.** Теория локомотивной тяги / В. Д. Кузмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. – Москва : Маршрут, 2005. – 448 с. – ISBN 5-89035-265-2.

9 Правила тяговых расчетов для поездной работы : утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р в редакции Распоряжения ОАО «РЖД» от 09.02.2018 № 182/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 516 с.

10 **Зарифьян, А. А.** Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Зарифьян Александр Александрович. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2016. – 121 с.

2 Russian Railways expects a line of completely domestic locomotives from factories // 1prime.ru : [website]. – 2023. – 25 April. – URL: <https://1prime.ru/transport/20230425/840470004.html> (date of access: 08/28/2023).

3 **Shevchenko, A.** TMH for the first time in the Russian Federation presented a contact-battery shunting electric locomotive / A. Shevchenko // neftegaz.ru : [website]. – 2023. – 27 August. – URL: <https://neftegaz.ru/news/Oborudovanie/791664-tmkh-vpervye-v-rf-predstavil-kontaktno-akkumulyatornyy-manevrovyuy-elektrovoz> (date of access: 08/28/2023).

4 **Kostoglotov, A. A.** A method of quasi-optimal synthesis of control laws based on the reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem using asynchronous variation / A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Theory and control systems. – 2021. – Vol. 6, No. 6. – P. 3–12. – ISSN 1029-3620.

5 **Zhdanov, A. A.** Application of fuzzy logic in the simulation system of autonomous adaptive control / A. A. Zhdanov, M. V. Karavaev // Proceedings of ISP RAS. – 2002. – Т. 3. – P. 121–137. – ISSN 2220-6426.

6 **Savin, M. M.** Theory of automatic control / M. M. Savin, V. S. Elsukov, O. N. Pyatina. – Rostov-on-Don : Phoenix, 2007. – 469 p. – ISBN 978-5-222-11274-8.

7 **Agapov, A. A.** Analysis of the effectiveness of quasi-optimal control laws using the apparatus of fuzzy logic in the problems of intellectualization of transport systems / A. A. Agapov, A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1(89). – P. 126–135. – ISSN 0201-727X.

8 **Kuzmich, V. D.** Theory of locomotive traction / V. D. Kuzmich, V. S. Rudnev, S. Ya. Frenkel. – Moscow : Route, 2005. – 448 p. – ISBN 5-89035-265-2.

9 Rules for traction calculations for train work : approved by Order of Russian Railways dated May 12, 2016 No. 867r as amended by Order of Russian Railways dated February 9, 2018 No. 182/r. – Moscow : JSC “Russian Railways”, 2016. – 516 p.

10 **Zarifyan, A. A.** Improving the energy efficiency of passenger electric locomotives with asynchronous traction drive when powered from a DC network : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.22.07 / Zarifyan Alexander Alexandrovich. – Rostov-on-Don : RSTU, 2016. – 121 p.

11 **Зарифьян, А. А.** Синтез регулятора скорости электровоза методами теории конечных автоматов / А. А. Зарифьян // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 3(75). – С. 30–37. – ISSN 0201-727X.

12 **Zarifyan, A.** Synthesis of the heavy freight locomotive speed control system by finite-state machine theory / A. Zarifyan // The 16th International Conference on Civil, Structural & Environmental Engineering Computing. – Riva del Garda, Italy, 2019. – ISBN 978-1-905088-45-4.

11 **Zarifyan, A. A.** Synthesis of the electric locomotive speed controller by methods of the theory of finite automata / A. A. Zarifyan // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 3(75). – P. 30–37. – ISSN 0201-727X.

12 **Zarifyan, A.** Synthesis of the heavy freight locomotive speed control system by finite-state machine theory / A. Zarifyan // The 16th International Conference on Civil, Structural & Environmental Engineering Computing. – Riva del Garda, Italy, 2019. – ISBN 978-1-905088-45-4.

A. A. Agapov, A. A. Zarifyan (Jr.)

THE POSSIBILITY OF USING INTELLIGENT CONTROL ALGORITHM BASED ON THE MAXIMUM CONDITION OF THE GENERALIZED POWER FUNCTION IN THE SYSTEM OF AUTOMATIC SPEED CONTROL OF ELECTRIC LOCOMOTIVE

Abstract. The paper considers the possibility of using an intelligent control algorithm based on the maximum condition of the generalized power function and the fuzzy logic apparatus in the problem of automatic speed control of a new generation electric locomotive with an asynchronous traction motor. An automatic speed controller for an electric locomotive was built, and the simulation of the movement of a passenger train with an EP20 locomotive at a given speed on the Moscow – Ryazan and Moscow – Adler sections with an appropriate track profile was carried out. An analysis of the simulation results allows us to conclude that the developed intelligent control algorithm can be used to build a speed control system for a new generation electric locomotive with an asynchronous traction motor to ensure movement at a given speed in various operating modes of the locomotive under conditions of a priori unknown influences.

Keywords: automatic speed control, intelligent control algorithm, condition for the maximum of the generalized power function, fuzzy logic.

For citation: Agapov, A. A. The possibility of using intelligent control algorithm based on the maximum condition of the generalized power function in the system of automatic speed control of electric locomotive / A. A. Agapov, A. A. Zarifyan (Jr.) // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No 3. – P. 28–34. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_28.

Сведения об авторах

Агапов Александр Андреевич
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вычислительная техника
и автоматизированные системы управления»,
ассистент,
e-mail: agapov2794@gmail.com

Зарифьян Александр Александрович (мл.)
ТМХ Инжиниринг,
кандидат технических наук, эксперт,
e-mail: zarifyan.alexander@gmail.com

Information about the authors

Agapov Alexander Andreevich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computing Machinery and Computerized
Control Systems»,
Lecturer,
e-mail: agapov2794@gmail.com

Zarifyan Alexander Alexandrovich (Jr.)
TMH Engineering,
Candidate of Engineering Sciences, Expert,
e-mail: zarifyan.alexander@gmail.com