

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 62 – 50 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_126

*А. А. Агапов, А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко***АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ***

Аннотация. Проведен анализ применения законов управления, разработанных на базе метода квазиоптимального синтеза с помощью подхода на основе условия максимума функции обобщенной мощности с применением аппарата нечеткой логики в задачах интеллектуализации прикладных задач управления транспортными системами на железной дороге. Построены схемы рассматриваемых систем в среде MATLAB Simulink, блок нечеткого логического вывода Такаги – Сугено реализован в Fuzzy Logic Designer. Анализ результатов моделирования позволяет утверждать, что предлагаемый закон управления дает возможность повысить эффективность управления по функционалам быстродействия и точности в сравнении с известным решением на основе подхода дифференциальных игр и принципа максимума Понтрягина в задачах управления типовыми динамическими объектами.

Ключевые слова: закон управления, условие максимума функции обобщенной мощности, нечеткая логика, уравнения Лагранжа 2-го рода.

Для цитирования: Агапов, А. А. Анализ эффективности квазиоптимальных законов управления с применением аппарата нечеткой логики в задачах интеллектуализации транспортных систем / А. А. Агапов, А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 126–135. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_126.

Введение

Необходимость решения задач управления в условиях качественного роста интенсивности транспортных потоков, числа транспортных средств, повышения интенсивности скоростного режима требует применения новых подходов к модернизации железнодорожного транспорта. Это определяет актуальность применения интеллектуальных транспортных систем (ИТС), развитие которых основывается на комплексном использовании методов интеллектуализации, теории управления, системного анализа и других дисциплин [1, 2]. Одной из функций бортовых средств ИТС является автоматическое управление [3], развитие которого происходило по направлениям расширения классов и видов задач оптимального управления, усложнения систем управления и интеграции ранее качественно различных методов управления в единый комплекс [1]. Интеллектуализация ответственных процессов управления позволит повысить безопасность движения поездов [4].

Построение системы управления может осуществляться с применением известного метода квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче [5], включающего в себя условие максимума функции обобщенной мощности.

Так как условия функционирования в процессе движения изменяются непредвиденным образом в широких пределах, представляется эффективным применять адаптивные системы управления [6, 7]. Адаптацию управления к изменению условий движения можно осуществить с помощью использования нечеткого логического вывода [8, 9], что обеспечивается за счет изменения гиперповерхности переключения [9].

В работе рассматривается вопрос применимости законов управления, построенных на основе метода квазиоптимального синтеза с применением аппарата нечеткой логики.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00812. – URL: <https://rscf.ru/project/23-29-00812>.

Цель работы – анализ эффективности законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и аппарата нечеткой логики в сравнении с известными решениями.

1 Постановка задачи синтеза управления с использованием системного подхода и формализма Лагранжа

Рассматривается совокупность динамических систем, движение которых удовлетворяет уравнению Лагранжа второго рода [10, 11]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_s} = u_s(t), \quad s = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_1] \subset R, \quad (1)$$

где $T = T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – кинетическая энергия; $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]^T \in R^n$ – вектор обобщенных координат; $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n]^T \in R^n$ – вектор обобщенных скоростей; $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), \dots, u_n(t)]^T$ – вектор ограниченных на конечном замкнутом интервале времени $[t_0, t_1] \subset R$ управляющих обобщенных сил, $\mathbf{u} \in \bar{G}$, \bar{G} – ограниченная замкнутая область суммируемых функций; $n = \dim \mathbf{q}$ – число степеней свободы динамической системы; T – знак транспонирования; точкой обозначена производная по времени.

Такой случай «играет центральную роль при рассмотрении систем вида (1) и их обобщений» [12]. Кинетическая энергия динамической системы (1) является положительно определенной квадратичной формой обобщенных скоростей $\psi_0 \sum_{s=1}^n \dot{q}_s^2 \leq T \leq \psi_1 \sum_{s=1}^n \dot{q}_s^2$, $\psi_j = \text{const}$, $\psi_j > 0$, $j = \overline{0, 1}$, и коэффициенты матрицы кинетической энергии непрерывно дифференцируемы.

Положим, что управляющие силы $\mathbf{u}(t)$ для любых двух заданных точек расширенного координатного пространства переводят динамическую систему (1) из начального состояния $t = t_0$, $\mathbf{q}(t_0) = [q_{10}, \dots, q_{n0}]^T$, $\dot{\mathbf{q}}(t_0) = [\dot{q}_{10}, \dots, \dot{q}_{n0}]^T$ в конечное состояние $t = t_1$, $\mathbf{q}(t_1) = [q_{11}, \dots, q_{n1}]^T$, $\dot{\mathbf{q}}(t_1) = [\dot{q}_{11}, \dots, \dot{q}_{n1}]^T$.

Для определенности

$$\bar{G} = \{u_s(t) : |u_s| \leq h_s, h_s = \text{const}, s = \overline{1, n}\},$$

$$h_0 = \min_{1 \leq s \leq n} h_s > 0.$$

Тогда в соответствии с [13] выполняется необходимое и достаточное условие управляемости исследуемого класса лагранжевых динамических систем (1).

Пусть задана скалярная непрерывная вместе со своими частными производными определенно-положительная целевая функция $F(\mathbf{q})$. Задача синтеза управления системой (1) состоит в поиске управляющих обобщенных сил, доставляющих минимум целевому функционалу

$$I[\mathbf{q}] = \int_{t_0}^{t_1} F(\mathbf{q}) dt \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in \bar{G}}$$

при вышеприведенных условиях.

2 Построение квазиоптимальных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода

Конструктивным подходом к решению задачи квазиоптимального синтеза управления является подход на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче, который включает в себя условие максимума функции обобщенной мощности, что позволяет определить структуру управления в виде [5]

$$u_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \lambda^{-1} (\mu_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{q}_s + V_s(\mathbf{q})), \quad s = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где λ – неопределенный множитель Лагранжа, μ_s – синтезирующая функция, V_s – фиктивная обобщенная сила, зависящая от формы задания целевого функционала [14], $V_s = \frac{\delta F}{\delta q_s}$, $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$ – обобщенные координаты и скорости, n – количество степеней свободы системы.

В задаче управления объектом с несколькими степенями свободы существует возможность применения метода декомпозиции [15], что позволит исключить из рассмотрения взаимовлияние между степенями свободы и строить законы управления для множества независимых подсистем.

Адаптацию параметров закона управления в подсистеме можно обеспечить за счет применения аппарата нечеткой логики и построения блока нечеткого логического вывода, который позволяет определять параметр закона управления в зависимости от текущего состояния системы [16, 17].

Для управления отдельной подсистемой в работе [9] был предложен закон управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности (2) и нечеткого логического вывода, который имеет вид

$$u_{cmp} = sat \left[k_1 \left(q + k_2 \frac{\dot{q}|\dot{q}|}{|q| + \tilde{k}_3} \right) \right], \quad (3)$$

где k_1, k_2 – параметры управления, \tilde{k}_3 – параметр на основе нечеткого логического вывода, $sat(\psi)$ – функция насыщения, обеспечивающая сглаживание скользящего режима [18]:

$$sat\psi = \begin{cases} 1, & \psi > \varepsilon, \\ \frac{\psi}{\varepsilon}, & |\psi| \leq \varepsilon, \\ -1, & \psi < -\varepsilon, \end{cases} \quad (4)$$

где ε – малая положительная постоянная.

Параметр \tilde{k}_3 формируется на основе нечеткого логического вывода Такаги – Сугено [17, 19] с базой правил

$$\begin{aligned} R_1 : q = \alpha_1 &\Rightarrow y_1, \\ R_2 : q = \alpha_2 &\Rightarrow y_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где α_1, α_2 – нечеткие лингвистические термы блока фаззификации, в котором выполняется процедура определения значений функций принадлежности $m_1(q), m_2(q)$ соответственно; y_1, y_2 – выходные переменные блока вывода [17].

Так как база правил (5) содержит только одну лингвистическую переменную, этапы агрегирования подусловий и активизации подзаключений в нечетких правилах продукций выполняются тривиальным образом. Аккумуляция заключений нечетких правил продукций для нечеткого логического вывода Такаги – Сугено фактически отсутствует [20].

Дефаззификация осуществляется следующим образом. Выходной сигнал представляет собой нормализованную взвешенную сумму заключений y_1 и y_2 :

$$\tilde{k}_3 = \frac{m_1(q)y_1 + m_2(q)y_2}{m_1(q) + m_2(q)}. \quad (6)$$

Заключения y_1, y_2 определяются в процессе настройки нечеткого логического вывода Такаги – Сугено в соответствии с моделью выбранного объекта управления. Применение нечеткого параметра \tilde{k}_3 позволяет изменять гиперповерхность переключения в зависимости от текущего состояния системы, что дает возможность адаптации к априорно неизвестным начальным условиям функционирования системы.

Блок системы управления на основе предлагаемого закона (3) представлен на рис. 1.

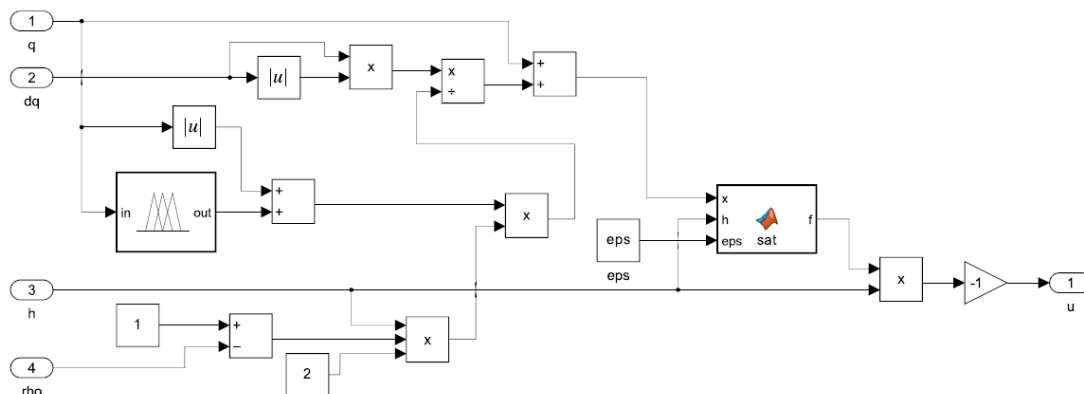


Рис. 1. Схема в MATLAB Simulink построенного управления (3)

В качестве показателя эффективности управления рассмотрим функционал быстродействия [21]

$$J_t = \int_{t_0}^{t_k} dt, \quad (7)$$

где t_0 – начало управления, t_k – время достижения заданной окрестности терминальной точки $q_k = \pm\xi$, $\dot{q}_k = \pm\xi$, примем $\xi = 10^{-3}$.

Моделирование

Рассмотрим модель движения [18] в среде с сопротивлением, которая в первом приближении описывает динамику движения высокоскоростного транспорта

$$\ddot{q} = -0.8\dot{q}^2 + u, \quad (8)$$

схема системы представлена на рис. 2.

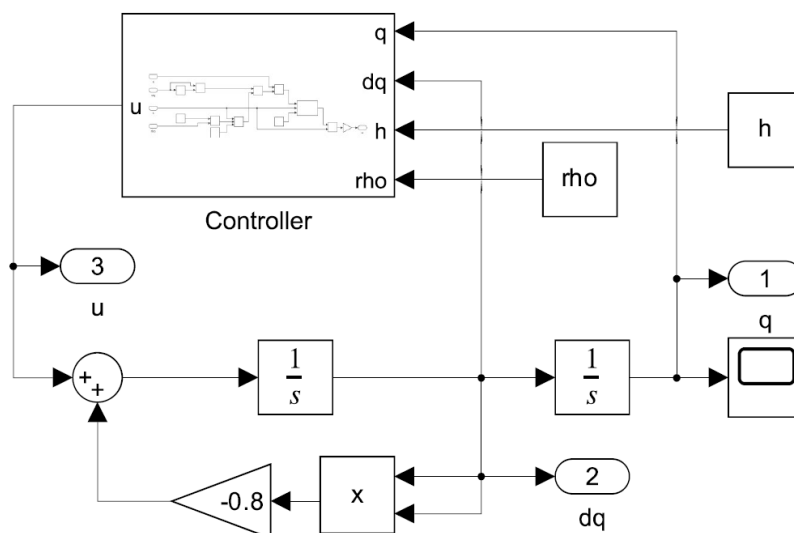


Рис. 2. Схема в MATLAB Simulink системы (8)

Для системы (8) в работе [9] выходные переменные базы правил (5) были определены как $y_1 = 2$, $y_2 = 0,53$, функции принадлежности $m_1(q)$, $m_2(q)$ определены в виде

$$m_1(q) = \frac{1}{1 + e^{-12(q-0.5)}}, \quad m_2(q) = \frac{1}{1 + e^{12(q-0.5)}},$$

их графики представлены на рис. 3.

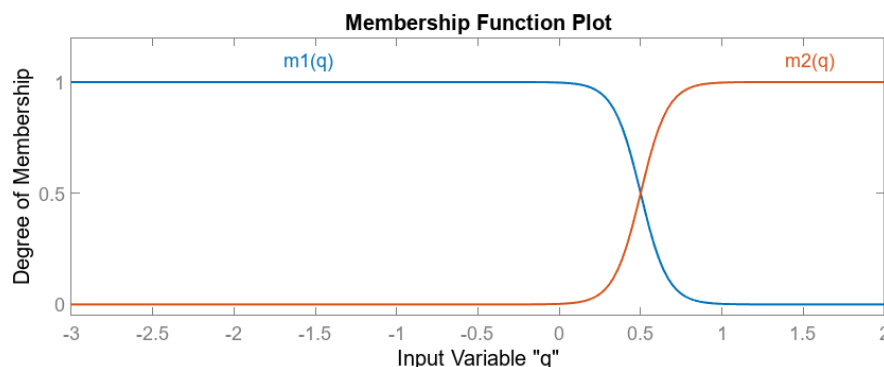


Рис. 3. Функции принадлежности нечетких лингвистических терм базы правил (5), реализованы в программном пакете MATLAB Fuzzy Logic Designer

Сравним разработанное управление (3) с известным управлением, предложенным для системы (8), которое представлено на рис. 4 и имеет вид [18]

$$\begin{aligned} u_{resh} &= h \text{sat}(\psi(q, \dot{q})), \\ \psi(q, \dot{q}) &= -q - k \cdot \dot{q} |\dot{q}|, \\ k &= [2h(1-\rho)]^{-1}, \end{aligned} \quad (9)$$

где h – ограничение на управление, ρ – постоянная, определяющая величину независимых ограниченных возмущений v : $|v| \leq \rho h, \rho < 1$. Так, для системы (8) величина ρ соответствует максимальному по модулю значению $v = -0.8\dot{q}^2$.

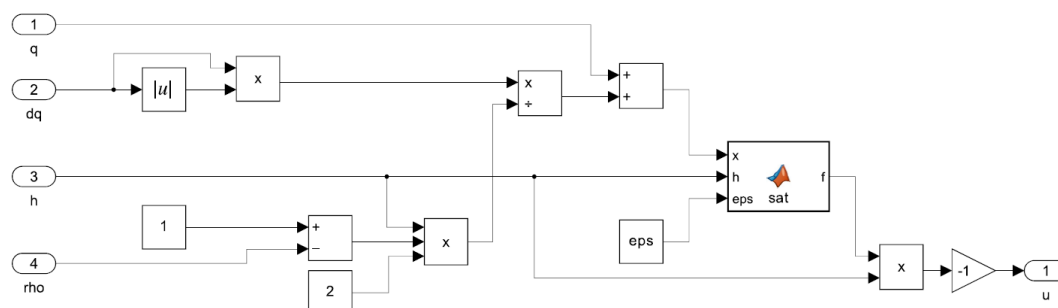


Рис. 4. Схема в MATLAB Simulink управления (9), блок sat реализован в соответствии с (4)

Значения показателя эффективности (7) для систем (8), (3) и (8), (9) с параметрами [9, 18] $\varepsilon = 10^{-3}$, $h = 1$, $k_1 = -1$, $k_2 = [2h(1-\rho)]^{-1}$ на области начальных условий $q_0 = -1$, $\dot{q}_0 \in [-1, 1]$ представлены на рис. 5. Так как на выбранном интервале $\dot{q}_0 \in [-1, 1]$ максимальное по модулю значение $v = -0.8\dot{q}^2 = 0.8$, определим $\rho = 0.8$.

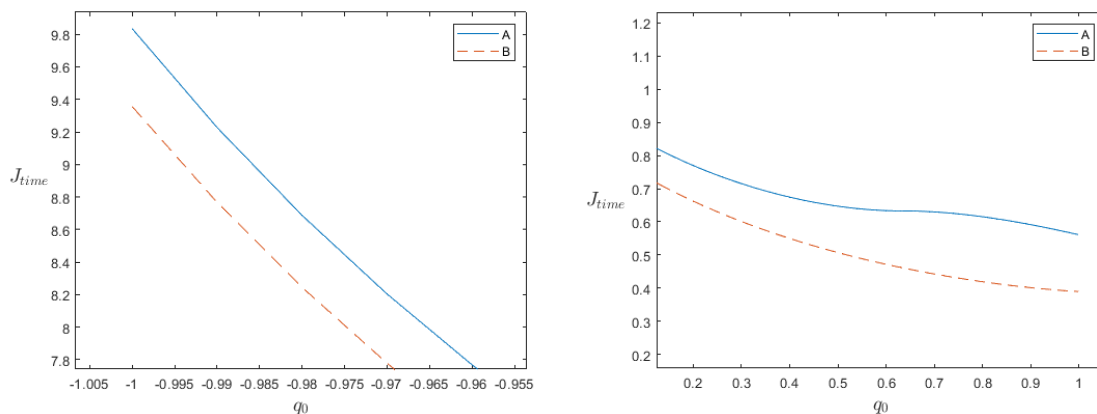


Рис. 5. Значения показателя (7) (левый и правый края интервала \dot{q}_0) при управлении системой (8):

A – известное управление (9), *B* – для построенное управление (3)

Результаты моделирования показывают, что на рассмотренной области начальных условий разработанное управление (3) доставляет выигрыш по функционалу (7) в сравнении с управлением (9).

Рассмотрим модель тягового электропривода поезда в виде апериодического звена второго порядка [22], представленную на рис. 6:

$$T_1 T_2 \ddot{x} + (T_1 + T_2) \dot{x} + x = u, \quad (10)$$

где $T_1 = 1,44$ с, $T_2 = 2,53$ с, $x = q - q^*$, q соответствует силе тяги/электрическому торможению, развиваемому локомотивом; q^* – целевое значение силы тяги/электрического торможения.

Поскольку управление силой тяги осуществляется с учетом равнодействующей сил основного и дополнительного сопротивления движению [22], которые можно рассматривать как априорно неизвестные мешающие возмущения, то рассматриваемые управления (3) и (9) могут быть реализованы при наличии сведений о величине r максимально возможных априорно неизвестных возмущений.

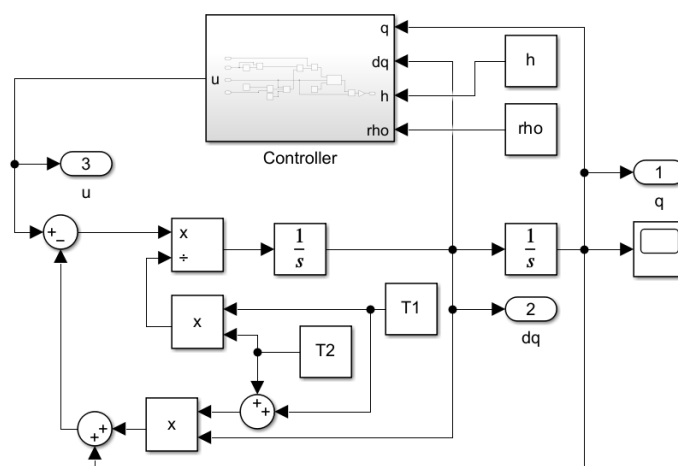


Рис. 6. Схема модели тягового электропривода поезда (10)

Помимо показателя (7) эффективность электропривода целесообразно определять по показателю точности [23], который выражается квадратичным функционалом

$$J_x = \int_{t_0}^{t_k} x^2 dt. \quad (11)$$

Значения показателя эффективности (7) для систем (10), (3) и (10), (9) с параметрами [9, 18] $\varepsilon = 10^{-3}$, $\rho = 0,76$, $h = 5$, $k_1 = -1$, $k_2 = [2h(1-\rho)]^{-1}$ и начальными условиями $x_0 = 1$, $\dot{x}_0 = 0,7$: для системы (10), (9) – 1,537 с, для системы (10), (3) – 1,213 с. Значения по показателю (11): для системы (10), (9) – 0,515 м², для системы (10), (3) – 0,479 м². Поведение систем на фазовой плоскости представлено на рис. 7.

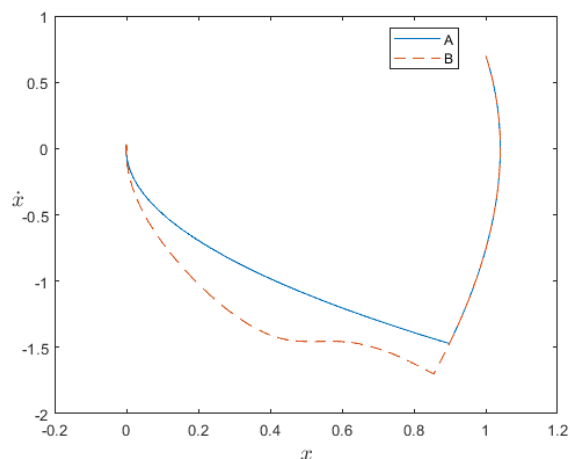


Рис. 7. Поведение системы (10) на фазовой плоскости под управлениями: A – (9), B – (3)

Результаты моделирования показывают, что предлагаемое управление (3) обеспечивает выигрыш по показателю эффективности (7) 21,4 % в сравнении с известным управлением (9), при этом

имеет место проигрыш на 19,72 % по функционалу $J_v = \int_{t_0}^{t_k} v^2 dt$.

Заключение

Анализ результатов моделирования позволяет утверждать, что закон управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и аппарата нечеткой логики дает возможность повысить эффективность управления по функционалу быстродействия и квадратичному функционалу в сравнении с известными решениями при управлении различными динамическими объектами.

Разработанный закон управления при детализации математической модели динамики движения с учетом особенностей работы электропривода поезда может быть использован в составе комплекса автоматизированного управления подвижным составом как элемент интеллектуальной транспортной системы.

Список литературы

- 1 Маркелов, В. М. Интеллектуальные транспортные системы как инструмент управления / В. М. Маркелов, И. В. Соловьев, В. Я. Цветков // Economic Consultant. – 2014. – № 3(7). – С. 42–49. – ISSN 2686-9012.
- 2 Цветков, В. Я. Интегральное управление высокоскоростной магистралью / В. Я. Цветков // Мир транспорта. – 2013. – № 5 (49). – С. 6–9. – ISSN 1992-3252.
- 3 Жанказиев, С. В. Интеллектуальные транспортные системы в обеспечении безопасности дорожного движения / С. В. Жанказиев // Актуальные проблемы деятельности по обеспечению безопасности дорожного движения (состояние, проблемы,

References

- 1 Markelov, V. M. Intelligent transport systems as a management tool / V. M. Markelov, I. V. Soloviev, V. Ya. Tsvetkov // Economic consultant. – 2014. – No. 3 (7). – P. 42–49. – ISSN 2686-9012.
- 2 Tsvetkov, V. Ya. Integral control of a high-speed highway / V. Ya. Tsvetkov // Mir Transporta. – 2013. – No. 5 (49). – P. 6–9. – ISSN 1992-3252.
- 3 Zhankaziev, S. V. Intelligent Transport Systems in Ensuring Road Safety / S. V. Zhankaziev // Actual problems of road safety activities (state, problems, ways of improvement) : materials of the interdepartmental scientific and practical

пути совершенствования) : материалы межведомственной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 124–128. – ISBN 978-5-91837-156-5.

4 Обеспечение надёжности и безопасности прицельного торможения подвижного состава на тупиковых путях станций / В. М. Абрамов, Б. Д. Никифоров, М. Ю. Капустин [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 1 (37). – С. 95–101. – ISSN 0201-727X.

5 **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. – DOI 10.31857/S0002338821060111.

6 **Шалягин, Д. В.** Интеллектуализация систем управления / Д. В. Шалягин, Е. Н. Розенберг, В. И. Астрахан // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 12. – С. 21–23. – ISSN 0044-4448.

7 **Капустин, М. Ю.** Модель адаптивной системы прицельного электропневматического торможения электропоезда / М. Ю. Капустин, С. И. Краснолобов, П. С. Саркисян // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 4. – С. 33–43. – ISSN 2074-9325.

8 **Furtat, I. B.** Robust adaptive control with disturbances compensation : 12th IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing ALCOSP 2016 / I. B. Furtat, J. V. Chugina // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, No. 13. – P. 117–122. – DOI 10.1016/j.ifacol.2016.07.937.

9 **Агапов, А. А.** Построение закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода / А. А. Агапов, А. А. Костоглотов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2022. – № 4(216). – С. 35–40. – DOI 10.17213/1560-3644-2022-4-35-40.

10 **Новоселов, В. С.** Вариационные методы в механике / В. С. Новоселов. – Ленинград : Изд-во Ленинградского университета, 1966. – 72 с.

11 **Лурье, А. И.** Аналитическая механика / А. И. Лурье. – Москва : Физматгиз, 1961. – 824 с.

12 **Пятницкий, Е. С.** Синтез иерархических систем управления механическими и

conference. – St. Petersburg, 2019. – P. 124–128. – ISBN 978-5-91837-156-5.

4 Ensuring the reliability and safety of targeted braking of rolling stock on dead-end tracks of stations / V. M. Abramov, B. D. Nikiforov, M. Yu. Kapustin [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2010. – No. 1 (37). – P. 95–101. – ISSN 0201-727X.

5 **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. – DOI 10.31857/S0002338821060111.

6 **Shalyagin, D. V.** Intellectualization of control systems / D. V. Shalyagin, E. N. Rozenberg, V. I. Astrakhan // Railway Transport. – 2014. – No. 12. – P. 21–23. – ISSN 0044-4448.

7 **Kapustin, M. Yu.** Model of an adaptive system for targeted electro-pneumatic braking of an electric train / M. Yu. Kapustin, S. I. Krasnolobov, P. S. Sarkisyan // Nauka i Tekhnika Transporta. – 2011. – No. 4. – P. 33–43. – ISSN 2074-9325.

8 **Furtat, I. B.** Robust adaptive control with disturbances compensation : 12th IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing ALCOSP 2016 / I. B. Furtat, J. V. Chugina // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, No. 13. – P. 117–122. – DOI 10.1016/j.ifacol.2016.07.937.

9 **Agapov, A. A.** Construction of a Control Law Based on the Maximum Condition of the Generalized Power Function and Fuzzy Logical Inference / Agapov, A. A., Kostoglotov, A. A. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. North Caucasian Region. Technical Sciences. – 2022. – No. 4(216). – P. 35–40. – DOI 10.17213/1560-3644-2022-4-35-40.

10 **Novoselov, V. S.** Variational methods in mechanics / V. S. Novoselov. – Leningrad : Publishing house of the Leningrad University, 1966. – 72 p.

11 **Lurie, A. I.** Analytical mechanics / A. I. Lurie. – Moscow : Fizmatgiz, 1961. – 824 p.

12 **Pyatnitsky, E. S.** Synthesis of hierarchical control systems for mechanical and

электромеханическими объектами на принципе декомпозиции. I / Е. С. Пятницкий // Автоматика и телемеханика. – 1989. – Т. 50, № 1. – С. 87–99. – ISSN 0005-1179.

13 **Пятницкий, Е. С.** Управляемость классов лагранжевых систем с ограниченными управлениями / Е. С. Пятницкий // Автоматика и телемеханика. – 1996. – Т. 57, № 12. – С. 29–37. – ISSN 0005-1179.

14 **Костоглотов, А. А.** Объединенный принцип максимума в информационных технологиях анализа и синтеза : монография / А. А. Костоглотов, А. И. Костоглотов, С. В. Лазаренко. – Ростов-на-Дону : РТИСТ, 2010. – 164 с. – ISBN 978-5-91403-036-7.

15 **Пятницкий, Е. С.** Принцип декомпозиции в управлении механическими системами / Е. С. Пятницкий // Доклады АН СССР. – 1988. – Т. 300, № 2. – С. 300–303. – ISSN 0002-3264.

16 **Пегат, А.** Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с. – ISBN 978-5-9963-1495-9.

17 **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия, 2006. – 452 с. – ISBN 5-93517-103-1.

18 **Ананьевский, И. М.** Непрерывное управление механической системой на основе метода декомпозиции / И. М. Ананьевский, С. А. Решмин // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 3–17. – DOI 10.7868/S0002338814040027.

19 **Штовба, С. Д.** Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С. Д. Штовба. – Москва : Горячая линия, 2007. – 288 с. – ISBN 5-93517-359-X.

20 **Леоненков, А. В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с. – ISBN 5-94157-087-2.

21 The minimum time control of electromechanical positional system / V. P. Kurgan, K. V. Pavlovich, A. A. Pankin, P. A. Aleksandrovich // Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. – 2016. – Vol. 24, No. 1. – P. 116–121. – DOI 10.14498/tech.2016.1.%u.

22 **Притыкин, Д. Е.** Метод обратных задач динамики для синтеза регулятора скорости магистрального электровоза / Д. Е. Притыкин //

electromechanical objects based on the principle of decomposition. I / E. S. Pyatnitsky // Avtomatika i Telemekhanika. – 1989. – Vol. 50, No. 1. – P. 87–99. – ISSN 0005-1179.

13 **Pyatnitsky, E. S.** Controllability of classes of Lagrangian systems with bounded controls / E. S. Pyatnitsky // Avtomatika i Telemekhanika. – 1996. – Vol. 57, No. 12. – P. 29–37. – ISSN 0005-1179.

14 **Kostoglotov, A. A.** The combined maximum principle in information technologies of analysis and synthesis : a monograph / A. A. Kostoglotov, A. I. Kostoglotov, S. V. Lazarenko. – Rostov-on-Don : RTIST, 2010. – 164 p. – ISBN 978-5-91403-036-7.

15 **Pyatnitsky, E. S.** Decomposition principle in the control of mechanical systems / E. S. Pyatnitsky // Doklady of the USSR Academy of Sciences. – 1988. – Vol. 300, No. 2. – P. 300–303. – ISSN 0002-3264.

16 **Pegat, A.** Fuzzy modeling and control / A. Pegat. – Moscow : BINOM. Knowledge Laboratory, 2013. – 798 p. – ISBN 978-5-9963-1495-9.

17 **Rutkovskaya, D.** Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems / D. Rutkovskaya, M. Pilinsky, L. Rutkovsky. – Moscow : Goryachaya Liniya, 2006. – 452 p. – ISBN 5-93517-103-1.

18 **Ananievsky, I. M.** Continuous control of a mechanical system based on the decomposition method / I. M. Ananievsky, S. A. Reshmin // Izvestiya Russian Academy of Science. Theory and control systems. – 2014. – No. 4. – P. 3–17. – DOI 10.7868/S0002338814040027.

19 **Shtovba, S. D.** Designing fuzzy systems using MatLab / S. D. Shtovba. – Moscow : Goryachaya Line, 2007. – 288 p. – ISBN 5-93517-359-X.

20 **Leonenkov, A. V.** Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH / A. V. Leonenkov. – St. Petersburg : BHV-Petersburg, 2005. – 736 p. – ISBN 5-94157-087-2.

21 The minimum time control of electromechanical positional system / V. P. Kurgan, K. V. Pavlovich, A. A. Pankin, P. A. Aleksandrovich // Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. – 2016. – Vol. 24, No. 1. – P. 116–121. – DOI 10.14498/tech.2016.1.%u.

22 **Priytkin, D. E.** The method of inverse problems of dynamics for the synthesis of the speed controller of the main electric locomotive /

Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 5. – С. 48–54. – ISSN 0136-3360.

23 Динамика электропривода с нечётким регулятором / С. В. Ланграф, А. И. Сапожников, А. С. Глазырин [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 168–173. – ISSN 1684-8519.

D. E. Pritykin // News of Higher Educational Institutions. Electromechanics. – 2012. – No. 5. – С. 48–54. – ISSN 0136-3360.

23 Dynamics of an electric drive with a fuzzy controller / S. V. Langraf, A. I. Sapozhnikov, A. S. Glazyrin [et al.] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2010. – Vol. 316, No. 4. – P. 168–173. – ISSN 1684-8519.

A. A. Agapov, A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF QUASI-OPTIMAL CONTROL LAWS USING FUZZY LOGIC APPARATUS IN TASKS OF INTELLECTUALIZATION OF TRANSPORT SYSTEMS

Abstract. The analysis of the control laws application developed on the basis of the method of quasi-optimal synthesis using the approach based on the condition of the maximum of the generalized power function using the apparatus of fuzzy logic in the problems of intellectualization of applied problems of control of transport systems on the railway is carried out. The schemes of the considered systems are constructed in the MATLAB Simulink environment, the Takagi-Sugeno fuzzy inference block is implemented in the Fuzzy Logic Designer. An analysis of the simulation results allows us to state that the proposed control law makes it possible to increase the efficiency of control in terms of speed and accuracy functional in comparison with the known solution based on the approach of differential games and the Pontryagin maximum principle in control problems for typical dynamic objects.

Keywords: control law, maximum condition for the generalized power function, fuzzy logic, Lagrange equations of the 2nd kind.

For citation: Agapov, A. A. Analysis of the efficiency of quasi-optimal control laws using fuzzy logic apparatus in tasks of intellectualization of transport systems / A. A. Agapov, A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 126–135. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_126.

Сведения об авторах

Агапов Александр Андреевич
ГТРК «Дон-ТР» (Филиал ФГУП ВГТРК),
инженер 1-й категории,
e-mail: agapov2794@gmail.com

Костоглотов Андрей Александрович
Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Связь на железнодорожном транспорте»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: kostoglotov@icloud.com

Лазаренко Сергей Валерьевич
Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Связь на железнодорожном транспорте»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: lazarenkosv@icloud.com

Information about the authors

Agapov Alexander Andreyevich
Don-TR (a Branch of RTR),
Engineer of 1st Category,
e-mail: agapov2794@gmail.com

Kostoglotov Andrey Alexandrovich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Communication on Railway Transport»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Chair,
e-mail: kostoglotov@icloud.com

Lazarenko Sergey Valerievich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Communication on Railway Transport»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: lazarenkosv@icloud.com