

19. *Shumskiy A.E.* Funktsional'noe diagnostirovanie nelineynykh dinamicheskikh sistem v usloviyakh parametricheskoy neopredelennosti modeley [Functional diagnosis of nonlinear dynamic systems under parametric uncertainty models], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1994, No. 3, pp. 184-188.
20. *Zhirabok A.N., Shumskiy A.E.* Metody i algoritmy funktsional'nogo diagnostirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Methods and algorithms of functional diagnostics of complex technical systems]. Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2007, 134 p.
21. *Kuz'min A.B.* Funktsional'noe diagnostirovanie tekhnicheskoy sistemy upravleniya [Functional diagnostics of the technical control system], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1994, No. 5, pp. 183.
22. *Blinov A.N., Osipov A.V.* Diagnostirovanie parametricheskikh otkazov metodami nechetkoy logiki [Diagnosis for parametric failures, methods of fuzzy logic], *X Mezhdunar. konf. po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [X international conference on soft computing and measurements], St.-Petersburg, 23–27 iyunya 2007, pp. 224-229.
23. *Zade L.A.* Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]. Moscow: Mir, 1976, 163 p.
24. *Kofman A.* Vvedeniye v teoriyu nechetkikh mnozhestv [Introduction to the theory of fuzzy sets]. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 432 p.
25. *Terano T., Asai K., Sugeno M.* Prikladnye nechetkie sistemy [Applied fuzzy systems]. Moscow: Mir, 1993, 368 p.
26. *Uskov A.A., Kuz'min A.V.* Intellektual'nye tekhnologii upravleniya. Iskusstvennye neyronnye seti i nechetkaya logika [Intelligent control technology. Artificial neural networks and fuzzy logic]. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom, 2004, 143 p.
27. *Bezmen G.V., Kolesov N.V.* Funktsional'noe diagnostirovanie lineynykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem nechetkogo analiza [Functional diagnosis of linear dynamic systems using fuzzy analysis], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2009, No. 5, pp. 67-73.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Обуховец.

Кондрашин Анатолий Васильевич – Ивановский государственный энергетический университет (ИГЭУ); e-mail: kav@dsn.ru; 153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34; тел.: 89203597271; кафедра автоматизации технологических процессов; к.т.н.; профессор.

Карасёв Виктор Сергеевич – ООО «ТеконАвтоматика»; e-mail: karasevvs@ivtecon.ru; Иваново, Подгорный пер., 5; тел. 89038796144; аспирант ИГЭУ.

Kondrashin Anatolij Vasil'evich – Ivanovo State Power Engineering University (ISPEU), e-mail: kav@dsn.ru; 34, Rabfakovskaya street, Ivanovo, 153003, Russia; phone: +79203597271; the department of automation of technological processes; cand. of techn. sc.; professor.

Karasyov Viktor Sergeevich – LLC «TekonAvtomatica»; e-mail: karasevvs@ivtecon.ru; 5, Podgornaya lane, Ivanovo, Russia; phone: +79038796144; postgraduate student of ISPEU.

УДК 621.337.1:681.326.3

DOI 10.18522/2311-3103-2016-8-88102

К.И. Юренко, Е.И Фандеев

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рассматриваются принципы построения систем автоведения подвижного состава железных дорог. Наиболее распространенным классом таких систем в нашей стране являются автономные бортовые системы автоведения. Их внедрение и эксплуатация позволяют повысить безопасность движения, энергоэффективность железнодорожного транспорта, улучшить условия труда локомотивных бригад. Анализируется история раз-

вития и структурно-функциональные схемы этих систем. Рассмотрены собственно программные устройства автовождения, которые включали от одной до трех программ движения, рассчитываемых предварительно в лабораторных условиях, а также современные двухконтурные системы, включающие регулятор скорости, регулятор времени хода и программный блок, предполагающие выполнение упреждающего тягового расчёта на борту в режиме реального времени. В векторной форме представлена формальная постановка задачи оптимального управления движением поезда. Наиболее распространенным критерием оптимальности в такой задаче является минимум расхода электроэнергии на тягу. Указаны основные подходы, используемые для её решения различными научными школами – на основе классического вариационного исчисления, принципа максимума и динамического программирования. Отмечаются их достоинства и недостатки. Приведен граф допустимых переключений оптимальных режимов ведения поезда. Предлагается подход к исследованию бортовых систем автоведения, который основан на выполнении вычислительных экспериментов с имитационной моделью. Такая модель разработана авторами в среде блочного визуально-ориентированного моделирования Simulink матричной системы компьютерной математики Matlab и позволяет исследовать алгоритмы работы систем автоведения поездов с целью их совершенствования. Представлена её структура и пример использования для расчета кривых движения поезда.

Автоведение; подвижной состав; энергооптимальное управление; программа движения; структурно-функциональная схема; программно-аппаратный комплекс; имитационное моделирование.

K.I. Yurenko, E.I. Fandeev

PRINCIPLES OF DESIGN AND SIMULATION MODELING OF SYSTEMS OF ELECTRIC ROLLING STOCK AUTOMATIC DRIVING

The article considers the principles of design of railway rolling stock automatic driving systems. The most widespread class of such systems in our country is the autonomous on-board automatic driving systems. Their implementation and application allow increasing the safety and energetic efficiency of rail transport, improving the working conditions of locomotive crews. Analyzed are the history of development and structural functional schemes of these systems. Considered are the programmed devices of automatic driving, which include one to three programs of traffic, calculated previously in the laboratory, and also the modern dual circuit systems comprising the speed controller, the time of motion controller and the program block assuming an implementation of the proactive traction calculation on-board in real time. A formal statement of the optimal control problem for the train motion is presented in a vector form. The most common optimality criterion in this problem is the minimum power consumption on traction. Shown are the main approaches proposed by different scientific schools, i.e. the classical calculus of variations, maximum principle and dynamic programming. Their advantages and disadvantages are marked. Shown is the graph of the allowable shifts of the train motion optimal regimes. We propose an approach to the study of on-board automatic driving which is based on the execution of computational experiments with simulation model. This model is developed by the authors in the environment of visual block-oriented modeling Simulink in the matrix system of computer mathematics Matlab and allows investigating the algorithms of automatic driving trains with a view of their improvement. Its structure and an example of the train motion curve calculation are presented.

Autodriver; rolling-stock; energy optimal control; program of motion; structural-functional scheme; soft-hardware complex; simulation modeling.

Введение. Системы автоматизированного ведения поезда, называемые иногда "автомашинист", предназначены для управления подвижным составом, обеспечивающим реализацию всех режимов его движения: пуск и разгон, выбор и поддержание оптимальной скорости, переход на выбег, торможение с целью выполнения скоростных ограничений, подтормаживание на спусках, прицельное остановочное торможение на станции, а также реакцию на запрещающие и ограничивающие сигналы светофоров [1–6].

Использование таких систем на железнодорожном транспорте позволяет повысить точность исполнения графика и безопасность движения посредством уменьшения ошибок и рисков, связанных с человеческим фактором, обеспечить снижение расхода электроэнергии и топливных ресурсов, уменьшить износ подвижного состава за счёт применения оптимальных режимов ведения поезда, а также улучшить условия труда локомотивных бригад и создать предпосылки к переходу на управление "в одно лицо" путем автоматизации функций управления локомотивом. При этом, контроль за осуществлением технологического процесса ведения поезда остается за машинистом, который имеет возможность в любой момент перейти к режиму ручного управления, что существенно повышает надежность сложной динамической системы "человек-поезд". В конечном итоге повышается пропускная способность железных дорог и интенсивность движения. Внедрение вместе с системами автоведения регистраторов параметров движения и использование в депо автоматизированных рабочих мест для расшифровки регистрируемых параметров позволяет повысить уровень контроля за эксплуатацией подвижного состава и учета расхода топливно-энергетических ресурсов.

Указанные выше системы, осуществляющие автоматизированное ведение поезда во взаимодействии с другими бортовыми системами локомотива (тяги, торможения, безопасности и некоторые другие) без непосредственной связи с центром управления, принято называть автономными. Вместе с тем, одним из направлений повышения эффективности работы железнодорожного транспорта является внедрение централизованных систем автоведения, когда в центре управления осуществляется расчет программ движения всех поездов на участке обслуживания, сбор информации об их местоположении и посылка команд управления в режиме реального времени. Такой подход используется, например, для управления поездами метрополитена, на железных дорогах ряда зарубежных стран и некоторых дорогах России (в частности, на поездах пригородного движения в г. Сочи и скоростной линии "Москва-Санкт-Петербург") [7]. Это достигается за счёт эффективного оперативного управления перевозочным процессом (в частности, система "автодиспетчер-автомашинист") на базе главного и региональных информационно-вычислительных центров РЖД, а также дорожных центров управления перевозками.

Однако, следует отметить, что на значительной части российских железных дорог (Сибирь, Дальний Восток и некоторых других регионов) использование централизованных систем серьёзно затруднено в связи с большой протяженностью их участков обслуживания, а также сложными природными и погодными условиями. Поэтому развитие и совершенствование бортовых систем автоведения для отечественного подвижного состава долгие годы продолжает оставаться актуальной научно-технической проблемой, на решение которой направлены исследования ученых и специалистов отраслевых предприятий РЖД, научно-исследовательских и опытно-конструкторских организаций, связанных с железнодорожным транспортом, а также вузов.

Первый этап развития системы "автомашинист" был связан с созданием собственно программных устройств для автоматического вождения поездов в 70–80-х годах прошлого века. Особенности их построения являлись следующее: во-первых, электроподвижной состав того времени преимущественно имел ступенчатое регулирование силы тяги с применением релейно-контакторной аппаратуры, а во-вторых, существующая на тот момент элементная база не позволяла реализовать на борту в режиме реального времени сколько-нибудь сложные алгоритмы управления. Поэтому создаваемые ранее системы были собственно программными, когда автоматизированное ведение поезда осуществлялось по заранее рассчитанным в лабораторных условиях программам движения, заносимым в бортовую память. По числу таких программ они подразделялись на одно-, двух- и трехпрограммные [1].

Анализ существующих систем. Основной программой являлась зависимость времени хода от пути $t_n(s)$, а главной функцией устройства автоведения – корректировка режимов ведения поезда с учетом отклонения фактического времени хода от программного, что выражалось в выборе номера позиции управления тягой, переходе на выбег или включении тормозов. Для улучшения качества управления, помимо указанных зависимостей вводились дополнительные программы: $N(s)$ и $v(s)$ – программные позиция и скорость, а также программа скорректированных позиций $N_k(s)$ для компенсации опоздания поезда, рассчитываемая предварительно как рациональная по энергопотреблению. Этот подход был реализован в трехпрограммной системе САПВ1 Московского института инженеров транспорта (МИИТ) для пассажирского поезда с электровозом ЧС2 [8], в которую также были введены программа допустимой скорости $v_{дон}(s)$ и признаки прицельного торможения Π_T и торможения в конце блок-участка $\Pi_{бу}$. С целью повышения точности выполнения графика движения путем более гибкой коррекции позиции управления была разработана система САВП2, упрощенная функциональная схема которой показана на рис. 1.

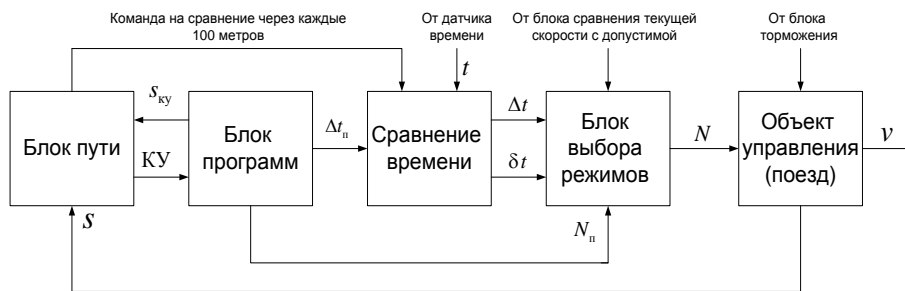


Рис. 1. Функциональная схема одноконтурной САВП2

Она относится к классу автономных двухпрограммных систем с программой времени хода $t_n(s)$ и позиций управления $N(s)$. Алгоритм системы предполагает коррекцию программных позиций управления пропорционально рассогласованию по времени и его приращению. Для каждого контрольного участка в блоке программ записывается его длина $s_{ку}$ и определяется среднее время хода. Данные обновляются по сигналу конец контрольного участка (КУ) через каждые 100 м. В блоке сравнения времени хода вычисляются действительные отклонения от графика движения Δt и приращение времени хода δt на каждом КУ, равное разности между фактическим и программным временем хода по этому участку. В блоке выбора режимов на основании Δt , δt и N_n определяется номер позиции управления:

$$N = N_n + k_1 \Delta t + k_2 \delta t.$$

Данный способ коррекции позиции управления позволяет снизить перерегулирование относительно способа регулирования только по величине и сократить число переключений позиций управления Δt . Вычисление программ движения осуществлялось предварительно на основе оптимального тягового расчёта, а также методом динамического программирования по критерию минимума расхода электроэнергии на тягу [8–11].

По аналогичным принципам строились системы автоведения пригородных и грузовых поездов, особенности которых были связаны со спецификой объекта управления. Для пригородных поездов характерны трехрежимные программы движения (тяга-выбег-торможение), которые определяют моменты переключения указанных режимов, а функции устройства заключаются в их коррекции в зависимости от отклонения программных и фактических параметров движения (прежде всего, времени хода). Особенностью двухпрограммного автоведения грузовых поездов являлось то, что машинист должен был выбирать один из режимов, соответствующий массе поезда, поскольку этот параметр в значительной степени определяет характеристики объекта управления, а также выполнять управление некоторыми режимами движения в ручном режиме (в частности, разгон поезда по условиям сцепления). Таким образом, первый этап дал необходимую научную и техническую базу для создания и внедрения устройств автоведения поездов, однако, как отмечалось выше, существенно сдерживался развитием элементной базы.

Дальнейшее совершенствование систем автоведения обусловлено появлением новой микропроцессорной элементной базы, позволяющей выполнять на борту локомотива в режиме реального времени энергооптимальный тяговый расчёт. На этом этапе системы автоведения создавались для подвижного состава как со ступенчатым, так и с плавным регулированием сил тяги и электрического торможения. Кроме того, оборудование современных локомотивов регуляторами скорости позволило унифицировать функциональные блоки системы независимо от принципа регулирования силы тяги локомотива.

В таком виде система управления, представленная на рис. 2, является двухконтурной. Она содержит нижний уровень – контур регулирования скорости, реализуемый в зависимости от особенностей локомотива (в этом случае формируется уставка тока I при непрерывном регулировании сил тяги и электрического торможения или номер позиции управления N – при ступенчатом), и унифицированный верхний уровень – регулятор времени хода и программный блок. Регулятор времени хода на основе программы $u(s)$ с учетом ограничений скорости, считываемых из базы данных (БД) участка обслуживания $v'_{огр}$ и формируемых на основе кодов автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) $v''_{огр}$, определяет заданную скорость движения v_3 , а при необходимости и код режима движения R (тяга, выбег, торможение).

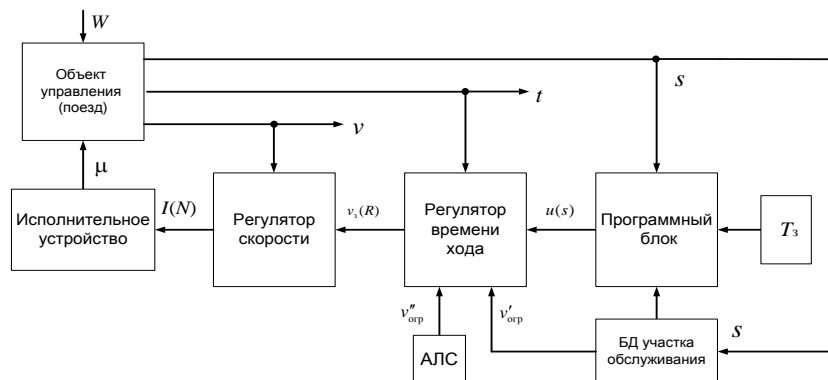


Рис. 2. Функциональная схема двухконтурной системы автоведения

Программный блок может как хранить в памяти предварительно рассчитанные программы движения $u(s)$, так и осуществлять их вычисления в режиме реального времени на основе результатов упреждающего энергооптимального тягового расчёта или других методов, исходя из заданного времени хода по перегону T_3 . Данный подход позволяет компенсировать отклонения времени хода от программного вследствие неконтролируемых возмущений W путем постоянного пересчета программы в процессе движения поезда [1]. Такой расчёт требует постановки и решения задачи оптимального управления движением поезда.

Постановка задачи. Рассматриваемый объект управления – поезд, может быть описан в фазовом пространстве системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\dot{x} = f(x, \mu, w, t), \quad t \in [t_0, t_K], \quad x(t_0) = x_0, \quad x(t_K) = x_K,$$

где x, x_0 и x_K – векторы фазовых координат объекта управления, его начальных и конечных состояний; μ – вектор управляющих воздействий; w – вектор возмущений; t – текущее время; f – заданная вектор-функция, определяющая дифференциальные связи между указанными векторными переменными; t_0 и t_K – начальный и конечный моменты времени, соответствующие началу и окончанию рассматриваемого процесса движения системы (например, начало движения из пункта назначения и остановка поезда в конечном пункте следования) и переходу в состояние x_K . Управляющие воздействия μ определяются программой управления u :

$$\mu = \mu(u_k, t), \quad t \in [t_k, t_{k+1}],$$

где $u_k = u(s)$ – вектор параметров программы управления, определяющей режимы движения поезда (тяга, выбег, торможение), а также их параметры (например, процент полной тяги или тяговая позиция, положение тормозного крана машиниста или давление в тормозных цилиндрах и т.д.), в функции пути, значения которых остаются неизменными на интервале $[t_k, t_{k+1}]$, $k = 1, 2, \dots, K$ – последовательность дискретных моментов времени. Оператор, формально описывающий формирование вектора оптимального управления, имеет вид $u(s) = \Omega(x, w, t_x, y)$, где t_x – оставшееся время хода по перегону; y – условия движения (ограничения по скорости, ускорению, сцеплению, параметры подвижного состава и т.д.). Программа движения рассчитывается с учетом необходимости минимизации функционала, определяющего качество управления $J(u) \Rightarrow \min$ – это, чаще всего, минимум расхода электроэнергии A .

В соответствии с основными положениями теории электрической тяги [12] могут быть определены следующие компоненты введенных векторов x , μ и w , схематично изображенные на рис.3: $x_1 = v$ – скорость движения, $x_2 = s$ – пройденный путь (или текущая железнодорожная координата поезда); $x_3 = A$ – суммарный расход электроэнергии на тягу; $\mu_1 = F$ и $\mu_2 = R$ – соответственно регулируемые силы тяги и электрического (рекуперативного или реостатного торможения), которые изменяются в диапазонах, определяемых тяговыми характеристиками подвижного состава, а также допустимыми ускорениями, продольно-динамическими реакциями в поезде и т.д., обуславливающими ограничения на управляющие воздействия, т.е. $R \in R(v)$ и $F \in F(v)$; $\mu_3 = B_m(P_{m_i})$ – регулируемая сила электропневматического (пневматического) торможения, зависящая от давления в тормозных цилиндрах и ограниченная характеристиками тормозного оборудования, а также

правилами его эксплуатации $B_T \in B_{T\text{доп}}$; $w_1 = w_o(v)$ – удельное основное сопротивление движению, зависящее от скорости и вычисляемое по эмпирическим соотношениям вида $w_o(v) = av^2 + bv + c$ (здесь a , b , c – коэффициенты полинома, определяемые экспериментальным путем и выбираемые для конкретного типа подвижного состава на основе правил тяговых расчётов); $w_2 = w_d(s)$ – удельное дополнительное сопротивление движению, зависящее от текущего положения поезда и рассчитываемое как сумма сопротивлений $w_d = i + w_{кр}(R)$, определяемых величиной уклона i и радиусом кривой пути R в точке пути s .

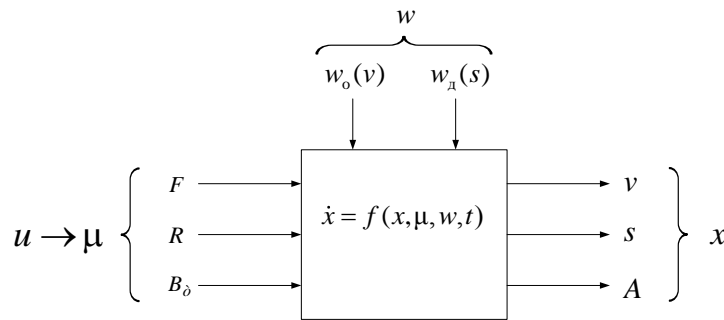


Рис. 3. Функциональная схема объекта управления

В соответствии с введенными обозначениями система дифференциальных уравнений движения поезда может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = x_1, \\ (1 + \gamma)\dot{x}_1 = \frac{\mu_1 - \mu_2 - \mu_3}{m} - w_1 - w_2, \end{cases}$$

где γ – коэффициент инерции вращающихся частей поезда, а m – его масса. Расход энергии в момент времени t_k определяется интегралом

$$x_3(u_k, t_k) = A_F - A_R = \int_{t_0}^{t_k} \left(\frac{\mu_1 x_1}{\eta_F} - \mu_2 x_1 \eta_R \right) dt,$$

где A_F и A_R – соответственно расход энергии на тягу и возврат при рекуперации, а η_F и η_R – к.п.д. в режимах тяги и рекуперации.

Целью управления является перевод системы из начального состояния x_0 в момент времени t_0 в требуемое состояние x_k за заданное время T_3 , что с учетом практики ведения поездов можно представить как условие обеспечить выполнение графика движения с требуемой точностью, т.е. $|T_3 - t_k| \leq \Delta t$, где Δt – допустимое отклонение от графика, обеспечив при этом минимум функционалу $J = x_3(u, t_k) \Rightarrow \min$.

С учетом вышеизложенного, актуальной проблемой является обоснованный выбор метода решения задачи вычисления энергооптимальной программы движения в рассмотренной постановке. Одной из первых работ, посвященных данной проблеме, была [13]. Аналитический метод решения рассматриваемой задачи, предложенный в [14] основан на предположении, что отношение расхода энергии к времени движения поезда по участкам должно быть постоянным на всем перегоне. При этом

решение сводится к частным случаям определения условий для переключения режимов движения, таких, например, как переход из режима тяги на выбег. Для общего случая поиска энергооптимальной программы движения были разработаны методики численного решения задачи на основе метода динамического программирования [1, 15]. Адаптация данного метода для современных типов локомотивов предложена в [16]. Данный метод эффективен при применении в лабораторных условиях с использованием рабочей станции и высокоуровневых средств программирования, при этом требует существенных вычислительных ресурсов и объема памяти, в связи с чем его использование для расчёта программ движения на борту затруднено.

Поэтому учеными и специалистами проведены многочисленные исследования для поиска других подходов к решению задачи расчёта оптимальных программ. В работе [17] с использованием аппарата вариационного исчисления был обоснован выбор оптимальных режимов ведения поезда с тепловозной тягой и предложен алгоритм управления движением. Используя необходимые условия оптимальности в форме уравнения Эйлера, автор доказывает, что при допущении о неизменности к.п.д. экстремальным является движение с постоянной скоростью. На основе данного предположения и некоторых эвристических правил был предложен регулятор времени хода поезда.

К недостаткам классических вариационных методов принято относить трудности их использования при ограничениях на управление и фазовые координаты. Поэтому научной школой МИИТа было всесторонне исследовано решение задачи расчёта оптимальных программ ведения поезда на основе принципа максимума Понтрягина и его обобщений для случаев с различными видами ограничений [1, 15, 18]. В результате были обоснованы оптимальные режимы ведения поезда, исследована структура оптимальной траектории, получены приближенные расчётные соотношения для определения их последовательностей и условий перехода с одного режима движения на другой при некоторых допущениях. На основе результатов этих исследований был предложен алгоритм, реализуемый с помощью бортовой ЭВМ.

Дальнейшее обобщение этих результатов получено в работах [15, 19], где исследовалась задача энергооптимального управления применительно к поезду метрополитена типа "Русич" с плавным регулированием сил тяги и рекуперативным торможением. Был предложен эмпирический алгоритм, позволяющий определять при заданном времени хода энергоэффективные программы управления движением поезда на перегонах.

Учеными Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) был разработан численно-аналитический метод решения задачи [20] на основе подходов, сходных с идеями метода последовательных приближений Крылова-Черноусько [21]. Он основывается на доказательстве общего принципа построения допустимой улучшающей вариации управления – принципе декомпозиции по времени [22]. При этом используется метод последовательных приближений, в котором на каждом шаге вычислительного процесса строится допустимое решение задачи с расходом энергии меньшим, чем на предыдущем приближении. Последовательность режимов управления при данном способе неизвестна заранее, а уточняется в процессе вычислений на каждом шаге. Это позволяет учитывать сложные сочетания условий задачи. Полученные алгоритмы и программное обеспечение были использованы при создании систем автоведения УСАВП [2]. Заслуживают внимания также другие подходы, в частности, предложенный в работе [23].

Многочисленные исследования рассматриваемой задачи выполнены и за рубежом [24–29]. Так, в работе [24] решается задача оптимального вождения дизель-локомотивов General Electric. Она решается как конечномерная задача математи-

ческого программирования большой размерности путем использования мощных вычислительных систем, установленных в центре управления и их взаимодействия с бортовой системой локомотива. Использование идей эволюционного программирования рассмотрено в работе [25].

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования отечественных и зарубежных ученых, а также обобщение опыта рационального вождения, накопленного машинистами, позволяют составить граф допустимых переключений оптимальных режимов, показанный на рис. 4 [30], где приняты следующие обозначения режимов движения поезда: разгон с максимально допустимым ускорением (максимальная тяга) – ТГ; движение в режиме стабилизации (с постоянной скоростью) в тяге – С; движение по инерции (выбег) – ВБ; движение по инерции с подтормаживанием на уклоне с поддержанием максимально допустимой на данном участке пути постоянной скорости – СТ; торможение с максимально допустимым замедлением – ТМ. Для подвижного состава с рекуперативным тормозом следует добавить режимы стабилизации скорости – СР и торможения с максимальной интенсивностью с помощью рекуперативного тормоза – РК.

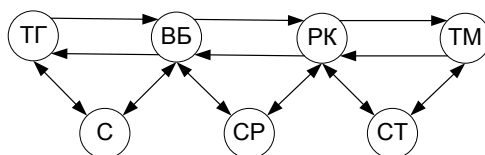


Рис. 4. Граф допустимых переключений оптимальных режимов

При этом, как показывают результаты эксплуатации существующих систем автоведения, возможности совершенствования их структуры и функций, методов расчёта оптимальных программ ведения поездов ещё не исчерпаны [31]. Это обусловлено сложностью рассматриваемой проблемы, прежде всего, большим количеством случайных факторов, влияющих на процесс движения, связанных как с внешней средой, так и с характеристиками и состоянием подвижного состава. В тоже время, современные возможности вычислительной техники и программных средств позволяют исследовать системы автоведения с помощью технологии имитационного моделирования [32, 33]. Это дает возможность применить вычислительный эксперимент для решения рассматриваемой задачи. В настоящее время учеными и инженерами стала широко использоваться среда блочного имитационного моделирования сложных динамических систем и устройств Simulink с применением современной технологии визуально-ориентированного программирования и имитационного моделирования. Указанная среда является одним из основных компонентов матричной системы компьютерной математики Matlab.

Авторами статьи с использованием средств библиотеки блоков Simulink была разработана имитационная модель движения поезда, функциональная схема которой представлена на рис. 5.

Она включает в себя подсистемы тяги, торможения, расчёта основного и дополнительного сопротивлений движения, сцепления, механического движения поезда, регуляторов скорости и времени хода, а также блоки ввода исходных данных, управления вычислительным экспериментом и визуализации результатов. Моделирование различных режимов ведения поезда позволяет исследовать и оптимизировать работу бортовой системы автоведения. В частности, модель может использоваться для сравнения различных структур и параметров систем автоведения, моделирования интеллектуальных функций системы, выполнения вариантных тяговых расчётов с учетом большого числа факторов, в том числе, изменений параметров внешней среды.

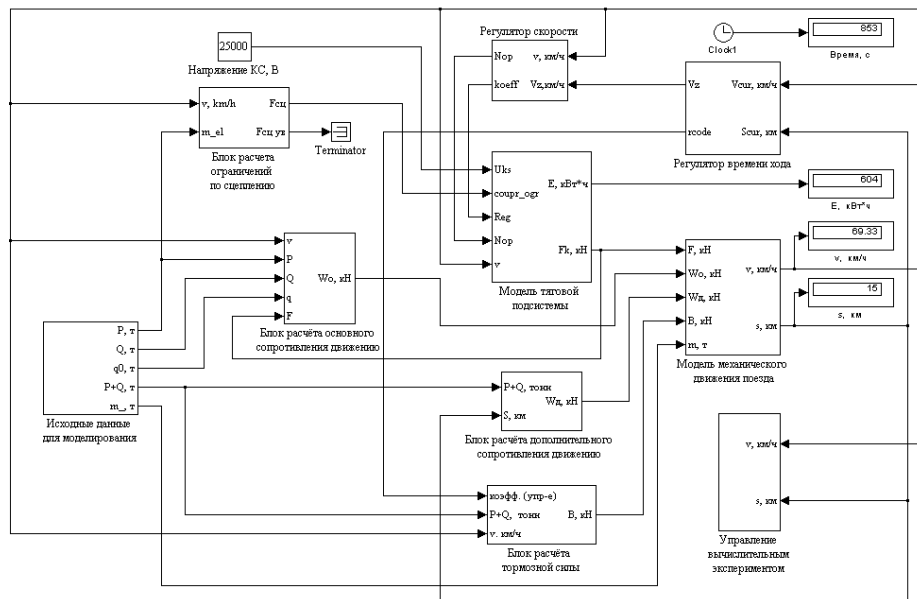


Рис. 5. Функциональная схема системы автоведения в среде Matlab/Simulink

В качестве примера её использования рассмотрим расчёт на основе вычислительного эксперимента траектории движения грузового поезда с локомотивом типа 2ЭС5К и массой 3600 тонн по участку пути длиной 14,5 км и профилем пути, данные о котором представлены в табл. 1, под управлением разработанной системы автоведения. Для проведения расчётов использовался метод Рунге-Кутты 4-го порядка, реализованный в системе Matlab [34]. График скорости, полученный в результате вычислительного эксперимента, представлен на рис. 6. Время хода составило 909 с, а расход энергии – 1057 кВт·ч. Время счета зависит от используемого численного метода, заданного шага интегрирования, производительности рабочей станции и в среднем составляет несколько секунд.

Таблица 1

Профиль пути на участке

№	Координата начала элемента пути, км	Длина элемента, м	Значение уклона, %
1	0	2500	0
2	2,5	5500	8
3	8,0	3000	0
4	11,0	1500	-1,5
5	12,5	2000	0

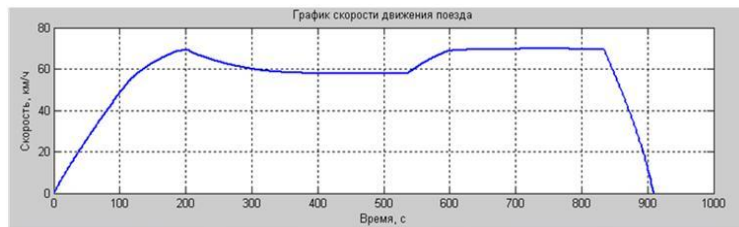


Рис. 6. График скорости движения поезда

Таким образом, вычислительный эксперимент с разработанной имитационной моделью позволяет исследовать режимы движения поезда с определением расхода энергии и времени хода при различных структуре и параметрах модели системы автоведения, что способствует решению задачи совершенствования её алгоритмов работы и функций в лабораторных условиях. Разработанные блоки регуляторов скорости и времени хода могут быть реализованы в виде аппаратно-программного комплекса на борту локомотива.

Выводы:

1. Бортовые системы автоведения подвижного состава железных дорог прошли путь от собственно программных устройств управления до систем, предполагающих вычисление оптимальных программ движения на борту локомотива в режиме реального времени на основе упреждающего энергооптимального тягового расчёта. Современные системы автоведения являются чаще всего двухконтурными и содержат регулятор скорости, регулятор времени хода и программный блок. Задача синтеза такой системы заключается в выборе структуры и алгоритмов работы указанных блоков.

2. Рассмотренная постановка задачи поиска оптимальных программ движения поезда допускает использование различных методов решения задачи, среди которых наиболее известны методы динамического программирования, вариационное исчисление, принцип максимума Понтрягина, а также методы, основанные на идеях последовательного приближения.

3. Несмотря на многочисленные исследования и многообразие используемых методов расчёта оптимальных программ движения возможности совершенствования программно-алгоритмического обеспечения систем автоведения поездов не исчерпаны. Эффективным средством исследования указанных систем, их структуры и параметров, является имитационное моделирование в среде Matlab/Simulink.

4. Разработанная имитационная модель бортовой системы автоведения может использоваться для построения кривых движения поезда, выполнения вариантных тяговых расчётов с учетом большого числа факторов, а также изменений параметров внешней среды; для сравнения различных структур и параметров систем. Разработанные блоки регуляторов скорости и времени хода могут быть реализованы в виде аппаратно-программного комплекса на борту локомотива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов Л.А. [и др]. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / под. ред. Л.А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
2. Донской А.Л., Завьялов Е.Е. Системы автоведения и регистрации для электропоездов пассажирского движения // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 9. – С. 9-12.
3. Fujikura, Nohomi, Yasunobu et. al. Automatic Train Operation Method // The Proceedings of The Inst.of Electrical Engineers of Japan, 1977. – P. 2205-2206.
4. Ning B. et. al. Advanced train control systems. – UK: WITPress, 2010. – 153 p.
5. Юренко К.И., Юренко И.К. Системы автоведения электроподвижного состава. Принципы построения и варианты реализации // Вестник Восточноукраинского нац. ун-та им. Вл. Даля. – 2008. – № 5 (123). Ч. 2. – С. 68-70.
6. Юренко К.И. Пути совершенствования бортовых систем автоведения локомотивов // Академические фундаментальные исследования молодых ученых России и Германии в условиях глобального мира и новой культуры научных публикаций: Сб. матер. междунар. молодёж. конф. – Новочеркасск, 4-5 октября 2012 г. ЮРГТУ (НПИ), ЛИК, 2012. – С. 404-406.
7. Розенберг Е.Н., Астрахан В.И. Задачи системы управления и обеспечения безопасности движения поездов (СУОБДП) по информационной и технологической поддержке функционирования ИСУЖТ // Труды первой НТК «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте ИСУЖТ-2012» г. Москва, МГУПС, 15-16 ноября 2012. – С. 34-37.

8. *Фаминский Г.В., Ерофеев Е.В.* Автоматические устройства для вождения поездов. – М.: Транспорт, 1978. – 103 с.
9. *Ерофеев Е.В.* Выбор оптимального режима ведения поезда на ЭЦВМ с применением метода динамического программирования // Труды МИИТ. – 1967. – Вып. 228. – С. 16-30.
10. *Ерофеев Е.В., Мостов И.С.* Оптимизация программ движения поездов // Труды МИИТ. – 1977. – Вып. 550. – С. 121-125.
11. *Сидельников В.М.* Выбор оптимального режима управления локомотивом с использованием ЭЦВМ // Вестник ЦНИИ МПС. – 1965. – № 2. – С. 52-58.
12. *Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н., Озеров М.И.* Теория электрической тяги. – М.: Транспорт, 1995. – 249 с.
13. *Ishikawa K.* Application of optimization theory for bounded state variable problems to the operation of trains // Bull. ISME – Nagoya Univ. – 1968. – Vol. 11, No. 47. – P. 857-865.
14. *Розенфельд В.Е., Палей Д.А.* Аналитический метод проведения на ЭЦВМ тягового расчёта при заданном времени хода и минимальном расходе электроэнергии // Вестник ВНИИЖТ. – 1974. – № 1. – С. 10-15.
15. *Баранов Л.А., Ерофеев Е.В., Мелёшин И.С., Чинь Л.М.* Оптимизация управления движением поездов. – М.: МИИТ, 2011. – 164 с.
16. *Юренко К.И.* Расчёт энергооптимальных режимов движения перспективного подвижного состава методом динамического программирования // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 3. – С. 78-82.
17. *Петров Ю.П.* Оптимальное управление движением транспортных средств. – Л.: Энергия, 1969. – 95 с.
18. *Головичер Я.М.* Оптимальное управление тяговым подвижным составом в системах автоведения магистральных железных дорог: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.07. – М., 1994. – 346 с.
19. *Баранов Л.А.* Модели и методы синтеза микропроцессорных систем автоматического управления скоростью электроподвижного состава с непрерывным управлением тягой // Вестник МИИТ. – 2004. – № 10. – С. 3-16.
20. *Мугинштейн Л.А., Илютович А.Е., Ябло И.А.* Энергооптимальные методы управления движением поездов // Сб. научн. тр. ОАО «ВНИИЖТ». – М.: Интекст, 2012. – 80 с.
21. *Крылов И.А., Черноусько Ф.Л.* Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления // Вычислительная математика и математическая физика. – 1972. – № 12. – С. 14-34.
22. *Илютович А.Е.* Выбор вариации спуска в задаче оптимального управления со смешанными ограничениями. Декомпозиционный подход // Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 9. – С. 103-114.
23. *Пицхопов В.Х., Гайдук А.Р., Медведев М.Ю.* Оптимизация движения поезда по критерию энергозатрат // Труды первой научно-технической конференции «ИСУЖТ-2013» г. Москва, 21-22 октября 2013 г. Ч. 1. – С. 89-92.
24. *Haupt P.K., Bonnani P.G., Chan D.S., Chandra R.S., Kalyanam K.* Optimal Control of Heavy-Haul Freight Trains to Save Fuel. // University of California at Santa Barbara, Winter 2009 Seminar. – P. 1033-1040.
25. *Seong H., Yun Sub B., Jong Hyen B., Tae Ki A., Su Gil L., Hyun Jun P.* An optimal automatic train operation (ATO) control using genetic algorithms (GA) // Proceedings of IEEE. Region 10 Conference. TENCON 99. "Multimedia Technology for Asia-Pacific Information Infrastructure". Vol. 1: IEEE Inst. Electron Eng. Korea., 1999.
26. *Chen, Y.-J., Yu J.-A., Zhou L.-S., Tao Q.* Study on the algorithm for train operation adjustment based on ordinal optimization // Advances in Mechanical Engineering. – Vol. 2013. – 8 p.
27. *Leander P., Lagos M., Karlsson M., Rydberg S.* Computer aided train operation // CATO. ИИНА. Kiruna. 2007. – P. 423-432.
28. *Coleman D., Yee R., Pudnev P.* Saving fuel on long-haul trains // Australian stage 2 train results, ИИНА. Rio de Janeiro. – 2005. – P. 1-5.
29. *Benjamin B., Howlett P., Vu X.* Freightmaster: optimal speed profiles for long haul trains // Proceedings of the 10th International Conference in Application of Advanced Technologies in Transportation. 27-30 May, 2008. – Athens, Greece. – P. 1-12.

30. Пудовиков О.Е. Автоматическое управление скоростью грузового поезда с электровозом, допускающим плавное управление силами тяги и электрического торможения: дис. ... д-ра. техн. наук : 05.13.06, 05.22.07. – М., 2011. – 291 с.
31. Климович А.В. Оптимизация управления движения поезда по минимуму затрат энерго-ресурсов на тягу. – М.: Компания Спутник+, 2008. – 263 с.
32. Юренко К.И., Фандеев Е.И. Компьютерная модель и программно-аппаратные средства бортовой системы автоматизированного ведения поезда // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 5 (130). – С. 51-56.
33. Юренко К.И., Савоськин А.Н., Фандеев Е.И. Математическое моделирование энергооптимальных режимов ведения поезда с учетом возмущений // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 34-44.
34. Dormand J.R., Prince P.J. Runge-Kutta triples // *Comp. & Maths. with Appls.* – 1986. – No. 21A. – P. 1007-1017.

REFERENCES

1. Baranov L.A. [i dr]. Mikroprotsessornye sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava [Microprocessor system of automatic electric rolling stock], ed. by L.A. Baranova. Moscow: Transport, 1990, 272 p.
2. Donskoy A.L., Zav'yalov E.E. Sistemy avtovedeniya i registratsii dlya elektrovozov passazhirskogo dvizheniya [Automatic driving system for electric locomotives for passenger transportation], *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport], 2005, No. 9, pp. 9-12.
3. Fujikura, Nohomi, Yasunobu et. al. Automatic Train Operation Method, *The Proceedings of The Inst. of Electrical Engineers of Japan, 1977*, pp. 2205-2206.
4. Ning B. et. al. Advanced train control systems. UK: WITPress, 2010, 153 p.
5. Yurenko K.I., Yurenko I.K. Sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava. Printsipy postroeniya i varianty realizatsii [Automatic driving system of electric rolling stock. The principles of construction and realization], *Vestnik Vostochnoukrainskogo nats. un-ta im. Vl. Dal'ya* [Bulletin of East Ukrainian national University named after Volodymyr Dahl], 2008, No. 5 (123), Part 2, pp. 68-70.
6. Yurenko K.I. Puti sovershenstvovaniya bortovykh sistem avtovedeniya lokomotivov [Ways of improving on-board systems of the automatic train locomotives], *Akademicheskie fundamental'nye issledovaniya molodykh uchenykh Rossii i Germanii v usloviyakh global'nogo mira i novoy kul'tury nauchnykh publikatsiy: Sb. mater. mezhdunar. molodezh. konf* [Academic fundamental research of young scientists of Russia and Germany in a global world and a new culture of scientific publications: proceedings of international youth conference]. Novocherkassk, 4-5 October 2012. YuRGU (NPI), LIK, 2012, pp. 404-406.
7. Rozenberg E.N., Astrakhan V.I. Zadachi sistemy upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov (SUOBEP) po informatsionnoy i tekhnologicheskoy podderzhke funktsionirovaniya ISUZhT [The tasks of the system control and safety of movement of trains (SOBEP) at information and technology to support the operation of ISUIT], *Trudy pervoy NTK «Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte ISUZhT-2012» g. Moskva, MGUPS, 15-16 noyabrya 2012* [Proceedings of the first NTK "Intelligent control systems for railway transport of ISWET-2012" Moscow, Moscow state railway University, 15-16 November 2012], pp. 34-37.
8. Faminskiy G.V., Erofeev E.V. Avtomaticheskie ustroystva dlya vozhdeniya poezdov [Automatic device for driving trains]. Moscow: Transport, 1978, 103 p.
9. Erofeev E.V. Vybora optimal'nogo rezhima vedeniya poezda na ETsVM s primeneniem metoda dinamicheskogo programmirovaniya [The selection of the optimal mode of train on digital, using the method of dynamic programming], *Trudy MIIT* [Proceedings of the MIIT], 1967, Issue 228, pp. 16-30.
10. Erofeev E.V., Mostov I.S. Optimizatsiya programm dvizheniya poezdov [Optimization of train traffic], *Trudy MIIT* [Proceedings of the MIIT], 1977, Issue 550, pp. 121-125.
11. Sidel'nikov V.M. Vybora optimal'nogo rezhima upravleniya lokomotivom s ispol'zovaniem ETsVM [Selection of the optimal mode of locomotive control using digital], *Vestnik TsNII MPS* [Bulletin of TSNII MPs], 1965, No. 2, pp. 52-58.
12. Rozenfel'd V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N., Ozerov M.I. Teoriya elektricheskoy tyagi [Theory of electric traction]. Moscow: Transport, 1995, 249 p.

13. *Ishikawa K.* Application of optimization theory for bounded state variable problems to the operation of trains, *Bull. ISME – Nagoya Univ.*, 1968, Vol. 11, No. 47, pp. 857-865.
14. *Rozenfel'd V.E., Paley D.A.* Analiticheskiy metod provedeniya na ETsVM tyagovogo rascheta pri zadannom vremeni khoda i minimal'nom raskhode elektroenergii [Analytical method for conducting digital traction calculation at any given time speed and minimum power consumption], *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1974, No. 1, pp. 10-15.
15. *Baranov L.A., Erofeev E.V., Meleshin I.S., Chin' L.M.* Optimizatsiya upravleniya dvizheniem poezdov [Optimization of train traffic control]. Moscow: MIIT, 2011, 164 p.
16. *Yurenko K.I.* Raschet energooptimal'nykh rezhimov dvizheniya perspektivnogo podvizhnogo sostava metodom dinamicheskogo programmirovaniya [Calculation energoortalyk driving modes promising rolling stock dynamic programming method], *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2013, No. 3, pp. 78-82.
17. *Petrov Yu.P.* Optimal'noe upravlenie dvizheniem transportnykh sredstv [Optimal control of vehicle movements]. Leningrad: Energiya, 1969, 95 p.
18. *Golovicher Ya.M.* Optimal'noe upravlenie tyagovym podvizhnym sostavom v sistemakh avtovedeniya magistral'nykh zheleznykh dorog: dis. ... d-ra. tekhn. nauk [Optimum management of traction rolling stock in the system automatic trunk railway. Dr. eng. sc. diss.]: 05.22.07. Moscow, 1994, 346 p.
19. *Baranov L.A.* Modeli i metody sinteza mikroprotsessornykh sistem avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu elektropodvizhnogo sostava s nepreryvnym upravleniem tyagoy [Models and methods for the synthesis of microprocessor systems of automatic control of speed of electric trains with a continuous control rod], *Vestnik MIIT* [Bulletin of Engineering], 2004, No. 10, pp. 3-16.
20. *Muginshteyn L.A., Ilyutovich A.E., Yabko I.A.* Energooptimal'nye metody upravleniya dvizheniem poezdov [Energopotrebleniye methods of train control], *Sb. nauchn. tr. OAO «VNIIZhT»* [Collection of scientific works of JSC "VNIIZHT"]. Moscow: Intekst, 2012, 80 p.
21. *Krylov I.A., Chernous'ko F.L.* Algoritm metoda posledovatel'nykh priblizheniy dlya zadach optimal'nogo upravleniya [The algorithm of the method of successive approximations for optimal control problems], *Vychislitel'naya matematika i matematicheskaya fizika* [Computational mathematics and mathematical physics], 1972, No. 12, pp. 14-34.
22. *Ilyutovich A.E.* Vybory variatsii spuska v zadache optimal'nogo upravleniya so smeshannymi ogranicheniyami. Deompozitsionnyy podkhod [The choice of variation of slope in the optimal control problem with mixed constraints. Decompositional approach], *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and Telemechanics], 1989, No. 9, pp. 103-114.
23. *Pshikhopov V.Kh., Gayduk A.R., Medvedev M.Yu.* Optimizatsiya dvizheniya poezda po kriteriyu energozatrat [Optimization of movement of trains on the criterion of energy consumption], *Trudy pervoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «ISUZhT-2013» g. Moskva, 21-22 oktyabrya 2013 g.* [Proceedings of the first scientific-technical conference "ISUIT-2013", Moscow, 21-22 October 2013]. Part 1, pp. 89-92.
24. *Houpt P.K., Bonnani P.G., Chan D.S., Chandra R.S., Kalyanam K.* Optimal Control of Heavy-Haul Freight Trains to Save Fuel, *University of California at Santa Barbara, Winter 2009 Seminar*, pp. 1033-1040.
25. *Seong H., Yun Sub B., Jong Hyen B., Tae Ki A., Su Gil L., Hyun Jun P.* An optimal automatic train operation (ATO) control using genetic algorithms (GA), *Proceedings of IEEE. Region 10 Conference. TENCN 99. "Multimedia Technology for Asia-Pacific Information Infrastructure". Vol. 1: IEEE Inst. Electron Eng. Korea.*, 1999.
26. *Chen, Y.-J., Yu J.-A., Zhou L.-S., Tao Q.* Study on the algorithm for train operation adjustment based on ordinal optimization, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2013, 8 p.
27. *Leander P., Lagos M., Karlsson M., Rydberg S.* Computer aided train operation, *CATO. IHHA. Kiruna. 2007*, pp. 423-432.
28. *Coleman D., Yee R., Pudnev P.* Saving fuel on long-haul trains, *Australian stage 2 train results, IHHA. Rio de Janeiro, 2005*, pp. 1-5.

29. Benjamin B., Howlett P., Vu X. Freightmaster: optimal speed profiles for long haul trains, *Proceedings of the 10th International Conference in Application of Advanced Technologies in Transportation. 27-30 May, 2008*. Athens, Greece, pp. 1-12.
30. Pudovikov O.E. Avtomaticheskoe upravlenie skorost'yu gruzovogo poezda s elektrovozom, dopuskayushchim plavnoe upravlenie silami tyagi i elektricheskogo tormozheniya: dis. ... d-ra. tekhn. nauk [Automatic control of the speed of a freight train with electric locomotive, allowing smooth control of the forces of traction and braking. Dr. eng. sc. diss]: 05.13.06, 05.22.07. Moscow, 2011, 291 p.
31. Klimovich A.V. Optimizatsiya upravleniya dvizheniya poezda po minimumu zatrat energoresursov na tyagu [Optimization of control of movement of trains at the minimum cost of energy for traction]. Moscow: Kompaniya Sputnik+, 2008, 263 p.
32. Yurenko K.I., Fandeev E.I. Komp'yuternaya model' i programmno-apparatnye sredstva bortovoy sistemy avtomatizirovannogo vedeniya poezda [Computer model and hardware-software on-board systems of automated driving of the train], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 5 (130), pp. 51-56.
33. Yurenko K.I., Savos'kin A.N., Fandeev E.I. Matematicheskoe modelirovanie energooptimal'nykh rezhimov vedeniya poezda s uchedom vozmushcheniy [Mathematical modeling of enloop allows an optimal modes of reference of a train with given parameters], *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-caucasian region. Technical Sciences Series], 2015, No. 3, pp. 34-44.
34. Dormand J.R., Prince P.J. Runge-Kutta triples, *Comp. & Maths. with Appls*, 1986, No. 21A, pp. 1007-1017.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Р. Гайдук.

Юренко Константин Иванович – Ростовский государственный университет путей сообщения; e-mail: ki-yurenko@yandex.ru; 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2; тел.: 89044454678; кафедра вычислительной техники и автоматизированных систем управления; к.т.н.; доцент.

Фандеев Евгений Иванович – Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова; e-mail: eif@inbox.ru; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132; кафедра стандартизации, сертификации и управления качеством; д.т.н.; профессор.

Yurenko Konstantin Ivanovich – Rostov State Transport University; e-mail: ki-yurenko@yandex.ru; 2, Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia; phone: +79044454678; the department of computer engineering and automatic control system; cand. of eng. sc.; associate-professor.

Fandeev Evgeniy Ivanovich – Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI); e-mail: eif@inbox.ru; 132, Prosvesheniya street, Novochoerkassk, 346428, Russia; the department of standardization, certification and quality management; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 656.212.5

DOI 10.18522/2311-3103-2016-8-102114

А.Н. Шабельников

МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЯХ*

Разрабатывается новый метаэвристический подход к решению оптимизационных задач, связанных с управлением технологическими процессами на железнодорожных сортировочных станциях и горках. В основу предлагаемого подхода положен модифицирован-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 16-07-20070-а, № 16-07-00086-а.