

Исследование энергоэффективных режимов ведения поезда с помощью имитационно-оптимизационной модели

К.И. Юренко^{1,2}, П.А. Харченко³, Е.И. Фандеев²

¹*Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону*

²*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск*

³*ОАО «РЖД», эксплуатационное локомотивное депо Лихая, Каменск-Шахтинский*

Аннотация: В статье рассматривается проблема оптимального управления движением поезда (ОУДП) с позиций современной теории автоматического управления. Эта проблема многие годы является актуальной, однако к настоящему времени окончательно не решена, что связано с большим числом случайных факторов, влияющих на характер движения поезда, а также развитием в последние годы скоростного и высокоскоростного, а также тяжеловесного и длинносоставного движения. Представлены математическая модель движения поезда и постановка задачи ОУДП, предложена классификация известных методов её решения. Разработана имитационная модель в среде Matlab/Simulink, позволяющая исследовать различные модели и законы управления. Предложен метаэвристический алгоритм оптимизации режимов ведения поезда, использующий имитационную модель, реализованный в виде программного модуля на языке Matlab. Приведены результаты вычислительных экспериментов, подтверждающие сходимость алгоритма.

Ключевые слова: оптимальное управление, автоведение, математическая модель, имитационная модель, метаэвристический алгоритм.

1. Введение. Развитие цифровой экономики, являющееся в настоящее время стратегическим приоритетом нашей страны, призвано создать необходимый инфраструктурный и технологический базис экономического роста, затрагивает такие ключевые отрасли, как транспорт, телекоммуникации, энергетика, образование и др. Применительно к железнодорожному транспорту это нашло отражение в создании директивных документов «Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» до 2020 и на перспективу до 2025 года» («Белая книга») и «Концепция реализации комплексный научно-технического проекта «Цифровая железная дорога»», в которых одним из приоритетов является совершенствование средств автоматического вождения подвижного состава (автоведение и автомашинист), что должно способствовать повышению

безопасности, надежности, энергоэффективности и комфортности пассажиров, снижению рисков, связанных с человеческим фактором.

Проблема безопасного и энергорационального ведения поездов многие годы находится в центре внимания эксплуатационных служб ОАО «РЖД», ученых и специалистов отраслевых вузов, предприятий и научно-исследовательских организаций [1-9]. За последние годы в этом направлении достигнуты определённые успехи: созданы и внедрены системы автоведения поездов, ими оснащен локомотивный парк и достигнуты высокие показатели их использования в процессе эксплуатации, что позволило улучшить условия труда локомотивных бригад, снизить число нарушений безопасности, связанных с человеческим фактором, повысить точность соблюдения графика движения и уменьшить расход топливных и энергоресурсов.

Вместе с тем, указанная проблема окончательно не решена, что связано с априорной неопределённостью поездной обстановки и условий функционирования, наличием случайных воздействий внешней среды, а также вариаций параметров и характеристик объекта управления. Как показывают результаты эксплуатации, возможности повышения энергоэффективности до конца не исчерпаны, что определяется показателями вождения поездов наиболее опытными и квалифицированными машинистами. Интенсивно реализуемые в последние годы скоростное и высокоскоростное, а также тяжеловесное и длинносоставное движение требует адаптации существующих методов, моделей и технических решений к особенностям выпускаемого в настоящее время подвижного состава и условиям его эксплуатации. В связи с этим продолжение исследований указанной научной проблемы актуально.

Современные возможности вычислительной техники и инструментальных средств исследования сложных динамических систем позволяют использовать для исследования задачи оптимизации управления

движением поезда технологию имитационного моделирования, а возможности современных микропроцессорной элементной базы и САПР [10,11] – осуществить реализацию инновационного алгоритмического, программного и аппаратного обеспечения на борту подвижного состава в режиме реального времени.

2. Математическая модель движения поезда. В основе такой модели лежат базовые положения теории электрической тяги, механики и электротехники [12-14]. Уравнение движения поезда с учетом распределения массы поезда (перемещения отдельных частей поезда по различным элементам профиля пути) может быть представлена в виде:

$$\frac{dv}{ds} = \frac{\xi}{v} \left[\frac{F_s}{(m_l + \sum m_c)g} - w - w_a + \frac{l_t - s_0}{l_t} i_1 + \frac{1}{l_t} \sum_{j=2}^{m-1} s_j i_j + \frac{1}{l_t} (s_0 - \sum_{j=2}^{m-1} s_j) i_m \right],$$

где s , v , t – соответственно координата пути, скорость и текущее время; ξ – ускорение поезда при действии единичной ускоряющей силы; F_s – управляемая сила: $F_s = F$ в режиме тяги; $F_s = R$ в режиме рекуперативного торможения; $F_s = B$ в режиме пневматического торможения; $F_s = 0$ в режиме выбега; m_l и $\sum m_c$ – масса локомотива и состава; g – ускорение свободного падения; w и w_a – удельные основное и добавочное сопротивления движению; l_t – длина поезда; s_0 – расстояние от принятой за начало отсчета точки сопряжения 1 и 2-го элементов профиля до “головы” поезда; i_j – уклон j -го элемента профиля, на котором находится часть поезда ($j=1,2,\dots$); s_j – длина j -го элемента профиля пути; силы F и R – рассчитываются с помощью следующих формул:

$$v = \frac{U - I_r}{C\Phi}; \quad F = kC\Phi I \eta_t; \quad \chi = -dF / dv; \quad R = kC\hat{O}I_r \eta_r,$$

где C – коэффициент (конструкционная постоянная); k – коэффициент; Φ – магнитный поток тягового двигателя; I , I_r – ток двигателя тяги и рекуперации соответственно; η_t , η_r – к.п.д. тягового электродвигателя,

отнесённый к ободам колесных пар, в режимах тяги и рекуперации соответственно; U – напряжение на двигателе; r – сопротивление внутренней силовой цепи двигателя; χ – коэффициент жесткости тяговой характеристики привода. Зависимость $U=U(I, U_p)$, где U_p – напряжение на токоприемнике локомотива, определяется с учетом особенностей его тягового привода. Значение U_p рассчитывается по формуле $U_p = U_f - \Delta U_c - \Delta U_t$, где U_f – напряжение на фидере тяговой подстанции; ΔU_c и ΔU_t – падение напряжения в контактной сети от сопутствующих поездов и от расчетного поезда; $\Delta U_t(x, I_t) = I_t Z_c(x)$, где I_t – ток электровоза; Z_c – полное электрическое сопротивление контактной сети и рельсов между электровозом и подстанциями, $Z_c = (x - x_{sb}^k)(x_{sb}^{k+1} - x) \rho / (x_{sb}^{k+1} - x_{sb}^k)$; $x_{sb}^k \leq x \leq x_{sb}^{k+1}$, где ρ – полное сопротивление 1 км контактной сети и рельсов;

$\Delta U_c = (k_U - 1) \Delta U_p$, x_{sb}^k – координата k -ой подстанции; коэффициент пропорциональности $k_U = 1 + 0.24 \frac{x_{sb}^{k+1} - x_{sb}^k}{(x_{sb}^{k+1} - x_{sb}^k) / l_m (1/L_{ev} + 1/L_{od})}$, здесь l_m – среднее расстояние между подстанциями; L_{ev} , L_{od} – межпоездные интервалы соответственно для четного и нечетного направлений.

Сила механического (пневматического) торможения определяется по формуле $B(P_{bc}, v) = k_k K_p(P_{bc}) \varphi_k(v)$, где k_k – количество тормозных колодок в поезде; P_{bc} – давление воздуха в тормозных цилиндрах; K_p – сила нажатия колодки на колесо, φ_k – коэффициент трения тормозной колодки, которая может быть представлена в виде зависимости [15]:

$$B(P_{bc}, v) = k_1 (k_2 P_{bc} - k_3) k_4 \frac{k_5 (k_6 P_{bc} - k_{10}) + k_{11}}{k_7 (k_8 P_{bc} - k_9) + k_{12}} \cdot \frac{v + k_{13}}{k_{14} v + k_{15}},$$

где $k_1 - k_{15}$ – числовые коэффициенты.

Силы основного сопротивления движению определяются из соотношений

$$w = \frac{w_l m_l + \sum w_c m_c}{m_l + \sum m_c}, \quad w_l = a_1 + b_1 v + c_1 v^2, \quad w_c = a_2 + (b_2 + c_2 v + d_2 v^2) / m_q,$$

где w_l и m_c – основное сопротивление движению соответственно локомотива и вагонов; m_q – масса, приходящаяся на одну ось; $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_2$ – числовые коэффициенты.

Добавочное сопротивление движению: $w_a = w_k + w_g + w_t + w_w + w_0$ складывается из дополнительных сопротивлений при движении поезда в кривых пути $w_k = k_{16}/R_k$, R_k – радиус кривой, дополнительного сопротивления от подвагонных генераторов, где $w_g = k_{17}P'/m_q v$ средняя условная мощность подвагонного генератора, приходящаяся на один поезд; $w_k = w_{k18}$ – дополнительное сопротивление движению при низких температурах окружающей среды; $k_{16} - k_{18}$ – числовые коэффициенты; w_w – дополнительное сопротивление от ветра: $w_w = A_g(c_0/2)/(\rho \Omega/Q_0)v^2$, где A_g – коэффициент, учитывающий скорость ветра v_w и угол между векторами скоростей ветра и поезда в случае, если $v > v_w$:

$$A_g = v_w/v(\sin\alpha - 2\cos\alpha) - v_w^2/v^2(\sin\alpha - 2\cos\alpha)\cos\alpha$$

c_0 – коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ – плотность воздуха; Ω и Q_0 – плотность поперечного сечения вагона и его вес; w_0 – добавочное сопротивление при трогании с места. Процессы боксования описываются следующей системой соотношений:

$$F - F_{sl} = m_l dv/dt; F_{sl} = 1000m_l g \psi_k; \psi_k = q_0 + q_1/(q_2 + q_3 v) - q_4 v,$$

где F_{sl} – сила сцепления колеса и рельса; ψ_k – коэффициент сцепления; $q_0 - q_4$ – числовые коэффициенты.

Одним из критериев качества управления является величина максимальных продольно-динамических реакций в поезде, которая связана с безопасностью движения грузовых поездов и комфортностью пассажиров. Для их исследования решаются дифференциальные уравнения движения экипажей поезда, которые имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_l d^2 s_l / dt = F - W - W_a - W_i - R - B_l - F_1; \\ m_1 d^2 s_1 / dt = F_1 - W_1 - W_{a1} - W_{i1} - B_1 - F_2; \\ m_2 d^2 s_2 / dt = F_2 - W_2 - W_{a2} - W_{i2} - B_2 - F_3; \\ \dots\dots\dots \\ m_{n-1} d^2 s_{n-1} / dt = F_{j-1} - W_{n-1} - W_{an-1} - W_{in-1} - B_{n-1} - F_{j+1}; \\ m_n d^2 s_n / dt = F_n - W_n - W_{an} - W_{in1} - B_n; \\ v_l = ds_l / dt; \\ v_n = ds_n / dt, \end{array} \right.$$

где: m_l , s_l и v_l – масса, координата и скорость локомотива; m_n , s_n – масса и координата n -го вагона; B_l и B_n – силы пневматического торможения локомотива и n -го вагона; W и W_a , W_{an} и W_{in} – силы основного и дополнительного сопротивлений локомотива и вагонов; F_i – реакция (сила) в i -м межвагонном соединении. При этом может быть использована, например, специализированная среда вычислительной механики «Универсальный механизм», позволяющая моделировать продольно-динамические реакции в поезде с заданными параметрами и режимами движения [15]. Расход электроэнергии на движение поезда составляет $A = (A_t + A_a) / (\eta_{tw} \eta_{sb})$, где A_t – расход энергии на тягу; A_a – расход энергии на собственные нужды; η_{tw} – средний к.п.д. тяговой сети; η_{sb} – средний к.п.д. тяговой подстанции, или

$$A = \int_0^T P dt = \int_0^T U_p I_t dt = \int_0^T (Fv / \eta_t - Rv \eta_r) dt,$$

где P – потребляемая локомотивом мощность; T – общее время хода.

3. Постановка и методы решения задачи оптимизации режимов ведения поезда. Задача оптимального управления движением поезда может быть сформулирована в следующем виде: для объекта, описываемого математическими соотношениями, представленными в параграфе 2, найти $F_u(u(t))$ или $F_u(u(s))$, $F_u(u) \leq F_u^{val}(s, v)$, удовлетворяющие условиям (1) для грузового поезда и (2) – для пассажирского:

$$\left\{ \begin{array}{l} A \rightarrow \min; \\ F_{\max} \rightarrow \min; \\ t_x - t_z \leq t_d; \\ x|_{t=0} = x_0; \\ x|_{t=t_x} = x_k; \\ v|_{x=x_0} = v_0; \\ v|_{x=x_k} = v_k; \\ v \leq v^{rist}(x), \end{array} \right. \quad (1)$$
$$\left\{ \begin{array}{l} A \rightarrow \min; \\ t_x - t_z \leq t_d; \\ x|_{t=0} = x_0; \\ x|_{t=t_x} = x_k; \\ v|_{x=x_0} = v_0; \\ v|_{x=x_k} = v_k; \\ v \leq v^{rist}(x); \\ dv/dt \leq a_c, \end{array} \right. \quad (2)$$

где $u(t)$ – управление; t_x, t_z – фактическое и заданное время хода; t_d – допустимое отклонение времени хода от заданного; x_0, x_k, v_0, v_k – начальные и конечные условия; v^{rist} и a_c – допустимые по условиям движения и комфортности пассажиров скорость и ускорение; $F_u^{val}(s, v)$ – ограничения на управление.

Различные методы её решения исследуются, например, в [1-6, 16-27]. Их классификация, предложенная авторами, представлена на рис. 1.



Рис. 1 – Классификация методов расчёта энергооптимальных режимов движения поезда

Наиболее глубоко развиты и доведены до практического применения аналитические методы на основе принципа максимума Л.С. Понтрягина (научная школа МГУПС) и численно-разработан оригинальный численно-аналитический метод энергооптимального тягового расчёта, разработанный коллективом ученых ВНИИЖТа. В первом случае с помощью необходимых условий оптимальности предварительно определяются оптимальные режимы движения и некоторые расчётные соотношения между ними (оптимальная скорость, координата перехода на выбег, скорость начала торможения и др.) и на основе полученных соотношений в режиме реального времени реализуется циклически повторяемый упреждающий энергооптимальный тяговый расчет. Второй подход основывается на идеях последовательного приближения: на каждой итерации алгоритма строится улучшающая вариация управления, а условия оптимальности проверяются после каждой итерации с помощью оценки на основе функции Гамильтона-Понтрягина. На основе данного алгоритма разработан программный модуль, используемый в специализированном программно-аппаратном комплексе семейства систем автоведения УСАВП. Вместе с тем, анализ эксплуатации подвижного состава показывает, что существующие методы в ряде случаев (как правило, связанных со сложным профилем пути) не обеспечивают требуемое качество управления и локомотивные бригады вынужденно осуществляют вмешательство в процесс ведения поезда.

4. Имитационная модель движения поезда. Для исследования алгоритмов автоведения в различных условиях эксплуатации авторами на основе изложенной выше математической модели разработана имитационная модель в среде Matlab с использованием инструментария визуального моделирования Simulink. Она позволяет произвольно задавать профиль пути и параметры подвижного состава, исследовать качество управления при различных законах $u(s)$ (или $u(t)$). В основе имитационной модели лежит

функциональная схема системы автоматического управления (САУ) ведения поезда, представленная на рис. 2.

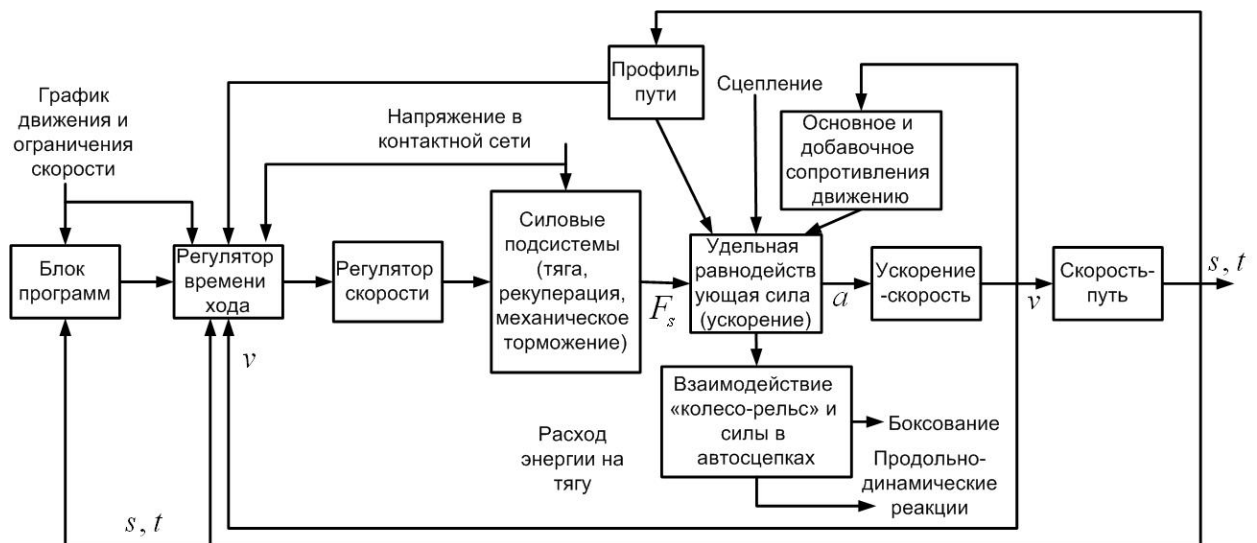


Рис. 2 - Функциональная схема САУ ведения поезда

5. Метаэвристический алгоритм оптимизации режимов ведения поезда. Для решения сформулированной в п.3 задачи оптимизации в рамках системного подхода, характерного для современной теории автоматического управления, на основе необходимых условий оптимальности в форме указанного принципа максимума выполнена редукция задачи оптимального управления (1) к специальной задаче математического программирования. Для её решения авторами разработан метаэвристический алгоритм, использующий идеи стохастической оптимизации (в частности, мультистарт, процедуры Монте-Карло и имитации отжига), а также его программную реализацию на языке Matlab. Алгоритм использует операторы запуска имитационной модели $(v, s, t, A) = Simulate(u, Z)$, где $Z = \{s_0, s_k, v_0, s_k, i(s), V^{rist}(s), m_l, m_c, n_c\}$ – набор параметров и генерации управления $u^{var} = Gen_u(Z)$ и может быть упрощенно представлен в виде следующей последовательности шагов.

Шаг 0. Инициализация алгоритма. Задать число стартов процедуры поиска N_{start} , число итераций поиска начального приближения методом

Монте-Карло N_{mc} , начальную и конечную температуры процедуры “имитации отжига” Θ_0 и Θ_k , коэффициент снижения температуры $\alpha < 1$. Установить счетчик стартов $c_{start} = 0$.

Шаг 1. Выполнить N_{mc} итераций $(v, s, t, A) = Simulate(u = Gen_u(Z), Z)$ и найти перспективное управление $u_0^* = \operatorname{argmin}(A) \mid v = v_0; s = s_0; t_x - t_z \leq t_d$.

Шаг 2. Инициализировать процедуру ИО: $\Theta = \Theta_0; k = 0; u^* = u_0^*$.

Шаг 3. Выполнить процедуру $(v, s, t, A) = Simulate(u_{k+1} = Gen_u(Z), Z)$.

Шаг 4. Изменить перспективное решение u^* в соответствии с вероятностью:

$$P(u^* = u_{k+1}) = \begin{cases} 1, & \text{if } A(u^*) - A(u_{k+1}) < 0, \\ \exp(A(u^*) - A(u_{k+1}) / \Theta), & \text{if } A(u^*) - A(u_{k+1}) \geq 0, \end{cases}$$

Уменьшить температуру $\Theta = \Theta \cdot \alpha$;

Шаг 5. Проверить условие окончания процедуры: **если** $\Theta \leq \Theta_k$ **то** $u[q] = u^*$; перейти к шагу 5; **иначе** перейти к шагу 3.

Шаг 6. Проверить условия окончания расчета: **если** $q \geq N$ **то** перейти к шагу 7. **Иначе** увеличить счетчик стартов $q = q + 1$ и перейти к шагу 1.

Шаг 7. Найти общий минимум по всем реализациям $u_{min} = \operatorname{argmin}(A(u_i)), i = 1..q$.

Как показывают вычислительные эксперименты, при правильном выборе параметров алгоритма обеспечивается хорошая его сходимость, что подтверждается данными, представленными в табл. 1.

В процессе вычислительных экспериментов, результаты которых представлены в таблице, моделировалось движение пассажирского поезда на участке длиной 30 км с затяжным спуском.

Таблица 1

Результаты вычислительных экспериментов

№	Время хода, с	Расход энергии на тягу, кВт·ч	Возврат энергии при рекуперации, кВт·ч	Суммарный расход, кВт·ч
1	1801	504.3	457.8	46.5
2	1802	485.7	439.9	45.8
3	1807	488.1	446.0	42.1
4	1806	485.3	441.1	44.2
5	1804	489.0	446.4	42.6
6	1803	497.0	453.1	43.9
7	1807	480.0	434.0	46.0
8	1803	489.6	446.7	42.9
9	1803	472.7	428.5	44.2
10	1804	489.2	446.5	42.7

Выводы.

1. Эффективным методом исследования задачи оптимизации режимов ведения поезда является проведение вычислительных экспериментов с имитационной моделью. Разработанная с использованием инструментов для моделирования сложных динамических систем среды MATLAB/Simulink имитационная модель движения поезда, её математическое, алгоритмическое и программное обеспечение могут быть использованы для исследования различных законов управления движения поезда и алгоритмов оптимизации режимов автоведения.

2. Предложенный метаэвристический алгоритм оптимизации режимов ведения поезда, использующий идеи стохастической оптимизации (в частности, мультистарт, процедуры Монте-Карло и имитации отжига), а также его программная реализация на языке MATLAB, имеют хорошую сходимость и позволяют решать задачу оптимизации режимов движения поезда для заданных исходных данных об участке пути (профиль пути, ограничения скорости и др.), подвижном составе (вес, длина и составность поезда) и расписании движения.

Благодарности

Работа доложена на МНК САУиОИ и опубликована при финансовой поддержке РФФИ, проект №18-07-20056 Г.

Литература

1. Фаминский Г.В., Ерофеев Е.В. Автоматические устройства для вождения поездов. М.:Транспорт, 1978. 103 с.
2. Костромин А.М. Оптимизация управления локомотивом. М.: Транспорт, 1979. 119 с.
3. Баранов Л.А. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л.А. Баранов [и др].; под. ред. Л.А. Баранова. М.: Транспорт, 1990. 272 с.
4. Климович А.В. Оптимизация управления движения поезда по минимуму затрат энергоресурсов на тягу. М.: Компания Спутник+, 2008. 263 с.
5. Баранов Л.А., Ерофеев Е.В., Мелёшин И.С., Чинь Л.М. Оптимизация управления движением поездов. М.:МИИТ, 2011. 164 с.
6. Мугинштейн Л.А., Илютович А.Е., Ябко И.А. Энергооптимальные методы управления движением поездов // Сб. научн. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2012. 80 с.
7. Юренко К.И., Юренко И.К. Системы автоведения электроподвижного состава. Принципы построения и варианты реализации // Вестник Восточноукраинского нац. ун-та им. Вл. Даля. Луганск. 2008. № 5 (123). Ч. 2. С. 68-70.
8. 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.

9. Юренко К.И., Щербаков В.Г., Сапунков А.Н., Юренко И.К. Анализ тенденций развития и задачи по созданию перспективных бортовых систем управления подвижного состава железных дорог // Известия вузов. Электромеханика. № 5. 2013. С. 68-74.

10. Юренко К.И. Основы микропроцессорной техники: учеб. пособие // ФГБОУ ВО РГУПС. Ростов н/Д, 2017. 159 с.

11. Юренко К.И. Средства автоматизированного проектирования информационных технологий, элементов и устройств вычислительной техники и систем управления. Введение в САПР: учеб. пособие // ФГБОУ ВО РГУПС. Ростов н/Д, 2017. 99 с.

12. Осипов С.И., Осипов С.С., Феоктистов В.П. Теория электрической тяги: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. С.И. Осипова. М.: Маршрут, 2006. 436 с.

13. Слепцов М.А., Долаберидзе Г.П., Прокопович А.В. Основы электрического транспорта / Под общ. Ред. М.А. Слепцова. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 464 с.

14. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров [и др.]. М.: Транспорт, 1995. 294 с.

15. Харченко П.А., Гребенников Н.В. Разработка компьютерной модели пассажирского поезда на основе данных современных средств регистрации параметров движения // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2016. №2 С. 38-46.

16. Yurenko K.I., Fandeev E.I. Structure and functions of on-board autodrivers system of train // Materials Engineering and Technologies for Production and Processing, May 19-20, 2016, IEEE Xplore (Scopus); Date Added to IEEE Xplore: 27 April 2017. - 2nd International Conference on Industrial

Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016; South Ural State University Chelyabinsk; Russian Federation. pp. 1-6.

17. Yurenko K.I., Fandeev E.I. Classification systems of automatic train driving with positions of the modern automatic control theory // Proceedings of 3rd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. Date of Conference: 16-19 May 2017; Date Added to IEEE Xplore (Scopus): 23 October; Saint Petersburg, Russia. pp. 1-5.

18. Юренко К.И. Принцип максимума Л.С. Понтрягина в задаче оптимального управления движением поезда. Вестник ВЭЛНИИ №1-2(79)/2018. С. 147-161.

19. Юренко К.И. Расчёт энергооптимальных режимов движения перспективного подвижного состава методом динамического программирования // Изв. вузов. Электромеханика. 2013. №3. С.78-82.

20. Юренко К.И., Савоськин А.Н., Фандеев Е.И. Математическое моделирование энергооптимальных режимов ведения поезда с учетом возмущений // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. № 3. С. 34-44.

21. Юренко, К.И., Фандеев Е.И. Принципы построения и имитационное моделирование систем автоведения электроподвижного состава // Известия ЮФУ. Технические науки. № 08. 2016. С. 88-102.

22. Юренко К.И., Санунков А.Н, Фандеев Е.И. Автоматическое управление тормозами поезда на основе математического аппарата нечёткой логики в системе автоведения / Вестник Всеукраинского национального университета им. В. Даля. Техн. науки. Серия Транспорт Ч.2 №5(176). Луганск: 2012. С. 22-29.

23. Юренко К.И., Харченко П.А., Юренко И.К. Человеко-машинное взаимодействие в технологическом процессе ведения поезда. Вестник ВЭЛНИИ № 1-2 (79) / 2018. С. 135-146.

24. Юренко К.И., Фандеев Е.И., Нефедов В.В. Программно-технические и тренажеро-моделирующие комплексы для разработки, испытаний, управления и обслуживания современных локомотивов // Инженерный вестник Дона, 2013, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1826/.

25. Юренко К.И., Шепилова Е.Г., Гречук И.А. Совершенствование бортовых систем управления локомотивов на базе технических средств тренажеро-моделирующих комплексов // Инженерный вестник Дона, 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2452.

26. Юренко К.И., Харченко П.А. Анализ модели управляющей деятельности машиниста и разработка методики оценки его профессиональных компетенций на основе нечеткой логики // Инженерный вестник Дона, 2018, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4910.

27. Юренко К.И., Харченко П.А., Фандеев Е.И., Юренко И.К. Системный подход в задаче оптимизации управления движением поезда. Системный анализ, управление и обработка информации: Труды VIII Междунар. конф. (п. Дивноморское, 8–13 октября 2017 г.); Донской гос. техн. ун-т. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. Т.1. С. 30-37.

References

1. Faminskij G.V., Erofeev E.V. Avtomaticheskie ustrojstva dlya vozhdeniya poezdov [Automatic train driving devices]. М.:Transport, 1978. 103 p.

2. Kostromin A.M. Optimizaciya upravleniya lokomotivom [Locomotive control optimization]. М.: Transport, 1979. 119 p.

3. Baranov L.A. Mikroprocessorny`e sistemy` avtovedeniya e`lektropodvizhnogo sostava [Microprocessor systems for automatic driving of electric rolling stock]. L.A. Baranov [i dr].; pod. red. L.A. Baranova. М.: Transport, 1990. 272 p.

4. Klimovich A.V. Optimizaciya upravleniya dvizheniya poezda po minimumu zatrat e`nergoresursov na tyagu [Optimization of control of movement of trains at the minimum cost of energy for traction]. M.: Kompaniya Sputnik+, 2008. 263 p.

5. Baranov L.A., Erofeev E.V., Melyoshin I.S., Chin` L.M. Optimizaciya upravleniya dvizheniem poezdov [Optimization of train operation control]. M.:MIIT, 2011. 164 p.

6. Muginshtejn L.A., Ilyutovich A.E., Yabko I.A. E`nergooptimal`ny`e metody` upravleniya dvizheniem poezdov [Energy-efficient methods of train control]. Sb. nauchn. tr. OAO «VNIIZhT». M.: Intekst, 2012. 80 p.

7. Yurenko K.I., Yurenko I.K. Vestnik Vostochnoukrainskogo nacz. un-ta im. Vl. Dalya. Lugansk. 2008. № 5 (123). Ch. 2. pp. 68-70.

8. Yurenko K.I. Puti sovershenstvovaniya bortovy`x sistem avtovedeniya lokomotivov. "Akademicheskie fundamental`ny`e issledovaniya molody`x ucheny`x Rossii i Germanii v usloviyax global`nogo mira i novej kul`tury` nauchny`x publikacij": Sb. mater. mezhdunar. molodyozh. konf.. Novocherkassk, 4-5 oktyabrya 2012 g. YuRGTU (NPI), LIK. 2012. pp.404-406.

9. Yurenko K.I., Shherbakov V.G., Sapunkov A.N., Yurenko I.K. Izvestiya vuzov. E`lektromexanika. № 5. 2013. pp 68-74.

10. Yurenko K.I. Osnovy` mikroprocessornoj texniki [The basics of microprocessor technology]: ucheb. posobie. FGBOU VO RGUPS. Rostov n/D, 2017. 159 p.

11. Yurenko K.I. Sredstva avtomatizirovannogo proektirovaniya informacionny`x texnologij, e`lementov i ustrojstv vy`chislitel`noj texniki i sistem upravleniya. Vvedenie v SAPR [Means of computer-aided design of information technology, elements and devices of computing equipment and control systems. Introduction to CAD] : ucheb. posobie. FGBOU VO RGUPS. Rostov n/D, 2017. 99 s.

12. Osipov S.I., Osipov S.S., Feoktistov V.P. Teoriya e`lektricheskoy tyagi [Electric traction theory]: Uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta . Pod red. S.I. Osipova. M.: Marshrut, 2006. 436 p.

13. Slepczov M.A., Dolaberidze G.P., Prokopovich A.V. Osnovy` e`lektricheskogo transporta [Basics of electric transport]. Pod obshh. Red. M.A. Slepczova. M.: Izdatel`skij centr «Akademiya», 2006. 464 p.

14. Teoriya e`lektricheskoy tyagi [Theory of electric traction]. V.E. Rozenfel`d, I.P. Isaev, N.N. Sidorov [i dr.]. M.: Transport, 1995. 294 p.

15. Xarchenko P.A., Grebennikov N.V. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya. 2016. №2 pp. 38-46.

16. Yurenko K.I., Fandeev E.I. Materials Engineering and Technologies for Production and Processing, May 19-20, 2016, IEEE Xplore (Scopus); Date Added to IEEE Xplore: 27 April 2017. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016; South Ural State University Chelyabinsk; Russian Federation. pp. 1-6.

17. Yurenko K.I., Fandeev E.I. Proceedings of 3rd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. Date of Conference: 16-19 May 2017; Date Added to IEEE Xplore (Scopus): 23 October; Saint Petersburg, Russia. pp. 1-5.

18. Yurenko K.I. Vestnik VE`INII №1-2(79) 2018. pp. 147-161.

19. Yurenko K.I. Izv. vuzov. E`lektromexanika. 2013. №3. pp.78-82.

20. Yurenko K.I., Savos`kin A.N., Fandeev E.I. Izv. vuzov. Severo-Kavkazskij region. Texnicheskie nauki. 2015. № 3. pp. 34-44.

21. Yurenko, K.I., Fandeev E.I. Izvestiya YuFU. Texnicheskie nauki. № 08. 2016. pp. 88-102.

22. Yurenko K.I., Sanunkov A.N, Fandeev E.I. Vestnik Vseukrainskogo nacional`nogo universiteta im. V. Dalya. Texn. nauki. Seriya Transport Ch.2 №5(176). Lugansk: 2012. pp. 22-29.



23. Yurenko K.I., Xarchenko P.A., Yurenko I.K. Vestnik VE`INII № 1-2 (79) 2018. pp. 135-146.

24. Yurenko K.I., Fandeev E.I., Nefedov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1826/.

25. Yurenko K.I., Shepilova E.G., Grechuk I.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2452.

26. Yurenko K.I., Xarchenko P.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4910/.

27. Yurenko K.I., Xarchenko P.A., Fandeev E.I., Yurenko I.K. Sistemny`j podxod v zadache optimizacii upravleniya dvizheniem poezda. Sistemny`j analiz, upravlenie i obrabotka informacii: Trudy` VIII Mezhdunar. konf. (p. Divnomorskoe, 8–13 oktyabrya 2017); Donskoj gos. texn. un-t. Rostov-na-Donu: DGTU, 2017. V.1. pp. 30-37.