

Е. П. БЛОХИН, д.т.н., профессор, ДИИТ (Украина);
А. Н. ПШИНЬКО, д.т.н., профессор, ДИИТ (Украина);
В. В. СКАЛОЗУБ, д.т.н., профессор, ДИИТ (Украина)

РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕТОДЫ ВОЖДЕНИЯ ПОЕЗДОВ В УСЛОВИЯХ ОПТОВОГО РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Розроблено уточнену модель розрахунку режимів тяги з урахуванням вартості як активної, так і реактивної енергії в умовах застосування змінних тарифів оплати електроенергії.

Разработана уточненная модель расчета режимов тяги с учетом стоимости как активной, так и реактивной энергии в условиях применения переменных тарифов оплаты электроэнергии.

The specified model of traction's modes computation, which takes into account the cost of active and reactive energy in the conditions of application of variable tariffs for electric power payment of is developed.

Введение

Выбор оптимальных режимов вождения поездов является одной из основных задач железнодорожного транспорта. Ее содержание постоянно расширяется и уточняется, в зависимости от степени учета условий и требований к процессу перевозки. В настоящей работе представлены результаты исследований в области создания современных ресурсо- и энергосберегающих технологий вождения поездов в условиях работы железных дорог на Оптовом Рынке Электроэнергии (ОРЭ), а также по созданию технологии организации процесса перевозок по стоимостным показателям. Актуальность этой проблемы развития и совершенствования методов управления движением поездов связана с необходимостью использования критериев минимума стоимости электроэнергии, потребленной на тягу поездов, в то время как в большинстве случаев применяют критерий минимума потребления энергии. При переменных тарифах на электроэнергию в ОРЭ (различие цены по периодам суток, а в некоторых случаях и на различных железнодорожных полигонах) задача расчета оптимальных по стоимости режимов ведения поездов существенно усложняется. Наряду с этим возникают дополнительные проблемы по изменению планирования и организации процесса перевозок.

Актуальность стоимостной оптимизации перевозок обусловлена также и тем, что железнодорожный транспорт Украины это один из значительных в стране потребителей топливно-энергетических ресурсов. Поэтому сокращение эксплуатационных расходов – важнейшее направление повышения эффективности желез-

нодорожного транспорта. По оценкам экспертов Укрзалізничці, выполненной в условиях 2007 года, переход железных дорог Украины в ОРЭ обеспечивал ежегодную экономию средств до 50 млн. долл. Начиная с ноября 2006 и до конца 2007 г. такая экономия составила около 10 млн. долл. В нее входили экономия средств от закупки электроэнергии с оптового рынка, доходы от передачи электроэнергии сетями железных дорог областными поставляющим компаниям. В то же время внедрение АСКУЭ (систем коммерческого учета энергии) достигло 80...95 % (по дорогам), а финансовые вложения составили около 5 млн. долл.

Выполненные исследования по анализу стохастических параметров цены электроэнергии на оптовом рынке, по моделированию и оптимизации движения поезда с учетом стохастических свойств напряжений на токоприемнике при учете необходимости оплаты активной и реактивной энергии и др., свидетельствуют о существенных особенностях технологий и методов вождения поездов в условиях переменных тарифов по критерию минимума стоимости потребленной на тягу электроэнергии. В разработанных и предлагаемых здесь технологиях учтены многообразные факторы, которые в должной степени определяют содержание задачи оптимального вождения поездов. Сложность этой задачи, в первую очередь, определяется полнотой учета совокупности характеризующих расчетный участок факторов, моделью поезда, разнообразными факторами и условиями процесса движения поезда по переменному профилю пути, а также возникающих при этом силах и др. В зависимости от целей управления, достоверности имеющихся данных для расчета

оптимальных режимов тяги, в работе применяются различные методы, основанные на моделях непрерывного, дискретного оптимального управления, а также смешанных - дискретно-непрерывных. Кроме того, разработаны модели и методы по формированию рационального управления ведением поезда на основе обобщения данных контрольных поездок, которые используют адаптивные подходы систем искусственного интеллекта, в частности, процедуры нечетких экспертных систем по выбору режимов тяги.

Рассмотрена проблема компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения в связи со стоимостной оптимизацией режимов вождения поездов. Для использования уточненного функционала задачи расчета оптимальных по стоимости режимов тяги по данным опытных поездок на ВЛ-80^Т построены математические модели коэффициента мощности, что обеспечило возможность учета различия стоимости активной и реактивной энергии.

Разработанная технология ведения поездов по критерию минимума стоимости электроэнергии программно реализована. На основе данных о железнодорожном полигоне, поезде, локомотиве, времени движения, ограничениях по скорости, применяемых тарифах на электроэнергию и др. рассчитывается оптимальный по стоимости режим ведения поезда в виде карты участковых скоростей или перегонных времен хода. Реализована функция сравнительного анализа режимов ведения по различным критериям, а также функция по оценке экономической эффективности применения переменных тарифов для заданного графика движения поездов и железнодорожного полигона.

Приведенные ниже многочисленные данные расчетов свидетельствуют о существенном различии режимов вождения поездов по критериям минимума стоимости и электропотребления, полученные результаты могут быть основой методики оценки экономической эффективности применения переменных тарифов и стоимостной организации процесса перевозок на электрических железных дорогах и условий ОРЭ, а также создания такой технологии.

Характеристики задачи выбора оптимальных режимов ведения поездов (ЗРВП)

Содержание и структура ЗРВП, присутствие в ней факторов случайности и неопределенности параметров и др., позволяет классифицировать ее как задачу стохастического оптимального управления [1, 2]. Во многих исследова-

ниях она рассматривается в детерминированной постановке [2, 3] или же случайные характеристики (напряжения на токоприемнике, масса поезда, параметры поездопотока и др. [4]) заменяются значениями, которые соответствуют математическим ожиданиям. В работе [4] было указано, что в силу невыпуклости вверх функций, определяющих модель ЗРВП (в частности, тяговых и токовых характеристик электроподвижного состава (ЭПС) [8], а также способа вхождения этих характеристик в модели задачи) и невыполнения неравенств Йенсена [5] переход к детерминированному аналогу исходной задачи требует строгого обоснования, поскольку здесь возможны случаи несоответствия решений, полученных для стохастической и детерминированной формулировок задачи ЗРВП.

Важным является вопрос о корректности учета стохастических компонентов задачи ЗРВП, который подробно рассмотрен в [4]. Выполненные расчеты по построению режимных карт движения пассажирских электропоездов с учетом случайного характера напряжений на токоприемнике ЭПС подтвердили положения работы [5]. Причем в некоторых из них была установлена неустойчивость оптимальных решений – изменение характера закона управления (значений токов на различных позициях контроллера) при вариации напряжений на токоприемнике. В связи с этим были рассчитаны режимные карты движения, основанные на двухэтапной модели задачи [3, 5], реализующей выбор такого оптимального управления, для которого ожидаемый расход электроэнергии (или же ее стоимость) на движение поезда с учетом неизбежной корректировки будет наименьшим.

Следуя [1, 8], считаем, что система дифференциальных уравнений вида (1) и начальные условия (2) [7], описывающие движение поезда как гибкой нити длины L_n с погонной массой $p_n(z)$, $0 \leq z \leq L_n$, путем конечноразностной аппроксимации по параметру “х”:
 $X = \{x_k = kh_x, k = 0, 1, 2, \dots, n_x\}$, приведены к виду нелинейной модели стохастического программирования (ЗНСП):

$$v_{k+1}^2 = v_k^2 + h_x \frac{2\zeta}{(q+Q)(1+\gamma)} [F_e(x_{(k)e}) - W(x_{(k)w}) - B_T(x_{(k)B})]; \quad (a)$$

$$\tau_{k+1} = \tau_k + h_x \frac{\tau_*(I_D(v(u(x_k, t), U_C(x_k, t, \theta))) - \tau(x_k, t))}{v(x_k, t)T_D(I_D(v(u(x_k, t), U_C(x_k, t, \theta))))}; \quad (b) \quad (1)$$

$$x(0) = x_0; v(0) = v_0; \tau(0) = \tau_0. \quad (2)$$

Остальные компоненты приведенной ниже модели также записываются в соответствующем дискретизированном представлении. Здесь: x, t – координаты пути и времени; $u(x, t)$ – управление (номер позиции контроллера); v – скорость центра масс поезда; q, Q – массы локомотива и поезда; γ – коэффициент инерции вращающихся масс; $\zeta = g/1000$, g – ускорение силы тяжести; F_e – сила тяги локомотива; $W(*)$ – сопротивление поступательному движению поезда; B_T – действующая на поезд тормозная сила; τ – температура перегрева тяговых электродвигателей; $\tau_* = \tau\infty$; T_D, I_D – тепловые характеристики и ток тягового электродвигателя [1, 8]; $U_C(*)$ – напряжение контактной сети; θ – совокупность случайных факторов задачи; $x_e = (v, u, U_C)$; $x_w = (x, v, u)$; $x_B = (v, k'(t), u, U_C)$, $k'(t)$ – суммарная сила нажатия тормозных колодок.

Представим задачу ЗРВП с уравнениями движения (1) – (2) в следующем виде

$$F(x, v, u, t) = M[A(u, \theta) * C(t)] \Rightarrow \min, \quad (3)$$

где

$$A(*) = \sum_{x_0}^{x_s} \int \frac{(U_C(x, t) + I_a(x, v, u, t)\rho(x))I_a(*)dx}{v(x, u, t)};$$

$I_a(*)$ – активный ток электровоза, $\rho(x)$ – эквивалентное сопротивление тяговой сети, $C(t)$ – тарифы оплаты электроэнергии, $M[*]$ – знак математического ожидания. Ограничения задачи задают следующие множества: G_u – множество управлений (позиции контроллера); ограничение на область допустимых фазовых траекторий, которое задают отношения $G_{XVT} = \{x_0 \leq x \leq x_s; 0 < v \leq v^{\max}(x, t); 0 < \tau \leq \tau_{\max}\}$; x_s – конечная координата рассматриваемого участка пути; ограничения на возможные управления $u(x, t)$ в соответствии с требованиями технической эксплуатации тяговых двигателей; область допустимых управлений равна $G_{IFK} = \{I_D(*) \leq I_D^{\max}; F_e(x_e) \leq \psi_k(v)q; K''(t, u)\varphi_k(v) \leq \psi_k(v)q_o\}$; допустимый ток $-I_D^{\max}$, q_o – нагрузка на ось экипажа, $\psi_k(k)$ – коэффициент сцепления колеса с рельсом, K'' – сила нажатия тормозных колодок колес-

ной пары, $\varphi_k(v)$ – коэффициент трения тормозной колодки о колесо;

$$T_X(u) = \int_{x_0}^{x_s} \frac{dx}{v(x, u, t)} \leq T_*, \quad (4)$$

ограничение по времени хода T_* .

Стохастическая природа и неопределенные факторы задачи учитываются вектором θ , который включает характеристики поездопотока на участке и значения напряжений $U_C(x, t, \theta)$ на токоприемнике ЭПС и др.; параметры поезда ($L_n, p_n(z)$) и связанные с его движением характеристики в (1) – (2) считаются детерминированными. Координата t (время суток) отражает зависимости параметров поездопотока и стоимости электроэнергии от времени при использовании дифференцированных тарифов оплаты. Выражение для расхода электроэнергии $A(*)$ (3) учитывает потери электроэнергии в контактной сети от тока, потребляемого ЭПС при ведении поезда согласно (1) – (2) (член $I_a(*)\rho(x)$).

Исследование свойств модели задачи выбора режимов ведения поезда

При решении ЗРВП часто напряжение на токоприемнике $U_C(x, t, \theta)$ считается постоянным, равным математическому ожиданию [1, 3]. Вместе с тем, анализ функций уравнений движения (1) и характеристик ограничений (3) – (4) позволяет в этом случае установить невыполнение неравенств Йенсена [5]

$$M[f(\eta)] \leq f(M[\eta]), \quad (5)$$

где η – действительная случайная величина, $f(\eta)$ – непрерывная выпуклая вверх функция действительного переменного. При этом возможны существенные различия между решениями приближенной и стохастической задачи выбора оптимального управления движением поезда.

В рассматриваемой задаче может быть получена оценка $U_C(*)$: $\bar{U}_C(x, t) = M[U_C(x, t, \theta)]$ для математического ожидания величины напряжения на токоприемнике ЭПС, поэтому ЗНСП формально представима в следующем виде

$$\min_{z \in G_Z} (\varphi_0(z, \bar{U}_C)), \quad G_Z = \{\varphi_i(z, \bar{U}_C) \leq 0, i = 1, 2, \dots, n_\varphi; z \in Z\}. \quad (6)$$

Известно, что «осредненная» задача ЗНСП (5) дает точное решение стохастической, если все функции (6) линейны относительно набора θ , или же выполняются отношения

$$\Psi_j(z) = M[\varphi_j(z, U_C(\theta))] \leq \varphi_j(z, \bar{U}_C), \quad j = 0, 1, \dots, n_\varphi. \quad (7)$$

В случае (7) любое допустимое решение (6) будет допустимым и для ЗНСП-задачи [4, 5], причем для оптимальных решений выполнены отношения

$$\min \Psi_0(z) \leq \min \varphi_0(z, \bar{U}_C). \quad (8)$$

Соотношения (7) – (8) имеют место, если выполняются неравенства (5).

Анализ показывает, что правые части (1) не являются линейными непрерывными и выпуклыми вверх функциями действительного переменного относительно $\bar{U}_C(*)$, как и некоторые другие элементы дискретизованной модели задачи (3) – (4). В именно, в уравнениях (1)-а) невыпуклой является F_e – сила тяги, а в (1)-в) – функции $I_D(*)$ и $v(*)$. К невыпуклости модели приводит и способ вхождения этих параметров в уравнения. Анализ модели ЗРВП показывает, что замена напряжения $U_C(*, \theta)$ значением математического ожидания может привести к существенным различиям между решениями стохастической задачи оптимального управления и ее детерминированного эквивалента. Далее приводятся результаты расчетов, которые подтверждают это положение.

Выбор режимов ведения поездов как двухэтапная задача стохастической оптимизации

В связи со стохастическими факторами θ , обусловленными нестабильностью напряжений в электротяговой тяговой сети (рис. 1) и напряжений на токоприемнике ЭПС $U_C(x, t, \theta)$, действительные режимы ведения поездов отличаются от режимов, рассчитанных для фиксированных $\bar{U}_C(*)$. Поэтому возникает задача выбора оптимальных режимов для (1) – (4), которые являются наиболее устойчивыми к присутствующей в задаче неопределенности. Для ЗРВП считается, что “защищенность” выбранных режимов ведения поездов означает необходимость минимальных дополнительных затрат электроэнергии на их коррекцию при движении. Для этого ЗРВП может быть представлена в форме двухэтапной задачи стохас-

тического оптимального управления [4, 5]. В двухэтапной ЗРВП в качестве вектора, зависящего от неопределенных факторов, выбираются значения возможных диапазонов напряжений, отличных от принятого расчетного номинала \bar{U}_C :

$$\Delta U_C(\theta) = ((P_1, \Delta U_1(\theta_1)), (P_2, \Delta U_2(\theta_2)), \dots, (P_k, \Delta U_k(\theta_k))), \quad \sum_j P_j = 1. \quad (9)$$

В векторе (9) через $\{P_j \geq 0\}_k$ введены оценки вероятностей для заданной системы диапазонов значений напряжений $\{\Delta U_j(\theta_j)\}_k$. Обозначим через $\Delta A(x, u, t, \theta)$ дополнительный расход электроэнергии, обусловленный неточностью задания напряжений в уравнениях движения (1) и компенсируемый за счет тока $I_{ak}(x, u, t, \theta)$. Тогда критерий двухэтапной ЗРВП, как минимизацию ожидаемых затраты на реализацию управления $u(x, t)$ и его коррекцию, принимает следующий вид

$$A(u(x, t)) + M[\Delta A(u(x, t, \theta))] \Rightarrow \min_{u \in D_u}, \quad (10)$$

где

$$\Delta A(*) = \rho(x) \left| I_{ak}^2(u(x, t, \theta)) - I_a^2(u(x, t)) \right|, \quad A(*) - \text{величина электропотребления из (3),} \\ M[*] - \text{знак математического ожидания.}$$

В двухэтапной задаче стохастического оптимального управления (1) – (4), (9) – (10) корректирующее множество совпадает с множеством управлений, а вектор параметров (9) представляет дополнительную информацию, необходимую для постановки двухэтапной ЗРВП. Значения компонентов (9) могут быть рассчитаны для каждого электрифицированного участка на основе применения интегрированных информационных технологий процесса перевозок (ВМД – вагонной информационной модели дороги, энергетической модели дороги [7]). Аналогичная постановка двухэтапной задачи расчета оптимальных режимов ведения поезда может быть сделана с использованием критерия минимума стоимости электроэнергии, когда учитываются различные тарифы оплаты по периодам суток.

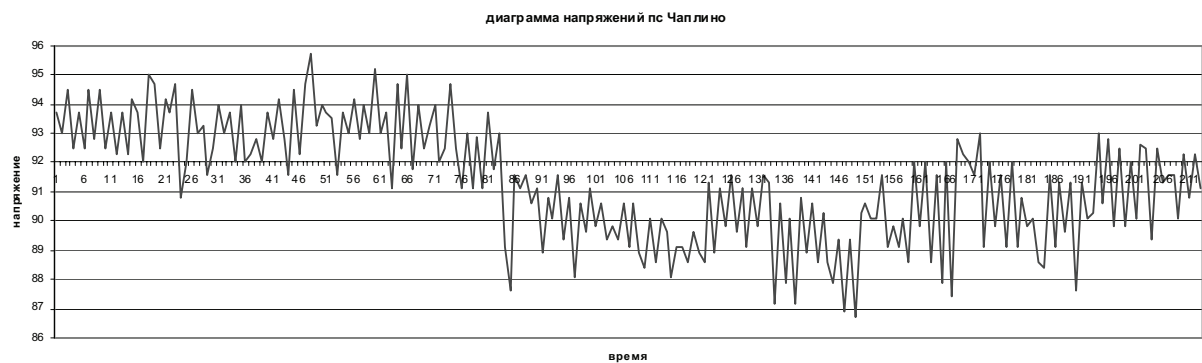


Рис. 1. График относительных величин напряжений по данным мониторинга счетчиками «Альфа»

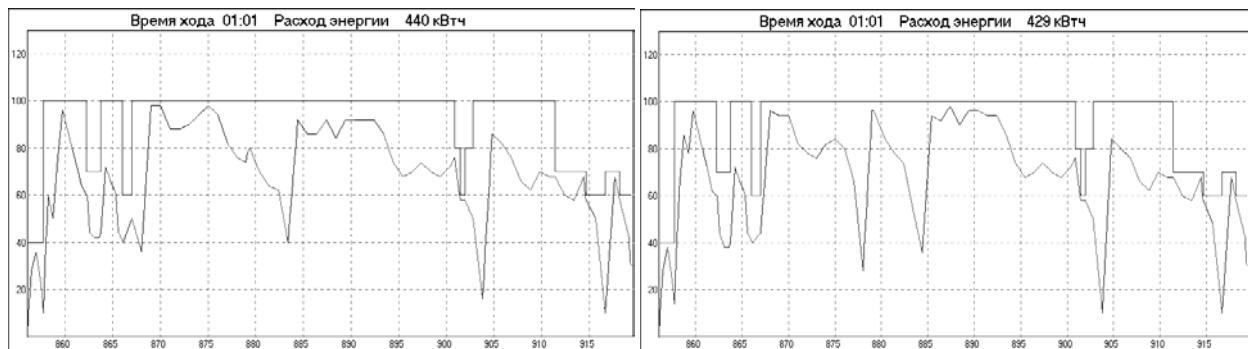


Рис. 2. Графики оптимальных скоростей движения пассажирских электропоездов при учете случайной величины напряжений на токоприемнике ЭПС

Реализации задачи ЗРВП с учетом случайного напряжения на токоприемнике ЭПС и применения дифференцированных тарифов оплаты электроэнергии

Для иллюстрации некоторых фактических условий реализации выбранных режимов ведения поездов на рис.1 показан график относительных уровней напряжений в тяговой сети (в процентах от номинала), полученный в течение суток путем поминутного мониторинга величин напряжений для тяговой подстанции Чаплино. Рис. 1 позволяет также установить присутствие некоторого “тренда” для уровня напряжений, связанного с неравномерностью электропотребления по периодам суток. Случайный характер значений напряжений в тяговой сети с колебаниями до 8 – 9% представляется значимым. На рис. 2 представлены графики оптимальных по расходу электроэнергии режимов ведения пассажирских поездов, рассчитанные для нормально распределенных случайных величин напряжений на токоприемнике: $M_U=27$ кВ, $\sigma_U=1.2$ кВ (верхний график), $M_U=27$ кВ, $\sigma_U=1.5$ кВ (нижний график). Рисунок показывает возможность качественного изменения характера оптимального управления (средняя часть пути) при вариациях напряжений в тяговой сети. При этом показатели

электропотребления изменяются незначительно. На рис. 3 приведены решения ЗРВП в двухэтапной постановке (9) – (10) для параметров напряжений на токоприемнике $M_U=25$ кВ, $\sigma_U=1.2$ кВ. Верхний и средний графики соответствуют модели (1) – (4), а нижний – (9) – (10), в котором устранена неустойчивость закона управления. Причем вектор вероятностей отклонений возможных значений напряжений (9) был равным: $\Delta U_C(\theta) = ((0.05, (21 - 22)), (0.1, 22 - 24), (0.7, (24 - 26)), (0.1, (26 - 27)), (0.05, (27 - 28)))$, где указаны диапазоны значений напряжений (в кВ) и их вероятности.

На рис. 4 приведены некоторые результаты расчетов оптимальных режимов ведения пригородных электропоездов на участке Киев – Миронивка в условиях применения дифференцированных тарифов оплаты электроэнергии. Рис. 4 позволяет установить отличия режимов ведения электропоезда (и участковых скоростей движения) с учетом дифференцированной стоимости энергии ночью и в полупиковый период от соответствующего ему случая, рис. 3, рассчитанного по двухэтапной модели. При одинаковом времени движения по заданному участку и существенно большем уровне электропотребления (506 кВт.ч вместо 433 кВт.ч) стоимости электроэнергии будут относиться как 367:433.

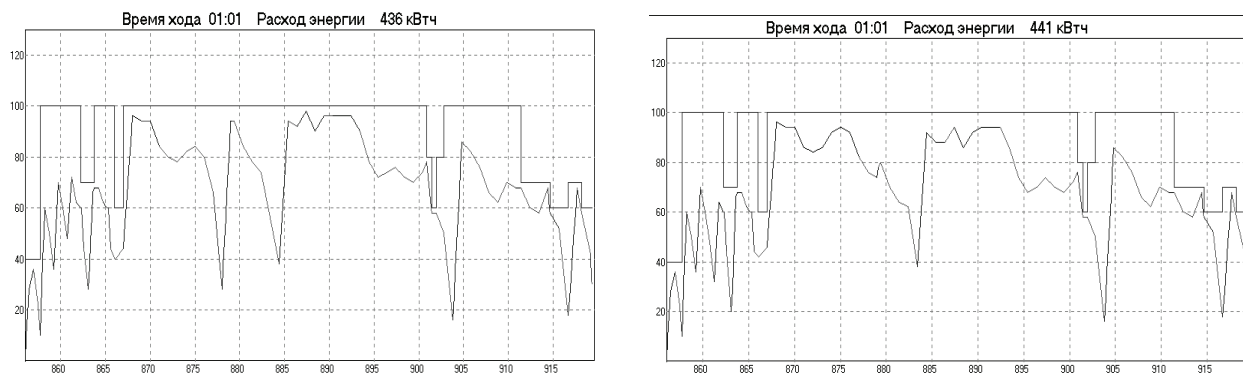


Рис. 3. Решение двухэтапной задачи расчета оптимальных режимов ведения поездов



Рис. 4. График скорости движения электропоездов при использовании дифференцированных тарифов оплаты электроэнергии.

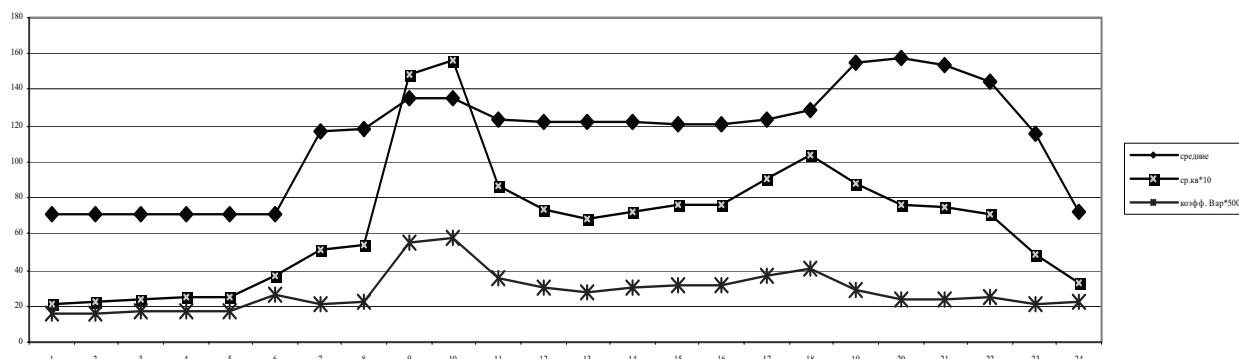


Рис. 5. Вероятностные характеристики цены электроэнергии, потребленной на тягу поездов, по периодам суток

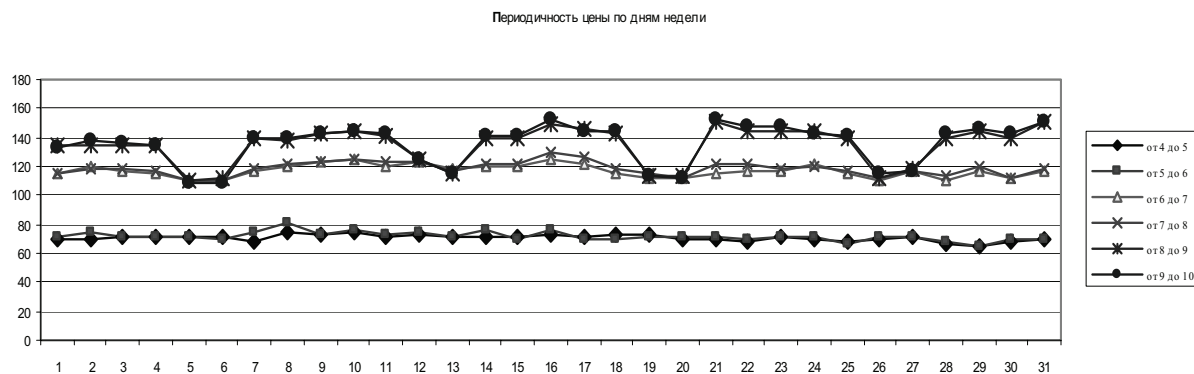


Рис. 6. Графики цены электроэнергии ОРЭ по временным интервалам и дням недели

Рис. 3 также демонстрирует возможность возникновения отмеченной выше неустойчивости оптимальных режимов при учете стохастической природы напряжений в контактной сети.

Анализ работы железных дорог Украины в условиях Оптового Рынка Электроэнергии

В рамках ОРЭ прогноз цены определяет стратегию закупок электроэнергии для электрифицированных участков.

Вероятностные характеристики цены электроэнергии по периодам суток (средние, средние квадратические отклонения, коэффициент вариации) представлены на рис. 5. При расчетах оптимальных режимов движения поездов выделяются четыре временные зоны:

- 23...24, 0...6 час, первая;
- 6...10, час, вторая,
- 10...17, 22...23 час, третья;
- 17...22 час, четвертая.

Различия нижних и верхних значений цены электроэнергии для различных периодов суток лежат в пределах 8...10%. Цены в ОРЭ зависят и от дня недели, рис. 6.

Опыт показывает, что функция цены на оптовом рынке электроэнергии прогнозируется оператором рынка, в зависимости от показателей маневровой мощности генерации и себестоимости. Согласно анализа данных, цена электроэнергии в ОРЭ является нестационарным случайным процессом. Для использования при расчетах режимов ведения поезда в условиях функционирования ОРЭ модель цены $C(x, t)$ представима в следующем виде

$$C(x, t) = \{ (N(M[c(x_k, t_1)], \sigma(x_k, t_1)), \dots, N(M[c(x_k, t_{24})], \sigma(x_k, t_{24}))) \}_{k \in N_k}$$

где $N(a, \sigma)$ – функция Гаусса, $M[*]$ – знак математического ожидания, x – координата пути, t – времени.

Разработка метода вождения поездов с учетом различия стоимости активной и реактивной электрической энергии

Асинхронные электродвигатели локомотивов являются потребителем активной и реактивной мощности. При отсутствии компенсирующих устройств в сетях реактивный ток (реактивная мощность) поступает к двигателям из сетей энергоснабжающей организации и подлежит оплате. Задачу компенсации реактивной мощности (КРМ) в сети можно рассматривать как задачу энергосбережения. Проблема компенсации реактивной мощности

в системах электроснабжения промышленных предприятий актуальна в связи с внедрением «Методики расчетов платы за перетоки реактивной мощности между электропередающей организацией и ее потребителями» (Министерство топлива и энергетики, приказ № 19 от 17.01.2002) [6]. Согласно методике, плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии определяется как:

$$P = P1 + P2 - P3, \quad (11)$$

где $P1$ – основная плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии; $P2$ – надбавка (при $tg\phi > 0,25$) за недостаточную оснащенность электрической сети потребителя устройствами КРМ; $P3$ – скидка платы при участии в оптимальном суточном регулировании режимов сети энергоснабжающей организации в расчетный период.

Величина надбавки $P2$ находится в нелинейной зависимости от $tg\phi$, и при $tg\phi > 0,6$, может принимать значения сравнимые с основной платой $P1$ за потребление и генерацию реактивной электроэнергии. Уменьшение величины $tg\phi$ за счет применения компенсирующих устройств реактивной мощности на локомотивах является сложной задачей. Вместе с тем эту задачу можно решать путем введения рациональных режимов управления движением поезда с применением критерия минимума расхода реактивной энергии или минимума стоимости потребленной реактивной мощности. Для решения задачи разработана методика формирования режимных карт, которые оптимальны как по расходу электроэнергии на тягу поездов, так и по стоимости электроэнергии, когда учитываются переменные по периодам суток тарифы и различная стоимость активной и реактивной энергии [11-13].

Основой оптимизации перегонных времен хода является математическое моделирование движения поезда, представленного как гибкая нерастяжимая нить. В качестве метода оптимизации режимов вождения при заданном времени хода по участку выступает динамическое программирование в дискретной форме [1. 2].

Предложен и исследован усовершенствованный критерий эффективности движения поездов, который учитывает активную и реактивную составляющую электрической энергии и переменные тарифы на оплату электроэнергии в разные периоды суток [12]. Целевая функция для оценки закона управления движением поезда на участке представляет собой функционал затрат электроэнергии на тягу поезда вида

$$A[u] = \int_{x_n}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) dx}{v(x, u)} \quad (12)$$

где $I_{da}(v, u)$ – активный ток электровоза.

С учетом стоимости электроэнергии (функция $c(t)$ – определяет ценовой коэффициент в зависимости от времени t) при расходе активной и реактивной энергии функция (12) принимает вид:

$$A[u] = \int_{x_n}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) \cdot c(t) dx}{v(x, u)} + \int_{x_n}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) \cdot \sin \varphi(I_{da}(*)) \cdot D \cdot c(t) dx}{v(x, u)} + P2 \quad (13)$$

где первый член отражает стоимость расхода только активной энергии, а второй – стоимость реактивной, D - коэффициент ЕЕРП, который характеризует часть влияния реактивного перетока в точке учета, на технико-экономические показатели в расчетном режиме, квт/квар. $P2$ - надбавка за недостаточное оснащение средствами компенсации реактивной энергии; $P2 = P1 \cdot C_{баз} \cdot (K_{\phi} - 1)$ (14)

$P1$ – основная плата за потребленную и сгенерированную реактивную энергию, второе слагаемое выражения (13), $C_{баз} = 1$, нормативное базовое значение коэффициента стимулирования капитальных вложений в средства компенсации в сетях потребителя; K_{ϕ} – коэффициент, который рассчитывают по регламентированной таблице в зависимости от фактического значения коэффициента $tg\phi$ потребителя в среднем за отчетный период; для тяговых подстанций железнодорожного транспорта переменного тока = 1,0, а для постоянного тока = 0,5. Для железнодорожного транспорта переменного значения надбавки $P2$ равняется нулю.

Целевая функция задачи представляется следующим образом:

$$A[u] = \int_{x_n}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) \cdot \{ \cos \varphi(I_{da}(*)) + D \cdot \sin \varphi(I_{da}(*)) \} \cdot c(t) dx}{v(x, u)} \quad (15)$$

Вычисления ЕЕРП (коэффициент D) выполняются электропоставляющей организацией один раз в два года. Полученные значения ЕЕРП, базового коэффициента стимулирования капитальных вложений в средства компенсации

и коэффициента убытков от генерации реактивной мощности из сети потребителя, закрепляется в договоре [6].

Моделирование режимов ведения поездов

Для использования уточненного функционала задачи расчета оптимальных по стоимости режимов тяги необходимо знать значения показателем потребления реактивной энергии (мощности), которым является коэффициент мощности $\cos \varphi$. Для построения характеристики $\cos \varphi$ были использованы данные из опытных поездок на локомотиве ВЛ-80т [14]. Измеренные зависимости значения $\cos \varphi(I_{da})$ от активного тока локомотива были аппроксимированы кривой вида:

$$f(x) = \frac{A}{B - e^{-Cx}} \quad (16)$$

На рис. 7 представлены точки натурных испытаний значений $\cos \varphi(I_{da})$ и кривая их аппроксимации по методу наименьших квадратов.

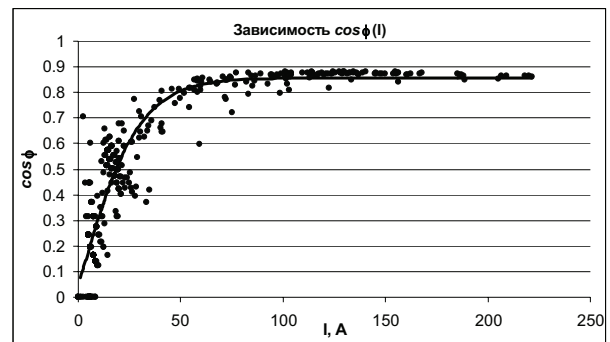


Рис. 7. Аппроксимация функции $\cos \varphi(I_{da})$

Приведем расчеты по управлению движением поездом с учетом применения дифференцированных тарифов платы за потребленную электроэнергию [12]. На рис. 8 показана зависимость скорости поезда при оптимизации движения по общему расходу электроэнергии. Отметим различие характеристик оптимального управления движением поезда. В первом, классическом, случае достигается минимальный расход электроэнергии. Для второго случая, при дифференцированном тарифе рис. 9, расход электроэнергии выше, поскольку для уменьшения стоимости электропотребления использовано большее количество энергии в зоне с меньшей стоимостью. Для третьего случая, представленного на рис. 10, при выборе оптимальных режимов тяги в целевой функции учитывались различия стоимости активной и

реактивной электрической энергии. Как показывает рис. 10, более точный подсчет величины стоимостного показателя для критерия минимума стоимости (дифференциация затрат на использование реактивной энергии, стоимость которой составляет примерно 10% от тарифа на активную электроэнергию) привел к существенным различиям в режимах ведения поезда.

Выполненные исследования оптимальных режимов ведения поездов показали существенные различия критериев минимума электропотребления и минимума его стоимости, а также необходимость более точно учитывать в моделях управления режимами тяги поездов различия в стоимости активной и реактивной энергии, если имеют место условия применения пе-

ременных тарифов оплаты электроэнергии (ОРЭ, дифференцированные тарифы).

Рис. 8-10 представляют типичные графики для оптимальных участковых скоростей движения пассажирских поездов при учете различных критериев оптимальности. Расчеты, выполненные для грузовых поездов, также показали различия в режимах тяги и показателях стоимостной эффективности. Однако в этом случае в расчетах были установлены не столь существенные различия.

На рис. 11-13 представлены графики оптимальных участковых скоростей при управлении движением грузовых поездов (ВЛ-80, 60 вагонов).



Рис. 8. Оптимизация тяги по электропотреблению



Рис. 9. Оптимизация режимов тяги по стоимости полного расхода электроэнергии



Рис. 10. Оптимизация режимов тяги с учетом платы за реактивную энергию

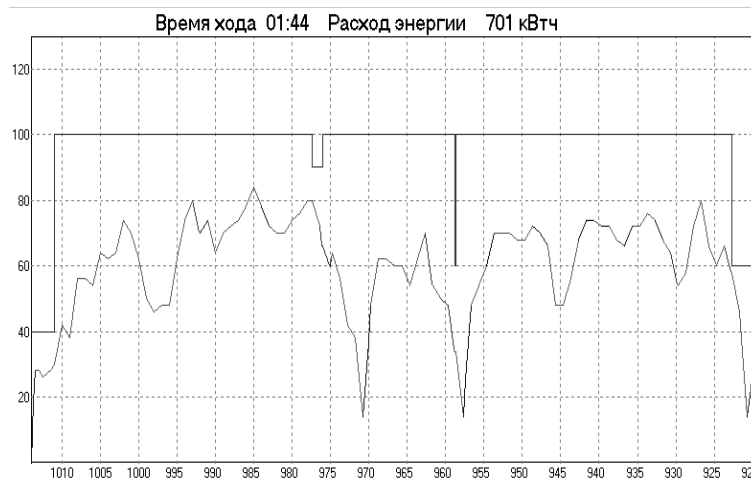


Рис. 11. Оптимизация режимов ведения грузового поезда (ВЛ-80, 60 вагонов) по показателю минимума электропотребления

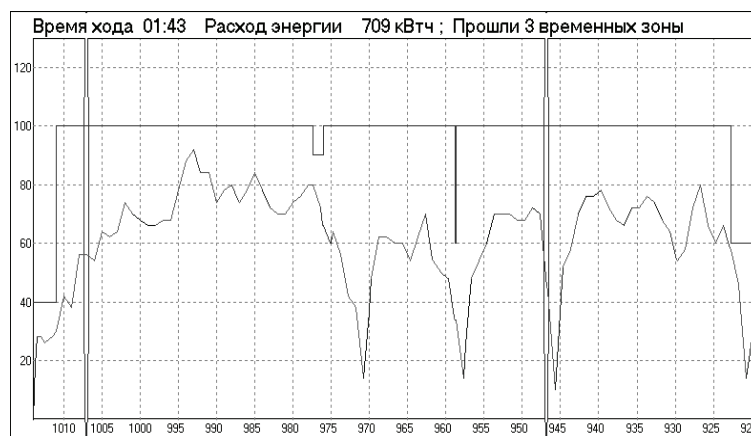


Рис. 12. Оптимизация режимов ведения грузового поезда (ВЛ-80, 60 вагонов) по показателю минимума стоимости электропотребления.(ОРЭ)

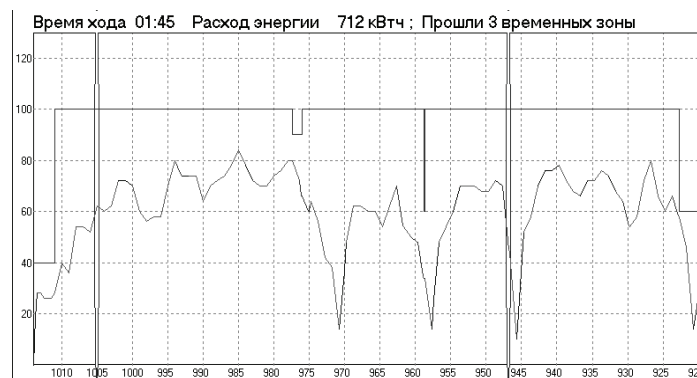


Рис. 13. Оптимизация режимов ведения грузового поезда по стоимостному показателю с учетом различия тарифа на активную и реактивную энергию

Следует также указать важную особенность организации процессов перевозок, оптимальных по критерию минимума стоимости потребленной на тягу электроэнергии. Для стоимостной оптимизации необходимо создание пакета режимных карт, каждая из которых должна использоваться в различные периоды суток.

При работе железных дорог в условиях рынка электроэнергии задачи по расчету опти-

мальных режимов ведения поездов должны решаться во взаимосвязи с задачами по оценке эффективности применения переменных тарифов оплаты электроэнергии. Для обеспечения возможности такого комплексного анализа в [13] были разработаны уточненные критерии эффективности применения переменных тарифов оплаты для расчетов оптимальных режимных карт ведения поездов электроэнергии с

учетом потребления активной и реактивной. Здесь установлено, что для определения экономической целесообразности важно знать не объемы потребления электроэнергии на тягу поездов по периодам суток, а лишь соотношения между этими показателями. Предложенные в [13] критерии учитывают следующие факторы – стохастический характер электропотребления на тягу в период в различные периоды суток для переменных тарифов, стохастический характер тарифов в условиях ОРЭ, что требует прогнозирования их значений, а также учет различной стоимости активной и реактивной электроэнергии.

Расчетно-экспериментальные исследования режимов тяги в условиях оптового рынка электроэнергии

Как показано выше, особенность оптимальных по стоимости режимов ведения поездов связана с переменной по периодам суток стоимостью электроэнергии в рамках ОРЭ. Это приводит к тому, что в различные периоды суток режимные карты имеют не одинаковые эффективности по стоимости.

На рис. 14-16 показаны графики приведенной относительной стоимости электроэнергии на участке Мироновка – Здолбунов (Юго-Западной ж.д.), полученные для оптимальных режимов ведения поездов массой 4000, 5000, 6000 т, которые отправляются в различные периоды суток (отправление с интервалом в один час).

На рис. 17 представлено распределение электропотребления на тягу поезда в зависимости от периода движения, полученное с использованием принятой в Укрзализнице методики и программных средств по расчету нормативных графиков ведения грузовых поездов, которые применялись и для расчетов рис. 14-16. Отметим, что в этом случае зависимость затрат энергии от пройденного поездом расстояния оказалась близкой к линейной.



Рис. 14. Приведенная стоимость оптимальных режимов движения поездов, масса 4000 т



Рис. 15. Приведенная стоимость, масса 5000 т



Рис. 16. Приведенная стоимость оптимальных режимов движения поездов, масса 6000 т

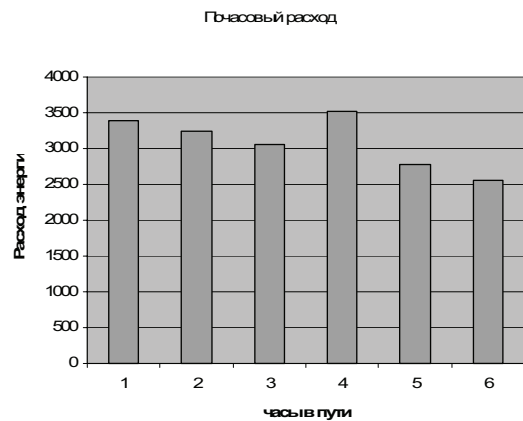


Рис. 17. График почасового потребления электроэнергии для оптимальных режимов тяги

Таким образом, расчеты показывают, что условия ОРЭ предполагают необходимость применения набора из 4 режимных карт по рациональному управлению тягой поезда.

Моделирование управления движением поезда по данным опытных поездок с использованием методов нечетких экспертных систем

В [12] для расчетов режимов вождения поездов в условиях ОРЭ построена модель стохастического оптимального управления, учи-

тывающая основные ограничения задачи выбора режимов тяги, целевая функция которой включает прогнозируемые величины тарифа в ОРЭ в различные периоды суток. Параметры математической модели настраиваются на основании данных ОРЭ. В связи с неопределенностью ряда параметров, используемых для расчетов режимов управления, разработан и программно реализован адаптивный метод в виде экспертной системы с нечеткими правилами, предназначенной для выбора рациональных режимов ведения поездов по данным отклонения параметров от эталонного управления. Параметрами нечетких правил управления являются следующие – различие во времени хода по участку «отставание (сильное, слабое, отсутствует)» и «опережение (отсутствует, слабое, сильное)», отклонение скорости, разница масс расчетного и поезда из эталонной поездки и др., а в качестве нечеткого управления выдаются рекомендации по управлению контролером. В [12] также приведены примеры расчета рационального управления на основе экспертной системы, свидетельствующие об эффективности метода.

Выводы

В работе выполнены исследования, направленные на решение проблемы уменьшения стоимости электроэнергии на тягу поездов, потребленной в условиях применения переменных тарифов, прежде всего для условий оптового рынка электроэнергии. Установлено, что в общем случае математические модели управления движением поезда, учитывающие переменность напряжений в электротяговой сети на основе математического ожидания, могут оказаться не адекватными, в этой связи предложена двухэтапная математическая модель выбора режимов ведения поездов.

Как показали расчеты, учитывающие переменные по периодам суток тарифы на электрическую энергию, полученные ранее рекомендации для выбора оптимальных относительно расхода энергии режимов ведения поезда оказываются ограниченными. Разработаны более общие методы расчетов режимов управления движением поездов, которые учитывают как переменность по периодам суток тарифов, так и различие в цене активной и реактивной составляющих энергии.

Создан набор математических моделей и программные средства, которые дают возможность выполнить анализ выгодности закупки железными дорогами электроэнергии на основе

переменных тарифов, если известен график движения поездов, а также рассчитать оптимальные по критерию минимума стоимости режимные карты управления тягой поездов.

Теоретические результаты и экспериментальное программное обеспечение «стоимостной» организации процесса перевозок на электрифицированных участках железных дорог использовано для разработки рекомендаций по обеспечению энергооптимального процесса перевозок для стран Организации Сотрудничества железных дорог ОСЖД [14].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блохин, Е. П. Методика расчета оптимальных по расходу электроэнергии времен хода поезда [Текст] / Е. П. Блохин, А. В. Слободян, Г. В. Евдомах // Транспорт. – 1999. – С. 47-55.
2. Гетьман, Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда грузовых электровозов для железных дорог Украины [Текст] : дис. ... доктора техн. наук / Г. К. Гетьман. – Д., 2001. – 416 с.
3. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов [Текст] / Е. П. Блохин и др. / Заліз. трансп. України. – 2001. – № 6. – С. 19-22.
4. Блохин, Е. П. Выбор режимов ведения поездов как стохастическая задача векторной оптимизации [Текст] / Е. П. Блохин, В. В. Скалозуб // Транспорт. – 2001. – Вып. 7. – С. 28-31.
5. Математические методы исследования операций [Текст] / Ю. М. Ермолев и др. – К.: Вища шк., 1979. – 312 с.
6. Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії [Текст]. Наказ № 19 від 17.01.2002, Зареєстр. в Міністерстві юстиції України 1 лютого 2002 р. за № 93/6381. Міністерство Палива та Енергетики України.
7. Скалозуб, В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии [Текст] / В. В. Скалозуб // Транспорт. – 2002. – Вып. 12. – С. 148-157.
8. Режимы ведения пассажирских поездов с учетом случайного напряжения в тяговой сети и переменных тарифов оплаты электроэнергии [Текст] / Г. В. Евдомах и др. // Вісник ДНУЖТ. – 2004. – Вып. 3. – С. 65-73.
9. Першочергові завдання залізниць України як суб'єкта оптового ринку електроенергії [Текст] / В. В. Корнієнко, В. Я. Карпенко, В. Т. Доманський, В. В. Скалозуб // Заліз. трансп. України. – 2003. – № 6. – С. 18-25.
10. Блохин, Е. П. Ресурсосберегающие методы ведения поездов при переменных тарифах оплаты электроэнергии [Текст] / Е. П. Блохин, В. В. Корниенко, В. В. Скалозуб // Электрифици-

- кация и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте. – 2004. – С. 112-118.
11. Пшинько, А. Н. Энергооптимальные технологии на железнодорожном транспорте [Текст] / А. Н. Пшинько, С. В. Мямлин, В. В. Скалозуб // Тр. Международн. научно-техн. конф. – Одесса, 2004. – С. 203-206.
 12. Скалозуб, В. В. Выбор режимов управления движения поезда на основе нечеткой продукционной модели [Текст] / В. В. Скалозуб, А. П. Иванов // Вестник БелГУТ. – 2007. – № 1-2. – С. 41-46.
 13. Оптимизация режимов ведения поездов по критерию минимума стоимости потребленной и реактивной электроэнергии [Текст] / В. В. Скалозуб и др. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – № 4 (78). – С. 111-115.
 14. Рекомендации по обеспечению энергооптимального процесса перевозок на основе информационных технологий управления системами электрической тяги Р-618, принята V комиссией Организации Сотрудничества Железных Дорог, Чешская Республика, г. Сенгограби, 2003 [Текст]. – 28 с.

Поступила в редколлегию 04.08.2009