

Г. В. ЕВДОМАХА, Ю. Н. ИВЧЕНКО, В. В. СКАЛОЗУБ, К. Г. ЖЕЛЕЗНОВ,
В. А. ЛИТВИН, А. П. ИВАНОВ (ДИИТ)

РЕЖИМЫ ВЕДЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ И ПЕРЕМЕННЫХ ТАРИФОВ ОПЛАТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Запропоновано моделі та методи розрахунку оптимальних режимів ведення електропоїздів, які враховують випадковий характер напруги в тяговій мережі та умови залежності ціни електричної енергії від періоду доби. Подано критерії ефективного використання змінних тарифів і приклади розрахунків оптимальних режимів ведення приміських електропоїздів.

Предложены модели и методы расчета оптимальных режимов ведения электропоездов, которые учитывают случайный характер напряжений в тяговой сети и условия зависимости цены электрической энергии от периода суток. Предложены критерии по эффективному использованию переменных тарифов и приведены примеры расчетов оптимальных режимов ведения пригородных электропоездов.

The authors propose models and calculation methods for optimal modes of running emu trains, taking into account the random character of catenary voltages and the conditions of dependence of electric power price upon the time of day. The paper suggests criteria for efficient use of variable tariffs and provides examples of calculating the optimal modes of running suburban emu trains.

Задача выбора оптимальных режимов ведения поездов

Задача выбора оптимальных режимов ведения поездов (ЗРВП) является одной из основных для железнодорожного транспорта. Содержание, структура, присутствие факторов случайности и неопределенности параметров в ЗРВП позволяют классифицировать ее как задачу стохастического оптимального управления [1; 2]. Во многих исследованиях она рассматривается в детерминированной постановке [3; 4], или же случайные характеристики (напряжения на токоприемнике, масса поезда, параметры поездотока и др.) заменяются значениями, которые соответствуют математическим ожиданиям. В работе [5] было указано, что в силу невыпуклости вверх функций, определяющих модель ЗРВП (в частности, тяговых и токовых характеристик электроподвижного состава (ЭПС) [6], а также способа вхождения этих характеристик в модели задачи) и невыполнения неравенств Иенсена [2] переход к детерминированному аналогу исходной задачи требует строгого обоснования, поскольку здесь возможны случаи несоответствия решений, полученных для стохастической и детерминированной формулировок задачи ЗРВП.

В настоящей работе вопрос о корректности учета стохастических компонентов задачи ЗРВП рассмотрен более подробно. Выполнен-

ные расчеты по построению режимных карт движения пассажирских электропоездов с учетом случайного характера напряжений на токоприемнике ЭПС подтвердили положения работы [5]. Причем в некоторых расчетах была установлена неустойчивость оптимальных решений – изменение характера закона управления (значений токов на различных позициях контроллера) при вариации напряжений на токоприемнике. В связи с этим сделаны расчеты режимных карт движения, основанные на двухэтапной модели задачи [2; 5], предполагающей выбор такого оптимального управления, для которого ожидаемый расход электроэнергии (или же ее стоимость) на движение поезда с учетом неизбежной корректировки будет наименьшим.

В настоящее время энергосистемами с целью стимулирования выравнивания нагрузок в пиковые и другие периоды суток предлагаются дифференцированные тарифы оплаты (ДТО) электроэнергии, согласно которым ее цена изменяется более, чем в 7 раз. В представленной работе рассматривается ЗРВП, в которой в условиях применения дифференцированных тарифов в качестве критерия используется минимум стоимости электроэнергии, потребленной на тягу поездов. Построенные для этих случаев режимы движения электропоездов сравниваются с режимами, оптимальными по расходу электрической

энергии. Таким образом, применение ДТО приводит к необходимости рассмотрения спектра режимов, обусловленных зависимостью оптимальных управлений от периода суток t .

Будем считать, что система дифференциальных уравнений вида (1) и начальные условия (2) [5], которые описывают движение поезда как гибкой нити длины L_n с погонной массой $p_n(z)$, $0 \leq z \leq L_n$, приведены за счет конечноразностной аппроксимации по параметру x : $X = \{x_k = kh_x, k = 0, 1, 2, \dots, n_x\}$, к виду нелинейной модели стохастического программирования (ЗНСП):

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

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

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

Здесь обозначено: 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 [6]; $U_C(*)$ – напряжение контактной сети; θ – совокупность случайных и неопределенных 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. Остальные компоненты приведенной выше модели также записываются в соответствующем дискретизированном представлении.

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

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

где

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

$I_a(*)$ – 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 $G_{IFK} = \{I_D(*) \leq I_D^{\max}; F_e(x_e) \leq \psi_k(v)q; K''(t, u)\varphi_k(v) \leq \psi_k(v)q_0\}$; допустимый ток – I_D^{\max} ; q_0 – нагрузка на ось экипажа; $\psi_k(k)$ – коэффициент сцепления колеса с рельсом; K'' – сила нажатия тормозных колодок колесной 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 $I_a(*)\rho(x)$).

Анализ модели задачи выбора режимов ведения поезда с использованием неравенства Иенсена

Как указывалось, часто при решении ЗРВП напряжение $U_C(x, t, \theta)$ считается постоянным, равным математическому ожиданию [3]. Анализ функций уравнений движения (1) и характеристик ограничений (3)–(4) позволяет установить невыполнение неравенств Иенсена [2]

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

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.

Поскольку в рассматриваемой задаче может быть получено $U_C(*)$: $\bar{U}_C(x, t) = M[U_C(x, t, \theta)]$ – математическое ожидание для напряжения на токоприемнике, то формально ЗНСП может быть представлена в следующем виде:

$$\min_{z \in G_Z} (\varphi_0(z, \bar{U}_C)),$$

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

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 решением и для ЗНСП [2], причем для оптимальных решений соблюдается отношение

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

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

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). Так в уравнениях (1а) невыпуклой является F_e – сила тяги, а в (1б) – функции

$I_D(*)$ и $v(*)$, а также способ их вхождения в уравнения, приводящий к невыпуклости модели. Проведенный анализ модели ЗРВП показывает, что замена напряжения $U_C(*, \theta)$ значением математического ожидания может приводить к существенным различиям между решениями стохастической задачи оптимального управления и ее детерминированного эквивалента. Представленные ниже расчеты подтверждают это положение.

Двухэтапная модель для стохастической задачи выбора режимов ведения поездов

Остановимся на путях реализации ЗРВП с учетом стохастических факторов θ . Нестабильность напряжений в электротяговой сети (рис. 1), а также $U_C(x, t, \theta)$ – напряжений на токоприемнике ЭПС приводит к тому, что действительные режимы ведения поездов отличаются от рассчитанных для фиксированных $\bar{U}_C(*)$. В связи с этим возникает задача выбора оптимальных режимов для (1)–(4), устойчивых к присутствующей в задаче неопределенности. В приложении к ЗРВП будем считать, что «защищенность» оптимальных режимов ведения поездов означает необходимость минимальных дополнительных затрат электроэнергии на их коррекцию при движении. В этом случае ЗРВП может быть представлена как двухэтапная задача [2; 5] стохастического оптимального управления. Для постановки двухэтапной ЗРВП примем в качестве вектора, зависящего от неопределенных факторов, значения возможных диапазонов напряжений, отличных от принятого расчетного номинала \bar{U}_C :

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

$$\sum_j P_j = 1.$$

В векторе (9) введены следующие параметры: $\{P_j \geq 0\}_k$ – оценки вероятностей для заданных диапазонов значений напряжений $\{\Delta U_j(\theta_j)\}_k$. Обозначим дополнительный расход электроэнергии, обусловленный неточностью задания напряжений в уравнениях движения (1) и компенсируемый за счет тока

$I_{ak}(x, u, t, \theta)$, через $\Delta A(x, u, t, \theta)$. Тогда минимальные ожидаемые затраты на реализацию управления $u(x, t)$ и его коррекцию образуют критерий двухэтапной ЗРВП вида

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

где

$$\Delta A(*) = \rho(x) |I_{ak}^2(u(x, t, \theta)) - I_a^2(u(x, t))|,$$

$A(*)$ – величина электропотребления из (3);

$M[*]$ – знак математического ожидания.

В двухэтапной задаче стохастического оп-

тимального управления (1)–(4), (9)–(10) корректирующее множество совпадает с множеством управлений. В ней вектор параметров (9) представляет дополнительную информацию, необходимую для постановки двухэтапной ЗРВП. Значения (9) могут быть рассчитаны для каждого электрифицированного участка на основе применения интегрированных информационных технологий процесса перевозок [5]. Аналогичная постановка двухэтапной задачи может быть сделана с использованием критерия минимума стоимости электроэнергии, когда учитываются различные тарифы оплаты по периодам суток.

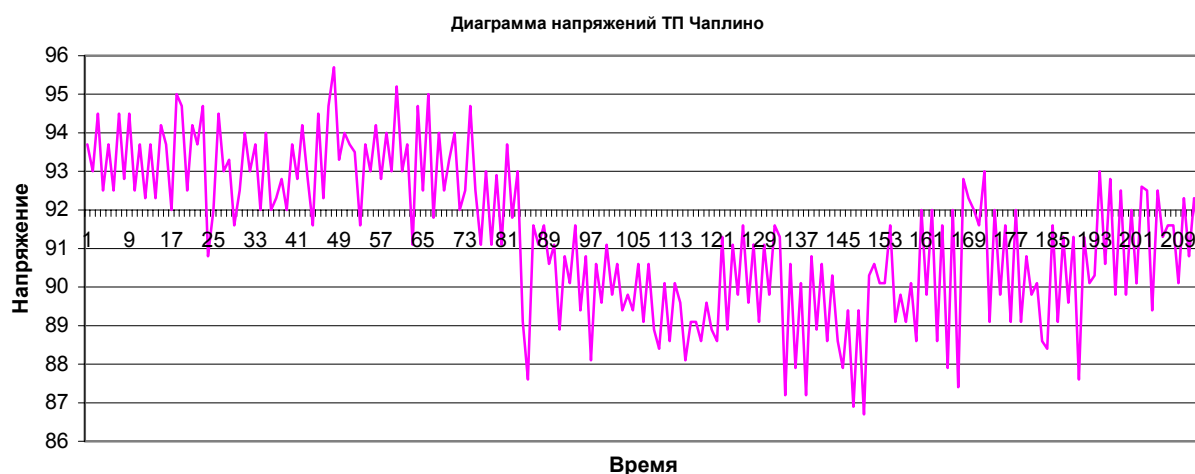


Рис. 1. График относительных величин напряжений по данным мониторинга счетчиками «Альфа»
 Авторы выражают благодарность В. Г. Кузнецову за предоставленные данные по мониторингу напряжений в тяговой сети

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. * График 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 пригородных поездов, рассчитанные для нормально распределенных случайных величин напряжений на токоприем-

нике: $M_U = 27$ кВ, $\sigma_U = 1,2$ кВ (верхний график), $M_U = 27$ кВ, $\sigma_U = 1,5$ кВ (нижний график). График 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 (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.

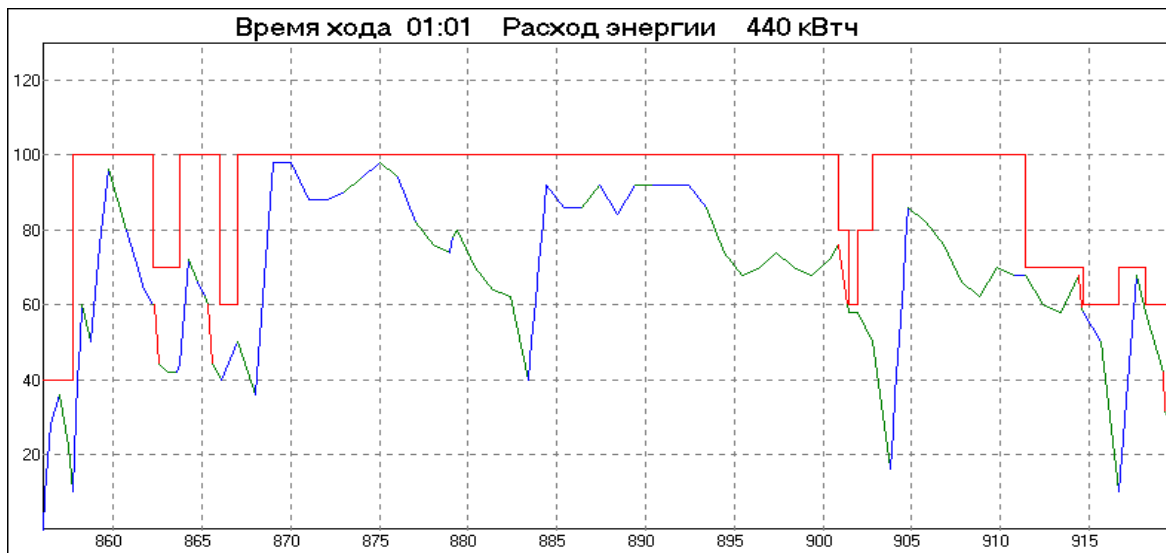


Рис. 2. Графики оптимальных скоростей движения электропоездов при случайной величине напряжений на токоприемнике ЭПС

В табл. 1 и на рис. 4 приведены некоторые результаты расчетов оптимальных режимов ведения пригородных электропоездов на участке Киев–Мироновка в условиях применения дифференцированных тарифов оплаты электроэнергии. Рис. 4 позволяет установить отличия режимов ведения электропоезда (и участков скоростей движения) с учетом дифференцированной стоимости энергии ночью и в полупиковый период от соответствующего ему случая, представленного на рис. 3 (средний график). 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.

Таблица 1

Показатели потребления и стоимости электроэнергии при дифференцированных тарифах оплаты

Тарифные зоны	Полупиковая зона	Ночь
Расход энергии на движение (кВт·ч)	253,00	131,00
На собственные нужды и др. (кВт·ч)	63,00	59,00
Коэффициенты стоимости по зонам	1,02	0,25
Всего электроэнергии	316,00	190,00
Относительная стоимость (с учетом коэффициентов)	320,00	47,00

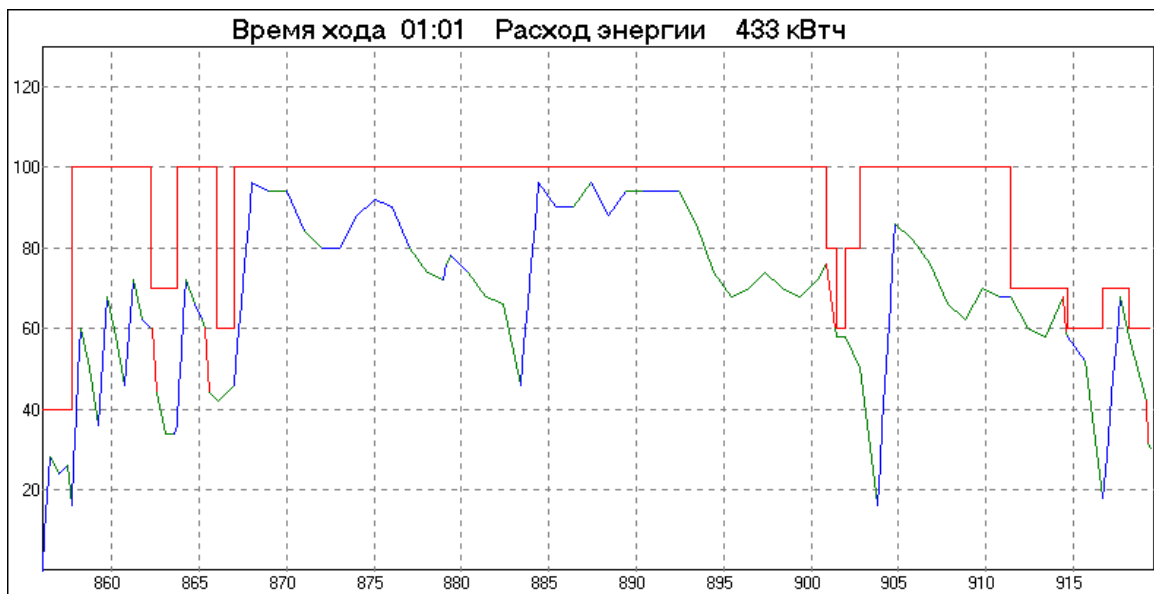
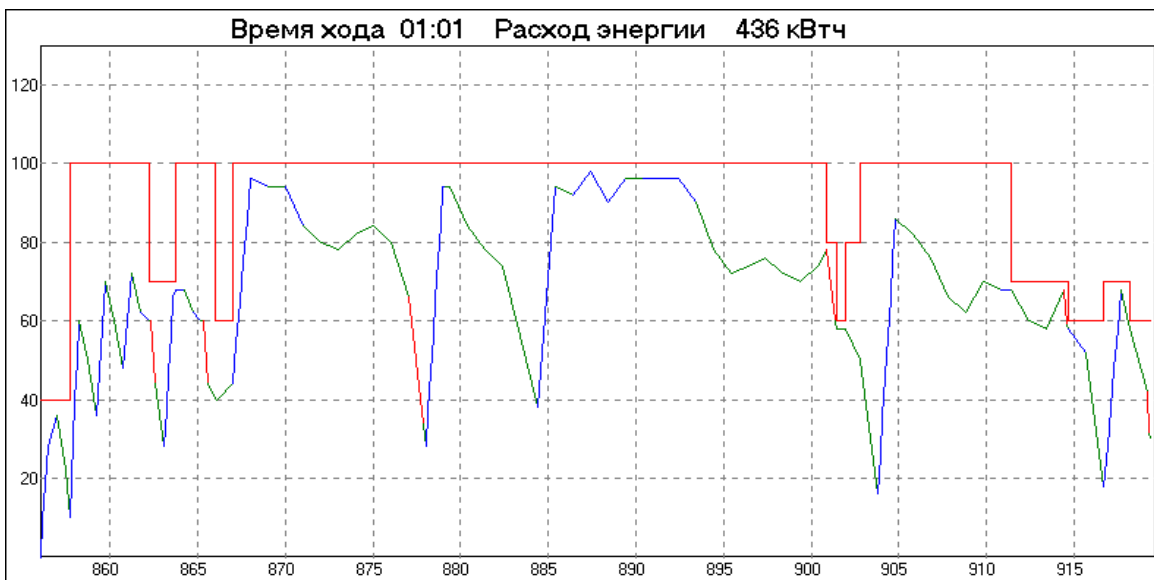
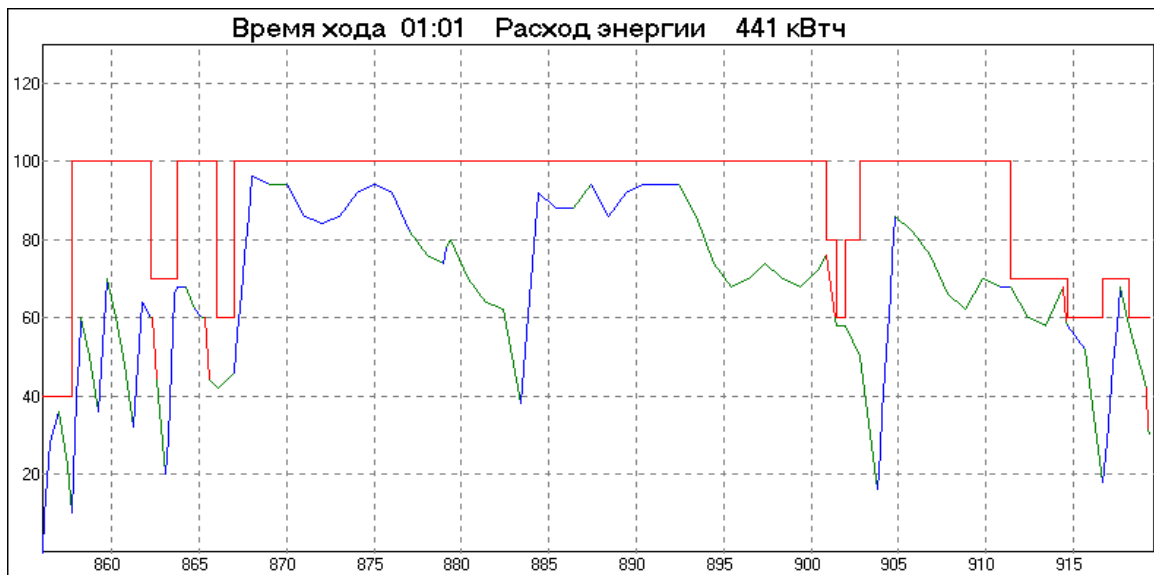


Рис. 3. Решение двухэтапной задачи расчета оптимальных режимов ведения поездов

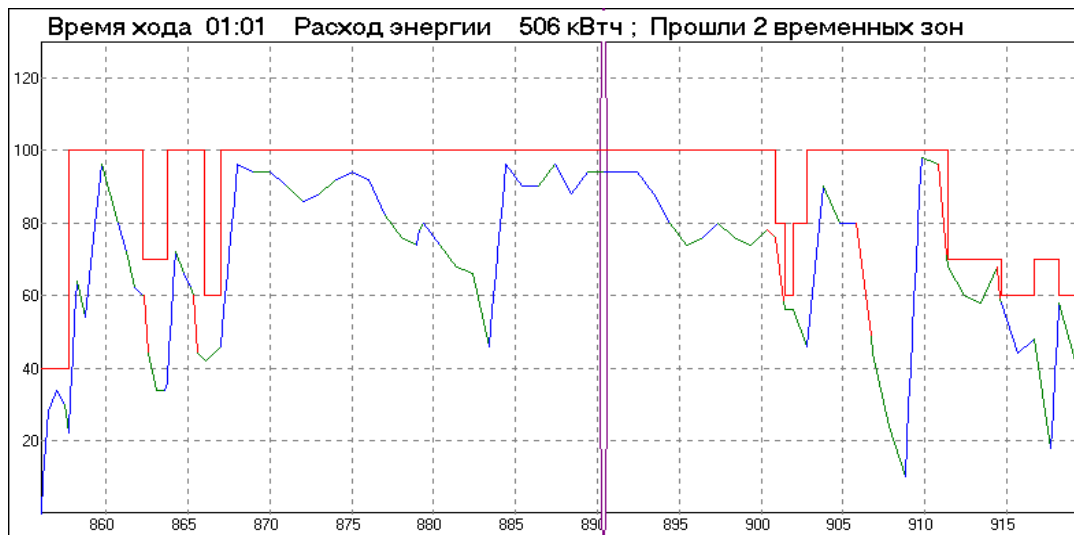


Рис. 4. График скорости движения электропоездов при использовании дифференцированных тарифов оплаты электроэнергии

Приведенные на рис. 2–4 результаты, а также другие подобного рода расчеты, свидетельствуют об эффективности предложенных методов учета как условий применения дифференцированных тарифов электроэнергии, так и случайных характеристик напряжений на токоприемнике ЭПС. Оптимальные режимы ведения поездов рассчитывались на основе модификации программы метода динамического программирования, представленной в работе [3].

Методы анализа экономической эффективности применения дифференцированных тарифов

Как показано в [7], задачи по оценке эффективности применения дифференцированных тарифов должны решаться во взаимосвязи с задачами по расчету оптимальных режимов движения поезда. При этом из-за значительного количества тяговых подстанций (ТП) возникают вычислительные трудности, которые вызваны комбинаторным характером процесса расчета оптимального распределения ТП соответственно условиям использования разных тарифов. Для упрощения методики экономического анализа с учетом практических потребностей и возможностей необходимо вместо поиска варианта распределения ТП по разным тарифам рассматривать более простую задачу – расчет эффективности применения ДТ для одной заданной ТП или для зафиксированного множества $J_A = \{j_1, j_2, \dots, j_m\}$ ТП.

Для заданного ($J_A = \{j_1, j_2, \dots, j_m\}$) множества ТП возможно лишь сравнение стоимостей

потребленной электроэнергии для ДТ и единого тарифа

$$C_S = \sum c_i * W_i^s \leq c_0 * W_S = C_0. \quad (11)$$

В критерии (11) обозначено: – $W_j^* = [W_{i,j}^*]_p$, $\forall j \in J_A$, – матрицы потребления электроэнергии по $W_i^s = \sum_{j \in J_A} W_{i,j}$ периодам суток $i = 1, 2, 3$; $W_S = \sum_i W_i$; $p = 3$; c_0 – единый тариф; c_i – дифференцированные тарифы; C_0 – стоимость электроэнергии для единого тарифа.

В случае выполнения условия (11) для некоторой тяговой подстанции или множества ТП, применение сменных тарифов для них экономически целесообразно.

Обобщение правила (11) ($C_S < C_0$) состоит в использовании характеристики $\hat{m}_C(\bar{c})$ – математического ожидания цены электроэнергии [7]. Смысл этого условия в том, что для определения экономической целесообразности важно знать не объемы потребления электроэнергии ТП по периодам суток, а лишь соотношения между этими показателями для разных периодов суток. Таким образом, для определения эффективности применения ДТ достаточно проверить следующий критерий:

$$\hat{m}_C(\bar{c}) = \sum \alpha_i \cdot c_i < c_0, \quad \alpha_i = W_i^s / W_S. \quad (12)$$

При выполнении условия (12) переход на ДТ является экономически эффективным.

Условие (12) позволяет установить предельные удельные (или абсолютные) объемы по-

ребления электроэнергии для установленных коэффициентов для разных периодов суток, при которых применения ДТ остается эффективным по показателям стоимости. Так для коэффициента тарифной зоны (j) предельный показатель объема потребления рассчитывается следующим образом:

$$\alpha_j^* = \left(c_0 - \sum_{i \neq j} \alpha_i \cdot c_i \right) / c_j. \quad (13)$$

На основе дополнительной информации, необходимой для постановки двухэтапной задачи стохастического программирования [2], можно получить более точное условие эффективности применения ДТ при закупках электроэнергии

$$M_{(c,\alpha)}[\tilde{c}, \tilde{\alpha}] = \sum_i \{ (\hat{\alpha}_i \cdot \hat{c}_i) + M[\Delta\alpha_{ik} p_{ik}] \cdot \hat{c}_i \} < c_0, \quad (14)$$

где второй, дополнительный, член обобщает критерий (12) для условий ДТ. В (14) обозначено: $\tilde{\alpha}$, $\hat{\alpha}_i$ – случайная величина удельного потребления электроэнергии, среднее и отклонение от средних в i -м периоде суток, p_{ik} – вероятность k -го интервала отклонений; \tilde{c} , \hat{c}_q – случайная величина цены и ее среднее значение на протяжении i -го часа суток; $M[*]$ – знак математического ожидания значений случайных величин. Информация для (14), может быть получена с помощью системы АСКУЭ.

Для применения критерия (14) необходимо построить закон распределения отклонений случайных величин удельного потребления электроэнергии в каждом i -м периоде таблицы тарифов следующего вида:

$$\frac{\Delta\alpha_k}{p_k} \left| \frac{\Delta\alpha_{k1}}{p_{k1}} \right| \left| \frac{\Delta\alpha_{k2}}{p_{k2}} \right| \left| \frac{\Delta\alpha_{k3}}{p_{k3}} \right| \dots \left| \frac{\Delta\alpha_{ki}}{p_{ki}} \right| \left| \frac{\Delta\alpha_{km}}{p_{km}} \right|. \quad (15)$$

Законы распределения вида (15), содержащие отклонения от средних и соответствующие значения вероятностей, необходимо построить для всех тарифных зон каждого ДТ, которые рассматривается при анализе эффективности методов закупки электроэнергии.

Модели и методы оценки экономической эффективности работы железной дороги на рынке электрической энергии

С некоторыми изменениями условие (12) может использоваться для оценки эффективности закупки электроэнергии в оптовом рынке

электроэнергии Украины (ОРЭ). При этом критерий принимает следующий вид:

$$\sum_i \alpha_i'' \cdot c_i < c_0^{\hat{c}}, \quad \alpha_i'' = W_i^S / W_{iS}'', \quad (16)$$

где характеристики представляют следующее: c_i – прогнозируемые оценки цены электроэнергии в ОРЭ на протяжении i -го часа суток, W_i^S – прогнозируемый показатель потребления электроэнергии для i -го часа суток, W_{iS}'' – приведенный показатель потребления электроэнергии вида

$$W_{iS}'' = \sum_k W_{ik} \cdot \left(\frac{c_0^k}{c_0^{\hat{c}}} \right),$$

где W_{ik} – объем потребления электроэнергии k -го облэнерго для i -го часа суток; α_i'' – скорректированные показатели относительного потребления электроэнергии (когда 100 % объема принимается за единицу) на тягу за тот же период; $c_0^{\hat{c}}$ – единый, принятый за базовый, тариф платы за электроэнергию; c_0^k – единый тариф платы за электроэнергию для k -го облэнерго.

Приведенные характеристики критерия (14) обобщают условие (15). Это вытекает из того, что при равенстве единого тарифа по всем облэнерго $\{c_0^1 = c_0^2 = \dots = c_0^k\}$ получаем характеристики условия (14).

Условие (16) не полностью учитывает стохастическую природу используемых характеристик (c_i, α_i) . На основе дополнительной информации, необходимой для постановки двухэтапной задачи стохастического программирования [2; 7], может быть образован обобщенный критерий, предназначенный для оценки выгоды переменных тарифов при закупке электроэнергии, который имеет вид

$$M_{(c,\alpha)}[\tilde{c}, \tilde{\alpha}] = \sum_i \{ (\hat{\alpha}_i \cdot \hat{c}_i) + M[\Delta\alpha_{ik}'' p_{ik}] \hat{c}_i + M[\Delta c_{iq} p_{iq}] \hat{\alpha}_i \} < c_0^{\hat{c}}. \quad (17)$$

В (17) обозначено: $\tilde{\alpha}$, $\hat{\alpha}_i$, $\Delta\alpha_{ik}$ – случайная величина относительного потребления электроэнергии; p_{ik} – вероятность k -го интервала отклонения; \tilde{c} , \hat{c}_q , Δc_{iq} – случайная величина цены, среднее и отклонение от средних на про-

тяжении i -го часа суток, p_{iq} – вероятность q -го интервала отклонения; $M[*]$ – знак математического ожидания случайных значений цены, где второй и третий члены суммы применяются при условиях ОРЭ.

Для использования (17) необходимо построить закон распределения для отклонений случайных величин потребления электроэнергии в каждом i -м периоде для таблицы тарифов (15), а также закон распределения отклонений случайных величин цены электроэнергии вида

$$\frac{\Delta c_q}{p_q} \left| \frac{\Delta c_{q1}}{p_{q1}} \right| \left| \frac{\Delta c_{q2}}{p_{q2}} \right| \dots \left| \frac{\Delta c_{qi}}{p_{qi}} \right| \left| \frac{\Delta c_{qm}}{p_{qm}} \right|. \quad (18)$$

В (18) указаны отклонения от средних, а также соответствующие значения вероятностей. Законы распределения вида (18) необходимо построить для всех часовых зон, учтенных в ОРЭ.

Выводы

Выявлены существенные особенности режимов тяги, оптимальных по стоимости электроэнергии, и предложены новые модели и методы расчетов режимов ведения поездов, обеспечивающие снижение стоимости электроэнергии, потребленной на тягу поездов в условиях

переменных тарифов, которые все шире применяются на железных дорогах Украины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блохин Е. П., Скалозуб В. В. Выбор режимов ведения поездов как стохастическая задача векторной оптимизации // Транспорт: Зб. наук. пр. / ДПТ. – Д.: Наука і освіта. 2001, – Вип. 7. – С. 28–31.
2. Математические методы исследования операций / Ю. М. Ермолев, И. И. Ляшко, В. С. Михалевич, В. И. Тюптя – К.: Вища школа, 1979. – 312 с.
3. Блохин Е. П., Слободян А. В., Евдомах Г. В. Методика расчета оптимальных по расходу электроэнергии времен хода поезда // Транспорт: Сб. научн. тр. / ДИИТ. – Д.: Наука и образование, 1999. – С. 47–55.
4. Гетьман Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда грузовых электропоездов для железных дорог Украины // Дис. ... д-р техн. наук. – Д., 2001. – 416 с.
5. Блохин Е. П., Пшинько А. Н., Евдомах Г. В., Скалозуб В. В., Землянов В. Б. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов // Залізничний транспорт України, № 6, 2001. – С. 19–22.
6. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
7. Скалозуб В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии // Транспорт: Зб. наук. пр., – Д. 2002, – Вип. 12. – С. 158–167.

Поступила в редколлегию 02.12.03.