

## **Развитие и автоматизация методов расчета оптимальных по стоимости потребленной электроэнергии режимов управления тягой грузовых поездов**

Представил д.т.н., проф. Скалозуб В.В.

---

### **Введение**

В связи с развитием рыночных отношений в Украине, реструктуризацией железнодорожного транспорта, а также ввиду вхождения железных дорог Украины в оптовый рынок электроэнергии (ОРЭ) все более актуальной становится проблема стоимостной оптимизации режимов ведения поездов. По оценкам специалистов Укрзализныци это позволит уменьшить оплату за электропотребление на 250 млн. грн. в год. Наибольшее потребление электроэнергии идет на тягу поездов. В работе развиты методы расчета оптимальных режимов ведения поездов в условиях переменных тарифов на электроэнергию. Они усовершенствованы за счет более полного и точного учета стоимости электроэнергии в различные периоды суток, а также оценке самой стоимости электропотребления на тягу поездов (различная стоимость активной и реактивной электроэнергии). На основе стоимостных оценок режимов тяги построены уточненные критерии эффективности применения переменных тарифов оплаты электроэнергии.

Существенное различие режимов электрической тяги поездов по крите-

рию минимума стоимости при применении переменных тарифов на электроэнергию было установлено в работах [1, 2]. В [2, 3] разработаны критерии для оценки эффективности переменных тарифов (дифференцированные тарифы, ОРЭ). При расчетах режимов ведения поездов в [1 – 3], в основном, рассматривались пассажирские перевозки.

Предложен усовершенствованный метод расчета режимов управления тягой грузовых по данным опытных поездок, основанный на методах нечеткого управления [4].

В статье, развиваются методы [1 – 3], а также автоматизированные технологии и АРМ, которые позволяют оперативно рассчитывать пакет режимных карт для разных временных зон, учитывая изменения стоимости электроэнергии при работе железных дорог на ОРЭ.

---

### **Математическая модель задачи выбора режимов ведения поездов**

Содержание, структура задачи выбора режимов тяги поездов (ЗВРП), присутствие факторов случайности и неопределенности параметров, позволяет классифицировать ее как задачу стохастического оптимального управления (ЗСОУ). Для ее решения при-

меняют приближенные методы, основанные на построении детерминированных аналогов моделей задачи. Здесь одним из основных методов является переход к анализу математических ожиданий случайных характеристик моделей задач. В частности, напряжение на токоприемнике ЭПС принимается, постоянным, равным математическому ожиданию. Такой подход требует тщательного

анализа, поскольку не всегда приводит к детерминированным аналогам, которые являются адекватными исходной задаче [1].

Считаем, что движение поезда как гибкой нити длины  $L_n$  с погонной массой  $p_n(z)$ ,  $0 \leq z \leq L_n$ , описывается системой дифференциальных уравнений вида (1) и начальными условиями (2).

$$\begin{aligned} \frac{d(v^2)}{dx} &= \frac{2\zeta}{(q+Q)(1+\gamma)} [F_e(x_e) - W(x_w) - B_T(x_B)]; \\ \frac{d\tau}{dx} &= \frac{\tau(I_D(v(u(x,t), U_C(x,t, \theta))) - \tau(x, t))}{v(x, t)T_D(I_D(v(u(x,t), U_C(x,t, \theta))))}; \end{aligned} \quad (1)$$

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

В (1) - (2) 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;  $\gamma$  – коэффициент инерции вращающихся масс;  $\zeta = g / 1000$ ,  $g$  – ускорение силы тяжести;  $F_e$  – сила тяги локомотива;  $W(x_w)$  – сопротивление поступательному движению поезда, равное:  $W = W'_0(v, u(x) + W''_0(v) + W_i(x) + W_r(x))$ ,

$$W_i(x) = \int_{x-Ln}^x i(z)P_n(z)dz \quad - \quad \text{сопротивление}$$

движению поезда от продольного профиля пути,  $i$ -величина уклона;

$$W_r(x) = \int_{x-Lm}^x i_r(z)P_n(z)dz \quad - \quad \text{сопротивление}$$

движению поезда от кривых в плане пути,  $i_r$ - удельное сопротивление от кривых; действующая на поезд тормозная сила –  $B_T$ ;  $\tau$  – температура нагрева тяго-

вых двигателей;  $\tau_* = \tau_\infty$ ,  $T_D$ ,  $I_D$  – тепловые характеристики и ток тягового электродвигателя;  $U_C(x, t, \theta)) - \tau(x, t)$  – напряжение контактной сети;  $\theta$  – 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.

Область допустимых фазовых траекторий определяется следующими ограничениями

$$G(x, v, \tau) = \left\{ \begin{array}{l} \tilde{x}_n \leq x \leq x_k \\ 0 \leq \tau \leq \tau_{don} \\ 0 \leq v \leq v^{\max}(x) \end{array} \right\} \quad (3)$$

где  $x_n$ ,  $x_k$  – начальная и конечная координаты пути участка между остановками поезда;  $\tau_{don}$  – максимально допустимая температура перегрева ТЭД.;  $v^{\max}(x)$  – максимально допустимая скорость движения поезда.

В соответствии с правилами технической эксплуатации на все возможные значения управления  $u(x)$  наложены ограничения, которые можно записать следующим образом:

$$\tilde{U} : \left\{ \begin{array}{l} I_d(v, U_c, u(c)) \leq I_d^{\max} \\ F_k(v, u(x), U_c) \leq \psi_k(v) \cdot P \\ K^n(t, u(x)) \cdot \phi_k(v) \cdot q_0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

где  $\tilde{U}$  - область допустимых управлений;  $I_d^{\max}$  - максимально допустимый ток ТЭД;  $q_0$  - нагрузка на ось экипажа;  $\psi_k$  - коэффициент сцепления колеса с рельсом;  $K^n$  - сила нажатия тормозных колодок колесной пары;  $\phi_k$  - коэффициент трения тормозной колодки о колесо.

Оптимальный закон управления движением поезда  $u(x)$  должен удовлетворять изопериметрическому ограничению (сравнивать законы управления можно только при одинаковом времени хода).

$$t_x[u] = \int_{x_n}^{x_k} \frac{dx}{v(x, u)} \equiv t_3 \quad (5)$$

где  $t_3$  – заданное время движения на участке между остановками поезда.

Критерий оценки закона управления на участке  $u(x)$  представляет собой функционал (затраты электроэнергии на тягу поезда)

$$A[u] = \int_{x_n}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) dx}{v(x, u)} \quad (6)$$

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

Тогда задачу выбора оптимального режима ведения поезда можно сформулировать следующим образом: найти

такой закон управления  $u^*(x) \in \tilde{U}$ , чтобы соответствующее ему решение системы уравнений (1-2) принадлежало области  $\tilde{G}$ , выполнялись ограничения (5), критерий оптимальности (6) принимал минимальное значение, а начальная и конечная точки траектории принадлежали множеству начальных значений  $(x_0, v_0, \tau_0)$  и множеству конечных значений  $(x_k, v_k, \tau_k)$ .

---

### Дифференцированные и переменные тарифы ОРЭ оплаты потребленной на тягу поездов электроэнергии

---

Железнодорожный транспорт один из самых больших в стране потребителей топливно-энергетических ресурсов [2]. Существует несколько тарифов оплаты электроэнергии, целью введения которых является стимулирование работы предприятий в часы, отличные от пикового потребления электроэнергии. Тарифы задаются в зависимости от времени суток, т.е. от загруженности электростанций потребителями. В таблице 1 приведён пример относительный ценовой коэффициент стоимости электроэнергии в разное время суток (данные 2006), что может заметно влиять на управление поездами и на составление оптимальных по критерию минимума стоимости электроэнергии управлений. В условиях ОРЭ стоимость электроэнергии изменяется почасово, еще в большей степени усложняя расчеты режимов ведения поездов

Таблица 1

Относительные стоимости электроэнергии в различные периоды суток

Время суток	0 – 5ч.	5 – 8ч.	8 – 11ч.	11–17ч.	17–20ч.	20–23ч.	23–24ч.
период	Ночь	Полу-пик	Пик	Полу-пик	Пик	Полу-пик	ночь
Ценовой коэффициент	0.25	1.02	1.8	1.02	1.8	1.02	0.25

Учитывая эти знания можно внести дополнения в математическую модель, пусть функция  $c(t)$  – определяет ценовой коэффициент в зависимости от времени  $t$ , тогда критерий оценки закона управления на участке (6) представляет собой функционал (затраты цены электроэнергии на тягу поезда)

$$A[u] = \int_{x_n}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) \cdot c(t) dx}{v(x, u)} \quad (7)$$

полученное управление будет оптимально по затратам на электроэнергию.

### Модель нечеткого управления режимами тяги поездов

В моделях управления тягой [1-2] использовано множество величин, значения которых сложно точно получить, или же их систематической измерение требует больших затрат и сложных технологий. Поэтому на практике надежной основой для оценки и расчетов рациональных режимов ведения поездов являются опытные поездки, представляющие выполненные фактически режимы тяги. Рассмотрим задачу выбора рационального режима тяги локомотива на основе построения базы нечетких правил экспертных систем по данным опытных поездок и формирования и организации управления тягой на основе

методов нечеткого вывода [4]. Такие правила управления учитывают отклонения фактических состояний процессов управления от оптимальной режимной карты для эталонного случая, рассчитанной для поезда заданной массы на заданном перегоне (эталонный режим). Эталонными режимами служат данные о фактических поездках или же расчеты согласно моделям в работах [2, 3]. Для построения баз нечетких правил управления тягой поезда использовались методы моделирования. На основе (1) – (7) формировались и реализовались программным путем наборы опытных поездок, где использовались расчеты режимов тяги поездов с разными массами, разным напряжением на токоприемнике, при различных ограничениях по скорости и изменением других параметров.

При формировании правил установлены такие параметры:

$\Delta t_i$  – разница по времени движения на участке «i», для характеристики которого введены значения нечетких величин  $Tr$ : «отставание (сильное, слабое, отсутствует)» и «опережение (отсутствует, слабое, сильное)»,  $\Delta v_i$  – отклонение скорости для участка «i», величина  $V_p$  со значениями: «сильное, отсутствует, слабое».  $\Delta m$  – разница массы поезда опытной траектории и поезда из эталонной поездки, величина  $M_p$ .  $Si$  – участок пути, или номера пикетов, величина

на  $Sp$ , где  $i = 0, 1.. n$  – это количество точек опытной траектории для одного перегона.

Нечеткие правила имеют вид, подобный работе [4], а их параметры настраиваются на основе эталонных расчетных данных:

**ЕСЛИ  $\dot{x}_i$  есть  $Sp$  И  $\Delta m$  есть  $Mr$  И  $\Delta t_i$  есть  $Tr$  И  $\Delta v_i$  есть  $Vp$  ТО  $\Delta U_i$ ,**

где  $\Delta U_i$  – количество позиций контролера, относительно текущего положения, которые обеспечивают управление, близкое к оптимальному на некотором  $i$ -том участке пути. При построении модели управления в виде нечетких правил использована работа [4], когда каждая нечеткая характеристика аппроксимируется  $N$  нечеткими величинами с треугольными функциями принадлежности. Для нечеткой характеристики заданы минимальное и максимальное значение, интервала, в которых находятся её допустимые значения. Аппроксимирующие величины имели треугольную модель степеней принадлежности: вершина лежит в центре, ей соответствует степень принадлежности 1, а две другие вершины по сторонам от нее со степенями принадлежности 0. Нечеткий вывод основывается на правиле нечеткой импликации, построенном на правиле Мамдани [4].

Таблица 2

Фрагмент таблицы характеристики нечеткой величины  $Mr$  (масса поезда)

№	Название значения	$\alpha=0$	$\alpha=1$	$\alpha=0$
1	Л1	-420	-320	-220
2	Л2	-358	-258	-158
3	Л3	-300	-200	-100

4	СрЛ1	-250	-150	-50
5	СрЛ2	-200	-100	0
6	Н2	-150	-50	50
7	Н	-100	0	100
8	Н1	-50	50	150
9	СрТ1	0	100	200
10	СрТ2	50	150	250

Рассмотрим величину  $Mr$  (разница масс поездов по отношению к эталонному поезду). Минимальное значение разницы масс равнялось -320 т., а максимальное 300т. Разбив этот интервал на 13 частей, имеем такие значения нечеткой величины, показанные в таблице (таблица 2). Названия каждого значения заданы таким образом: значения около 0 называются «Н» (нет отклонения), максимальные значения «Т» (тяжелее), минимальные значения «Л» (легче); между ними «СрЛ» (средне легче) и «СрТ» (средне тяжелее). Изображение этой величины в виде графиков функции принадлежности показано на рис. 1.

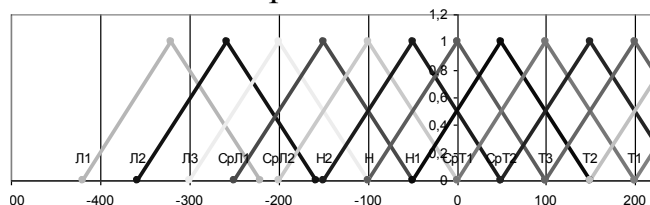


Рисунок. 1. Функции принадлежности при аппроксимации нечеткой величины  $Mr$

Разбиение каждой величины следовало откорректировать так, чтобы добиться наибольшего соответствия значениям, которые подаются на вход нечеткой модели управления тягой поездов.

На следующем шаге выполнено формирование базы правил. При этом каждое значение из обучающей выборки эталонных режимов тяги сопоставляется со значениями нечеткой характеристики и заменяется

той, значения которой имеют максимальную степень принадлежности среди всех термов в области. Например, значения отклонений  $\Delta m = 80$ ,  $\Delta t_i = -5$  и  $\Delta v_i = 30$ , а  $\Delta U_i = 3$  тогда получим такое правило:

ЕСЛИ  $\Delta m$  есть «Н» И  $\Delta t$  есть «Опер.сред2» И  $\Delta v$  есть «Быс4» ТО  $\Delta U = 3$ .

Для каждой точки опытной траектории получается несколько правил и возникает проблема их противоречивости: правила с одинаковыми посылками будут подтверждать разные выводы. Проблема решается приписыванием каждому правилу степени истинности. При появлении противоречивых правил проверяется их степень истинности и остается правило с наибольшей степенью истинности. Такой способ уменьшает общее количество правил в базе и полностью устраняет противоречивость. Степень истинности вычисляем как произведение степени принадлежности всех величин участвующих в правиле [4]. Построенная база правил имеет вид таблицы, в которой есть столбцы посылок, столбец вывод и степень истинности правила.

Использование базы нечетки правил заключается в определении отображения входных посылок  $f(s_i, \Delta m, \Delta t_i, \Delta v_i) \Rightarrow \Delta U_i$ , где  $\Delta U_i$  – нечеткая величина, для определения количественного значения которой необходимо выполнять операцию дефаззификации [4]. В представленных результатах был использован метод дефаззификации по правилу среднего центра.

---

### **Разработка АРМ расчета режимных карт управления режимами тяги по стоимости электроэнергии**

---

Программный комплекс (АРМ), написан на языке программирования C++ и предназначен для систем с процессором Intel под операционной системой Windows, выполняет следующие функции:

1. Хранение и ведение базы данных, содержащей следующую информацию:

- расписание поездов (названия станций, плечи обслуживания);
- ветки пути, координаты станций, ограничения на ветках (пробы тормозов, нейтральные вставки, временные ограничения);
- характеристики кривых участков, расположение и длина нейтральных вставок, профиль участка и километраж.

2. Расчет оптимальной режимной карты ведения поезда на заданном участке пути:

- Управление поездом с минимальным расходом электроэнергии;
- Управление оптимальное по стоимости электроэнергии с учетом дифференцированных или переменных тарифов оплаты (ОРЭ);
- Управление, учитывающее переменность напряжения на токоприемнике;
- Помехозащищенное управление поездом, не зависящее от перепадов напряжения.

3. Выдача документов

- Режимная карта или режимная карта, защищенная от изменений напряжения на токоприемнике;

- Количество затраченной электроэнергии с учетом временных зон;
- Перегонные времена на участке пути;

- График изменения скорости на участке пути;

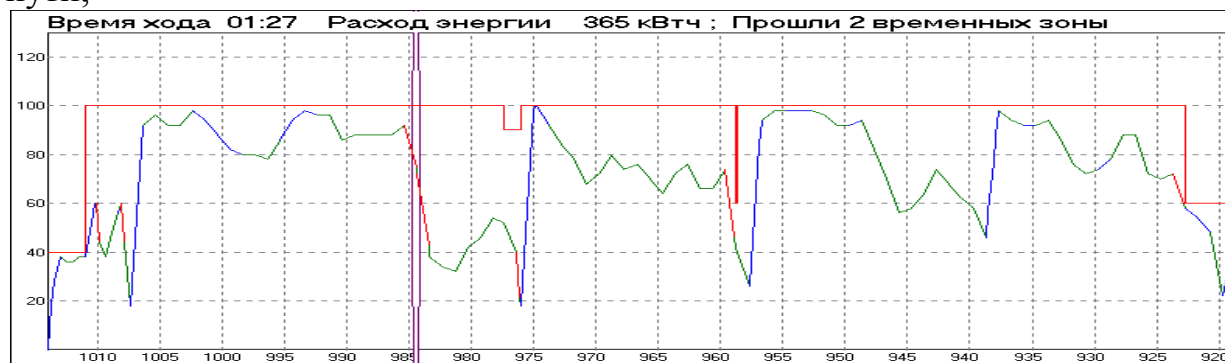


Рисунок 2 Результаты расчета скорости поезда, при отправлении из Винницы, оптимальные по общему расходу электроэнергии на тягу

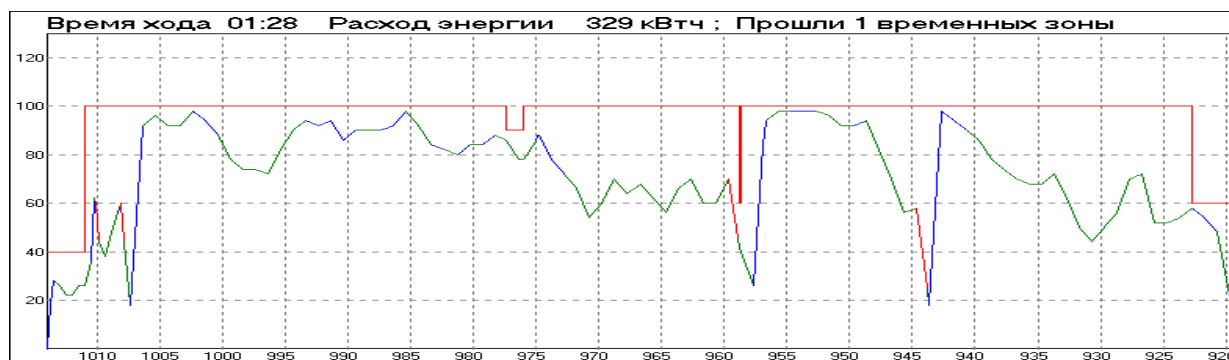


Рисунок 3 Результаты расчетов участковой скорости поезда, при отправлении из Винницы в 6 час 30 мин, оптимальность по стоимости электроэнергии на тягу

На рис. 2 рис. 3 показаны рассчитанные скорости движения электропоездов на участке Казатин-Фастов, оптимальные по расходу электроэнергии (рис. 2) или стоимости потребленной электроэнергии (рис. 3). При отправлении электропоездов в разное время суток можно заметить увеличение расхода электроэнергии на тягу при уменьшении ее стоимости, что вызвано изменением тарифа за электроэнергию.

Реализованный программный комплекс в виде автоматизированного рабо-

чего места позволяет рассчитывать режимные карты для определённых типов пассажирских и грузовых поездов. Рассчитанные режимные карты выступают рекомендацией машинисту электровоза при управлении поездом. Основой оптимизации перегонных времен хода является математическое моделирование движения поезда. В качестве метода оптимизации режимов вождения поездов между пунктами остановки при заданном времени хода, выступает метод динамического программирования в дискретной форме.

---

## Выводы

В ходе исследований установлена эффективность применения переменных тарифов оплаты для уменьшения стоимости электроэнергии, потребленной на тягу поездов. Показано существенное отличие режимов ведения поезда, оптимальных по стоимостным показателям, от режимных карт, оптимальных по критерию минимума электропотребления. Разработаны методы расчета компромиссно-оптимальных режимов тяги поездов.

Разработан уточненный метод расчета режимов тяги поездов, с использованием моделей нечеткого управления. Полученную базу правил, по сути, заменяющую собой модель движения поезда, можно использовать в форме советчика машиниста для выбора управления на очередном участке пути с учетом условий неопределенности.

Разработан АРМ по расчету режимных карт, оптимальных по стоимости потребленной на тягу поездов электроэнергии, который может использоваться для грузовых и пассажирских перевозок

электроэнергии //Системні технології, №3' (26), 2003. С. 142 – 150.

3. Скалозуб В.В., Иванов А.П. Модели управления движением поездов на основе данных опытных поездок. Локомотив информ, май 2007, г. Харьков, «Техностандарт».

4. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. // М. Горячая линия – Телеком, 2004 г.

## Анотация

В представленной статье предложена усовершенствованная модель получения оптимальных по стоимости потребленной электроэнергии режимных карт управления тягой поездов.

---

У представлений статті запропонована вдосконалена модель одержання оптимальних за вартістю спожитої електроенергії режимних карт управління тягою поїздом

---

The present article proposes an improved model of the optimum cost of consumed electricity regime maps of train traction

---

## Литература

1. Скалозуб В.В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии //Транспорт. Зб. наук. праць, вип. 12. – Дніпропетровськ, 2002. С. 148 – 157.

2. Скалозуб В.В., Евдомах Г.В. Исследование режимов ведения поездов с учетом переменных тарифов оплаты