

УДК 656.222.4

А. П. ИВАНОВ, В. В. СКАЛОЗУБ, Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. А. Лазаряна

ВЫБОР РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ПРОДУКЦИОННОЙ МОДЕЛИ

В модели выбора рациональных режимов ведения поездов использованы множество величин, значения которых сложно точно получить, и их измерение потребует больших затрат. На практике надежной основой для оценки и расчетов рациональных режимов ведения поездов являются опытные поездки, представляющие выполненные фактически режимы тяги. Рассмотрена задача выбора рационального режима тяги локомотива на основе построения базы правил экспертных систем по данным опытных поездок и организации нечеткого вывода. Основой для построения базы нечетких правил стали численные значения отклонения опытных режимов управления от эталонного управления. При формировании правил установлены необходимые параметры. Выполнено формирование базы правил. Каждое значение из обучающей выборки эталонных режимов тяги сопоставляется со значениями нечеткой характеристики и заменяется той, значения которой имеют максимальную степень принадлежности среди всех заданных в области. Выполненные исследования показали достаточную точность результатов моделирования задачи выбора режимов управления локомотивом. Полученную базу нечетких правил, заменяющую собой модель движения поезда, можно использовать в форме советчика машиниста для выбора управления на участке пути с учетом условий неопределенности.

Проблема выбора рациональных режимов ведения поездов остается одной из основных для железнодорожного транспорта. Ее решение опирается на все более полный учет факторов, определяющих режим ведения поезда. Разрабатываемые для этого статистические модели предполагают наличие значительных объемов аналитической информации.

В [1, 2] представлена следующая математическая модель, описывающая движение поезда. Поезд представляется гибкой нитью длины L_n с погонной массой $p_n(z)$, $0 \leq z \leq L_n$ и описывается системой дифференциальных уравнений [1, 2] вида (1) и начальными условиями (2):

$$\frac{d(v^2)}{dx} = \frac{2\zeta}{(q+Q)(1+\gamma)} [F_e(x_e) - W(x_w) - B_T(x_B)];$$

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{\tau(I_D(v(u(x,t), U_C(x,t, \theta))) - \tau(x,t))}{v(x,t)T_D(I_D(v(u(x,t), U_C(x,t, \theta))))}; \quad (1)$$

$$x(0) = x_0; \quad v(0) = \dot{x}_0; \quad \tau(0) = \tau_0, \quad (2)$$

где (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; $W(x_w)$ – сопротивление поступательному движению поезда,

$$W = W'_0(v, u(x)) + W''_0(v) + W_i(x) + W_r(x);$$

$W_i(x) = \int_{x-Ln}^x i(z)P_n(z)dz$ – сопротивление движению поезда от продольного профиля пути, i – величина уклона; $W_r(x) = \int_{x-Lm}^x i_r(z)P_n(z)dz$ – сопротивление движению поезда от кривых в плане пути; i_r – удельное сопротивление от кривых; B_T – действующая на поезд тормозная сила; τ – температура нагрева тяговых двигателей; $\tau^* = \tau_\infty, T_D, I_D$ – тепловые характеристики и ток тягового электродвигателя; $U_C(x, t, \theta)$ – 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.

Область допустимых фазовых траекторий определяется следующими ограничениями:

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

где x_n, x_k – начальная и конечная координаты пути участка между остановками поезда; $\tau_{\text{доп}}$ – максимально допустимая температура перегрева ТЭД; $v^{\text{max}}(x)$ – максимально допустимая скорость движения поезда. На все возможные значения управления $u(x)$ наложены ограничения, которые можно записать следующим образом:

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

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

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

$$t_x[u] = \int_{x_{\text{н}}}^{x_{\text{к}}} \frac{dx}{v(x, u)} \equiv t_3, \quad (5)$$

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

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

$$A[u] = \int_{x_{\text{н}}}^{x_{\text{к}}} \frac{U_c I_{\text{да}}(v, u) dx}{v(x, u)} \rightarrow \min_{u \in Du}, \quad (6)$$

где $I_{\text{да}}(v, u)$ – активный ток электровоза.

Задачу выбора оптимального режима ведения поезда формулируют 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 (3), (5), критерий оптимальности (6) принимал минимальное значение, а начальная и конечная точки траектории принадлежали множествам начальных (x_0, v_0, t_0) и конечных (x_k, v_k, τ_k) значений.

В модели использовано множество величин, значения которых сложно точно получить или же их измерение потребует больших затрат. 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 правил экспертных систем по данным опытных поездок и организации нечеткого вывода. В целом правила управления учитывают отклонения фак-

тического состояния от оптимальной режимной карты для эталонного случая, рассчитанной для поезда заданной массы на заданном перегоне (эталонный режим). Эталонными служат либо данные о фактических поездках или же расчеты согласно (1)–(6). Для моделирования опытных поездок использовались расчеты режимов тяги поездов с разными массами, разным напряжением на токоприемнике, при различных ограничениях по скорости и изменением других параметров. Основой для построения базы нечетких правил стали численные значения отклонения опытных режимов управления от эталонного. При формировании правил установлены такие параметры:

Δt_i – разница по времени хода на участке « i », для характеристики которого введены значения нечетких величин T_p : «отставание (сильное, слабое, отсутствует)» и «опережение (отсутствует, слабое, сильное)»; ΔV_i – отклонение скорости для участка « i »; величина V_p со значениями: «сильное, отсутствует, слабое»; Δm – разница массы поезда опытной траектории и поезда из эталонной поездки – величина M_p , S_i – участок пути или номера пикетов – величина S_p , где $i = 0, 1$; n – это количество точек опытной траектории для одного перегона.

Нечеткие правила имеют вид, подобный работе [3]:

**ЕСЛИ S_i есть S_p И Δm есть M_p И Δt_i есть T_p
И ΔV_i есть V_p ТО ΔU_i ,**

где ΔU_i – количество позиций контроллера относительно текущего положения, которые обеспечивают управление, близкое к оптимальному на некотором i -м участке пути. При построении модели управления в виде нечетких правил использованы материалы работ [4].

Каждая нечеткая характеристика аппроксимируется N нечеткими величинами с треугольными функции принадлежности. Для каждой нечеткой характеристики задается минимальное и максимальное значения интервала, в которых находятся её допустимые значения. Аппроксимирующие величины будут иметь треугольную степень принадлежности: вершина лежит в центре, ей соответствует степень принадлежности 1, и две другие вершины по сторонам от нее со степенями 0.

Рассмотрим величину M_p (разница масс поездов по отношению к эталонному поезду). Минимальное значение равнялось 320 т, а максимальное – 300 т. Разбив этот интервал на 13 частей, имеем такие значения нечеткой величины (таблица 1):

Таблица 1 – Значения нечеткой величины M_p

Название	$\alpha = 0$	$\alpha = 1$	$\alpha = 0$
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
11 Т3	100	200	300
12 Т2	150	250	350
13 Т1	200	300	400

Названия каждого значения даны 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). Отображение этой величины в виде графика функции принадлежности показано на рисунке 1.

Каждая аппроксимация была представлена такими нечеткими значениями, полученными разбиением допустимого интервала на части (рисунки 2–3).

Разбиение каждой величины надо откорректировать таким образом, чтобы более соответствовать значениям, которые подаются на вход модели.

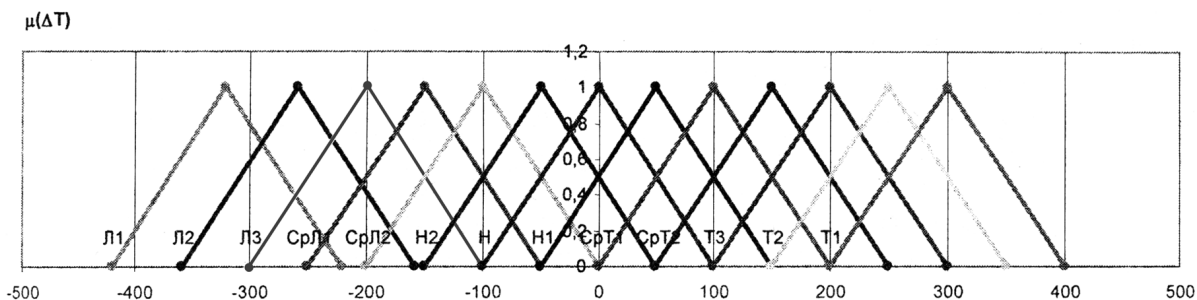


Рисунок 1 – Функции принадлежности аппроксимации значений нечеткой величины M_p

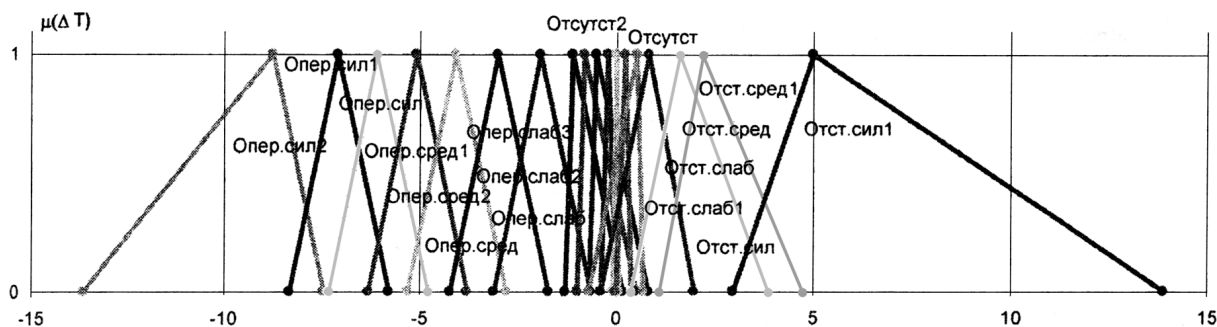


Рисунок 2 – Функции принадлежности аппроксимаций значений нечеткой величины T_p (отставание по времени)

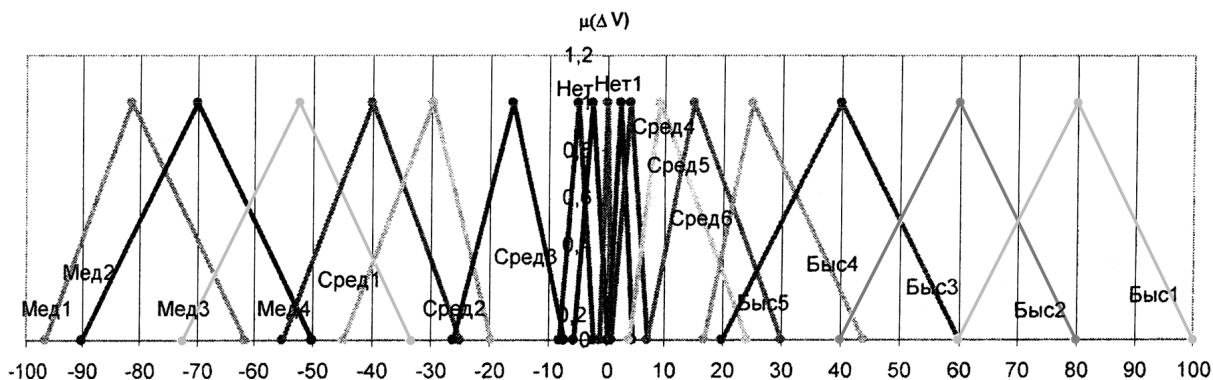


Рисунок 3 – Функции принадлежности аппроксимаций значений нечеткой величины V_p (отклонение в скорости)

На следующем шаге выполнено формирование базы правил. При этом каждое значение из обучающей выборки эталонных режимов тяги сопос-

тавляется со значениями нечеткой характеристики и заменяется той, значения которой имеют максимальную степень принадлежности среди всех за-

данных 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 Δm есть «Н» **И** Δt есть «Опер.сред2»
И ΔV есть «Быс4» **ТО** $\Delta U = 3$.

Для каждой точки опытной траектории получается одно правило. Таких правил несколько, и возникает проблема противоречивости части правил: правила с одинаковыми посылками будут подтверждать разные выводы. Эта 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 принято вычислять 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. В таблице 2 представлена часть полученной базы правил.

Использование базы нечетких правил заключается в определении отображения входных посылок $f(S_i, \Delta m, \Delta t_i, \Delta V_i) \Rightarrow \sim \Delta U_1$, где $\sim \Delta U_1$ – нечеткая величина, для определения количественного значения которой необходимо выполнять операцию дефuzziфикации [2].

Результаты проведенного моделирования проиллюстрированы примером на рисунке 4, где изображен график зависимости скорости от пройденного расстояния для двух разных поездов.

Тонкая линия – скорость эталонного поезда, которая представляет рассчитанную аналитически согласно (1)–(6) идеализированную оптимальную

траекторию. Исходными данными для построения базы правил являлись значения отклонений в скорости, времени хода, массе поезда от данной эталонной поездки других расчетных поездок. Жирная линия показывает контрольную расчетную поездку, информация о которой не попадала в обучающую выборку, которую нужно приблизить к эталонной поездке на основе базы нечетких правил.

Таблица 2 – Фрагмент полученной базы правил

Степень истинности	S	Δm	ΔT	ΔV	ΔU
0,6310	61600	T2	Отст.слаб1	Нет	0
0,9465	62200	T2	Отст.слаб1	Нет	0
0,8051	63200	T2	Отст.слаб1	Нет1	0
0,9735	63400	T2	Отст.слаб1	Нет	0
0,8812	63400	T2	Отсутст1	Нет	0
0,7600	0	СрТ1	Отсутст2	Нет	0
0,7600	167	СрТ1	Отсутст2	Нет	2
0,5054	334	СрТ1	Отсутст2	Нет	0
0,4395	500	СрТ1	Отсутст2	Нет	-9
0,3863	1000	СрТ1	Отст.слаб	Сред2	-2
0,1200	1400	СрТ1	Отст.сред	Сред2	-9
0,4016	1600	СрТ1	Отст.сред	Сред2	-4
0,5899	1800	СрТ1	Отст.сред	Сред2	-4
0,5653	2000	СрТ1	Отст.сред	Сред2	-2
...					
0,0231	61000	СрТ2	Опер.сил2	Сред4	2
0,0383	61200	СрТ2	Опер.сил2	Сред4	2
0,0282	61400	СрТ2	Опер.сил2	Сред5	2
0,0368	61600	СрТ2	Опер.сил2	Сред5	0
0,0189	62200	СрТ2	Опер.сил2	Сред6	0
0,0000	63200	СрТ2	Опер.сил2	Сред6	-1
0,0000	63400	СрТ2	Опер.сил2	Нет	0
0,9800	0	Л2	Отсутст2	Нет	-2
0,9800	167	Л2	Отсутст2	Нет	0
0,6517	334	Л2	Отсутст2	Нет	-2
0,5667	500	Л2	Отсутст2	Нет	-9

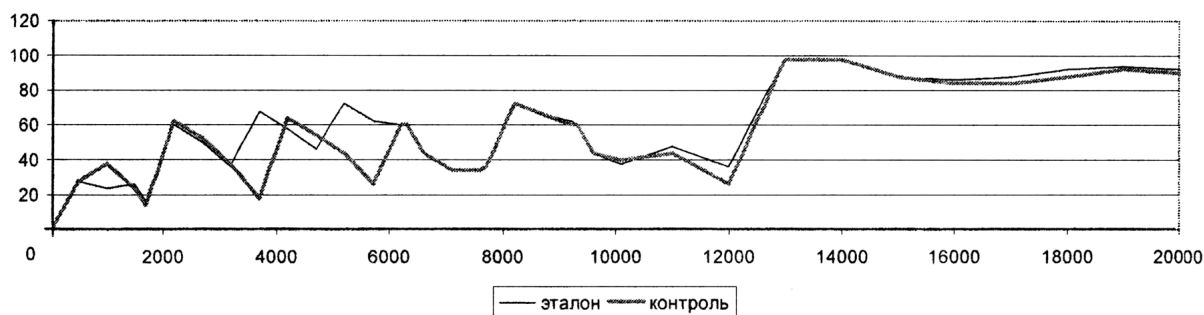


Рисунок 4 – Скорость эталонного и контрольного поездов на заданном перегоне

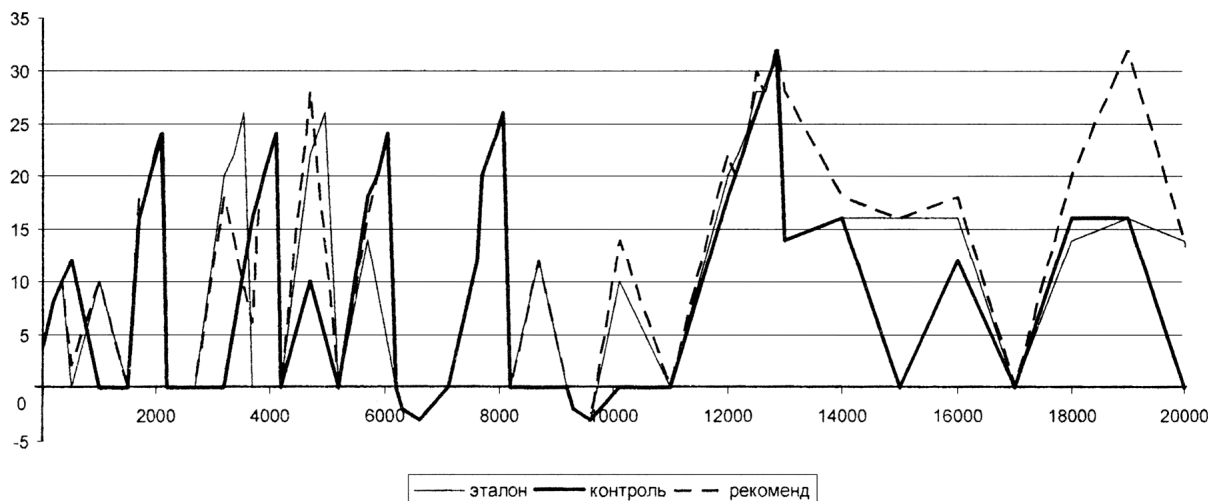


Рисунок 5 – Зависимость номера позиции контроллера от участка пути

На рисунке 5 показано, как система, основанная на выводе из базы правил, производила корректировку управления контрольной поездкой. Пунктирная линия представляет рекомендуемое управление, которое нужно задать машинисту локомотива, чтобы движение поезда приблизилось к показателям заданного эталонного управления. Из графика видно, что рекомендуемое системой управление стремится увеличить номер позиции, чтобы ускорить движение. Это объясняется тем, что в качестве контрольной была взята поездка с опозданием, поэтому повышение скорости приближает ее к оптимальному управлению.

Выполненные исследования показали достаточную точность результатов моделирования задачи выбора режимов управления локомотивом.

Получено 12.10.2006

A. P. Ivanov, V. V. Skalozub. Choice of control modes of train dispatching on the basis of fuzzy productional model.

In model of a choice of rational modes of of train dispatching are used set of sizes which values are difficultly exact to receive and their measurement will demand the big expenses. In practice by a reliable basis for an estimation and calculations of rational modes of train dispatching the skilled trips representing modes executed actually of draft are. The task of a choice of a rational traction mode of the locomotive is considered on the basis of construction of rule database of expert systems according to test trips and the organization of an fuzzy derivation. A basis for construction of fussy rule database became numerical values of a deviation of test control modes from reference control. At formation of rules necessary parameters are established. Formation of rule database is executed. Each value from training sample of reference traction mode compares to values of the fuzzy characteristic and is replaced with that which values have the maximal degree of a belonging among all given in areas. The executed researches have shown sufficient accuracy of results of modelling of a task of a choice of control modes by the locomotive. The received fuzzy rules database, replacing model of movement of a train, it is possible to use in the form of the adviser engineman for a choice control mode on a site of a way in view of conditions of indeterminacy.

Полученную базу нечетких правил, заменяющую собой модель движения поезда, можно использовать в форме советчика машиниста для выбора управления на очередном участке пути с учетом условий неопределенности.

Список литературы

- 1 Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов / Е. П. Блохин [и др.] // Залізничний транспорт України. – 2001. – № 6. – С. 19–22.
- 2 Скалозуб, В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии / В. В. Скалозуб // Транспорт : зб. наук, праць. Вип. 12. – Дніпропетровськ, 2002. – С. 148–157.
- 3 Згуровский, М. З. Интегрированные системы оптимального управления и проектирования / М. З. Згуровский. – Київ : Вища школа, 1990.
- 4 Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия. – Телеком, 2004.