

УДК 629.4.016.12

В.В. Скалозуб, А.П. Иванов

## УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО ОПИСАНИЯ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ

Сокращение эксплуатационных расходов – важнейшее направление повышения эффективности работы железных дорог Украины

Железнодорожный транспорт один из значительных потребителей топливно-энергетических ресурсов Украины. В год только на тягу поездов потребляется более четырех миллиардов кВт·ч электроэнергии. Одним из эффективных путей экономии энергоресурсов является внедрение энергетически-оптимальных графиков движений поездов (расчет времен хода по участкам) и оптимальных режимных карт ведения поездов на главных направлениях железных дорог Украины.

Проблеме обеспечения энергетически-эффективного процесса перевозок посвящены многочисленные исследования в Украине и за рубежом [1,2]. В них рассматриваются вопросы формализации постановок задач, учитывающих разнообразные факторы и условия процесса движения поезда по переменному профилю пути, математические методы исследования возникающих при этом оптимизационных задач. Сложность задачи организации оптимального ведения поезда в первую очередь определяется полнотой учета совокупности факторов характеризующих участок, силы, модель поезда и т.д. В зависимости от полноты имеющихся данных для решения задачи расчета оптимальных режимов тяги применяются различные методы, основанные на моделях непрерывного и дискретного оптимального управления.

### Построение нечеткой системы для выбора режимов управления движением поезда

В моделях [1, 2] использовано множество величин, значения которых сложно точно получить, или же их измерение требует больших затрат. На практике надежной основой для оценки и расчетов рациональных режимов ведения поездов являются опытные поездки, представляющие выполненные фактически режимы тяги.

---

© В.В. СКАЛОЗУБ, А.П. ИВАНОВ, 2007

Рассмотрим задачу выбора рационального режима тяги локомотива на основе построения базы нечетких правил экспертных систем по данным опытных поездок и организации нечеткого вывода. Такие правила управления учитывают отклонения фактических состояний 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 [1, 2]. 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.

При формировании правил установлены такие параметры:

$\Delta t_i$  – разница по времени движения на участке « $i$ », для характеристики которого введены значения нечетких величин  $T_r$ : «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  $M_p$ .  $S_i$  – 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**  $\Delta m$  есть  $M_p$  **И**  $\Delta t_i$  есть  $T_r$  **И**  $\Delta v_i$  есть  $V_p$  **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 [3], а каждая нечеткая характеристика аппроксимируется  $N$  нечеткими величинами с треугольными функции принадлежности. Для нечеткой характеристики заданы минимальное и максимальное значение, интервала, в которых находятся её допустимые значения. Аппроксимирующие величины имели треугольную степень 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 [3].

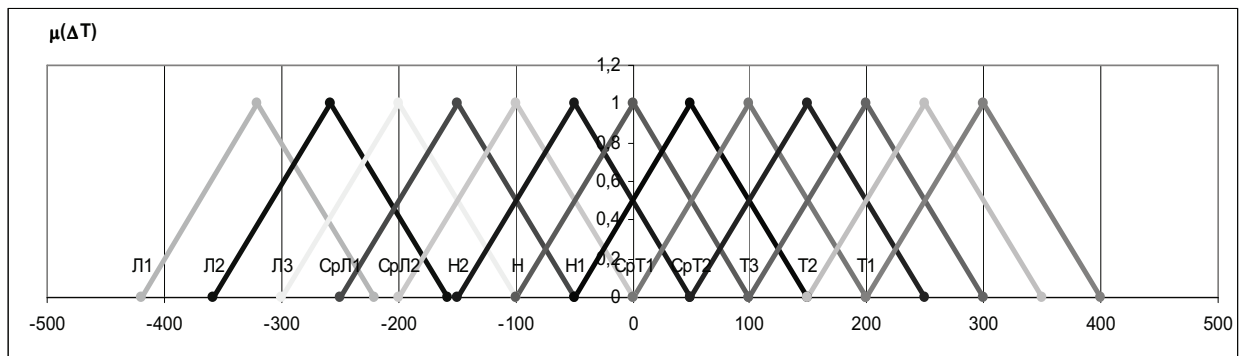
Рассмотрим величину  $M_p$  (разница масс поездов по отношению к эталонному поезду). Минимальное значение разницы масс равнялось -320 т., а максимальное 300т. Разбив этот интервал на 13 частей, имеем такие значения нечеткой величины, показанные в табл. 1.

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). Изображение этой величины в виде графиков функции принадлежности показано на рис. 1.

Таблица 1

Значения нечеткой величины  $M_p$  (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
11	Т3	100	200	300
12	Т2	150	250	350
13	Т1	200	300	400

Рисунок 1 - Функции принадлежности при аппроксимации нечеткой величины  $M_p$ 

Каждая аппроксимация была представлена нечеткими значениями, полученными при разбиении допустимого интервала на части рис.2-3.

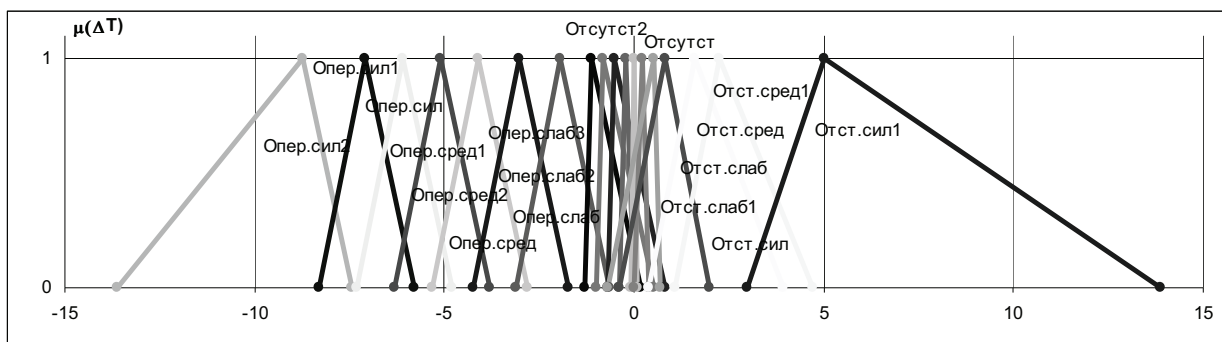


Рисунок 2 - Функции принадлежности при аппроксимаций нечеткой величины Тр (отставание по времени)

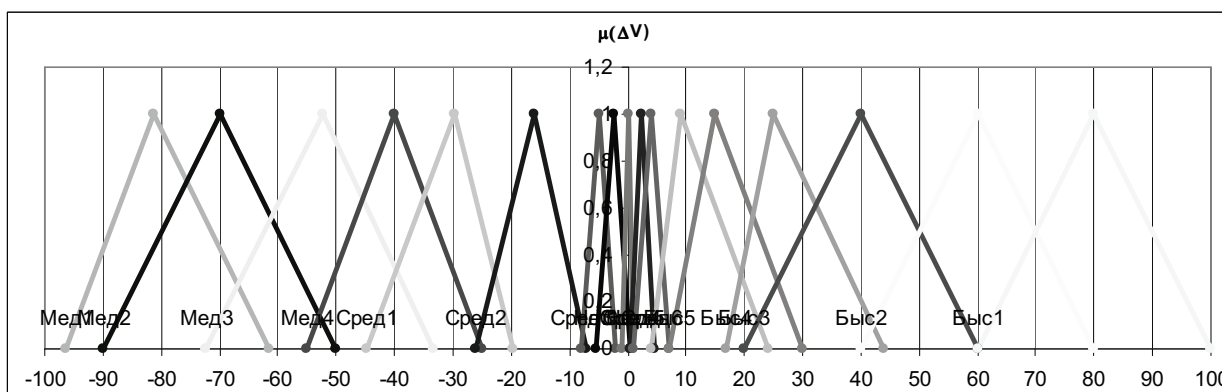


Рисунок 3 - Функции принадлежности при аппроксимаций нечеткой величины Vp (отклонение в скорости)

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

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 заданных 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 послылками 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 [3]. Построенная база правил имеет вид таблицы, в которой есть столбцы посылок, столбец вывод и степень истинности правила. В следующей таблице (таб. 2) представлена часть полученной базы правил.

Использование базы нечетки правил заключается в определении отображения входных посылок  $f(s_i, \Delta m, \Delta t_i, \Delta v_i) \Rightarrow \sim \Delta U_i$ , где  $\sim \Delta U_i$  – нечеткая величина, для определения количественного значения которой необходимо выполнять операцию дефаззификации [3]. В представленных результатах был использован метод дефаззификации по правилу среднего центра.

Таблица 2

Фрагмент полученной базы правил

Степень ист. правила	s	$\Delta m$	$\Delta t$	$\Delta v$	$\Delta U$
0,6310	61600	T2	Отст.слаб1	Нет	0
0,9465	62200	T2	Отст.слаб1	Нет	0
0,8051	63200	T2	Отст.слаб1	Нет1	0
0,4395	500	СрТ1	Отсутст2	Нет	-9
0,3863	1000	СрТ1	Отст.слаб	Сред2	-2
0,4016	1600	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
0,9800	167	Л2	Отсутст2	Нет	0
0,6517	334	Л2	Отсутст2	Нет	-2
0,5667	500	Л2	Отсутст2	Нет	-9

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



Рисунок 4 - Скорость эталонного и контрольного поезда на заданном перегоне

Тонкая линия – скорость эталонного поезда, которая представляет рассчитанную согласно [2], идеализированную оптимальную траекторию. Исходными данными для построения базы правил являлись значения отклонений в скорости, времени хода, массе поезда от эталонной поездки. 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.

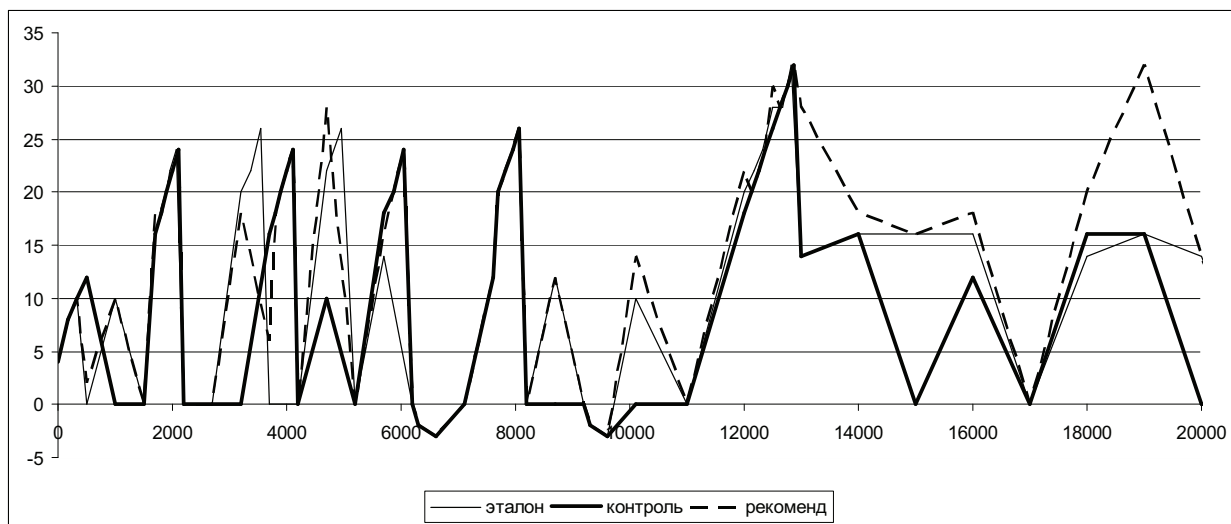


Рисунок 5 - Зависимость номера позиции контроллера от участка пути

На рис. 5. показано как система, основанная на выводе из базы нечетких правил, производила корректировку управления в контрольной поездке. 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 контроллера, чтобы ускорить движение. Это связано с тем, что в качестве контрольной была взята поездка с опозданием, поэтому повышение скорости приближает ее к оптимальному управлению.

### Выводы

Проведенные исследования показали достаточную точность полученных режимов управления локомотивом. Построенную базу нечетких правил, заменяющую собой модель движения поезда,

можно использовать как советчик машиниста для выбора управления на очередном участке пути с учетом условий неопределенности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Блохин Е. П., Пшинько А. Н., Евдомаха Г. В., Скалозуб В. В., Землянов В. Б. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов // Залізничний транспорт України, №6, 2001. С. 19 –22.
2. Скалозуб В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии // Транспорт. Зб. наук. праць, вип. 12. – Дніпропетровськ, 2002. – С. 148 – 157
3. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М: «Горячая линия – Телеком», 2004.

Получено 04.05.2007 г.