

ВЫБОР ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЯГОВЫХ СЕТЕЙ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОГО ОПИСАНИЯ ИХ СОСТОЯНИЙ

У статті запропоновано підхід до реалізації енергозберігаючих технологій тягового електропостачання залізниць, що використовує нечіткі моделі та методи представлення, аналізу і вибору управління.

В статье предложен подход к реализации энергосберегающих технологий тягового электроснабжения железных дорог, использующий нечеткие модели и методы представления, анализа и выбора управлений.

In the article the approach to realization of energy conservation technologies of hauling power supply of railways, using fuzzy models and methods of presentation, analysis and choice of controls, is offered.

В данной статье предложен подход к реализации энергосберегающих технологий тягового электроснабжения железных дорог, использующий нечеткие модели и методы представления, анализа и выбора управлений. Такой подход позволяет использовать разнородные и ограниченные данные для принятия решения о выборе рациональных режимов системы тягового электроснабжения (СТЭ) с учетом режимов работы питающих их энергосистем. На этапе формирования модели нечеткого управления учитывается то, что на режимы СТЭ влияют множество неопределенных факторов. Среди них такие, как режим работы электротяговых нагрузок, уровни напряжений тяговых подстанций, схемы питания тяговых сетей. Несмотря на наличие такого постоянного фактора, как профиль пути, от которого непосредственно зависит режим ведения поезда, рациональное управление уникально для каждой поездки.

Рассмотрим задачу выбора энергосберегающих режимов системы тягового электроснабжения с учетом внешней системы электроснабжения (ВСЭ) на основе построения базы нечетких правил экспертных систем по данным опытных измерений основных параметров: суммарной массы перевезенных грузов за сутки на межподстанционной зоне двухпутного участка переменного тока, суточных расходов и потерь энергии на межподстанционной зоне, уровней напряжения тяговых подстанций. Такие правила управления учитывают отклонения фактических состояний от оптимальных режимов для эталонного случая, рассчитанного в предположении равенства уровней напряжения на шинах тяговых подстанций СТЭ и экономичного распределения нагрузок ЭПС с компромиссно-оптимальными режимами работы.

Эталонными режимами служат данные о фактических энергосберегающих режимах СТЭ участков или направлений железных дорог или же расчеты согласно моделям СТЭ. Критерием оценки режимов работы СТЭ является расход энергии тяговыми подстанциями, в котором отражены большинство влияющих факторов, в том числе и неразрывная взаимосвязь СТЭ и ВСЭ. Для моделирования энергосберегающих режимов использовались:

- компромиссно-оптимальные режимы тяги поездов с разными массами, разным напряжением на токоприемнике, при различных ограничениях по скорости и изменением других параметров;

- режимы минимальных потерь и перетоков мощности СТЭ и ВСЭ с учетом неразрывной их взаимосвязи;

- режимы равномерной загрузки СТЭ с учетом критерия минимальных энергетических затрат при формировании графика движения поездов.

При формировании правил установлены такие параметры:

ΔQ_i – отклонение суточной массы перевезенных грузов на i -ой межподстанционной зоне двухпутного участка переменного тока, для характеристики которой введены значения нечетких величин Q_p : «отставание (сильное, слабое, отсутствует)» и «опережение (отсутствует, слабое, сильное)»; ΔS_i – отклонение суточных активных потерь энергии для межподстанционной зоны i , величина S_p со значениями: «сильное, отсутствует, слабое»; ΔW_i – разница суточных расходов энергии на межподстанционной зоне i для реального режима работы СТЭ и эталонного режима равномерной загрузки СТЭ, величина W_p ; K_i – участок пути, величина K_p ,

где $i = 0, 1.. n$ – это количество межподстанционных зон заданного участка.

IF ($K_i \in K_p$ AND $\Delta W_i \in W_p$ AND $\Delta Q_i \in Q_p$ AND $\Delta S_i \in S_p$) THEN U_i AND Cx_i ,

где U_i – уровни напряжения тяговых подстанций, которые обеспечивают управление, близкое к оптимальному на некоторой i -той межподстанционной зоне участка пути, Cx_i – схема питания i -той зоны.

При построении модели управления в виде нечетких правил использована работа [2], а 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 степень

Нечеткие правила имеют вид, подобный работе [1]:

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 W_p (разница расходов энергии реального и эталонного режима работы СТЭ). Минимальное значение разницы расходов межподстанционной зоны равнялось -32 тыс. кВт·ч, а максимальное 30 тыс. кВт·ч. Разбив этот интервал на 13 частей, имеем такие значения нечеткой величины, показанные в табл. 1.

Таблица 1

Значения нечеткой величины W_p (разница расходов энергии реального и эталонного режима на межподстанционной зоне, кВт·ч)

№	Название значения	$\alpha = 0$	$\alpha = 1$	$\alpha = 0$
1	$-\Delta W_6$	-42000	-32000	-22000
2	$-\Delta W_5$	-35800	-25800	-15800
3	$-\Delta W_4$	-30000	-20000	-10000
4	$-\Delta W_3$	-25000	-15000	-5000
5	$-\Delta W_2$	-20000	-10000	0
6	$-\Delta W_1$	-15000	-5000	5000
7	ΔW_n	-10000	0	10000
8	$+\Delta W_1$	-5000	5000	15000
9	$+\Delta W_2$	0	10000	20000
10	$+\Delta W_3$	5000	15000	25000
11	$+\Delta W_4$	10000	20000	30000
12	$+\Delta W_5$	15000	25000	35000
13	$+\Delta W_6$	20000	30000	40000

Названия каждого значения даны таким образом: значения около 0 называются « ΔW_n », « $+\Delta W_1$ » – « $+\Delta W_6$ », « $-\Delta W_1$ » – « $-\Delta W_6$ » – нечеткие отклонения соответственно до ΔW_{\max} та ΔW_{\min} классов 1...6. Изображение этой величины в виде графиков функции принадлежности показано на рис. 1.

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

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

Каждое значение из обучающей выборки эталонных режимов тяги сопоставляется со значениями нечеткой характеристики и заменяется значением с максимальной степенью принадлежности для всех заданных в области. Например, если $\Delta W_i = 8$ тыс. кВт·ч, $\Delta Q_i = -50$ тыс. т и $\Delta S_i = 300$ кВт·ч, то получим правило:

IF ($\Delta W_i \in \langle \Delta W_H \rangle$) AND $\Delta Q_i \in \langle -\Delta Q_2 \rangle$ AND $\Delta S_i \in \langle +\Delta S_4 \rangle$) THEN $U_i \geq 27,5$ AND $C_{X_{Ki}}$,

где $\langle -\Delta Q_2 \rangle$ – слабое опережение по перевезенной суточной массе класса 2; $\langle +\Delta S_4 \rangle$ – сильное отклонение суточных активных потерь класса 4.

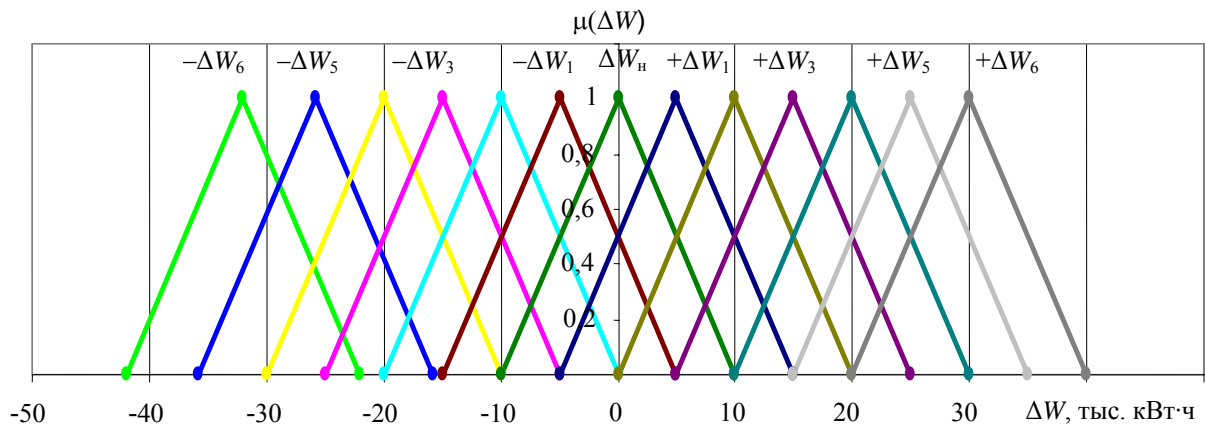


Рис. 1. Функции принадлежности при аппроксимации нечеткой величины W_p

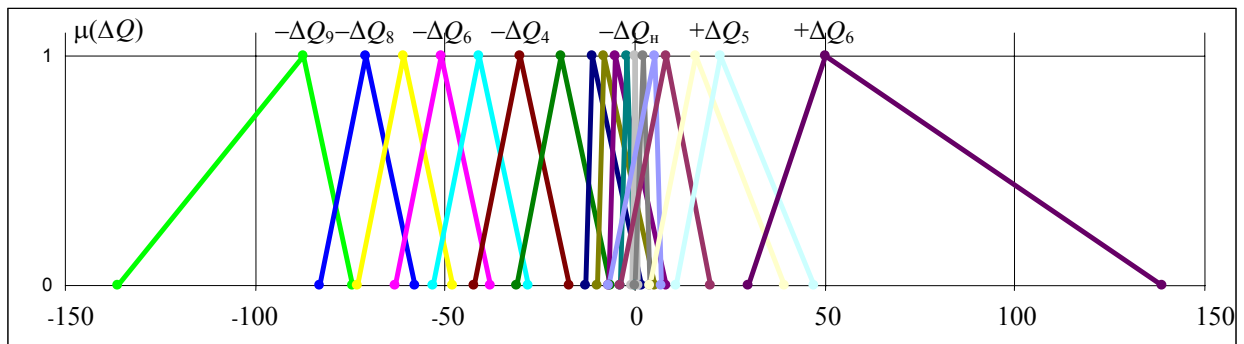


Рис. 2. Функции принадлежности при аппроксимации нечеткой величины Q_p (отставание по перевезенной суточной массе грузов, тыс. т)

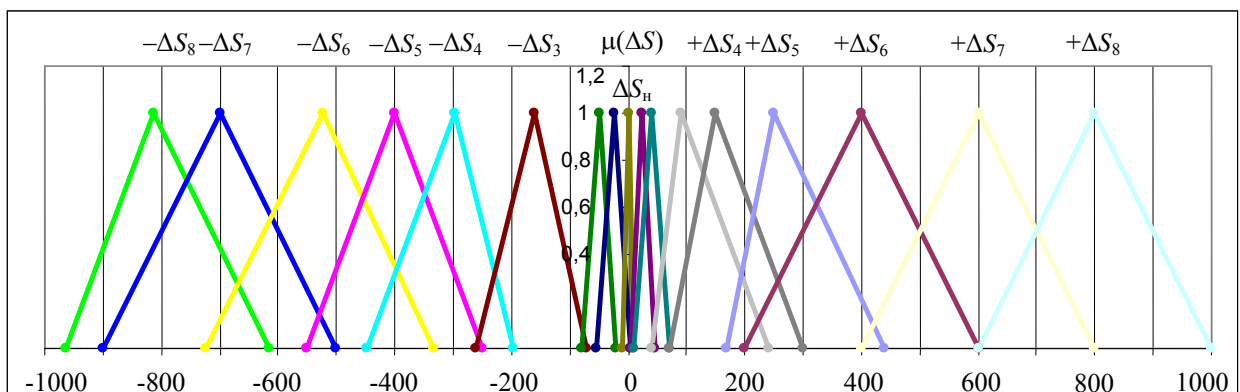


Рис. 3. Функции принадлежности при аппроксимации нечеткой величины S_p (отклонение суточных активных потерь энергии, кВт·ч)

Согласно правилу, необходим переход на консольную схему питания тяговой сети с таким напряжением на шинах подстанций, которое обеспечит допустимую норму 21 кВ для ЭПС. 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 по-

явлении противоречивых правил проверяется их степень истинности и остается правило с наибольшей степенью истинности. Степень истинности вычисляем как произведение степени принадлежности всех величин, участвующих в правиле. Построенная база правил имеет вид таблицы, в которой есть столбцы посылок, столбец вывода и степень истинности правила. В табл. 2 представлена часть полученной базы правил.

Таблица 2

Фрагмент полученной базы правил для одной межподстанционной зоны

Степень ист. правила	ΔW	ΔQ	ΔS	U , кВ
0,6310	$+\Delta W_5$	$+\Delta Q_1$	ΔS_{II}	27,5
0,9465	$+\Delta W_5$	$+\Delta Q_1$	ΔS_{II}	27,5
0,8051	$+\Delta W_5$	$+\Delta Q_1$	ΔS_{II}	27,5
0,4395	$+\Delta W_2$	ΔQ_{II}	ΔS_{II}	23,5
0,3863	$+\Delta W_2$	$+\Delta Q_2$	$-\Delta S_3$	25,0
0,4016	$+\Delta W_2$	$+\Delta Q_3$	$-\Delta S_3$	24,0
0,5653	$+\Delta W_2$	$+\Delta Q_3$	$-\Delta S_3$	25,0
			
0,0231	$+\Delta W_3$	$-\Delta Q_2$	$-\Delta S_1$	28,0
0,0383	$+\Delta W_3$	$-\Delta Q_2$	$-\Delta S_1$	28,0
0,9800	$-\Delta W_5$	ΔQ_{II}	ΔS_{II}	27,5
0,6517	$-\Delta W_5$	ΔQ_{II}	ΔS_{II}	25,0
0,5667	$-\Delta W_5$	ΔQ_{II}	ΔS_{II}	23,5

Использование базы нечетких правил заключается в определении отображения входных посылок $f(K_i, \Delta W_i, \Delta Q_i, \Delta S_i) \Rightarrow \sim U_i$, где $\sim U_i$ – нечеткая величина, для определения количественного значения которой необходимо выполнять операцию дефазификации [3]. В представленных результатах был использован метод дефазификации по правилу среднего центра.

Результаты проведенного моделирования проиллюстрированы примером на рис. 4, где изображен график зависимости потерь мощности для двух вариантов. Тонкая линия – потери мощности эталонного режима. Жирная линия показывает контрольный расчетный режим работы СТЭ, информация о котором не попадала в обучающую выборку, которую нужно приблизить к эталонному режиму на основе базы нечетких правил.

На рис. 5 показано, как система, основанная на выводе из базы нечетких правил, производит корректировку управления режимами работы СТЭ.

Пунктирная линия представляет рекомендуемое управление, которое нужно задать энергодиспетчеру, чтобы режим СТЭ приблизился к показателям энергосберегающего режима управления. Из графика видно, что рекомендуемое системой управление стремится увеличить уровень напряжения на шинах тяговой подстанции, чтобы снизить потери энергии на межподстанционной зоне и обеспечить необходимый уровень на ЭПС. Это связано с тем, что в качестве контрольного был взят режим ликвидации перетоков мощности путем перехода на консольную схему питания тяговой сети и повышение уровня напряжения приближает систему к оптимальному управлению.

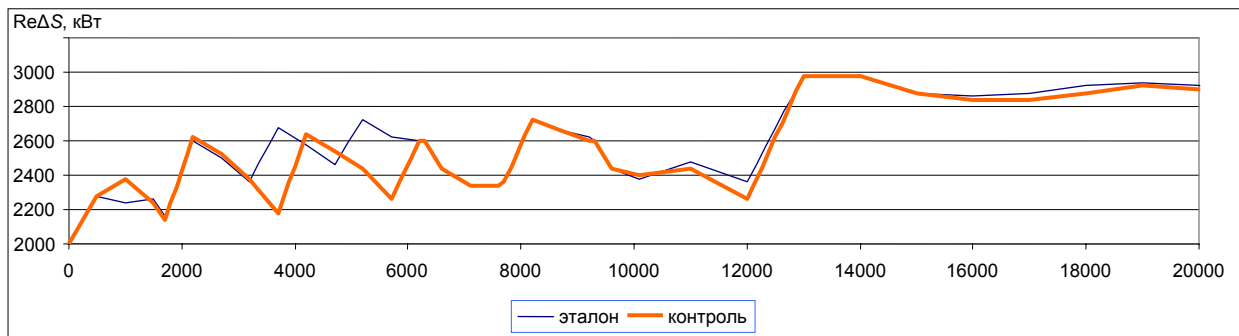


Рис. 4. Потери мощности эталонного энергооптимального режима работы СТЭ и реального на заданной межподстанционной зоне перегона

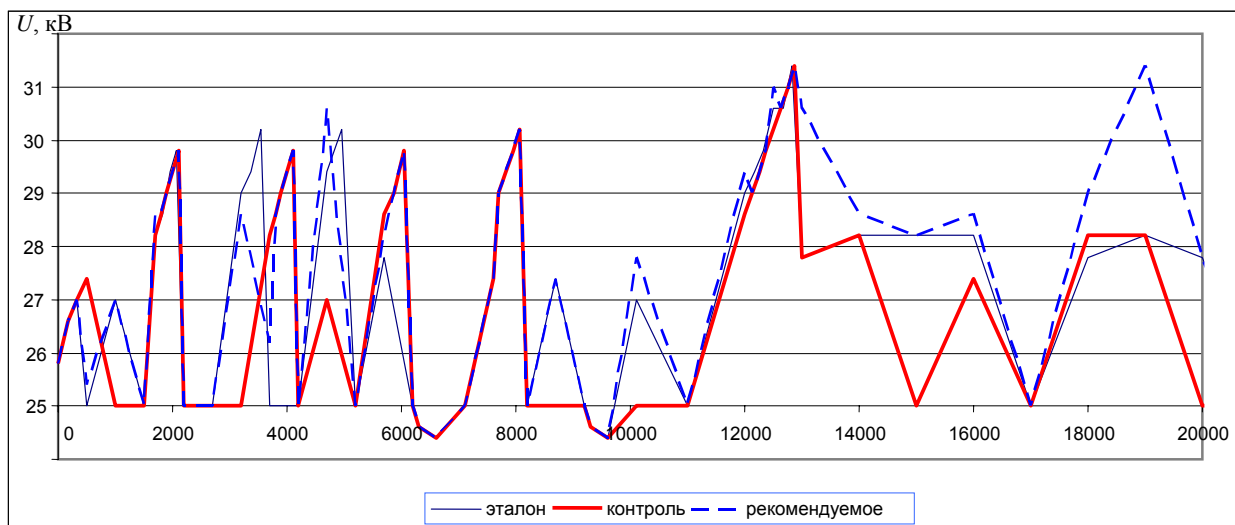


Рис. 5. Зависимость уровня напряжения на шинах тяговой подстанции на очередном временном промежутке

Проведенные исследования показали достаточно точность полученных режимов управления СТЭ. Построенную базу нечетких правил, заменяющую собой модель режимов СТЭ, можно использовать как советчик энергодиспетчеру для выбора управления на очередном временном промежутке с учетом условий неопределенности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Объектно-ориентированные модели нестационарных стохастических потоков в транспортных сетях [Текст] / В. В. Скалозуб и др. // Сис-

темні технології: Регіональний міжвуз. зб. наук. пр. – Д., 2001. – С. 141-150.

2. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – М: Горячая линия, 2004.
3. Шнейдерман, М. Получение экспертных знаний [Текст] / М. Шнейдерман, И. В. Неймани // Итоги науки и техники. Сер. «Техническая кибернетика». – ВИНТИ, 1990. – С. 29.

Поступила в редколлегию 09.09.2009.

Принята к печати 17.09.2009.