

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

У статті запропоновано експертні системи управління на базі синтезу знань, що дозволяє вибрати енергозберігаючі режими і мінімізувати перетоки потужності та втрати енергії в тягових мережах.

В статье предложены экспертные системы управления на базе синтеза эвристических и каузальных знаний, что позволяет выбрать энергосберегающие режимы и минимизировать перетоки мощности и потери энергии в тяговых сетях.

In the article the expert management systems on the base of synthesis of heuristic and causal knowledge are offered that allows choosing the energy-saving modes and minimizing the power flow-overs and energy losses in electric-traction networks.

Основой интеллектуализации управления режимами работы систем тягового электро-снабжения (СТЭ) являются экспертные системы (ЭС) [1 – 3]. Особый интерес вызывают ЭС, обладающие способностью автоматического приобретения каузальных и эвристических знаний [4]. В литературе такие ЭС называют самообучающимися или использующими механизм нечетного логического вывода. Перспективным направлением автоматического приобретения знаний является синтез эвристических знаний на основе использования каузальных и ретроспективных знаний.

Общая схема работы ЭС, совмещающей применение всех типов знаний, выглядит следующим образом. При обнаружении режима работы СТЭ с повышенными потерями энергии делается попытка его устранения при помощи эвристик. В случае успеха работа ЭС прекращается, в случае неудачи приводится в действие каузальный механизм вывода, который оформляется в виде эвристики и заносится в базу эвристических знаний. Очевидно, что при повторном возникновении этого же режима работы СТЭ он будет обработан при помощи этой эвристики, что более быстро и эффективно.

Таким образом, осуществляется синтез эвристик с помощью каузальных знаний. При этом такой синтез может быть осуществлен даже на этапе проектирования системы путем использования математической или имитационной модели поведения системы электроснабжения при возникновении различных ситуаций. В правильно построенной на основе описываемого принципа ЭС преобладает тенденция редкого применения каузального механизма вывода, что свидетельствует о повышении качества

накапливаемых этой ЭС эвристических знаний. Синтез эвристических знаний на основе использования ретроспективных знаний осуществляется на основе единицы ретроспективных знаний в экспертной системе – примера. Например, при эксплуатации электротяговых сетей каждый успешный случай минимизации электропотребления оператором оформляется в виде примера и вводится в базу ретроспективных знаний. Эта база является исходными данными для работы механизма синтеза эвристик, который и осуществляет их преобразование в форму продукций, сцепленных в дерево или хранимых в базе ЭС просто в виде совокупности. Такой процесс преобразования носит название индуктивного вывода.

Строки матрицы режимов СТЭ являются состояниями, характеризующими объекты СТЭ  $X_i = (X_{i1}, \dots, X_{in})$  набором параметров  $x_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ . Задача построения оптимальной классификации состоит в выборе группы параметров  $G_k$ ,  $k = 1, \dots, g$ , и класса объектов  $T_{rk}$ ,  $r = 1, \dots, t_k$ , в каждой  $G_k$  для пары элементов  $(G_k^*, T_{rk}^*)$ , на которой минимизируется заданный функционал  $F(G, T)$  расстояний элементов от «центров» классов  $T_{rk}$ . В работах Землянова В. Б., Скалозуба В. В. предложены две формы правил продукций, которые можно использовать в ЭС оценки ситуаций и диагностики и минимизации перетоков мощности и потерь энергии в тяговой сети

$$IF [AND (N_k = g_r)] THEN [y_j \in N_F; (\bar{Y}_j, \sigma_j^2)];$$

$$IF AND_{k \in q^*} [OR_{j \in G_k} (x_{ij} \approx x_j^*)] THEN [(y_j \approx y^*)], \text{ где } g_r -$$

номера групп  $G_k$  с классами  $N_k$ , к которым могут быть отнесены параметры объектов СТЕ;  $(\bar{Y}_j, \sigma_j^2)$  – средние значения и дисперсии переменных-заклучений (в том числе опорных);  $N_F$  – выделенные финальные классы, или же классы, которые формируются предложенным ниже методом, использующим понятие направленности вероятностных зависимостей;  $AND$  и  $OR$  – знаки логических операций; знак « $\approx$ » показывает на «приблизительное равенство»;  $x_j^*$ ,  $y_j^*$  – полученные из подтаблиц  $T_{kr}$  значения элементов БЗ;  $y_j$  – прогнозируемый параметр режима СТЕ для  $i$ -го объекта  $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ .

Функционал качества классификации при этом будет иметь следующий вид:

$$F(G, T) = \frac{1}{N \cdot n} \sum_{k=1}^q \sum_{r=1}^{I_r} [F_{rk}(G, T) * W_{rk}^{-1}] \Rightarrow \min_{(G, T) \in \pi}$$

где  $F_{rk}(G, T)$  – некоторые меры рассеяния элементов  $T_{rk}$ ,  $W_{rk} = |G_r| \cdot |I_{rk}|$ ,  $I_{rk}$  – множество номеров объектов подматриц  $T_{rk}$ .

Можно выделить две схемы формирования правил продукций ЭС, учитывающих дополнительные источники информации о переменных.

По первой схеме правила продукций с учетом требований по заданию опорных переменных будут иметь вид:

$$(AND_{s \in q^*} [OR_{j \in G_s} (x_{ij} \approx x_j^*)] AND_{k \in K = \cup j_s} [(x_{ijk} \approx w_{jk}^*)]) \Rightarrow [(y_{ijG} \approx w_{jG}^*)],$$

где индексы « $i$ » показывают характеристики « $j_k$ » ситуации « $i$ » при сравнении с заданными значениями  $w_{jk}^*$ ; индексы « $k$ », « $j_G$ » указывают номера заданных опорных переменных  $k, j_G \in K = \cup j_s$ , где номер  $j_G$  показывает прогнозируемую характеристику  $w_{jG}^*$ .

По второй схеме используется мера Журавлева ( $Cl = 2$ ) и предлагается следующая форма правил:

$$AND_{s \in q^*} [OR_{j_k \in K} (OR_{j_k \in K} (x_{ijk}^s \approx w_{jk}^s), B(x_{(i)} : j_i \notin K) \geq B_*^s)] \Rightarrow (y_{ijG} \approx w_{jG}^*),$$

где  $j_i \notin K$  – совокупность переменных, определяющих исследуемый объект  $x_{(i)} = \{x_{ijk}, x_{ij}\}$ ;  $B_*^s$  – пороговые значения для сравнения близости объектов по переменным, составляющим группу  $G_s$ .

Обобщенная схема ЭС для реализации энергосберегающих технологий тягового электрооборудования железных дорог с учетом режимов работы питающих их энергосистем показана на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная схема экспертной системы

Проведенные исследования указывают на необходимость рассмотрения направлений, линий одной или нескольких дорог при анализе электропотребления для правильной оценки и выбора энергоэффективных режимов работы СТЭ. Снижение неравномерности электропотребления тяговых подстанций возможно за счет регулирования районной нагрузки, изменения уровня напряжений и создания искусственных перетоков, применения рациональных масс и интервалов между поездами при составлении годовых графиков движения поездов.

Заслуживают внимания два способа интенсификации перевозочного процесса: увеличение грузооборота путем применения тяжеловесного движения с сохранением количества пар поездов заданного направления и увеличение количества пар поездов с выбранными энергооптимальными весами поездов. Первый способ может быть эффективным за счет резкого снижения стоимости электроэнергии при пропуске тяжеловесных поездов в ночное время. Второй способ равномерно загружает тяго-

вые сети, что, безусловно, снижает потери энергии.

Естественно, что основополагающими критериями при этом являются мощность локомотива, коэффициент сцепления колеса с рельсом, пропускная способность участка. Однако в условиях рыночной экономики и дефицита энергоресурсов было бы интересно оценить интенсификацию перевозок по критерию потерь энергии в тяговой сети с учетом режимов работы внешней системы электроснабжения.

Имитационное моделирование осуществлялось для реальной фидерной зоны переменного тока с подвеской ПБСМ 70 + МФ 100, рельсами Р65, отношением времени хода поезда по времени его хода под током 1,2...1,8 по нечетному и 1...1,15 по четному пути, напряжением на шинах  $27,5 \pm 1,5$  кВ. Параметры двух потоков поездов приведены в табл. 1. Интенсификация перевозок имитировалась путем замены поездов массой 4 тыс. т тяжеловесными поездами от 6 до 24 тыс. т.

Таблица 1

Количество поездов и их массы

Масса поезда, т	600	1000	1200	2000	2500	3000	3500	4000
$N_1$ – средний грузопоток, шт.	6/6	42/42	12/2	10/11	5/19	8/10	7/2	5/3
$N_2$ – интенсивный грузопоток, шт.	12/12	42/42	24/4	20/22	10/38	10/20	14/4	10/6

Примечание: в числителе – нечетное, в знаменателе – четное направление..

На рис. 2 показаны результаты решения одной из задач – прогноз изменения электропотребления и потерь энергии при различных грузопотоках.

По результатам эксперимента на имитационной модели получены зависимости активных и реактивных расходов и потерь энергии, про-

цента активных потерь  $W_a = f(Q)$ ,  $W_p = f(Q)$ ,  $\Delta W_a = f(Q)$ ,  $\Delta W_p = f(Q)$ ,  $\delta = f(Q)$ , а также средние и эффективные токи фидеров в зависимости от суммарной передвигаемой массы грузов по участку в четном и нечетном направлении за сутки (см. табл. 2).

Таблица 2

Значения средних и эффективных токов фидеров для узловой схемы

Средние и эффективные токи фидеров, А	Суточная суммарная масса поездов в четном и нечетном направлениях	
	Грузопоток 680 тыс. т	Грузопоток 700 тыс. т
$\dot{I}_{A1}$	134,4 – j 97,3	128,9 – j 100
$\dot{I}_{A2}$	60,9 – j 50,0	62,2 – j 55,5
$\dot{I}_{B1}$	126,74 – j 105,6	130,6 – j 110,8
$\dot{I}_{B2}$	65,4 – j 55,7	77,0 – j 66,8
$I_{A\sigma 1}$	318,5	186,3
$I_{A\sigma 2}$	114,7	96,8
$I_{B\sigma 1}$	335,1	202,4
$I_{B\sigma 2}$	149,7	122,2

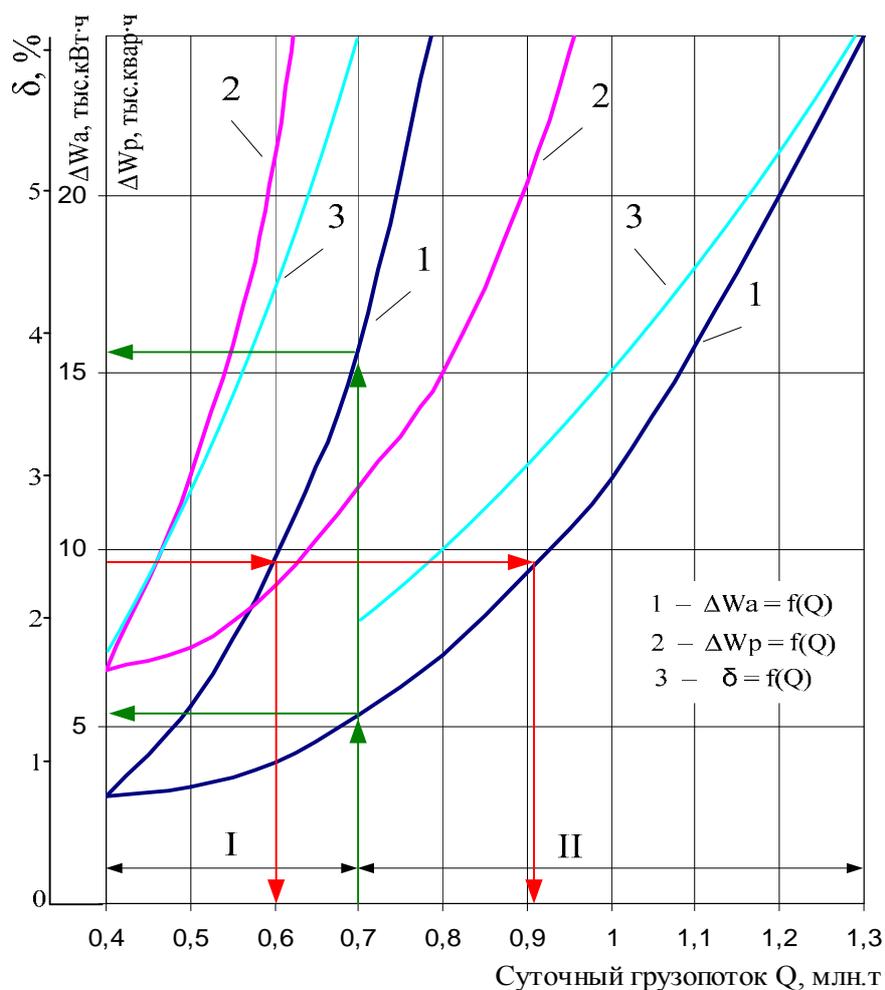


Рис. 2. Суточные потери энергии и процент потерь при изменении грузооборота на двухпутном участке переменного тока

Увеличение перевозимой по двухпутному участку массы с 400 тыс. т до 700 тыс. т в сутки при различных способах реализации графика движения поездов и интенсификации их веса приводит к существенно разным потерям энергии. При ритмичном графике и соответствующих типах поездов потери энергии снижаются минимум в 3 раза.

Предельные возможности системы электропитания переменного тока 25 кВ обеспечивают суточный грузооборот на двухпутном участке до 1200 тыс. т. Применение же схем параллельного соединения контактных подвесок при интенсификации перевозок позволит уменьшить активные потери энергии на 8...15 %, а реактивные – на 7...11 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лорьер, Ж. Системы искусственного интеллекта [Текст] / Ж. Лорьер. – М.: Мир, 1991. – 586 с.
2. Таунсенд, К. Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ [Текст] / К. Таунсенд, Д. Фохт : [пер. с англ.]. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 320 с.
3. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия, 2004.
4. Землянов, В. Б. Енергооптимальні технології аналізу та регулювання електроспоживання на тягу поїздів [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / Дніпропетр. держ. техн. ун-т заліз. трансп. – Д., 2000. – 20 с.

Поступила в редколлегию 09.09.2009.  
 Принята к печати 21.10.2009.