УДК 621.331:621.311 DOI 10.33042/2522-1809-2021-3-163-117-125

В.О. Васенко

Комунальне підприємство «Міськелектротранссервіс», Україна

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОТЯГОВИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО ОПИСУ ЇХ СТАНУ

Запропоновано підхід до реалізації енергозберігаючих технологій тягового електропостачання міського електротранспорту, що використовує нечіткі моделі і методи уявлення для аналізу і вибору управлінь. Розроблені принципи формування алгоритмів і наповнення баз даних і знань експертних систем і вирішені задачі забезпечення режимів енергозбереження в системах тягового електропостачання міського електротранспорту.

Ключові слова: *управління режимами, експертна система, електротягові мережі, нечіткі моделі і методи, бази даних, енергозбереження.*

Постановка проблеми

Мінімізація втрат електроенергії в електротяговій мережі є цільовою задачею підвищення енергетичної ефективності міського електротранспорту (МЕТ) в цілому. Найменша потужність системи електропостачання потрібна при найбільш рівномірному розподілі трамваїв і тролейбусів (за їх кількістю і типом) у часі. Велике значення в досягненні енергоефективності електропостачання МЕТ має інтелектуалізація системи управління режимами роботи електротягових мереж на базі експертних систем (ЕС). Наведено вище визначає актуальність теми дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основою інтелектуалізації управління режимами роботи систем тягового електропостачання є ЕС [1–14]. Застосування ЕС в інтегрованих системах управління МЕТ стримувалося відсутністю технічних засобів автоматизації для розв'язання задач тягового електропостачання трамваїв і тролейбусів з урахуванням численності і різнорідності джерел інформації і необхідності прийняття рішень в умовах неповної або суперечливої інформації. Найбільш просто ЕС застосовувати на рівні організаційно-економічного управління інтегрованої системи МЕТ. Однак висока ефективність їх застосування буде на рівні організаційно-технологічного та технологічного управління. А саме на диспетчерському центрі моніторингу та керування засобами організації дорожнього руху і районних та центральних диспетчерських пунктах оперативного управління тяговими підстанціями.

Особливий інтерес викликають ЕС, що володіють здатністю автоматичного набуття каузальних і евристичних знань [9, 10]. У літературі такі ЕС називають самонавчальними, або такими, що використовують механізм нечіткого логічного висновку. Перспективним напрямком автоматичного набуття знань є синтез евристичних знань на основі використання каузальних і ретроспективних знань.

Загальна схема роботи ЕС, що поєднує застосування всіх типів знань, виглядає таким чином. При виявленні режиму роботи систем електропостачання МЕТ з підвищеними втратами енергії робиться спроба його усунення за допомогою евристик. У разі успіху робота ЕС припиняється, у разі невдачі приводиться в дію каузальний механізм виводу, який оформляється у вигляді евристики і заноситься в базу евристичних знань. Очевидно, що при повторному виникненні цього ж режиму роботи систем електропостачання МЕТ він буде оброблений за допомогою цієї евристики, що швидше і ефективніше.

Таким чином, здійснюється синтез евристик за допомогою каузальних знань. При цьому такий синтез може бути здійснений навіть на етапі проектування системи шляхом використання математичної або імітаційної моделі поведінки системи електропостачання при виникненні різних ситуацій. У правильно побудованій на основі описуваного принципу ЕС переважає тенденція не частого застосування каузального механізму виводу, що свідчить про підвищення якості евристичних знань, що накопичуються цією ЕС.

Синтез евристичних знань на основі використання ретроспективних знань здійснюється на основі одиниці ретроспективних знань в ЕС – прикладу. Наприклад, при експлуатації електротягових мереж МЕТ кожен успішний випадок мінімізації електроспоживання оператором оформляється у вигляді прикладу і вводиться в базу

© Васенко В.О.

ретроспективних знань. Ця база є вихідними даними для роботи механізму синтезу евристик, який і здійснює їх перетворення у форму продукцій, зчеплених в дерево або збережених у базі ЕС просто у вигляді сукупності. Такий процес перетворення носить назву індуктивного виводу.

Метою роботи є удосконалення системи управління режимами роботи електротягових мереж з використанням нечітких моделей і методів управління та побудова бази нечітких правил, що дозволяє мінімізувати перетоки потужності і втрати енергії в процесі перевезень пасажирів на МЕТ.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо задачу вибору режимів системи тягового і зовнішнього електропостачання МЕТ на основі побудови бази нечітких правил ЕС за даними експериментальних вимірювань основних параметрів: сумарної кількості перевезених пасажирів за добу на міжпідстанційній зоні двоколійного ділянки, добових витрат і втрат енергії на міжпідстанційній зоні, рівнів напруги тягових підстанцій. Такі правила управління враховують відхилення фактичних станів від оптимальних режимів для еталонного випадку, розрахованого в припущенні рівності рівнів напруги на шинах тягових підстанцій систем електропостачання МЕТ і економічного розподілу навантажень електрорухомого складу з компромісно-оптимальними режимами роботи. Еталонними режимами є фактичні енергозберігаючі режими на ділянках або ж їх розрахунки на імітаційних моделях.

Критерієм оцінки режимів роботи систем електропостачання МЕТ є витрата енергії тяговими підстанціями, в якому відображені більшість факторів, що впливають, в тому числі і нерозривний взаємозв'язок систем тягового і зовнішнього електропостачання. Для моделювання енергозберігаючих режимів використовувалися: компромісно-оптимальні режими тяги електрорухомого складу з різною кількістю пасажирів з урахуванням напруги на струмоприймачах, при різних обмеженнях по швидкості і зміною інших параметрів; режими мінімальних втрат і перетоків потужності систем тягового і зовнішнього електропостачання з урахуванням нерозривного їх взаємозв’язку; режими рівномірного завантаження системи електропостачання з урахуванням критерію мінімальних енергетичних витрат при формуванні графіка руху трамваїв або тролейбусів.

Необхідність застосування індуктивного виводу обумовлюється складністю безпосереднього використання ретроспективних знань, які подаються у формі прикладів для отримання ЕС остаточного висновку при виборі режиму роботи систем електропостачання, схеми живлення або причини відказу пристроїв електропостачання.

Рядки матриці режимів (***MP***) системи електропостачання є станами, які характеризують об’єкти електропостачання $X_i = (X_{i1},...,X_{in})$ набором параметрів x_{ij}, $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, n$. Задача побудови оптимальної класифікації ***MP*** полягає у виборі групи параметрів G_k, $k = 1, \dots, g$ і класу об’єктів T_{rk}, $r = 1, \dots, t_k$ у кожній G_k для пари елементів (G_k^*, T_{rk}^*), на якій мінімізується заданий функціонал $F(G, T)$ відстаней елементів від «центрів» класів T_{rk}.

Одержали розвиток дві форми правил продукцій, призначені для оцінки мінімізації перетоків потужності і втрат енергії в тяговій мережі:

$$\text{а) IF}[\text{AND}(N_k = g_r)]\text{THEN}[y_j \in N_F; (\overline{Y}_j, \sigma_j^2)]; \quad (1)$$

$$\text{б) IF} \underset{k \in q^*}{\text{AND}}[\underset{j \in G_k}{\text{OR}}(x_{ij} \approx x_j^*)]\text{THEN}[(y_j \approx y^*)]$$

де AND і OR – знаки логічних операцій; g_r – номери груп G_k з класами N_k, до яких можуть бути віднесені параметри об’єктів; y_j – прогнозований параметр режиму СТЕ для i-го об’єкта $(x_{i1}, x_{i2},..., x_{in})$; N_F – виділені фінальні класи; $(\overline{Y}_j, \sigma_j^2)$ – середні значення і дисперсії змінних-висновків; знак “$\approx$” показує на «приблизну рівність»; x_j^*, y^* – отримані з підтаблиць значення елементів бази знань (БЗ).

При формуванні правил (1) передбачається [10], що є можливість завдання змінної-висновку до побудови класифікації. У таблиці 1 подані додаткові засоби формування задач умовної класифікації даних (УКД), а також нові методи дослідження статистичних залежностей між змінними величинами. Це дозволяє встановити не тільки наявність зв’язку, але і їх спрямованість та відкриває можливість для більш точного вибору змінних-посилань і змінних-висновків у правилах продукції БЗ, одержуваних з розв’язань задач УКД.

Задача умовної класифікації таблиць спостережень полягає в знаходженні групи змінних $G_q^* = \{G_k^*\}$, кількості груп q^* і розподілі об’єктів за класами $T^* = \{T_{rk}\}$, $r = 1,...,t_k^*$, $q = 1,...,q^*$, які мінімізують функціонал якості класифікації в області виконання продукційних обмежень $\pi(G, T)$, що задовольняє умови 1): $x_{ir} \otimes C_r \Rightarrow x_r \in G_p$; 2) $x_{iu} \otimes x_{iv} \Rightarrow x_u, x_v \in G_p$; 3): $x_u \in G_p \Rightarrow x_v \in G_p$. Тут при виконанні відношення $\otimes$ посилка x_r поміщається в групу G_p, якщо $\otimes$ правильно, для всіх рядків T_{rk}, то обидві змінні відносять до групи G_p, а

змінна-висновок розміщується в групі змінної посилки. Функціонал якості класифікації при цьому матиме такий вигляд:

$$F(G,T)=\frac{1}{N\cdot n}\sum_{k=1}^{q}\sum_{r=1}^{t_r}[F_{rk}(G,T)*W_{rk}^{-1}]\Rightarrow\min_{(G,T)\in\pi}, \quad (2)$$

де $F_{rk}(G, T)$ – розрахункові міри розсіяння елементів $W_{rk}=|G_r|\cdot|I_{rk}|$; I_{rk} – множина номерів об'єктів підматриць T_{rk}.

Таблиця 1

Умовна класифікація даних

№n\n	Тип	Функція	Параметри	Характеристика	Зміст
1	C_1	Struc(N_g, N_T)	N_g – число q^*; N_T – число t_k^*	Задана розмірність оптимальної класифікації	Максимальне число груп и класів в групі
2	C_2	Grup(j_1,…,j_r)	j_r – номер змінної	$r<n$; $j_p\neq j_q; p,q\in r$ $\forall(j_g,j_h)\in r:$ $\neg(\exists(v_{j_g}\in G_k),$ $(v_{j_h}\in G_k))$	Завдання опорних змінних класифікації v_{j_r}
3	C_3	Set $(j_s, w_1^s,.,w_t^s)$	j_s – номер змінної; w_t^s – центри класів по j_s	j_s – опорна змінна, допускається – $t>t_k^*$	Завдання центрів класів груп, які містять змінну j_s
4	C_4	$\mathrm{Up}(j_p, j_q)$	J_p, j_q – індекси змінних	$J_p < j_q$	Завдання «зон» індексів змінних
5	C_5	$\mathrm{Mes_min}(z_1)$; $\mathrm{Mes_max}(z_2)$	$z_1\in[\mu_1;\mu_2)$ $z_2\in(z_1;\mu_2]$	$\mu_1=(C_1N_gN_T)^{-1}$, $\mu_2=(C_2)^{-1}$	Допустимі потужності класів T_{rk}, $C_1\approx10;\ C_2\approx4$
6	C_6	$\mathrm{Sel}(\sigma_1,...,\sigma_d)$ $\mathrm{ASel}(\sigma_1,\sigma_2)$ $\mathrm{OSel}(\sigma_1,\sigma_2)$	$\sigma_d=v_{j_d}\theta d$; $d=\{v_{jk};\tilde{N}_d\}$; C_d – const	v_{j_d},v_{j_k} – змінні, $\theta\in\{<,>,=,..\}$ – оператори відношень, Asel(), Osel() – логічні операції І, АБО	Завдання частки таблиці спостережень, за якими ведеться УКД
7	C_7	Clas(Cl)	$\mathrm{Cl}\in\{1;\ 2\}$	Cl = 1 – квадратична міра, Cl = 2 – міра Журавлева	Завдання обчислення відстані від центрів класів

Можна виділити дві схеми формування правил продукцій ЕС, що враховують додаткові джерела інформації про змінні.

За першою схемою правила продукцій (1) з урахуванням вимог до завдань опорні змінні (табл. 1) матимуть вигляд такий:

$$(\underset{s\in q^*}{AND}[\underset{j\in G_s}{OR}(x_{ij}\approx x_j^*)]\ \underset{k\in K=\bigcup j_s}{AND}[(x_{ij_k}\approx w_{j_k}^*)])\Rightarrow[(y_{ij_G}\approx w_{j_G}{}^*)], \quad (3)$$

де індекси 'i' показують характеристики 'j_k' ситуації 'i' при порівнянні із заданими значеннями $w_{j_k}^*$; індекси 'k', 'j_G' вказують на номери заданих опорних змінних $k, j_G\in K=\bigcup j_s$; номер j_G показує прогнозовану характеристику $w_{j_G}^*$. Тут індекси змінних посилок 'k' і висновків, а також деякі значення $w_{j_k}^*$ встановлюються до розв'язання задачі УКД.

Змінні з індексами 's' формуються у ході розв'язання задач УКД (2), їх позначення і використання відповідають моделі (1, *б*). Таким чином, зміст схеми (1) полягає в тому, щоб зробити постановки задач УКД, а також одержувані при цьому правила БЗ, як можна більш змістовними, об'єднуючи експертну інформацію про відомі характеристики $\{w_{j_k}^*\}$ з результатами обчислень згідно з (2).

При використанні продукцій (3) для виведення висновків характеристики поточної ситуації (досліджуваного об'єкта) $x_{(i)} = \{x_{ij_k}, x_{ij}\}$ порівнюються зі значеннями параметрів-посилок правил виду (1). Якщо значення змінних $x_{(i)}$ задовольняють значення в умовній частині, тоді значення змінних з частини висновків показують результат, отриманий за допомогою БЗ.

За другою схемою використовується міра Журавльова (Cl = 2) і функція відстані дорівнюватиме:

$$B(x_i, x_j) = \sum_s b_s(x_{is}, x_{js});\ b(x_{is}, x_{js}) = 1,$$
$$\text{при } \left| x_{is} - x_{js} \right| < \delta_s, \text{ інакше } 0, \qquad (4)$$

де δ_s – задані постійні величини, що визначають категорії близькості змінних 's'.

Тут підсумовування ведеться за індексами всіх змінних, що увійшли до групи G_k для рядків таблиці спостережень з номерами (i, j): $\{x_i, x_j\}$. Якщо виконано відношення $B(x_i, x_j) \geq n_B$, тоді рядки $\{x_i, x_j\}$ таблиці T_{rk} вважаються близькими, де n_B – задане число.

У цьому випадку обчислення середніх значень за класами не має сенсу, тому моделі (1) повинні бути відповідним чином змінені. Для вимог C_7 (Cl = 2) (таблиця 1) пропонується така форма правил перетворення результатів УКД в БЗ експертних систем:

$$\underset{s \in q^*}{AND}[OR(\underset{j_k \in K}{OR}(x_{ij_k}^{\ s} \approx w_{j_k}^s), B(x_{(i)} : j_i \notin K) \geq B_*^s)] \Rightarrow (y_{ij_G} \approx w_{j_G}^{\ *}), \qquad (5)$$

де $j_i \notin K$ – сукупність змінних, що визначають досліджуваний об'єкт $x_{(i)} = \{x_{ij_k}, x_{ij}\}$, які не перераховані у розділах C_2–C_3 задачі УКД; B_*^s – порогові значення для порівняння близькості об'єктів за змінними, що становлять групу.

Алгоритм побудови БЗ (5) показує, що в умовній частині продукцій при оцінці істинності для значень змінних-посилок перевіряється два відношення: близькість значень опорних змінних до заданих еталонних $\{(x_{ij_k}^{\ s} \approx w_{j_k}^s)\}$ і перевищення встановленого рівня B_*^s в міру (4) для параметрів, які не входять до кількості опорних $\{B(x_{(i)} : j_i \notin K) \geq B_*^s)\}$. У разі виконання хоча б одного з них для змінних $x_{(i)}$ відповідна частина посилки вважається дійсною. Завдання констант B_*^s проводиться для всієї таблиці або для кожної з груп, що включають деяку опорну змінну. При цьому числа можуть задаватися як константи, що встановлюють кількості змінних, або як відносні параметри, що враховують число змінних, що утворюють групи G_s.

Запропоновані алгоритми створення баз даних ЕС можна реалізувати після модернізації систем управління пристроями електропостачання на базі нових інтегрованих систем. У програмне забезпечення автоматизованого робочого місця енергодиспетчера необхідно включити ЕС. Їх включення планується після впровадження нових мікропроцесорних систем телемеханіки районних диспетчерських пунктів.

Разом з тим управління режимами роботи системи електропостачання і вибір режимів можна реалізувати на основі нечіткого опису їх станів. При формуванні правил встановлені такі параметри: ΔQ_i – відхилення добової кількості перевезених пасажирів на i-й міжпідстанційній зоні двоколійної ділянки, для характеристики якої введені значення нечітких величин Q_p: «відставання (сильне, слабке, відсутнє)» і «випередження (відсутнє, слабке, сильне)»; ΔS_i – відхилення добових активних втрат енергії для міжпідстанційної зони i, величина S_p із значеннями: «сильне, відсутнє, слабке»; ΔW_i – різниця добових витрат енергії i-ої міжпідстанційної зони, для реального режиму роботи системи електропостачання і еталонного режиму рівномірного завантаження системи електропостачання, величина W_p; K_i – ділянка колії, величина K_p, де $i = 0, 1..n$ – кількість міжпідстанційних зон заданої ділянки. Нечіткі правила мають вигляд:

$$\text{IF}(K_i \in K_p \text{AND} \Delta W_i \in W_p \text{AND} \Delta Q_i \in Q_p \text{AND} \Delta S_i \in S_p) \text{ THEN } U_i \text{ AND } Cx_i, \qquad (6)$$

де U_i – напруги тягових підстанцій, які забезпечують управління, що близьке до оптимального на i-й міжпідстанційній зоні ділянки; Cx_i – схема живлення зони.

При побудові моделі управління у вигляді нечітких правил кожна нечітка характеристика апроксимується N нечіткими величинами з трикутними функціями належності. Для нечіткої характеристики задані мінімальне і максимальне значення інтервалу, в яких знаходяться її допустимі значення. Апроксимуючі величини мають трикутний ступінь належності: вершина лежить в центрі, їй відповідає ступінь приналежності 1, а дві інші вершини – по сторонах від неї із ступенями належності 0. Нечіткий висновок ґрунтується на правилі нечіткої імплікації Мамдані.

Розглянемо величину W_p (різниця витрат енергії реального і еталонного режиму роботи системи електропостачання). Мінімальне значення різниці витрат на міжпідстанційній зоні дорівнювало – 9 600 кВт·год, а максимальне дорівнювало 9 600 кВт·год. Розбивши цей інтервал на 13 частин, маємо такі значення нечіткої величини, як показані у табл. 2.

Назви кожного значення показані таким чином: значення близько 0 називаються «$\Delta W_н$» (немає відхилення), «$+\Delta W_1$» – «$+\Delta W_6$», «$-\Delta W_1$» – «$-\Delta W_6$» – нечіткі відхилення відповідно до ΔW_{max} та ΔW_{min} класів 1...6. Зображення цієї величини у вигляді графіків функції належності показано на рис. 1. Кожна апроксимація була показана нечіткими значеннями, отриманими при розбитті допустимого інтервалу на частини (рис. 2, рис. 3).

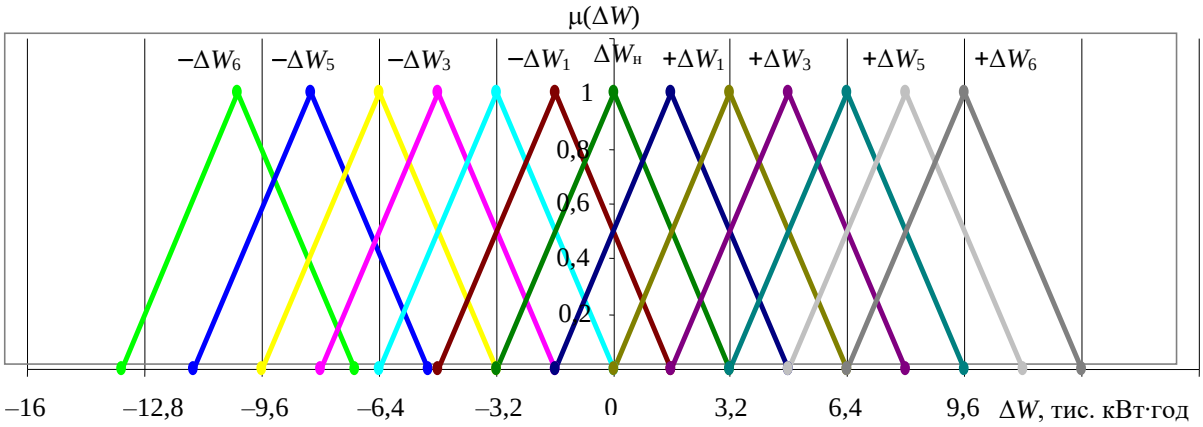

Рис. 1. Функції належності при апроксимації нечіткої величини W_p

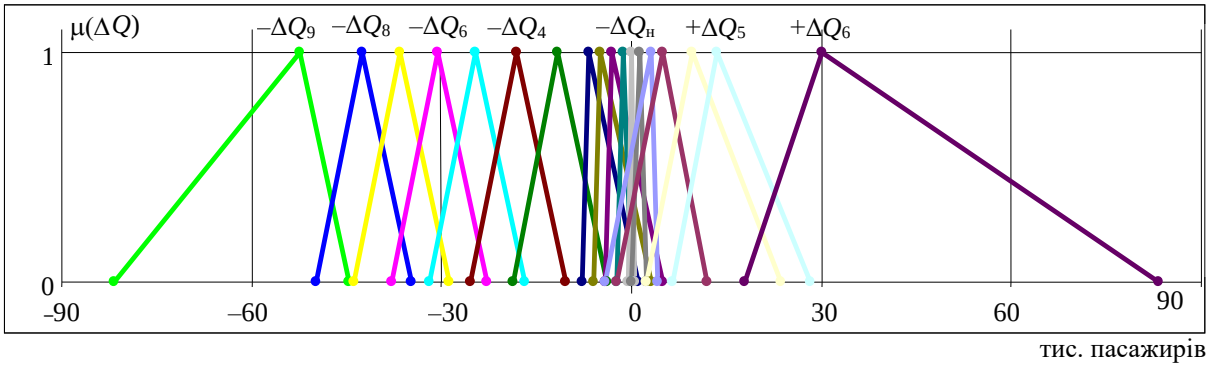

Рис. 2. Функції належності при апроксимації нечіткої величини Q_p
(відставання за перевезенням добової кількості пасажирів)

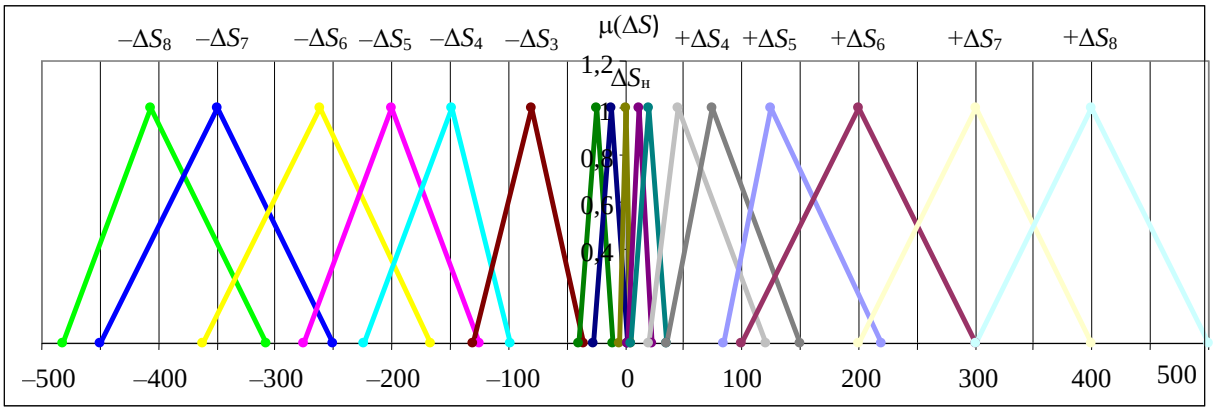

Рис. 3. Функції належності при апроксимації нечіткої величини S_p
(відхилення добових активних втрат енергії, кВт·год)

Таблиця 2

Значення нечіткої величини різниці добових витрат енергії міжпідстанційної зони

№	Назва значення	$\alpha = 0$	$\alpha = 1$	$\alpha = 0$
1	$-\Delta W_6$	–12800	–9600	–6400
2	$-\Delta W_5$	–11200	–8000	–4800
3	$-\Delta W_4$	–9600	–6400	–3200
4	$-\Delta W_3$	–8000	–4800	–1600
5	$-\Delta W_2$	–6400	–3200	0
6	$-\Delta W_1$	–4800	–1600	1600
7	$\Delta W_н$	–3200	0	3200
8	$+\Delta W_1$	–1600	1600	4800
9	$+\Delta W_2$	0	3200	6400
10	$+\Delta W_3$	1600	4800	8000
11	$+\Delta W_4$	3200	6400	9600
12	$+\Delta W_5$	4800	8000	11200
13	$+\Delta W_6$	6400	9600	12800

Розбиття кожної величини необхідно відкоригувати так, щоб домогтися найбільшої відповідності значень, які подаються на вхід нечіткої моделі.

Кожне значення з навчальної вибірки еталонних режимів тяги зіставляється зі значеннями нечіткої характеристики і замінюється значенням з максимальним ступенем належності для всіх заданих в ділянці. Наприклад, якщо ΔW_i = 6400 кВт·год, ΔQ_i = –30 тис .пас. і ΔS_i = 300 кВт·год, то отримаємо правило:

IF ($\Delta W_i \in$ «$\Delta W_н$» AND $\Delta Q_i \in$ «$-\Delta Q_2$» AND $\Delta S_i \in$ «$+\Delta S_4$») THEN $U_i \geq$ 0,6 AND CxK_i, де «$-\Delta Q_2$» – слабке випередження за перевезеною добовою кількістю пасажирів класу 2; «$+\Delta S_4$» – сильне відхилення добових активних втрат класу 4.

Згідно з правилами необхідний перехід на консольну схему живлення тягової мережі з такою напругою на шинах підстанцій, яка забезпечить допустиму норму 0,55 кВ для електрорухомого складу. Для кожної точки дослідної траєкторії виходить кілька правил і виникає проблема їх суперечливості: правила з однаковими посилками будуть підтверджувати різні висновки. Проблема вирішується приписуванням кожному правилу ступеня істинності. При появі суперечливих правил перевіряється їх ступінь істинності і залишається правило з найбільшим ступенем істинності. Ступінь істинності обчислюємо як добуток ступенів належності всіх величин, що беруть участь у правилі. Побудована база правил має вигляд таблиці, в якій є стовпці-посилки, стовпець-висновок і ступінь істинності правила. У табл. 3 подана частина отриманої бази правил.

Використання бази нечітких правил полягає у визначенні відображення вхідних посилок $f(K_i, \Delta W_i, \Delta Q_i, \Delta S_i)$ => $\sim U_i$, де $\sim U_i$ – нечітка величина, для визначення кількісного значення якої необхідно виконувати операцію дефазифікації [4]. У показаних результатах був використаний метод дефазифікації за правилом середнього центру.

Таблиця 3

Частина отриманої бази правил

Ступінь іст. правила	ΔW	ΔQ	ΔS	U, кВ
0,6310	$+\Delta W_5$	$+\Delta Q_1$	$\Delta S_н$	0,6
0,9465	$+\Delta W_5$	$+\Delta Q_1$	$\Delta S_н$	0,6
0,8051	$+\Delta W_5$	$+\Delta Q_1$	$\Delta S_н$	0,6
0,4395	$+\Delta W_2$	$\Delta Q_н$	$\Delta S_н$	0,5
0,3863	$+\Delta W_2$	$+\Delta Q_2$	$-\Delta S_3$	0,55
0,4016	$+\Delta W_2$	$+\Delta Q_3$	$-\Delta S_3$	0,5
0,5653	$+\Delta W_2$	$+\Delta Q_3$	$-\Delta S_3$	0,55
		.....		
0,0231	$+\Delta W_3$	$-\Delta Q_2$	$-\Delta S_1$	0,7
0,0383	$+\Delta W_3$	$-\Delta Q_2$	$-\Delta S_1$	0,7
0,9800	$-\Delta W_5$	$\Delta Q_н$	$\Delta S_н$	0,6
0,6517	$-\Delta W_5$	$\Delta Q_н$	$\Delta S_н$	0,55
0,5667	$-\Delta W_5$	$\Delta Q_н$	$\Delta S_н$	0,5

Результати проведеного моделювання проілюстровані прикладом на рис. 4, де зображено графік залежності втрат потужності для двох варіантів. Тонка лінія – втрати потужності еталонного режиму. Жирна лінія показує контрольний розрахунковий режим роботи системи електропостачання, інформація про який не потрапляла у навчальну вибірку, яку потрібно наблизити до еталонного режиму на основі бази нечітких правил.

На рис. 5 показано, як система, заснована на виведенні з бази нечітких правил, виробляла коригування управління режимами роботи системи електропостачання. Пунктирна лінія представляє рекомендоване керування, яке потрібно задати енергодиспетчеру, щоб режим системи електропостачання наблизився до показників енергозберігаючого режиму управління. З графіка видно, що рекомендоване системою керування прагне збільшити рівень напруги на шинах тягової підстанції *x*, щоб знизити втрати енергії на міжпідстанційній зоні і забезпечити необхідний рівень на електрорухомому складі. Це пов'язано з тим, що за контрольний було взято режим ліквідації перетоків потужності шляхом переходу на консольну схему живлення тягової мережі, тому підвищення рівня напруги наближає систему до оптимального керування.

Проведені дослідження показали достатню точність отриманих режимів управління системи електропостачання. Побудовану базу нечітких правил, яка замінює собою модель режимів системи електропостачання, можна використовувати як порадник енергодиспетчеру для вибору управління на черговому часовому проміжку з урахуванням умов невизначеності.

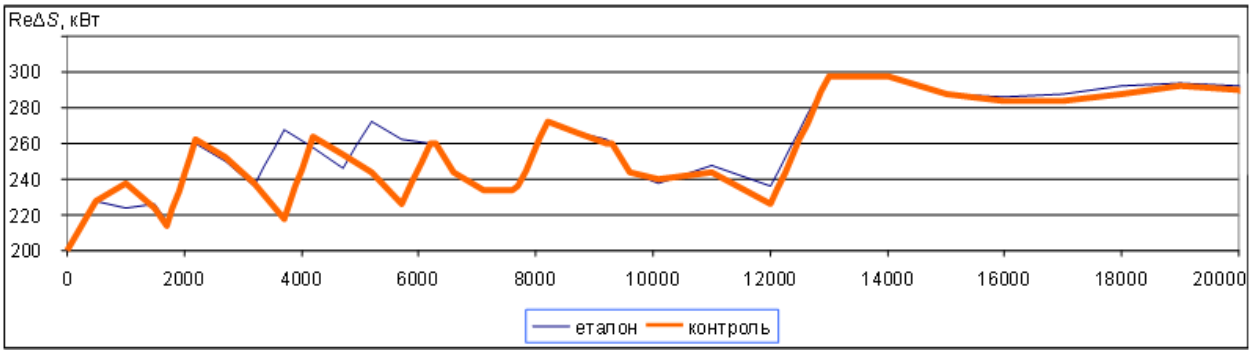

Рис. 4. Втрати потужності еталонного і реального режиму роботи системи електропостачання на заданій міжпідстанційній зоні

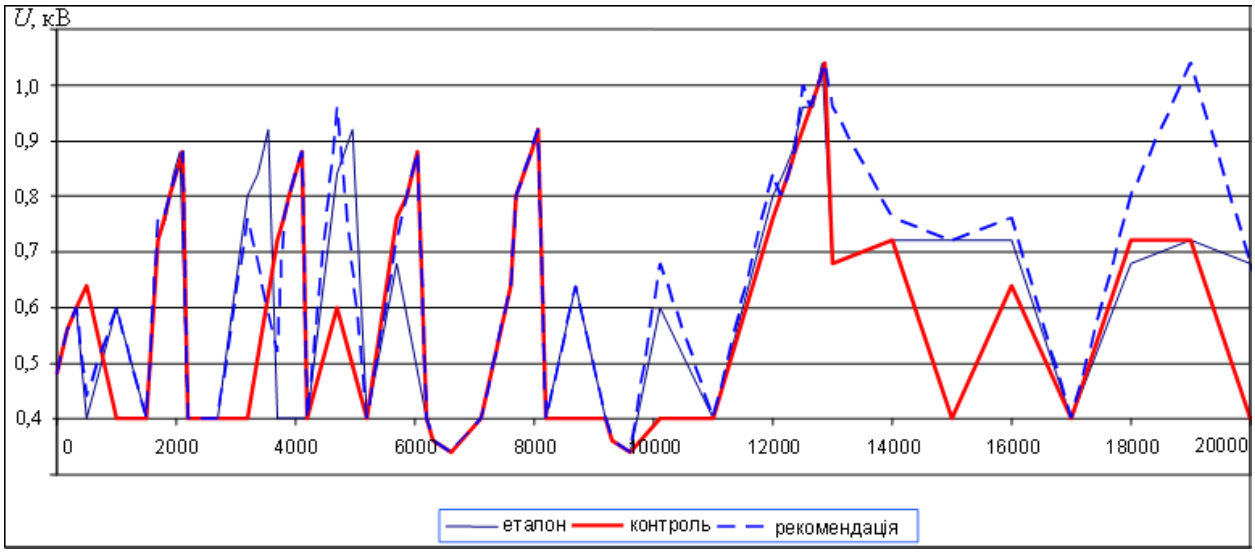

Рис. 5. Залежність рівня напруги на шинах тягової підстанції на черговому часовому проміжку

Висновки

Удосконалено систему управління режимами роботи системи електропостачання МЕТ з урахуванням енергосистем, що їх живлять на базі нечітких моделей і методів управління та побудовано базу нечітких правил, що дозволяє вибрати рівні напруг тягових підстанцій і схеми живлення тягових мереж та мінімізувати перетоки потужності і втрати енергії в тяговій мережі.

Застосування енергооптимальних режимів управління рухом електротранспорту на основі систем автоведення, які враховують наповненість трамваїв і тролейбусів, план і профіль колії, умови організації руху електрорухомого складу, тягові і гальмівні характеристики трамваїв і тролейбусів, за досвідом зарубіжного МЕТ, дозволяє економити електроенергію в середньому на 2,0–2,5 %, а на окремих напрямах – до 10,0 %.

Література

1. *Лорьер Ж. Системы искусственного интеллекта / Ж. Лорьер. – М. : Мир, 1991. – 586 с.*

2. *Boose J.H. Expertise transfer for expert system design / J.H. Boose // Elsevier. – 1986. – С. 12–14.*

3. *Reitman J.S. Organization revealed by recall orders and confirmed by pauses. Cognitive Psychology / J.S. Reitman, H.H. Ruetwr. – 1980. – 12 с.*

4. *Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия-Телеком, 2013. – 384 с.*

5. *Скалозуб В.В. Модели и методы расчета компромиссно-оптимальных режимов движения поезда / В.В. Скалозуб // Системні технології : регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ. – 2002. – Вип. 3(20). – С. 137–146.*

6. *Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков : изд. центр «НТМТ», 2013. – 248 с.*

7. *Мугиншейн Л.А. Энергооптимальные методы управления движением поездов / Л.А. Мугиншейн, А.У. Илютович, И.А. Ябко. – М. : Интекст, 2012. – 80 с.*

8. *Бондаренко В.О. Анализ энергоэффективности режимов работы электрических систем с тяговыми нагрузками / В.О. Бондаренко, И.В. Доманский, Г.Н. Костин // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – № 1. – С. 54–62.*

9. *Скалозуб В.В. Развитие метода нечетко-статистического моделирования и управления в задачах экономики / В.В. Скалозуб, В.Вл. Скалозуб // Вісник*

ДНУЗТ. – 2010. – Вип. 31. – С. 249–255.
10. Доманський І.В. Основи енергоефективності електричних систем з тяговими навантаженнями: монографія / І.В. Доманський // НТУ „ХПІ”. – Харків: вид-во ТОВ «Центр інформації транспорту України», 2016. – 224 с.
11. Скалозуб В.В. Управление движением поезда на основе нечеткого описания состояний системы / В.В. Скалозуб, А.П. Иванов // «Системні технології» № 3(50). – 2007.
12. Yagup V. Analysis and optimization of the reactive power compensation modes in a power supply system / V. Yagup, K. Yagup, Yu. Kovalova, V. Kharchenko, T. Besarab, O. Krasnov, I. Domanskii, V. Domanskii, H. Kostin, H.G. AbuGoukh // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Issue 3/5 (99). P. 13–22.
13. Хворост М.В. Технологія експлуатації міських електричних систем з тяговими навантаженнями на базі енерго- та ресурсозбереження / М.В. Хворост, І.В. Доманський, В.О. Васенко // Комунальне господарство міст. 2020. Вип. 1(154). – С. 16–27.
14. Хворост М.В. Ресурсозберігаючі технології експлуатації контактної мережі за станом для міського електротранспорту / М.В. Хворост, І.В. Доманський, В.О. Васенко // Світлотехніка та електроенергетика. 2020. Вип. 58, № 02. – С. 3–9.

References

1. Loriere, J. (1991). Systems of artificial intelligence / J. Loriere. Moskva. Mir, 586.
2. Boose, J.H. (1986). Expertise transfer for expert system design. *Elsevier.* 12–14.
3. Reitman, J.S., Ruetwr, H.H. (1980). Organization revealed by recall orders and confirmed by pauses. Cognitive Psychology, 12.
4. Rutkovskaya, D., Pilinsky, M., Rutkovsky, L. (2013). Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems. Moskva. Hotline-Telecom, 384.
5. Skalozub, V.V. (2002). Models and methods for calculating the compromise-optimal modes of train movement *System technologies: regional educational collection of scientific works*. Dnipropetrovsk,. *3 (20)*, 137–146.
6. Dmitrienko, V.D., Zakovorotny, V.D. (2013). Modeling and optimization of diesel train traffic control processes. Kharkov. *ed. center "NTMT"*, 248.
7. Muginshein, L.A., Ilyutovich, A.U., Yabko, I.A. (2012). Energooptimalnye metody management of the movement of trains. Moskva. Intext, 80.
8. Bondarenko, V.O., Domansky, I.V., Kostin, G. N. (2017). Analysis of energy efficiency of operating modes of electrical systems with traction loads. *Electrotechnics and Electromechanics. 1*, 54–62.
9. Skalozub, V.V., Skalozub, V.Vl. (2010). Development of the method of fuzzy statistical modeling and management in problems of economics. *Bulletin of DNUZT, 31*, 249–255.
10. Domanskiy, I.B. (2016). Fundamentals of energy efficiency of electrical systems with traction navantazhennymi: monograph NTU “KhPI”. Kharkiv: "Center for Information Transport of Ukraine", 224.
11. Skalozub, V.V., Ivanov, A.P. (2007). Train motion control based on fuzzy description of system states. *"System technologies", 3(50).*
12. Yagup, V., Yagup, K., Kovalova, Yu., Kharchenko, V., Besarab, T., Krasnov, O., Domanskii, I., Domanskii, V., Kostin, H., AbuGoukh, H.G. (2019). Analysis and optimization of the reactive power compensation modes in a power supply system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *3/5 (99)*, 13–22.
13. Khvorost, M.V., Domansky, I.V., Vasenko, V.O. (2020). Technology of exploitation of electric power systems with traction equipment on the basis of energy resources saving. *Municipal economy of cities*, *1(154)*, 16–27.
14. Khvorost, M.V., Domansky, I.V., Vasenko, V.O. (2020). Resource-saving technologies for the operation of the catenary as of urban electric transport. *Lighting Engineering & Power Engineering*, *58(2)*, 3–9.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Ф. Харченко, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна.

Автор: ВАСЕНКО Владислав Олександрович
директор комунального підприємства «Міськелектротранссервіс»
E-mail – vladvasenko2021@gmail.com
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8613-973X

SYSTEM OF CONTROL OF OPERATING MODES OF ELECTRIC TRACTION NETWORKS ON THE BASIS OF FUZZY DESCRIPTION OF THEIR CONDITION

V. Vasenko
Municipal Enterprise «Miskelektrotransservis», Ukraine

Given the need to save energy and reduce the cost of passenger transport on urban electric transport, the greatest effect (from 5 to 15%) is achieved through the introduction of comprehensive information technologies based on rational modes of traction of electric rolling stock and traction and external power supply. The criterion for assessing the modes of operation of power supply systems of urban electric transport is the energy consumption of traction substations, which reflects most of the influencing factors, including the inseparable relationship of traction and external power supply systems.

An approach to the implementation of energy-saving technologies of traction power supply of urban electric transport is proposed, which uses fuzzy models and methods of representation for analysis and selection of controls. It is proposed to implement the control of the power supply system operation modes and the selection of modes on the basis of a vague description of their states. When forming the rules, the following parameters are set: deviation of the daily number of transported passengers on the i-th interstation zone of the two-track section, for the

characterization of which the values of fuzzy values "lag (strong, weak, absent)" and "advance (absent, weak, strong)" deviation of daily active energy losses for the substation zone and with the values "strong, absent, weak"; the difference between the daily energy consumption of the i-th substation zone, for the actual mode of operation of the power supply system and the reference mode of uniform loading of the power supply system. When constructing a control model in the form of fuzzy rules, each fuzzy characteristic is approximated by N fuzzy quantities with triangular membership functions. For the fuzzy characteristic the minimum and maximum values of an interval in which there are its admissible values are set. Approximate quantities have a triangular degree of belonging: the vertex lies in the center, it corresponds to the degree of belonging 1, and the other two vertices - on the sides of it with degrees of belonging 0. The fuzzy conclusion is based on the rule of fuzzy Mamdani implication.

The constructed base of fuzzy rules, which replaces the model of modes of the power supply system, can be used as a guide to the energy dispatcher to select control for the next time period, taking into account the conditions of uncertainty. The principles of formation of algorithms and filling of databases and knowledge of expert systems are developed and problems of maintenance of modes of energy saving in systems of traction power supply of city electric transport are solved. The proposed algorithms for creating databases of expert systems can be implemented after the modernization of power supply control systems based on new integrated systems. Expert systems must be included in the software of the automated workplace of the energy dispatcher. Their inclusion is planned after introduction of new microprocessor systems of telemechanics of regional control points.

Keywords: *mode control, expert system, electric traction networks, fuzzy models and methods, databases, energy saving.*