

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК [621.331: 621.311.4:621.3] – 047.44

О. О. МАТУСЕВИЧ^{1*}

^{1*}Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 793 19 17, ел. пошта al_m0452@meta.ua, ORCID 0000-0002-2174-7774

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ ЗБИТКУ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ

Мета. Дослідження передбачає розробку методики та моделі зменшення збитку системи тягового електропостачання (СТЕ) електрифікованих залізниць України. Необхідним є й визначення показника оцінки запобігання збитку системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць. Робота також спрямована на пошук сучасних методів та підходів до удосконалення системи моніторингу, діагностування та технічного обслуговування СТЕ. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведено дослідження світового досвіду та публікацій, які присвячені якісному вирішенню проблем СТЕ з використанням лінгвістичного підходу на базі теорії нечітких множин та лінгвістичної змінної. **Результати.** У результаті дослідження розроблено алгоритм зменшення збитку СТЕ, яка функціонує в умовах невизначеності. Встановлено, що розв'язання даної проблеми можливе за рахунок своєчасного виявлення фактичного технічного стану обладнання в умовах проведення якісного технічного обслуговування, діагностування та оновлення ресурсу електротехнічного обладнання тягових підстанцій (ТП) СТЕ. При проведенні дослідження розглянута схема нечіткого висновку, що базується на застосуванні механізму мінімізації області прийняття рішень. Вона сприяє не тільки структурній ідентифікації у процесі формування бази даних, але й дозволяє значно підвищити продуктивність знаходження параметрів нечіткої моделі, що, в свою чергу, зменшує зусилля, які необхідні для аналізу та проектування ефективних систем управління технічним обслуговуванням і ремонтом (ТО і Р) СТЕ. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано алгоритм зменшення збитку системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць України. Розроблена математична модель розрахунку зменшення збитку СТЕ від відмов силового обладнання ТП за рахунок удосконалення системи ТО і Р. Вперше запропоновано показник оцінки запобігання збитку системи тягового електропостачання. **Практична значимість.** У статті розглянута схема нечіткого висновку, що базується на застосуванні механізму мінімізації області прийняття рішень та сприяє не тільки структурній ідентифікації в процесі формування бази даних, але й дозволяє значно підвищити продуктивність знаходження параметрів нечіткої моделі. Впровадження даного підходу зводиться до визначення основних етапів, особливостей та оптимального обґрунтування кількісних й якісних вимог до системи ТО і Р ТП. Це досягається при допустимих витратах на удосконалення з метою зменшення збитків СТЕ та вирішення проблеми підтримки обладнання ТП у працездатному стані в умовах наростання темпів і обсягів його старіння (у порівнянні з існуючим темпом і обсягами оновлення).

Ключові слова: електрифіковані залізниці; система тягового електропостачання; тягова підстанція; електрообладнання; зменшення збитків; технічне обслуговування і ремонт; діагностування; фактичний технічний стан; показник оцінки зменшення збитку; нечіткі множини; лінгвістичні змінні

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Вступ

Основним завданням системи електропостачання залізниць є повне і надійне енергетичне забезпечення перевізного процесу при зниженні ризиків та недопущення розвитку кризових ситуацій в безперервному енергозабезпеченні залізничного транспорту.

Підходи до оцінки економічного збитку від ненадійності силового обладнання СТЕ можуть бути виражені у вигляді вартості витрат від простою електрорухомого складу (ЕРС) внаслідок перерв в електропостачанні, недоотриманих доходів енергопередавальних компаній або соціального збитку під час розгляду систем електропостачання житлово-комунального сектора. У статті ми будемо розглядати лише складову збитків, пов'язану із зменшенням надійності та відмов силового обладнання СТЕ в умовах невизначеності її функціонування.

Система електропостачання залізниць має складну ієрархічну структуру і велику кількість пристроїв, довготривала експлуатація, яких без належного моніторингу та діагностування технічного стану може привести до виходу їх із ладу і значних матеріальних збитків. Найбільш складним об'єктом системи електропостачання є тягові підстанції. На електрифікованих залізницях України експлуатується 307 ТП, однак з них 37 ТП мають термін служби понад 30 ро-

ків, а 216 ТП більше 40 років. Також на електрифікованих залізницях в експлуатації знаходиться 9 підстанцій з одним вводом живлення, що не відповідає вимогам Правил улаштування системи тягового електропостачання залізниць України [1, 13].

Розподіл тягових підстанцій по терміну експлуатації наведено на рис. 1.

Аналіз поданих результатів, які наведені на рис. 1, вказує на тенденцію збільшення в експлуатації кількості ТП та їх обладнання, яке відпрацювало не тільки призначений, але і парковий ресурс, а обсяги його заміни настільки малі, що процес старіння парку ТП і його силового електрообладнання практично не зменшує своїх темпів, що знижує ефективність і надійність тягового електропостачання залізниць. Виходячи з цього, важливою складовою в системі діагностики тягової підстанції повинна бути методика діагностики, згідно з якою діагностичні оцінки відображають фактичний стан обладнання ТП. Метою сучасних підходів щодо управління системою діагностики та технічного обслуговування пристроїв ТП є: уникнення або мінімізація наслідків відмов пристроїв; забезпечення ремонту за фактичним станом обладнання; вирішення завдань щодо виявлення відмов; оптимізація планового обслуговування тощо.

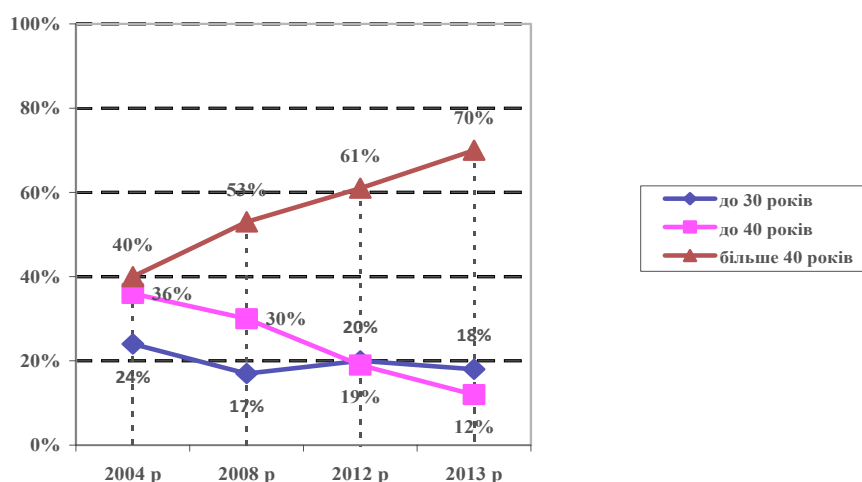


Рис. 1. Розподіл тягових підстанцій по терміну експлуатації

Fig. 1. The distribution of traction substations according to the term of service

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

У господарстві електропостачання залізниць України за 2013 рік допущено 1 031 випадок порушень нормальної роботи пристроїв, що на 43 випадки більше, ніж за 2012 рік (988 випадків), а внаслідок пошкодження пристроїв електропостачання на залізницях України за 2012 рік було затримано 982 поїзди на 959 годин, у 2011 році 832 – поїзди на 656 годин. Це на 17,0 % більше по кількості і на 46,0 % більше за часом [1].

Мета

Виходячи з вищенаведеного, метою статті є виконання дослідження світового досвіду та публікацій, які присвячені якісному вирішенню проблем СТЕ. Пошук нових сучасних методів і підходів удосконалення системи моніторингу, діагностування і технічного обслуговування в процесі експлуатації ТП з метою зменшення збитків системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць України.

Методика

Для вирішення задачі мінімізації наслідків відмов пристроїв ТП, система ТО і Р повинна мати такі властивості:

- ефективність в умовах високої невизначеності початкової інформації стану СТЕ;
- простота застосовування, універсальність, комплексність, практична спрямованість, можливість нарощування вхідних даних, тощо.

Кінцевим результатом дослідження повинна бути розробка моделі зменшення збитків системи тягового електропостачання.

Однак, вирішення цієї проблеми ускладнюється деякими особливостями організації та управління системою ТО і Р, основними з яких є [3, 8, 12]:

- необхідність обліку великої кількості показників експлуатаційної надійності обладнання при виборі їх раціонального варіанта в умовах невизначеності функціонування СТЕ;
- суттєвий взаємозв'язок і взаємозалежність показників, що мають суперечливий характер;
- складність отримання вихідних даних залишкового ресурсу обладнання в умовах невизначеності стану пристроїв ТП, які необхідні для вирішення завдань аналізу і синтезу, особливо на ранніх етапах розвитку відмови;
- здебільшого якісний характер показників, які враховуються під час аналізу і синтезу системи ТО і Р.

Вказані особливості дуже ускладнюють застосування традиційних математичних методів, зокрема методів математичної статистики і теорії ймовірності, а також класичних методів оптимізації для вирішення прикладних завдань аналізу і синтезу системи ТО і Р ТП внаслідок того, що математична статистика і теорія ймовірності використовують експериментальні дані, які володіють певною точністю і достовірністю.

У цьому випадку перспективним напрямом для вирішення прикладних задач, які пов'язані з оцінкою та вибором напрямів рішення проблеми зменшення збитків системи тягового електропостачання з причини відмов пристроїв СТЕ, при експертній початковій інформації є: лінгвістичний підхід на базі теорії нечітких множин і лінгвістичної змінної [5, 6, 15–20].

Теорія нечітких множин має справу з «людськими знаннями», які прийнято називати експертною інформацією. У цьому випадку ухвалення рішень в більшості базується на експертних оцінках.

Виходячи з розглянутого та враховуючи практичний досвід і публікації [4, 7, 9, 10], можна запропонувати алгоритм зменшення збитку системи тягового електропостачання від відмов силового електрообладнання під час перевезень на електрифікованому залізничному транспорті, який враховує наведені складові та їх взаємозв'язки (рис. 2).

На рис. 2: $i = 1, n$ – відмови силового обладнання ТП; P_i – ймовірність відмови i -го обладнання; Δq_i – збиток системи тягового електропостачання залізниць з причини відмов силового обладнання ТП (економічний, технічний, інформаційний тощо). Для тягового електропостачання економічний збиток може бути визначений за наступним виразом [15]:

$$\Delta q = q_{\text{пр}} + q_{\text{зуп}} + q_{\text{від}},$$

де $q_{\text{пр}}$ – збиток від простою поїздів через перерви в тяговому електропостачанні, $q_{\text{зуп}}$ – збиток від зупинки поїздів, $q_{\text{від}}$ – складова збитку, пов'язана з ліквідацією наслідків відмови силового обладнання; $R_i(r)$ – фактичний залишковий ресурс i -го електрообладнання ТП в обсязі напрацювання r ; P_i^b – ймовірність відновлення ресурсу i -го обладнання при своєчасному

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

виявленні його фактичного технічного стану та виконанні якісного ТО і Р; $i = \overline{1, n}$ – відновлення працездатності силового обладнання ТП при своєчасному виявленні фактичного технічного стану та виконанні якісного ТО і Р; \overline{w}_i – показник запобігання збитку СТЕ: економічного, технічного, інформаційного тощо за рахунок відновлення ресурсу i -го обладнання ТП.

В умовах відмов силового обладнання ТП – $i = \overline{1, n}$, кожна i -та відмова характеризується ймовірністю появи – P_i і збитком системи тягового електропостачання – Δq_i , який наноситься під час простою, зупинки ЕРС внаслідок перерв у електропостачанні, ліквідації наслідків відмови силового обладнання, тощо.

Інтелектуальна система моніторингу, діагностування та ТО і Р ТП (ІСМД ТО і Р – ТП), яка розглянута в [9], виконує такі основні функції:

- безперервний моніторинг та діагностування технічного стану основного силового електрообладнання ТП;
- визначення залишкового ресурсу $R_i(r)$ i -го обладнання;
- повне або часткове відновлення ресурсу i -го обладнання ($i = \overline{1, n}$) з ймовірністю відновлення P_i^B ;
- зменшення збитку СТЕ (\overline{w}_i) за рахунок відновлення ресурсу i -го обладнання.

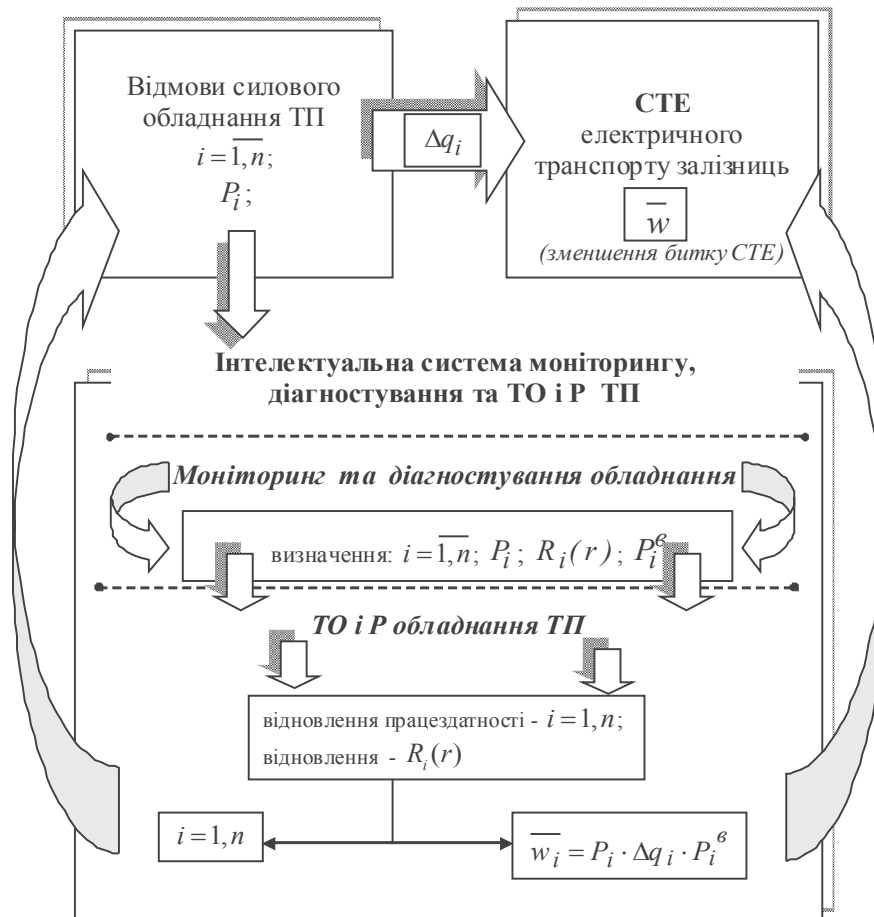


Рис. 2. Алгоритм зменшення збитку системи тягового електропостачання

Fig. 2. The algorithm of reduction the damage of traction energy system

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

З метою вирішення проблеми підвищення ефективності системи ТО і Р визначимо в загальному вигляді задачу ІСМД ТО і Р – ТП, це: відновлення ресурсу силового електрообладнання ТП та зменшення збитку СТЕ під час перевезень на електрифікованому залізничному транспорті за рахунок своєчасного виявлення фактичного технічного стану обладнання та виконання якісного ТО і Р.

Для вирішення цієї задачі необхідно вибрати варіант реалізації запропонованої ІСМД ТО і Р – ТП, який забезпечить максимум відновлення ресурсу та зменшення збитку при допустимих витратах на створення та підтримку інтелектуальної системи.

Згідно з [2] формальна постановка задачі має вигляд:

$$T^{\text{опт}} = \arg \max \bar{W}(\bar{T}). \quad (1)$$

При цьому необхідно знайти

$$T^{\text{опт}} \in T^{\text{доп}}$$

при обмеженні

$$C(T^{\text{опт}}) \leq C_{\text{доп}}$$

де \bar{T} – вектор, що характеризує варіант технічної реалізації ІСМД ТО і Р – ТП; $T^{\text{доп}}$, $T^{\text{опт}}$ – допустиме і оптимальне значення вектора \bar{T} ; $C_{\text{доп}}$ – допустимі витрати на ІСМД ТО і Р – ТП.

Для вирішення цієї задачі необхідно, перш за все, сформулювати показник визначення рівня зменшення збитку з причини відмов силового обладнання ТП – $\bar{W}(\bar{T})$ з врахуванням якості функціонування ІСМД ТО і Р – ТП.

Показник загального зменшення збитку СТЕ в загальному вигляді подамо співвідношенням:

$$\bar{W} = F(P_i; \Delta q_i; i = \overline{1, n}; P_i^{\text{в}}). \quad (2)$$

Показник запобігання збитку СТЕ i -го обладнання ТП за рахунок визначення реального фактичного стану обладнання (залишкового ресурсу) та поновлення ресурсу подамо співвідношенням:

$$\bar{w}_i = P_i \Delta q_i P_i^{\text{в}}; i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

За умови незалежності відмов обладнання ТП і адитивності (збільшення) їх наслідків отримуємо

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^n P_i \Delta q_i P_i^{\text{в}}. \quad (4)$$

Розглянемо співмножники, що входять у формулу (4).

Ймовірність виходу з ладу i -го обладнання ТП визначається статистично і відповідає відносній інтенсивності виходу з ладу:

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad (5)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -го обладнання.

Збиток, який наноситься з причини відмов силового обладнання ТП – Δq_i , може визначатися в абсолютних одиницях: економічних витрат, технічних витрат, тимчасових витрат інформації тощо.

Однак практично застосувати ці визначення дуже важко, особливо на ранніх етапах впровадження ІСМД – ТП. Тому доцільно замість абсолютного збитку використовувати *відносний збиток*, який по суті справи є рівнем відмови i -го обладнання ТП. Рівень відмови i -го обладнання ТП може бути визначений експертним шляхом в припущенні, що всі відмови силового обладнання ТП складають повну групу відмов [5, 7], тобто $0 \leq \Delta q_i \leq 1$; $\sum_{i=1}^n \Delta q_i = 1$.

Найбільш складним питанням є визначення ймовірності відновлення ресурсу i -го обладнання – $P_i^{\text{в}}$.

Зробимо припущення, що ця ймовірність визначається тим, наскільки повно враховані якісні і кількісні вимоги до ІСМД ТО і Р – ТП, тобто

$$P_i^{\text{в}} = f_i(x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im}), \quad (6)$$

де x_{ij} – ступінь виконання j -ї вимоги до ІСМД ТО і Р – ТП для відновлення ресурсу i -го обладнання, $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, k+m}$.

Хай перші j вимоги « k » до ІСМД ТО і Р – ТП будуть *кількісними* ($j = \overline{1, k}$), а решта – *якісними* ($j = \overline{1, m}$).

Для оцінки ступеня виконання j -ї кількісної та якісної вимоги до ІСМД ТО і Р – ТП найзруч-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ніше використовувати його нормоване значення.

Як показано в [2], для нормування значення ступеня виконання j -ї вимоги зручно використовувати таку функцію

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij}^{\text{НГ}}}{x_{ij}^{\text{НК}} - x_{ij}^{\text{НГ}}}, \quad (7)$$

де x_{ij} – поточне значення ступеня виконання j -ї вимоги відновлення ресурсу i -го обладнання; $x_{ij}^{\text{НК}}$, $x_{ij}^{\text{НГ}}$ – найкраще і найгірше значення.

З урахуванням формули (7) отримуємо такі розрахункові співвідношення:

при $x_{ij}^{\text{НК}} = x_{ij_{\text{max}}}$; $x_{ij}^{\text{НГ}} = x_{ij_{\text{min}}}$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij_{\text{min}}}}{x_{ij_{\text{max}}} - x_{ij_{\text{min}}}}, \quad (8)$$

при $x_{ij}^{\text{НК}} = x_{ij_{\text{min}}}$; $x_{ij}^{\text{НГ}} = x_{ij_{\text{max}}}$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij_{\text{max}}} - x_{ij}}{x_{ij_{\text{max}}} - x_{ij_{\text{min}}}} \quad (9)$$

Тоді при $x_{ij}^{\text{НК}} = x_{ij_{\text{opt}}}$; $x_{ij}^{\text{НГ}} = x_{ij_{\text{min}}}$; $x_{ij}^{\text{НГ}} = x_{ij_{\text{max}}}$;

$x_{ij_{\text{min}}} \leq x_{ij_{\text{opt}}} \leq x_{ij_{\text{max}}}$;

– ступінь виконання j -ї кількісної вимоги відновлення ресурсу i -го обладнання:

$\bar{x}_{ij} = 0$ при $x_{ij_{\text{opt}}} > x_{ij} > x_{ij_{\text{min}}}$, $x_{ij_{\text{opt}}} < x_{ij} < x_{ij_{\text{max}}}$;

$\bar{x}_{ij} = 1$ при $x_{ij} = x_{ij_{\text{opt}}}$ ($x_{ij_{\text{min}}} \leq x_{ij_{\text{opt}}} \leq x_{ij_{\text{max}}}$);

– ступінь виконання j -ї якісної вимоги відновлення ресурсу i -го обладнання визначається функцією приналежності до якнайкращого значення $\mu(x_{ij})$:

$$\mu(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - x_{ij_{\text{min}}}}{x_{ij_{\text{opt}}} - x_{ij_{\text{min}}}} \quad \text{при } x_{ij_{\text{min}}} \leq x_{ij} \leq x_{ij_{\text{opt}}};$$

$$\mu(x_{ij}) = \frac{x_{ij_{\text{max}}} - x_{ij}}{x_{ij_{\text{max}}} - x_{ij_{\text{opt}}}} \quad \text{при } x_{ij_{\text{opt}}} \leq x_{ij} \leq x_{ij_{\text{max}}}.$$

Розклавши функцію (6) в ряд Макларена і обмежившись лише першими членами ряду, отримаємо

$$P_i^B = P_i^B(0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial P_i^B}{\partial x_{ij}} x_{ij}, \quad (10)$$

де $P_i^B(0) = 0$ – ймовірність відновлення ресурсу i -го обладнання при невиконанні вимоги до

ІСМД ТО і Р – ТП; $\frac{\partial P_i^B}{\partial x_{ij}} = \alpha_{ij}$ – величина, що

характеризує ступінь впливу вимоги на ймовірність відновлення ресурсу i -го обладнання (важливість виконання j -ї вимоги для усунення i -ї відмови обладнання). Очевидно, що

$$0 \leq \alpha_{ij} \leq 1; \quad \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} = 1 \quad \text{для } i = \overline{1, n}.$$

Після підстановки в (10) відповідних значень отримуємо

$$P_i^e = \sum_{j=1}^k \alpha_{ij} \bar{x}_{ij} + \sum_{j=k+1}^m \alpha_{ij} \mu(x_{ij}). \quad (11)$$

Остаточно формула (4) показника оцінки запобігання збитку СТЕ приймає вигляд:

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k P_i \Delta q_i \alpha_{ij} \bar{x}_{ij} +$$

$$+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=k+1}^m P_i \Delta q_i \alpha_{ij} \mu(x_{ij}). \quad (12)$$

Результати

У результаті дослідження розглянута схема нечіткого висновку, що базується на застосуванні механізму мінімізації області прийняття рішень та сприяє не тільки структурній ідентифікації в процесі формування бази даних, але й дозволяє значно підвищити продуктивність знаходження параметрів нечіткої моделі, оскільки в цьому випадку ми маємо справу не з нескінченними величинами – варіаціями, а з великою кількістю, але, тим не менш, кінцевим числом даних і формальних правил прийняття рішень, що якісно впливає на знаходження системою правильного рішення задачі. Це дуже важливий фактор, тому що застосування концепції мінімізації області прийняття рішень зменшує кількість правил для опису нечіткої моделі, що в свою чергу зменшує зусилля, які необхідні для аналізу і проектування ефективних систем управління ТО і Р СТЕ.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Отримано вираз показника оцінки запобігання збитку СТЕ (економічного, технічного, інформаційного тощо) за рахунок визначення реального фактичного стану обладнання (залишкового ресурсу) та у разі потреби поновлення ресурсу i -го обладнання ТП:

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k P_i \Delta q_i \alpha_{ij} \bar{x}_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=k+1}^m P_i \Delta q_i \alpha_{ij} \mu(x_{ij}),$$

де P_i – ймовірність відмови i -го обладнання (визначається статистично); Δq_i – збиток системи тягового електропостачання залізниць з причини відмов силового обладнання ТП ($0 \leq \Delta q_i \leq 1$); α_{ij} – показник важливості виконання j -ї вимоги для усунення i -ї відмови обладнання. Ця величина характеризує ступінь впливу вимоги на ймовірність усунення i -ї відмови обладнання ($0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$); \bar{x}_{ij} – ступінь виконання j -ї кількісної вимоги з близькістю до необхідного (оптимального) значення для усунення i -ї відмови силового електрообладнання ТП: $\bar{x}_{ij} = 0$, при $x_{ij} < x_{ij_{\min}}$; $x_{ij} > x_{ij_{\max}}$, $\bar{x}_{ij} = 1$, при $x_{ij} = x_{ij_{\text{opt}}}$; $\mu(x_{ij})$ – ступінь виконання j -ї якісної вимоги визначається функцією приналежності до якнайкращого значення в межах ($0 < \mu(x_{ij}) < 1$).

Наукова новизна та практична значимість

У статті вперше запропоновано алгоритм зменшення збитку системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць України. Розроблена математична модель розрахунку зменшення збитку СТЕ від відмов силового обладнання ТП за рахунок удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту. Вперше запропоновано показник оцінки запобігання збитку системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць.

Цей підхід зводиться до визначення основних етапів, особливостей та оптимального обґрунтування кількісних і якісних вимог до інтелектуальної системи моніторингу, діагностики та ТО і Р ТП, при допустимих витратах на удосконалення, з метою зменшення збитків системи тягового електропостачання та вирішення проблеми підтримки обладнання ТП у працездатному стані в умовах наростання темпів і обсягів його старіння порівняно з існуючим темпом і обсягами оновлення.

здатному стані в умовах наростання темпів і обсягів його старіння порівняно з існуючим темпом і обсягами оновлення.

Висновки

Вирішення задачі зменшення збитку СТЕ у вигляді (1), (2) зводиться до оптимального обґрунтування кількісних і якісних вимог до системи ІСМД ТО і Р – ТП, яка дозволяє визначити $\max \bar{w}(x_{ij}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, k+m})$ при обмеженні допустимих витрат на систему $C(x_{ij}) \leq C_{\text{доп}}$.

Встановлено, що основними етапами розв'язання задачі зменшення збитку СТЕ електрифікованих залізниць, є:

- збір і обробка експертної інформації про характеристики відмов: ймовірності відмови i -го обладнання P_i і збитку Δq_i ($i = \overline{1, n}$);
- збір і обробка експертної інформації для визначення показника важливості виконання j -ї вимоги для усунення відмови i -го обладнання – α_{ij} ;
- визначення ступеня виконання j -ї якісної вимоги $\mu(x_{ij})$, ($i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, m}$) та кількісної вимоги \bar{x}_{ij} , ($i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, k}$);
- оцінка вартості системи ІСМД ТО і Р – ТП для конкретного варіанта її реалізації, залежна від ступеня виконання вимог $C(x_{ij}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, k+m})$;
- розробка моделі для вибору раціонального варіанта побудови системи ІСМД ТО і Р – ТП.

Також цей підхід дозволить визначити найбільш важливі проблеми підтримки основного обладнання ТП СТЕ у працездатному стані, в умовах наростання темпів і обсягів його старіння та відмов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2013 році. – Київ : Дедалта, 2014. – 251 с.
2. Борисов, А. Н. Принятие решения на основе нечетких моделей: примеры использования / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров. – Рига : Знание, 1990. – 184 с.
3. Интегрированная система управления электрооборудованием железнодорожного транспорта / В. Б. Землянов, А. Н. Пшинько, В. Т. Доманс-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- кий, В. В. Скалозуб // Proc. of the 7th Intern. Scientific Conf. of Railway Experts. «ЈУЖЕЛ» (4.10.-6.10.2000). – Vrnjaska Banja, 2000. – С. 65–68.
4. Капіца, М. І. Стратегії експлуатації, технічного обслуговування та ремонту локомотивів / М. І. Капіца, Р. О. Коренюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 63–66.
 5. Костерев, Н. В. Нечеткое моделирование электрооборудования для оценки технического состояния и принятия решений о стратегии дальнейшей эксплуатации / Н. В. Костерев, Е. И. Бардик // Технічна електродинаміка : тем. вип. : Проблеми сучасної електротехніки. – 2006. – Ч. 3. – С. 39–43.
 6. Круглов, В. В. Нечеткая логика и искусственные сети / В. В. Круглов. – Москва : Физматлит, 2001. – 221 с.
 7. Кузнецов, В. Г. Модель экономического ущерба от ненадежности силового оборудования, участвующего в регулировании режимов системы тягового электроснабжения / В. Г. Кузнецов // Вестн. нац. техн. ун-та «ХПИ». Сер. : «Новые решения в современных технологиях» : сб. науч. тр. – Харьков, 2013. – № 38 (1011). – С. 136–141.
 8. Матусевич, А. А. Построение модели системы защиты информационно-управляющих телемеханических комплексов электроснабжения железных дорог / А. А. Матусевич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 14. – С. 59–63.
 9. Матусевич, О. О. Сучасні підходи з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць на основі SMART технологій / О. О. Матусевич // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 4 (52). – С. 75–85. doi: 10.15802/stp2014/27362.
 10. Матусевич, О. О. Удосконалення системи діагностування силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць / О. О. Матусевич // Гірн. електромеханіка та ав-томатика : наук.-тех. зб. – 2014. – № 92. – С. 31–36.
 11. Методы определения коэффициентов важности критериев / А. М. Анохин, В. А. Глотков, В. В. Павельев, А. М. Черкашин // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 8. – С. 3–35.
 12. Общие технические требования к системам тягового электроснабжения постоянного и переменного тока скоростных и высокоскоростных линий : Рекомендации ОСЖД Р-610/7. – Варшава : Комитет ОСЖД, 2002. – 25 с.
 13. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України : ЦЕ- 0009 : затв. Наказом Укрзалізниці від 24.12.2004 р. № 1010-ЦЗ. – Київ : Укрзалізниця, 2005. – 80 с.
 14. Рекомендації з техніко-економічних розрахунків окремих показників експлуатаційної роботи залізниць : ЦД-0037 : затв. Наказом Укрзалізниці від 18.06.2001 р. № 329-Ц / розроб. О. Ф. Вергун, Л. Ю. Гаркуша. – Київ : Трансп. України, 2001. – 64 с.
 15. Buckley, J. J. Simulating Continuous Fuzzy Systems / J. J. Buckley, L. J. Jowers, K. D. Reilly // Information Sciences. – 2007. – Vol. 177. – Iss. 2. – P. 436–448. doi: 10.1016/j.ins.2006.03.005.
 16. Wang, X. A Hybrid Algorithm to Extract Fuzzy Measures for Software Quality Assessment / X. Wang, M. Ceberio, S. Virani [et. all] // J. of Uncertain Systems. – 2013. – Vol. 7 (3). – P. 219–237.
 17. Yang, H. Measuring Software Product Quality with ISO Standards Base on Fuzzy Logic Technique / H. Yang // Affective Computing and Intelligent Interaction. – 2012. – Vol. 137. – P. 59–67. doi: 10.1007/978-3-642-27866-2_8.
 18. Zadeh, L. A. Fuzzy logic. Computing with words / L. A. Zadeh // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 1996. – Vol. 4, № 2. – P. 103–111. doi: 10.1109/91.493904.
 19. Zemankova-Leech, M. Fuzzy Relational Data Bases: A Key to Expert Systems / M. Zemankova-Leech, A. Kandel. – Cologne : TUV Rheinland, 1984. – 68 p.
 20. Zimmerman, H. Fuzzy Sets Theory – and Its Applications / H. Zimmerman. – Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 2001. – 544 p.

А. А. МАТУСЕВИЧ^{1*}

^{1*}Каф. «Електроснабження железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 793 19 17, эл. почта al_m0452@meta.ua, ORCID 0000-0002-2174-7774

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА УЩЕРБА СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Цель. Исследование предусматривает разработку методики и модели уменьшения ущерба системы тягового электроснабжения (СТЭ) электрифицированных железных дорог Украины. Необходимым является и определение показателя оценки предотвращения ущерба СТЭ электрифицированных железных дорог. Работа также направлена на поиск современных методов и подходов к усовершенствованию системы мониторинга, диагностирования и технического обслуживания СТЭ. **Методика.** Для достижения поставленной цели проведено исследование зарубежного опыта и публикаций, которые посвящены качественному решению проблем СТЭ с использованием лингвистического подхода на базе теории нечетких множественных чисел и лингвистической переменной. **Результаты.** В результате исследования разработан алгоритм уменьшения ущерба СТЭ, которая функционирует в условиях неопределенности. Установлено, что решение данной проблемы возможно за счет своевременного выявления фактического технического состояния оборудования в условиях проведения качественного технического обслуживания, диагностирования и обновления ресурса электротехнического оборудования тяговых подстанций (ТП) СТЭ. При проведении исследования рассмотрена схема нечеткого вывода, который базируется на применении механизма минимизации области принятия решений. Это способствует не только структурной идентификации в процессе формирования базы данных, но и позволяет значительно повысить продуктивность нахождения параметров нечеткой модели, которая, в свою очередь, уменьшает усилия, необходимые для анализа и проектирования эффективных систем управления техническим обслуживанием и ремонтом (ТО и Р) СТЭ. **Научная новизна.** Впервые предложен алгоритм уменьшения ущерба системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог Украины. Разработана математическая модель расчета уменьшения ущерба СТЭ от отказов силового оборудования ТП за счет усовершенствования системы ТО и Р. Впервые предложен показатель оценки предотвращения ущерба системы тягового электроснабжения. **Практическая значимость.** В статье рассмотрена схема нечеткого вывода, который базируется на применении механизма минимизации области принятия решений и способствует не только структурной идентификации в процессе формирования базы данных, но и позволяет значительно повысить производительность определения параметров нечеткой модели. Внедрение данного подхода сводится к определению основных этапов, особенностей и оптимального обоснования количественных и качественных требований к системе ТО и Р ТП. Это достигается при допустимых расходах на усовершенствование с целью уменьшения ущерба СТЭ и решения проблемы поддержания оборудования ТП в работоспособном состоянии в условиях нарастания темпов и объемов его старения (в сравнении с существующим темпом и объемами обновления).

Ключевые слова: электрифицированные железные дороги; система тягового электроснабжения; тяговая подстанция; электрооборудование; уменьшение ущерба; техническое обслуживание и ремонт; диагностирование; фактическое техническое состояние; показатель оценки уменьшения ущерба; нечеткие множества; лингвистические переменные

О. О. MATUSEVYCH^{1*}

^{1*}Dep. «Power Supply of Railway Transport», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 793 19 17, e-mail al_m0452@meta.ua, ORCID 0000-0002-2174-7774

MATHEMATICAL MODEL OF THE DAMAGE ANALYSIS OF RAILWAY TRACTION ENERGY SYSTEM

Purpose. The study provides the methods and models development of reducing damages of traction energy systems (TES) at electrified railways of Ukraine. Definition the indicator of preventing damage evaluation TES at electrified railways is necessary. Paper is aimed to search the modern methods and approaches to improve the system of TES monitoring, diagnosis and maintenance. **Methodology.** To achieve this purpose a study of foreign experience and publications that focus on problem-solving quality of TES using a linguistic approach based on the theory of fuzzy multiple numbers and linguistic variable were done. **Findings.** In result of research an algorithm to reduce TPS damages which operates under uncertainty was developed. It is found that the solution of this problem is possible by timely detection of actual technical condition of equipment in terms of quality maintenance, diagnostics and update resource of electrical equipment traction substations (TS) power supply TES. The study examined the fuzzy inference scheme, which is based on the use of mechanisms to minimize the area of decision-making. It contributes

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

not only to structural identification in the process of developing a database, but also can significantly improve the efficiency of finding the parameters of fuzzy model, which in turn reduces the efforts that are necessary for the analysis and the design of effective control systems maintenance and repair (M and R) TES. **Originality.** For the first time the algorithm of reduction the damage of traction energy system of electrified railways of Ukraine was offered. The mathematical model of reduction the damage calculation of TES from TP power equipment failures by improving system maintenance (M and P) was developed. Firstly evaluation index was proposed to prevent the damage of traction energy system. **Practical value.** The article describes the fuzzy inference scheme, which is based on the use of the mechanism to minimize the area of decision-making and contributes not only to structural identification in the process of developing a database, but also can significantly improve the performance of determining the parameters of fuzzy model. Implementation of this approach comes to the determination of the main stages, features and optimal justification of quantitative and qualitative requirements for system M and R of TS. It will be done with allowable costs for improvements to reduce TPS damage and address the equipment of traction substations in working condition in terms of growth rates and volumes aging (compared to the current speed and volume of updates).

Keywords: electrified railway; traction energy system; traction substation; electrical equipment; reduction the damage; maintenance and repair; diagnosis; actual technical condition; evaluation index of reduction the damage; fuzzy sets; linguistic variables

REFERENCES

1. *Analiz roboty hospodarstva elektryfikatsii ta elektropostachannia v 2013 rotsi* [Analysis of the electrification work and electricity supply in 2013]. Kyiv, Devalta Publ., 2014. 251 p.
2. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. *Prinyatiye resheniya na osnove nechetkikh modeley: primery ispolzovaniya* [Decision making based on fuzzy models: examples of usage]. Riga, Znaniye Publ., 1990. 184 p.
3. Zemlyanov V.B., Pshinko A.N., Domanskiy V.T., Skalozub V.V. *Integrirovannaya sistema upravleniya elektrosnabzheniyem zheleznodorozhnogo transporta* [The integrated power management system of railway transport]. Proc. of 7th Intern. Sci. Conf. of Railway Experts. «ЮЖЕЛ» (4.10.-6.10.2000). Vrnjacka Banja, 2000, pp. 65-68.
4. Kapitsa M.I., Koreniuk R.O. *Stratehii ekspluatatsii, tekhnichnoho obsluhovuvannia ta remontu lokomotyviv* [Strategies for the operation, maintenance and locomotive repair]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 63-66.
5. Kosterev N.V., Bardik Ye.I. *Nechetkoye modelirovaniye elektrooborudovaniya dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya i prinyatiya resheniy o strategii dalneyshey ekspluatatsii* [Fuzzy modeling of electrical equipment for technical condition assessment and decision-making about the strategy of further exploitation]. *Tekhnichna Elektrodynamika. Problemy suchasnoi elektrotekhniki – Technical Electrodynamics. Problems of Modern Electrical Engineering*, 2006, part 3, pp. 39-43.
6. Kruglov V.V. *Nechetkaya logika i iskusstvennye seti* [Fuzzy logic and artificial networks]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 221 p.
7. Kuznetsov V.G. *Model ekonomicheskogo ushcherba ot nenadezhnosti silovogo oborudovaniya, uchastvuyushchego v regulirovanii rezhimov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya* [The model of economic losses due to the unreliability of power equipment that is involved in the modes regulation of traction power supply system]. *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta «KPI». Novyye resheniya v sovremennykh tekhnologiyakh* [Bulletin of the National Technical University KhPI. New solutions in modern technologies.]. Kharkiv, 2013, no. 38 (1011), pp. 136-141.
8. Matusevich A.A. *Postroeniye modeli sistemy zashchity informatsionno-upravlyayushchikh telemekhanicheskikh kompleksov elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog* [Building a model system for the protection of information-control telemechanical railway power supply systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 14, pp. 59-63.
9. Matusevich O.O. *Suchasni pidkhody z tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu obladnannia tiahovykh pidstantsii elektryfikovanykh zaliznyts na osnovi SMART tekhnolohii* [New approaches to maintenance and repairing of the traction substations equipment on electrified railways on the basis of SMART-technologies]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zal-*

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- iznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 4 (52), pp. 75-85. doi: 10.15802/stp2014/27362.
10. Matusевич О.О. Udoshkonalennia systemy diahnostuvannia sylovykh transformatoriv tiahovykh pidstantsii elektryfikovanykh zaliznyts [Improvement of the diagnostics system of power transformers traction substation of electrified railways]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka. Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk* [Collection of Mining Electromechanics and Automation], 2014, no. 92, pp. 31–36.
 11. Anokhin A.M., Glotkov V.A., Pavelev V.V., Cherkashin A.M. Metody opredeleniya koeffitsientov vazhnosti kriteriyev [Methods of the coefficients importance criteria determination]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and remote control*, 1997, no. 8, pp. 3-35.
 12. *Obshchiye tekhnicheskyye trebovaniya k sistemam tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo i peremennogo toka skorostnykh i vysokoskorostnykh liniy: Rekomendatsii OSZhD R-610/7*. [General technical requirements for traction power supply systems, AC and DC speed and high-speed lines: Recommendations OSJD R-610/7]. Varshava, Komitet OSZhD Publ., 2002. 25 p.
 13. *Pravyla ulashtuvannia systemy tiahovoho elektropostachannia zaliznyts Ukrainy. TsE-0009* [Rules arrangement of the traction power supply system of railways of Ukraine. TsE-0009]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 2005. 80 p.
 14. Verhun O.F., Harkusha L.Yu. *Rekomendatsii z tekhniko-ekonomichnykh rozrakhunkiv okremykh pokaznykiv ekspluatatsiinoi roboty zaliznyts. TsD-0037* [Recommendations on technical and economic calculations of individual operational performance of the Railways. TsD-0037]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2001. 64 p.
 15. Buckley J.J., Jowers L.J., Reilly K.D. Simulating Continuous Fuzzy Systems. *Information Sciences*, 2007, vol. 177, issue 2, pp. 436-448. doi: 10.1016/j.ins.2006.03.005.
 16. Wang X., Ceberio M., Virani S., Garcia A., Cummins J. Hybrid Algorithm to Extract Fuzzy Measures for Software Quality Assessment. *Journal of Uncertain Systeme*, 2013, vol. 7 (3), pp. 219-237.
 17. Yang H. Measuring Software Product Quality with ISO Standards Base on Fuzzy Logic Technique. *Affective Computing and Intelligent Interaction*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2012, vol. 137, pp. 59-67. doi: 10.1007/978-3-642-27866-2_8.
 18. Zadeh L.A. Fuzzy logic. Computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1996, vol. 4, no.2, pp. 103-111. doi: 10.1109/91.493904.
 19. Zemankova-Leech M., Kandel A. *Fuzzy Relational Data Bases: A Key to Expert Systems*. Cologne, TUV Rheinland Publ., 1984. 68 p.
 20. Zimmerman H. *Fuzzy Sets Theory – and Its Applications*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers Publ., 2001. 544 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. В. Хворостом (Україна); д.т.н., доц. В. Г. Сиченком (Україна)

Надійшла до редколегії 20.02.2015

Прийнята до друку 15.05.2015