

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО  
УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРКІВ  
ЗАЛІЗНИЧНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

*Анотація. Представлені результати із створення інтелектуальної автоматизованої системи, що забезпечує управління процесами експлуатації парків залізничних технічних систем (електричних двигунів) на основі отримання оцінок параметрів їх поточного стану, без вилучення пристроїв з виробничих технологічних процесів. Досліджено кілька напрямків удосконалення автоматизованих систем управління експлуатацією парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів: урахування вектору показників, за якими оцінюється ефективність процесів експлуатації, розділення процедур визначення черговості діагностування і ремонтів технічних систем, формування моделі автоматизованого управління парком, з урахуванням координації підсистем і розвитку автоматизованої системи, застосування інтелектуальних методів аналізу та управління на основі нейронних мереж, а також методів екстраполяційного прогнозування часових і технічних характеристик ін.*

*Ключові слова: парки технічних систем, процеси експлуатації, поточний стан, багатокритеріальне автоматизоване керування. електричні двигуни стрілочних переводів, інтелектуальне управління, нейронні мережі.*

**Вступ**

В даний час застосування методів і технологій інтелектуальних транспортних систем залізничного транспорту (ІТСЗ) спрямоване на підвищення ефективності залізничних перевезень, безпеки процесів експлуатації технічних систем (ТС) ін. Для сучасних ІТСЗ важливим напрямком розвитку є багатокритеріальна оптимізація управління при забезпеченні вимог безпеки, ефективності, зниження впливу транспорту на навколишнє середовище в умовах зростаючої інтенсивності транспортних потоків, посилення взаємодії різних видів транспорту при вирішенні логістичних та інших технологічних завдань. Удосконалення процесів експлуатації парків ТС (вагонів,

локомотивів, стрілочних переводів, електродвигунів ін.) або їх складових компонентів, з урахуванням параметрів поточного стану, являється актуальною науково-технічною проблемою, яка є надзвичайно важливою для залізничного транспорту, де налічують тисячі одиниць такого роду ТС. У роботі представлені методи підвищення ефективності автоматизованих процесів експлуатації парків електричних двигунів (ЕД), АСУЕД, що використовуються в залізничних стрілочних переводах - високо відповідальних засобах управління процесами перевезень. В даний час лише на Південно-Західній залізниці України їх експлуатується понад 6800. ЕД – коштовне устаткування при закупівлі, експлуатації, у ремонті. Зараз процеси експлуатації ЕД здійснюються на основі планово-попереджувального методу, з урахуванням нормування. У статті представлені результати по створенню інтелектуальної автоматизованої системи, що забезпечує управління процесами експлуатації парків ЕД (моделі ДП 0.18, ДП 0.25, МСП 0.15, МСП 0.25) на основі отримання оцінок параметрів їх поточного стану, без видалення пристроїв з виробничих технологічних процесів. Перевага такої системи автоматизованої діагностики [1] в тому, що в ній проводяться вимірювання характеристик двигунів, які знаходяться під впливом номінальних, робочих значень напруг, струмів, магнітних полів, відцентрових сил та ін. Такі вимірювання параметрів ЕД дозволяють виявляти більше несправностей, ніж при використанні статичних методів діагностики [2].

В [3] для реалізації безпосередніх процедур управління парком ЕД з урахуванням їх технічного стану розроблена дворівнева система математичних моделей, верхній рівень якої представляє деякі контрольовані властивості парку технічних систем в цілому, забезпечує оцінки параметрів поточного стану і прогнозування значень параметрів (очікуваний час до прояву несправності, необхідні витрати на відновлення тощо), а нижній - формується з математичних моделей окремих об'єктів, які представляють еволюцію станів конкретних ЕД.

У статті виконано наступні удосконалення АСУЕД: урахування вектору показників ефективності процесів експлуатації зі складовими – експлуатаційні витрати, надійність системи (ризик відмови), додаткові витрати на відновлення функціонування системи, сукупно-

стей ТС; розділення процедур визначення черговості діагностування технічних систем і їх ремонтів; розвиток моделі автоматизованого управління парком ТС з урахуванням координації підсистем і розвитку автоматизованої системи; застосування інтелектуальних методів аналізу та управління на основі нейронних мереж, а також методів екстраполяційного прогнозування часових і технічних характеристик та ін.

Для компонентів вектору цілі встановлено взаємно компромісний характер відношень між ними, що дозволило застосувати аксіоматичні методи векторної оптимізації. При визначені черговості обслуговувань окремих ТС ураховується інтенсивність перевезень на відповідних ділянках залізниць. У роботі наведено дані про технологічні можливості АСУЕД, а також пропозиції щодо можливості її застосування для інших типів ТС залізничного транспорту.

**Постановка завдання.** Постановка завдання із підвищення ефективності експлуатації і управління парком технічних систем або їх компонентів формулюється наступним чином. Розглядається певна множина складних техніко-технологічних об'єктів однакового призначення (ЕД), парк технічних систем, а також процеси їх експлуатації. Об'єкти парків характеризуються наборами властивостей, значення яких вказують на їх певний «поточний» стан, що відображає хід і можливості подальшої експлуатації кожної з систем. Технічний стан об'єкта на даному етапі його експлуатації визначається за сигналами, що знімається з нього, причому без виключення з процесів експлуатації. Також відомі ресурси (технічні, матеріальні, трудові та ін.), необхідні або ж виділені для експлуатації парку об'єктів. Ставиться завдання підвищення ефективності експлуатації парку об'єктів, на основі створення інтелектуальної автоматизованої технології та системи управління процесами експлуатації парку технічних об'єктів по поточному стану. При цьому потрібно визначити поточний технічний стан компонентів системи (моніторинг технічного стану), а також забезпечити раннє виявлення прихованих несправностей. Результатом моніторингу є оцінка приналежності об'єкта до класу справного або до класів несправного. Якщо виявлено несправний стан об'єкта, то необхідно визначити вид несправності і отримати оцінку достовірності. На основі даних

моніторингу об'єктів потрібно спрогнозувати можливі зміни технічного стану елементів системи, а також встановити раціональну черговість відновлення елементів, з урахуванням вимог із безпеки транспортної системи та обмежених ресурсів процесів експлуатації.

#### Нейронно-мережеве моделювання процесів в АСУЕД

Автоматизована технологія діагностування та управління парком ЕД заснована на аналізі частотного спектра робочого струму електродвигуна. Дискретизація струму ЕД реалізується в блоці аналого-цифрового перетворювача (АЦП), отримання спектральних характеристик струму ЕД реалізовано за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [4]. Вхідними даними модуля моніторингу електродвигунів являється частотний спектр струму ЕД, розрахований в блоці ШПФ. Для кожного електродвигуна формується індивідуальна модель (ІМ), яка зберігає спектральні характеристики справного стану двигуна. Завдання з автоматизації керування процесом експлуатації парку ЕД з контрольованими поточними станами вирішується на основі побудови дворівневої нейронно-мережевої моделі (карти Кохонена [5]), в якій моніторинг станів ЕД і аналізу їх динаміки реалізується в рамках індивідуальної моделі двигуна (ІМД). Пропонована модель керування експлуатацією парку ЕД полягає в об'єднанні індивідуальної моделі зміни станів ЕД з моделлю парку [3]. Одночасно з використанням моделі парку (МП) контролюються можливі зміни поточного стану ЕД, що відображають відповідні різні типи несправностей. Як початкові використовуються експлуатаційні дані всього парку ЕД – гармоніки певної частоти і інтенсивності в спектрі струму для електродвигунів з раніше виявленими станами (зразки), а також відповідні параметри досліджуваного електродвигуна.

Для вирішення задачі за експлуатаційними даними (спектри струмів ЕД) була побудована МП можливих станів електродвигунів у формі карти Кохонена. При навчанні (10000 епох) використовувалися представники ЕД з наступними контрольованими станами: І (справний); КЗО (коротке замикання обмотки); КЗПК (коротке замикання пластин колектора); ОСЯ (обрив секції якоря); КПК (круговий вогонь по колектору). У моделі експлуатації парку реалізований механізм «розфарбовування» вузлів мережі відповідно до заданих ознак об'єктів, які досліджуються при аналізі сукупності даних. Після

«розфарбовування» отримують зони моделі, які відповідають заданим кольоровим «ознакам типа вузлів».

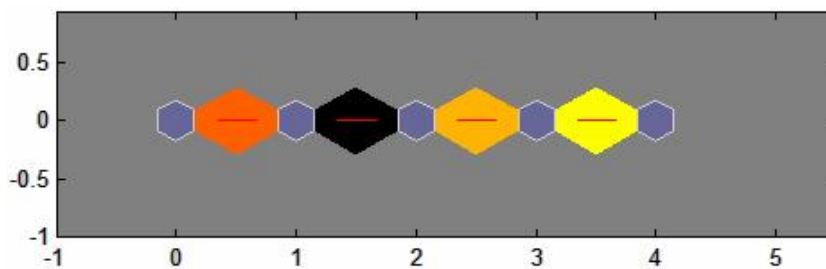


Рисунок 1 - Карта Кохонена потужностей зв'язків між кластерами ІМД

При аналізі нових даних, або нових ЕД, попадання параметрів деякого об'єкту при класифікації на основі карти Кохонена в певну зону говорить про його очікувані властивості. За рахунок побудови моделі статистичних даних як карти ознак Кохонена, а також маючи інформацію про частину досліджуваних об'єктів, можна досить достовірно прогнозувати поведінку інших об'єктів [5].

На рис. 1 подана карта Кохонена загальної моделі станів ЕД. Малі шестикутники – нейрони карти Кохонена, а колір великих – відображує близькість груп об'єктів. Чим темніше колір шестикутника, тим сильніше відрізняються об'єкти кластерів.

Згідно рис. 2 в шестикутниках карти Кохонена вказаний розподіл двигунів на даний момент (23, 22, 23, 10, 22), зверху, в жовтих прямокутниках, – попередній розподіл (23, 25, 20, 10, 22). Колір шестикутника визначається таким чином. Якщо сталася зміна кількості елементів в кластері – колір зелений, а якщо число елементів перевищує деяке задане число (тут – 22) – колір червоний, інакше колір є стандартним, синім.

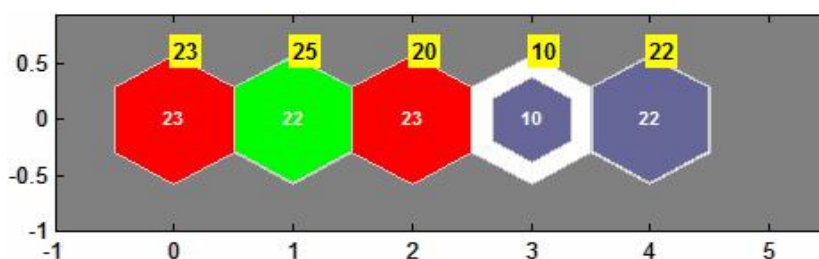


Рисунок 2 - Відображення динаміки станів парку ЕД стрілочних переводів

Такий аналіз (рис. 2) дозволить ефективно здійснювати моніторинг за станом парку ЕД при його експлуатації, своєчасно встановлювати потреби в здійсненні ремонтів або оновленні парку технічних систем.

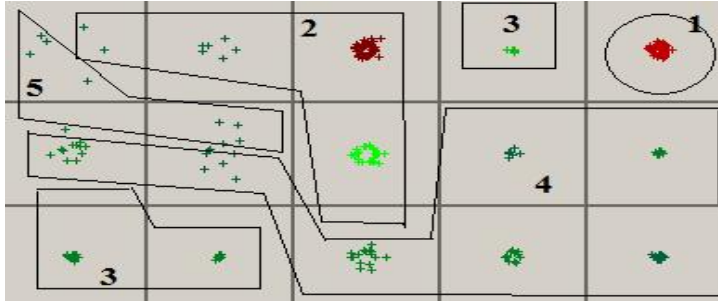


Рисунок 3 - Топологічна карта для кластеризації спектральних характеристик електродвигунів

Топологічна карта для кластеризації спектральних характеристик електродвигунів представлена рис. 3. На ній показані приблизні межі кластерів технічного стану двигуна. Знаками «+» позначено положення вхідних зразків на карті, їх близькість до центрів нейронів і між собою. Кластери позначені таким чином: справний - 1, коротке замикання обмотки - 2, коротке замикання пластин колектора - 3, обрив секції якоря - 4, круговий вогонь по колектору - 5. Вхідні зразки, відповідні справному ЕД, добре локалізовані, повністю відповідають одному нейрону топологічної карти. Кластери інших типів несправностей мають невеликі перекриття.

Векторна модель для оцінки ефективності процесів експлуатації

Управління процесами експлуатації парку ТС, в тому числі, полягає в реалізації процедур моніторингу параметрів поточних станів ЕД, а також у вирішенні завдань по встановленню раціональної черговості проведення діагностування ЕД і їх ремонтів. В цілому ефективне управління парком ТС може бути представлено як рішення задачі векторної оптимізації (ЗВО) з частковими показниками  $E$  - експлуатаційні витрати (за заданий період),  $P$  - надійність (забезпечення необхідного рівня працездатності системи),  $DZ$  - додаткові витрати на відновлення у разі відмови транспортної системи:

$$\bar{W} = (E, P, DZ) \Rightarrow \underset{x \in D_x}{opt} \quad (1)$$

У моделі (1) керовані параметри «х» вибираються з області  $D_x$ . Для реалізації багатокритеріальної моделі (1), розкриття змісту оператора  $opt$  (), використовується аксіоматичний метод скаляризації [7], згідно з яким здійснюється вибір узагальненого мінімаксного критерію оптимальності, як буде показано нижче. Слід, насамперед, вказати важливу властивість системи показників моделі (1) - їх взаємну суперечливість. Змістовно ця особливість полягає в тому, що поліпшення оцінок будь-якого з компонентів вектора (1) можливе лише при погіршенні інших, що враховується при формуванні скалярної моделі компромісу. Наприклад, збільшуючи експлуатаційні витрати  $E$ , можна підвищити надійність  $P$  і скоротити додаткові витрати  $DZ$ .

В роботі [2] для визначення черговості ремонту ЕД, як частини завдання управління парком, використаний показник «загальна вартість відмови електродвигуна», який має вигляд:

$$C = f(R, F, Z), \quad (2)$$

де  $R$  - вартість ремонту електродвигуна;  $F$  - прогнозована вартість ремонту електродвигуна за індивідуальною моделлю (ІМ);  $Z$  - витрати, викликані припиненням роботи стрілочного переводу. У лінійній формі моделі (2) оцінка вартості відмови ЕД може бути представлена, як

$$C = \gamma_Z Z + \gamma_R R + \gamma_F F, \quad (3)$$

де коефіцієнти важливості  $\gamma_k$  визначаються на основі методу аналізу ієрархій або експертними методами [7]. Для оцінки вартості ремонтів  $R$  використовується значення ймовірності несправності, які вважаються незалежними. При цьому оцінка очікуваної вартості  $R$  ремонту ЕД представлена наступним чином:

$$R = \sum_{i=1}^N d_i c_i, \quad (4)$$

де  $d_i$  - достовірність і-ої несправності,  $d_i \in [0;1]$  ;  $c_i$  - нормативна вартість ремонту і-ої несправності;  $N$  - число несправностей, виявлених системою діагностики електродвигунів.

У АСУЕД крім нормативних значень  $d_i$  використовуються їх оцінки, одержувані за ІМ, Для виявлення несправностей в електродвигунах за спектрами струмів використовуються штучні нейронні мережі [5, 6]. При цьому значення достовірності і-ої несправності  $d_i$  визначається значенням нейрона вихідного шару багат шарового персептрона. Прогнозована вартість ремонту електродвигуна  $F$  обчислюється, як

$$F = \sum_{i=1}^N d_i^F c_i, \quad (5)$$

де  $d_i^F$  - прогнозоване значення достовірності і-ої несправності,  $d_i^F \in [0;1]$  . Система діагностики здійснює постійний (за регламентом) контроль технічного стану ЕД, Моніторинг технічного стану конкретного двигуна дозволяє отримати часовий ряд оцінок достовірності для кожної і-ої несправності  $d_i$  :

$$D_i = \{d_i^1, d_i^2, \dots, d_i^k, d_i^{k+1}, \dots, d_i^L\}, (i = \overline{1, N}). \quad (6)$$

Вважається, що з часом наступне значення  $d_i^{k+1}$  достовірності і-ої несправності часового ряду (6) не менше попереднього  $d_i^k$  :  $d_i^k \leq d_i^{k+1}, (i = \overline{1, N})$  . Для обчислення оцінок  $F$  (5) необхідно прогнозувати значення на основі даних часового ряду (6), відповідного і-тій несправності в індивідуальній моделі ЕД. Для розрахунку оцінок значень  $d_i^F$  використовуються методи багатовимірної лінійної екстраполяції [9].

Витрати  $Z$ , викликані відмовою ЕД та припиненням роботи стрілочного переводу, оцінюються згідно

$$Z = N_p T_v C_z P_z, \quad (7)$$

де  $N_p$  - середнє число поїздів, що проходять через стрілочний перевід на годину;  $T_v$  - час, необхідний для відновлення роботи стрілочного переводу;  $C_z$  - вартість затримки одного поїзда на одну годину;  $P_z$  - ймовірність відмови стрілочного переводу. Без урахування взаємних впливів різних типів несправностей ЕД ймовірність  $P_z$  оцінюється як

$$P_z = \max_i (d_i)$$

Після розгляду часткового завдання, що відноситься до управління парком ТС, повернемося до аналізу векторної моделі управління (1). Зауважимо, що взаємна суперечливість компонентів  $\bar{W} = (E, P, DZ)$  встановлюється логічно, представляючи елементи вектора пов'язаними умовою залежного ресурсу [7]. Один з найбільш поширених підходів до вирішення завдань виду (1) полягає в побудові узагальнених критеріїв, що формалізують компромісний характер вихідної проблеми проектування. Сутністю використаного тут аксіоматичного підходу є узгодження припущень, які обумовлюють вид моделей «згорток», з можливостями їх реалізацій в конкретних класах ЗВО. Слідуючи [7], властивості при застосуванні узагальненого критерію виду

$$\lambda^0 = \max_{x \in D} \min_{k \in N} \left\{ \lambda_k^1 = \frac{\lambda_k}{\alpha_k} = \frac{1}{\alpha_k} \frac{f_k(x) - f_k^-(x)}{f_k^+ - f_k^-} \right\} \quad (8)$$

гарантують отримання єдиного компромісного рішення  $x_c^0$ , що задовольняє аксіомам оптимальності по Парето  $x_c^0 \in P_x$  і симетрії

$$\lambda_p(x_c^0) \alpha_p^{-1} = \lambda_q(x_c^0) \alpha_q^{-1}, \quad \forall p, q \in N, \quad (9)$$

де  $f_k^-, f_k^+$  - мінімальні і максимальні оцінки в  $x \in D_x$ ,  $\alpha_k$  - коефіцієнт важливості. Гарантування властивостей рішень  $x_c^0$  служить обґрунтуванням вибору компромісу (8) для задачі (1)). Крім знаходження рішення з аксіоматизованими властивостями, також принцип оптимальності (8): - визначає повноту множини критеріїв  $\bar{W}_N$ ; - дозволяє зіставити оцінки додаткових витрат і найменших прирощень ефективності (при рівноцінності  $W_j$ ); - дозволяє отримати

оцінки коефіцієнтів важливості частиних критеріїв  $W_j$  на основі відомих аналогів (прототипів).

**Модель екстраполяційного прогнозування часових і технічних характеристик об'єктів парку залізничних систем**

У АСУЕД методом багатовимірної лінійної екстраполяції [9] вирішується завдання оцінки прогнозних значень параметрів ТС за інформацією, що накопичена у подібних або «аналогічних» системах. Зокрема до них відносять ТС приналежні одному кластеру, побудованому вище. Нехай ефективність прогнозу визначається функцією векторних аргументів  $X$  та  $Y$

$$Q = Q(X, Y) \quad (12)$$

де  $Y = (y_1, \dots, y_m)$  - вектор параметрів об'єкту і  $X = (x_1, \dots, x_n)$  - вектор ситуації, який визначає специфіку об'єкта та його середовища, що треба враховувати при прогнозуванні. Для невеликої кількості ситуацій  $X_i (i = \overline{1, k})$  відомі значення векторів рішень  $Y_i^* (i = \overline{1, k})$  та значення  $Q$ . Вирішується завдання визначення оцінок вектора  $Y_{k+1}$ , «близького» до вектору  $Y_{k+1}^*$ , оптимального у заданій новій ситуації  $X_{k+1}$  (наприклад, через встановлений інтервал часу).

У роботі виконується процедура прогнозування [9], коли число  $k$  еталонів об'єктів мале і недостатнє для побудови навіть лінійної моделі рівняння  $Y^* = L(X)$ ,  $k < n + 1$ . При цьому будується лінійна модель на підпросторах  $\{X'\}$   $\{Y'\}$ , утворених «аналогами», що належать одному кластеру. З використанням гіпотези щодо лінійної функції на просторах  $\{X\}$  та  $\{Y\}$  отримуються рівняння для гіперплощин  $\{X'\}$  и  $\{Y'\}$ , які мають вигляд

$$\{X'\} = X_1 + \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i (X_{i+1} - X_1); \quad (13)$$

$$\{Y'\} = Y_1 + \sum_{i=1}^{k-1} \mu_i (Y_{i+1} - Y_1) \quad (14)$$

На основі прийнятої гіпотези про лінійність перетворення  $\{X'\} \rightarrow \{Y'\}$  отримують  $(\lambda_i = \mu_i, i = \overline{1, k-1})$ . Для розрахунку єдиного

рішення вводиться функцію  $\Phi(X, X') = \|X - X'\|^2$ , де  $X \in \{X\}, X' \in \{X'\}$ , яка кожній парі ситуацій  $X$  та  $X'$  ставить у відповідність число, що характеризує їх близькість. Далі кожному вектору ситуації  $X \in \{X\}$  ставиться у відповідність його ортогональна проекція  $X''$  на лінійний підпростір  $\{X'\}$ . Параметри  $\lambda_i$  отримують із системи рівнянь  $\partial\Phi/\partial\lambda_i = 0, i = \overline{1, k-1}$ , враховуючи що  $\{X'\} = \sum_{i=1}^k \lambda_i * X_i$ , тобто

$$\Phi(X' - X_{\ominus}) = \sum_{i=1}^n [\lambda_i * X_i - X_{\ominus}]_i^2 \quad (15)$$

Мінімізуючи (15) знаходять параметри  $\lambda_i$ , а отже і прогноз значень  $Y_{k+1}$ . На основі отриманих прогнозних значень техніко-економічних параметрів ТС виконуються процедури керування експлуатацією парків ТС – остаточно визначаються черговості діагностування ЕД, їх ремонту ін.

#### Висновки

У роботі представлено методи та засоби, призначені для автоматизації та інтелектуального управління процесами експлуатації парку ТС, зокрема, електродвигунів залізничних стрілочних переводів за оцінками їх поточного стану, отриманих з використанням процедур моніторингу та діагностування. Для управління парком ТС використана векторна модель з показниками - експлуатаційні витрати, надійність, додаткові витрати на відновлення. Завдання з автоматизації керування процесом експлуатації парку ЕД вирішується на основі побудови дворівневої нейронно-мережевої моделі Кохонена, в якій моніторинг і аналіз динаміки станів ЕД реалізується на основі формування індивідуальних моделей експлуатації двигунів. Автоматизована система передбачає адаптацію на основі обробки експлуатаційних даних.

Виконані дослідження і розробки дозволяють перейти від планово-попереджувального методу експлуатації до обслуговування по фактичному технічному стану ЕД. При цьому здійснюється прогнозування технічного стану елементів засобами штучного інтелекту, а також методами кластеризації та екстраполяції. До основних експлуатаційних властивостей АСУЕД відносяться наступні: багатокритеріальність процедур управління парками ТС; прогнозу-

вання відмови ЕД на основі індивідуальних моделей, а також методами екстраполяції; віддалена діагностика ЕД без їх виключення з процесів експлуатації; розділення процедур визначення черговості діагностування технічних систем і їх ремонтів; самонавчання та адаптація моделей окремих об'єктів; можливість застосування засобів АСУЕД до експлуатації парків інших технічних систем.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Скалозуб В.В., Швець О.М. Нейросетевые модели диагностики электродвигателей постоянного тока // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – №4. – С. 7-11.
2. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв, сигналізації, централізації та блокування (СЦБ), Державна адміністрація залізничного транспорту України, Київ, 2009.
3. Скалозуб В.В., Швець О.М., Осовик. В.Н. Методы интеллектуальных систем в задачах управления парками объектов железнодорожного транспорта по текущему состоянию // В сб. «Питання прикладної математики і математичного моделювання». – Дніпропетровськ: вид. ДНУ, 2014. С. 40 – 47.
4. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1024 с.
6. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288с.
7. Скалозуб В.В. Аксиоматика компромисса в обратных задачах многокритериальной оптимизации конструкций и технических систем // В сб. научн. тр. АН Украины «Математические методы в задачах расчета и проектирования сложных механических систем». – Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. 1992. С. 62 – 65.
8. Саати Т. Кернес А. Метод анализа иерархий. – М.: Мир. 1991. – 352 с.
9. Растрингин Л.А., Пономарев Ю.П. Экстраполяционные методы проектирования и управления. – М. Машиностроение, 1986. – 116 с.