

Оцінка технічного стану технологічного обладнання та діагностика неполадок у його роботі в умовах невизначеності

Матвій Білоусов, Микола Стародубцев, Сергій Шибанов,
Вікторія Невлюдова, Геннадій Макаренко

Кафедра КІТАР, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА, Харків, пр. Науки. 14., email:
nikolaj.starodubcev@nure.ua

Анотація: У статті показано, що проблема оцінки технічного стану технологічного обладнання в умовах невизначеності може розглядатися як проблема розпізнавання образів і розроблено класифікаційну модель оцінки технічного стану технологічного обладнання, що реалізує один з можливих підходів до розпізнавання стану об'єкта діагностування – виділення ознак та класифікацію з подальшою ідентифікацією стану об'єкта. Встановлено, що найчастіше аварійна ситуація в роботі технологічного обладнання характеризується неявно вираженими ознаками. Запропоновано модель діагностики неполадок в роботі обладнання, яка дозволяє в умовах неповноти інформації та обмеженості часу діагностування прийняти рішення про тип дефекту з множини можливих.

Ключові слова: технологічне обладнання, технічний стан, класифікаційна модель, модель діагностики неполадок, дефекти, умови невизначеності.

I. ВСТУП

В даний час для виробництва РЕА характерні:

- складні процеси та обладнання;
- велика потужність;
- довгі технологічні ланцюжки;
- висока продуктивність обладнання;
- складні пристрої керування та прилади, які коригують та згладжують неполадки.

У міру ускладнення промислових систем зростають загальні витрати енергії та матеріалів, що викликає нагальну необхідність правильної та своєчасної діагностики роботи обладнання як з точки зору надійності виробництва, так і з точки зору зниження виробничих витрат. При цьому існує необхідність оцінки поточного стану технологічного устаткування. Без вирішення задач оцінки поточного технічного стану неможливе забезпечення якісного функціонування технологічного устаткування.

II. КЛАСИФІКАЦІЙНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ

Оцінка технічного стану технологічного обладнання може здійснюватися у різних випадках та з різними цілями:

- для виявлення несправності, що зароджується;
- для раннього виявлення ненормального стану технологічного об'єкта;

– для прогнозування тенденції розвитку процесу у бік порушення його нормальної течії;

– для вибору відповідного способу дій з метою виправлення ненормального стану;

– для визначення причини несправності після того, як вона сталася.

Більшість літератури з оцінки технічного стану та виявлення несправностей і відмов у складних технічних системах містить аналітичний апарат, мало придатний для обґрунтування контролю за порушеннями роботи системи за умов невизначеності. Так, в даний час найбільш добре розроблені методи контролю технічних систем, які ґрунтуються на надійнісних характеристиках і відомій апріорній статистичній інформації про стан системи. При розробці методів та засобів діагностування технічного стану систем в умовах ненадійності вимірів та дефіциту статистичних даних доводиться оперувати поняттями з нечіткими, розпливчастими межами. У зв'язку з цим можливість використання традиційних "жорстких", тобто детермінованих та статистичних методів діагностики стає обмеженою, і тому виникає потреба у використанні досвіду розробників. Як правило, досвід і знання розробників мають якісний характер, ґрунтуються на неповній інформації.

Застосування лінгвістичного підходу [1,2] дає можливість використовувати в моделі діагностування поняття професійної мови, а методами теорії нечітких множин – обробити отриману інформацію. Зокрема, сучасні методи та засоби діагностування складних систем таких, наприклад, як електронні системи, є ергатичними, які, як правило, приймають рішення про стан електронних систем в умовах неповноти інформації [3,4].

Проблему оцінки технічного стану технологічного обладнання будемо розглядати як проблему розпізнавання образів. Важливою властивістю методів розпізнавання образів є те, що повне знання розподілу ймовірностей даних не потрібно. Одним з можливих підходів до розпізнавання стану об'єкта діагностування є виділення ознак і класифікація з подальшою ідентифікацією стану об'єкта.

Процедура виділення ознак та класифікації може розглядатися як триступеневий процес. Спочатку виконуються відповідні виміри, результати яких називають простором вимірів. На другому етапі за результатами вимірювань обчислюються або з них виділяються характерні ознаки, що утворюють простір ознак. Ознаки у просторі ознак повинні краще групуватися, ніж вимірювання у просторі вимірювань, і, можливо, утворювати більш прості вирішальні поверхні.

По суті, процес виділення ознак – це утримування класу дискримінуючої інформації та відсіювання класу непотрібної інформації із системи вимірювань. Далі застосовуються різні вирішальні правила по відношенню до простору ознак для класифікації векторів ознак на класи, після чого може бути проведений процес діагностування технічного стану об'єкта. Найпростішим прикладом може бути вектор ознак з двома можливими образами:

- відповідними нормальній роботі обладнання;
- відповідними ненормальній роботі.

Більш корисним є розпізнавання образів для оцінки технічного стану технологічного обладнання на основі вибірки, що класифікується наступним чином:

- комбінація ознак №1, що відповідає технічному стану "дуже погане";
- комбінація ознак №2, що відповідає технічному стану "погане";
- комбінація ознак №3, що відповідає технічному стану "середнє" і так далі.

Вирішальні правила можуть бути обрані априорі або встановлені в ході процесу навчання. Задача розпізнавання образів, отже, може розглядатися як задача конструювання функцій системи кінцевих векторів ознак різних класів, так щоб функції розбивали простір класифікації на області, кожна з яких містить ознаки одного класу. При конструюванні функцій, які називають дискримінуючими функціями, система образів, для яких відома приналежність до класів, використовується для "тренування" класифікатора. Як тільки класифікатор навчений, він стає частиною системи розпізнавання образів, яка тоді стає здатною обробляти вимірювання невідомого образу, що вводяться, і класифікувати цей образ, відносячи його до одного або декількох відомих класів.

Теоретично, якщо є нескінченно велика кількість результатів вимірювань, так що функції щільності точно відомі, неідентифікований стан процесу може бути віднесено до найбільш ймовірного кластера, наприклад, на підставі їхнього взаємного положення (вимірюного будь-яким відповідним способом).

Разом з тим, в умовах невизначеності, наявна сукупність результатів вимірювань може не дати чіткої однозначної відповіді. Тому схема, яка дає ступінь належності до кількох кластерів, може виявитися більш осмисленою, ніж схема, яка прагне дати цілком певний діагноз [5].

Нечітку модель оцінки технічного стану технологічного обладнання представимо у вигляді (X, P, D) , де $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_m$ – багатовимірний простір ознак, які впливають на оцінку, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ – розбиття X на нечіткі еталонні класи P_i , $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ – оцінки, відповідні класам P_i .

Процес побудови нечіткої моделі оцінки технічного стану складається з наступних етапів.

Шляхом опитування експертів виділяється множина ознак X_1, X_2, \dots, X_m , що найбільше впливають на вибір рішення $D_i \in D$, і формується простір $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_m$.

З кожною із виділених ознак X_j пов'язуємо деяку лінгвістичну змінну A_j зі своїми лінгвістичними значеннями $\{a_{kj}, k_j = 1, \dots, S_j, j = 1, \dots, m\}$.

Для всіх лінгвістичних значень шляхом експертного опитування будуються $\mu_{k_1}(x_1), \mu_{k_2}(x_2), \dots, \mu_{k_m}(x_m)$ – функції приналежності на відповідних базових шкалах X_1, X_2, \dots, X_m [6,7].

Якісна структура моделі діагностування представляється у виді таблиці, яка має $S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_m$ рядків і $(m + 1)$ стовпців. Рядки таблиці відповідають різноманітним наборам лінгвістичних значень змінних A_j . Для кожного набору в останньому стовпці таблиці спеціаліст-експерт проставляє в лінгвістичних термінах одну з можливих оцінок $D_i \in D$, яку він поставив би в ситуації, словесно описаній відповідним набором.

На заключному етапі будується нечітка модель оцінки технічного стану, у якій кожен нечіткий клас P_i розбиття P характеризується функцією приналежності μ_i , що задається формулою

$$\mu_i(x_1, x_2, \dots, x_m) = \bigvee_{\{a_{kj}\} \in R_j} \mu_{k_1}(x_1) \wedge \mu_{k_2}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{k_m}(x_m),$$

де R_j – множина наборів $\{a_{kj}, k_j = 1, \dots, S_j, j = 1, \dots, m\}$, яким в таблиці відповідає діагноз D_i .

Нехай ситуація, що характеризує стан об'єкта, представлена точкою $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)$ в просторі ознак X . Підставимо точку x^0 у функції належності $\mu_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$. Серед усіх $\mu_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ знаходимо функцію, що приймає максимальне значення у точці x^0 . Вибираємо оцінку D_i , що відповідає еталонному класу P_i , для якого $\mu_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ у точці x^0 приймає максимальне значення.

Запропонований підхід до розпізнавання стану об'єкта діагностування за умов неповноти інформації формалізує досвід фахівця-експерта, а, по суті, імітує поведінку людини в заданій предметній галузі. Модель заснована на використанні інтегрованого досвіду спеціалістів-експертів і може застосовуватися для вирішення слабо формалізованих задач оцінки технічного стану технологічного обладнання. Вона дозволяє отримати якісну оцінку поточного стану технологічного устаткування в лінгвістичних термінах.

III. МОДЕЛЬ ДІАГНОСТИКИ НЕПОЛАДОК У РОБОТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Актуальною проблемою діагностики технологічного обладнання є розробка моделей діагностики неполадок за умов дефіциту часу діагностування та відсутності реальної статистики.

Методи діагностування технологічного обладнання суттєво відрізняються від методів діагностування окремого виду апаратури, оскільки технологічне обладнання є сукупністю технічних засобів, об'єднаних в єдиний комплекс. Реальний процес діагностування технологічного обладнання є прерогативою фахівців високого класу – експертів, які мають високий рівень компетентності в даній галузі. Крім загальнодоступних знань, сконцентрованих у відповідній літературі, довідниках тощо, експерт має індивідуальні знання, засновані на особистому досвіді. З урахуванням цього, засоби алгоритмічного опису та рішення поставленого

діагностичного завдання повинні мати можливість відображати знання та практичний досвід експертів.

Задачу діагностики неполадок сформулюємо в такий спосіб. Нехай $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – множина параметрів (ознак), що характеризують технічний стан технологічного обладнання, і нехай $N = \{N_1, N_2, \dots, N_p\}$ – множина можливих неполадок в устаткуванні.

З кожним параметром $x_i \in X$ зв'яжемо лінгвістичну змінну L_i зі своїми значеннями l_{ij} , ($i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, q_i$), наприклад, l_{i1} ="мале значення параметра x_i ", l_{i2} ="середнє значення параметра x_i ", l_{i3} ="велике значення параметра x_i ", або, l_{i1} ="значення параметра x_i знаходиться ліворуч від поля допуску", l_{i2} ="значення параметра x_i знаходиться в межах поля допуску", l_{i3} ="значення параметра x_i знаходиться праворуч від поля допуску", при цьому значення q_i може дорівнювати $1, 2, \dots, Q$.

Утворимо множину $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$, елементами якого є значення l_{ij} ; $m = \sum_{i=1}^n q_i$. Зазначимо, що множина S може містити і числові значення параметрів $x_i \in X$.

На основі наявної апіорної інформації та знань експерта зіставимо кожній неполадці N_k ($k = 1, \dots, p$) підмножину $D_k = \{S_{k1}, S_{k2}, \dots, S_{kj}\}$, характерне для неполадки N_k ($D_k \subset S$). Тоді технологічне обладнання як об'єкт діагностування є нечіткою множиною $\tilde{D} = \{\tilde{D}_1, \tilde{D}_2, \dots, \tilde{D}_p\}$, таким, що перетин підмножин \tilde{D}_k не дорівнює порожній множині.

У процесі діагностування рішення про тип неполадки N_k^* визначатимемо максимальним значенням нечіткої міри перетину кожної нечіткої множини \tilde{D}_k з нечіткою множиною $\tilde{E} = \{\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \dots, \tilde{E}_t\}$ ($t \leq n$) значень параметрів, визначених в результаті діагностування технологічного об'єкта, що зводиться до виразу:

$$N_k^* = \arg \max_{D_k} g(\tilde{E} \cap \tilde{D}_k),$$

де g – нечітка міра перетину нечітких множин \tilde{E} і \tilde{D}_k .

Технічний стан технологічного об'єкта як об'єкта діагностування опишемо нечіткою множиною

$$\tilde{N}_E = \left\{ (N_k, \mu_{\tilde{N}_E}(N_k)) \mid N_k \in N \right\},$$

де значення ФП $\mu_{\tilde{N}_E}(N_k)$ визначаються як ступінь нечіткої пов'язаності множин \tilde{E} та \tilde{D}_k :

$$\mu_{\tilde{N}_E}(N_k) = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{\tilde{D}_k}(S_i) \wedge \mu_{\tilde{E}}(S_i)}{\sum_{i=1}^m \mu_{\tilde{D}_k}(S_i)}. \quad (1)$$

Визначимо ступінь впливу неполадки N_k на працездатність технологічного обладнання через нечітку λ -міру множини \tilde{D}_k до [8]. Для нечіткої міри в загальному випадку не повинна виконуватися умова адитивності. Для побудови нечітких мір використовується наступне λ -правило [9]:

якщо A, B - нечіткі множини, $A \cap B = \emptyset$, то

$$g(A \cup B) = g(A) + g(B) + \lambda g(A)g(B), \quad -1 < \lambda < \infty; \quad (2)$$

якщо $A \cap B \neq \emptyset$, то вираз (2) набуває вигляду

$$g(A \cup B) = \frac{g(A) + g(B) - g(A \cap B) + \lambda g(A)g(B)}{1 + \lambda g(A \cap B)}. \quad (3)$$

Так як носії множин \tilde{D}_k , що характеризують неполадки, перетинаються, побудуємо на множині \tilde{D} нечітку міру за аналогією з (3). Вираз (3) можна переписати у вигляді:

$$g(A \cup B) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{(1 + \lambda g(A))(1 + \lambda g(B))}{1 + \lambda g(A \cap B)} - 1 \right]. \quad (4)$$

Тоді для v множин \tilde{D}_k ($1 < v < p$) вираз (4) набуває виду:

якщо v – парне, то

$$g(\cup_{k=1}^v \tilde{D}_k) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\Pi_1 \Pi_3 \dots \Pi_{v-1}}{\Pi_2 \Pi_4 \dots \Pi_v} - 1 \right], \quad (5)$$

якщо v – непарне, то

$$g(\cup_{k=1}^v \tilde{D}_k) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\Pi_1 \Pi_3 \dots \Pi_v}{\Pi_2 \Pi_4 \dots \Pi_{v-1}} - 1 \right], \quad (6)$$

де

$$\Pi_t = \prod_{k_1 < k_2 < \dots < k_t} \left(1 + \lambda g \left(\prod_{i=1}^t \tilde{D}_{k_i} \right) \right),$$

$t = 1, 2, \dots, v$.

Параметр λ знаходиться з умови нормування

$$g \left(\bigcup_{k=1}^p \tilde{D}_k \right) = 1.$$

Тоді для ідентифікації неполадки обчислимо нечіткий інтеграл

$$N' = \arg \int_{\tilde{D}} \mu_{\tilde{N}_E}(N_k) \circ g(\cdot). \quad (7)$$

В результаті обчислення інтеграла (7) отримуємо множину N' найбільш очікуваних дефектів. Так як $N' \subset N$, уточнюємо множину \tilde{D} , звужуючи її до \tilde{D}' , і відповідно уточнюємо ФП $\mu_{\tilde{N}_E}(N_k)$, $N_k \in N'$. Оскільки носії підмножин \tilde{D}' перетинаються, для ідентифікації неполадки повторно беремо нечіткий інтеграл на області \tilde{D}' по мірі v , що відповідає ступеню стійкості станів S_{k_i} у класі D_k , тобто

$$N_k^* = \arg \int_{\tilde{D}'} \mu_{\tilde{N}_E}(N_k) \circ v(\cdot). \quad (8)$$

Міра $v(\cdot)$ визначається із співвідношення [9]:

$$v(\cdot) = 1 - \eta(\cdot),$$

де $\eta(\tilde{D}_k)$ – ступінь нечіткої пов'язаності множини \tilde{D}_k в \tilde{D} , яка обчислюється за аналогією з (1) через

$\eta_1(\tilde{D}_k, \tilde{D}_j)$ – ступінь нечіткої зв'язаності \tilde{D}_k з \tilde{D}_j ($i = 1, \dots, p; i \neq k$); $\eta_2(\tilde{D}_k, \tilde{D}_i \cap \tilde{D}_j)$ – ступінь нечіткої зв'язаності \tilde{D}_k з $\tilde{D}_i \cap \tilde{D}_j$ ($i, j = 1, \dots, p; j < i; i, j \neq k$); $\eta_{p-1}(\tilde{D}_k, \cap_i \tilde{D}_i)$ – ступінь нечіткої пов'язаності \tilde{D}_k $\cap_i \tilde{D}_i$ ($i = 1, \dots, p; i \neq k$):

$$\eta(\tilde{D}_k) = \sum_i \eta_1(\tilde{D}_k, \tilde{D}_i) - \sum_{i,j} \eta_2(\tilde{D}_k, \tilde{D}_i \cap \tilde{D}_j) + \dots + (-1)^{p-1} \eta_{p-1}(\tilde{D}_k, \cap_i \tilde{D}_i).$$

Значення нечіткої міри $\nu(\cdot)$ для об'єднань множин $\cup_{k=1}^p \tilde{D}_k$ ($1 < \nu < p$) обчислюються аналогічно (5)-(6). Нечіткий інтеграл (8) дозволяє ідентифікувати неполадку N_k^* в роботі технологічного обладнання.

IV. ВИСНОВКИ

Розроблена модель діагностики неполадок реалізує двоетапну процедуру прийняття рішень про тип неполадки. На першому етапі визначається клас найбільш очікуваних дефектів, на другому – ідентифікується неполадка. Розпізнавання технічного стану технологічного обладнання здійснюється з використанням нечіткого інтеграла Сугено. Модель працює в умовах відсутності реальної статистики порушень працездатності технологічного обладнання та дефіциту часу діагностування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Zadeh L. A. Linguistic variables, approximate reasoning and dispositions. *Medical Informatics*. Volume 8, Issue 3. 1983. Pages 173-186.
- [2] Lieb Hans-Heinrich. *Linguistic Variables*. John Benjamins B.V. 1993. 275 p.
- [3] Поморова О.В. Теоретичні основи, методи та засоби інтелектуального діагностування комп'ютерних систем: Монографія. Хмельницький: ТОВ «Триада-М», 2007. 253 с.
- [4] Герасимов Б. М., Грабовський Г. Г., Рюмшин Н. А. Нечіткі множини в задачах проектування, управління та обробки інформації. К.: Техніка, 2002. 140 с.
- [5] Кутковецький В. Я. Розпізнавання образів. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2017. 420 с.
- [6] Дмитрієва О. А., Зайцева О. С. Моделі прийняття рішень на основі теорії нечітких множин. Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка: всеукр. наук. зб. Донецьк: ДонНТУ, 2009. Вип. 10 (153). С. 266–273.
- [7] Кравець П., Киркало Р. Системи прийняття рішень з нечіткою логікою. НУ "Львівська політехніка". 2009. С. 115-123.
- [8] Желдак Т.А., Коряшкіна Л.С., Ус С.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень: за редакцією С.А. Ус ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 387 с.
- [9] Sugeno M. Fuzzy measure and fuzzy integral. *Trans.SICE*. 1972. V.8. №2. P.95-102.
- [10] H. Attar, A. T. Abu-Jassar, V. Yevsieiev, V. Lyashenko, I. Nevliudov and A. K. Luhach, "Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar", *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2022, pp. 3046116, 2022.
- [11] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
- [12] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Khosravi, M. R. (2022). Control system development and implementation of a CNC laser engraver for environmental use with remote imaging. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 9140156, 2022
- [13] Mustafa, S.K., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Lyashenko, V.. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(1), 139-145.
- [14] Lyashenko, V., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated Monitoring and Visualization System in Production. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 5(6), 9-18.
- [15] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Filippenko, I. (2020). Development of an architectural model to automate the management of the process of creating complex cyberphysical industrial systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 4(3-106), 44-52.
- [16] Amer Abu-Jassar, Hassan Al-Sukhni, Yasser Al-Sharo, Svitlana Maksymova, Vladyslav Yevsieiev, Vyacheslav Lyashenko, "Building a Route for a Mobile Robot Based on the BRRT and A*(H-BRRT) Algorithms for the Effective Development of Technological Innovations," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 72, no. 11, pp. 294-306, 2024. Crossref, <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I11P129>
- [17] Igor Nevliudov, Vladyslav Yevsieiev, Svitlana Maksymova, Nataliia Demska, Nikolaj Starodubcev, Oleksandr Klymenko, "Monitoring System Development for Equipment Upgrade for IIoT", 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), pp.1-5, 2023.
- [18] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR ADAPTIVE CONTROL FOR THE INTELLIGENT GRIPPER OF THE COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57–65. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.07>
- [19] Hybrid Approaches to Building Intelligent Robotic Systems on FPGAs and MCUs for Industry 5.0 Tasks / V. Yevsieiev, S. Maksymova, N. Demska, N. Starodubcev // Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA-2025) : VII International Scientific and Practical Conference, June 27-28, 2025. – Kharkiv : NURE – P.30-3