

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ

¹Вінницький Національний Технічний Університет

Анотація

Розглянуто використання методів нечіткої логіки для оцінювання технічного стану електроприводів насосних станцій у розподілених системах водопостачання. Проаналізовано сучасні методи діагностики стану електроприводів насосних агрегатів та виявлено їх обмеження в умовах невизначеності параметрів і розподіленості об'єктів. Запропоновано підхід на основі нечіткої логіки, який дозволяє на основі даних датчиків і експертних правил визначати стан електропривода (нормальний, передаварійний, аварійний). Застосування нечіткої логіки для моніторингу стану електроприводів сприятиме підвищенню надійності та ефективності роботи систем водопостачання.

Ключові слова: нечітка логіка, технічний стан, електропривод насосної станції, розподілена система водопостачання, діагностика, моніторинг.

Abstract

The use of fuzzy logic methods is considered for assessing the technical condition of pumping station electric drives in distributed water supply systems. The current methods of diagnosing the condition of pump station electric drives are analyzed, and their limitations under conditions of parameter uncertainty and distributed objects are identified. A fuzzy logic-based approach is proposed that uses sensor data and expert rules to determine the state of an electric drive (normal, pre-failure, critical). The application of fuzzy logic for condition monitoring of electric drives will increase the reliability and efficiency of water supply systems.

Keywords: fuzzy logic, technical condition, pumping station electric drive, distributed water supply system, diagnostics, monitoring.

Вступ

Надійне функціонування систем водопостачання значною мірою залежить від безперервної роботи насосних станцій, основою яких є електроприводи насосних агрегатів. Вихід з ладу електропривода або робочого насоса може призвести до перерв у подачі води і значних економічних втрат. Тому оцінка технічного стану електроприводів під час експлуатації є важливим завданням для своєчасного обслуговування і запобігання аваріям. Сучасні розподілені системи водопостачання включають в себе множину географічно розосереджених насосних станцій, що ускладнює централізований контроль їх стану. В таких умовах набувають актуальності інтелектуальні методи моніторингу, здатні обробляти неоднорідні дані від різних датчиків і працювати за неповної інформації.

Нечітка логіка як підхід до обробки неточних даних була запропонована Л. Заде у 1965 році [2, с. 338]. Відтоді методи нечіткої логіки широко застосовуються для управління і діагностики в різних галузях техніки завдяки здатності працювати з лінгвістичними змінними та експертними знаннями. Зокрема, нечіткі регулятори успішно впроваджені для керування електроприводами насосів у системах водопостачання, демонструючи поліпшення динамічних характеристик порівняно з традиційними методами керування [3, с. 24]. Це свідчить про перспективність використання нечіткої логіки не тільки для керування, але і для оцінювання технічного стану обладнання.

Аналіз існуючих підходів до діагностики електроприводів показує, що наразі не існує універсального методу, який би повністю охоплював виявлення всіх видів несправностей. Наприклад, у роботі [1, с. 11] відзначено, що жоден з розглянутих методів контролю не здатен виявити всі можливі дефекти асинхронного двигуна, що зумовлює потребу в розвитку нових підходів. Традиційні методи оцінки стану електродвигунів включають вібраційний аналіз, контроль струмів двигуна (MCSA), тепловий моніторинг, аналіз стану ізоляції тощо. Кожен з них має свої переваги й недоліки: так, віброаналіз ефективний для виявлення механічних несправностей підшипників і дисбалансу, але потребує встановлення датчиків вібрації; аналіз струму дозволяє безконтактно виявляти деякі електричні та гідравлічні проблеми насоса, але чутливий до змін навантаження; тепловізійний контроль вимагає прямої видимості і залежить від зовнішніх умов. До того ж, багато методів потребують зупинки обладнання для тестування або спеціалізованої експертизи, що не завжди прийнятно в умовах безперервної роботи водопостачання. Отже, актуальним є пошук підходів, які б дозволили інтегрувати дані різних датчиків та експертні знання про режим роботи насосів для комплексної оцінки стану електропривода в режимі реального часу.

Метою статті є підвищення ефективності діагностування електроприводів насосних станцій у розподілених системах водопостачання шляхом розробки методики оцінювання їхнього технічного стану з використанням методів нечіткої логіки. Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання: провести огляд і аналіз існуючих методів контролю стану електроприводів насосних агрегатів; виявити основні фактори, що впливають на надійність роботи насосних електродвигунів; запропонувати структуру нечіткої системи оцінювання стану електропривода, яка враховує кілька діагностичних ознак (струми, вібрацію, температуру тощо) та експертні правила; розробити лінгвістичні змінні і базу правил для класифікації стану електропривода на різні рівні (справний, задовільний, передаварійний, аварійний); оцінити очікувані переваги запропонованого підходу в порівнянні з традиційними методами. Реалізація мети дозволить підвищити оперативність і достовірність виявлення несправностей, мінімізувати незаплановані простої та оптимізувати графіки ремонтів у системах водопостачання.

Об'єктом дослідження є електроприводи насосних станцій розподілених систем водопостачання та процеси зміни їх технічного стану в умовах експлуатації.

Предметом дослідження методи та засоби оцінювання технічного стану електроприводів насосних станцій з використанням нечіткої логіки для підтримки прийняття рішень щодо технічного обслуговування.

Основна частина

Забезпечення працездатності електроприводів насосних агрегатів включає регулярний моніторинг їх стану та раннє виявлення ознак наближення відмов. Серед сучасних підходів до діагностики технічного стану асинхронних електродвигунів (що використовуються як приводи насосів) можна виділити методи віброакустичного контролю, аналіз струму двигуна, контроль температурного режиму, аналіз параметрів живлення, а також періодичну перевірку ізоляції обмоток [1, с. 9–10]. Відомо, що приблизно 40–50% відмов асинхронних двигунів пов'язані з пошкодженнями підшипників, інші типові проблеми – дефекти ротора (обриви стрижнів, дисбаланс), статора (міжвиткові замикання) та насоса (кавітація, знос крильчатки). Для кожного типу дефекту доцільні свої методи контролю, проте в експлуатаційних умовах вибір методу обмежується доступними сенсорами та можливістю зупинки агрегату. Згідно з аналізом [1, с. 11], жоден окремий метод не гарантує виявлення всіх несправностей, тому на практиці часто поєднують кілька підходів (наприклад, струмову діагностику та вібромоніторинг) для більш повної оцінки стану. Це створює потребу в інтеграції даних різної природи та врахуванні невизначеностей вимірювань, що традиційні алгоритми обробки сигналів виконують неефективно.

Методи нечіткої логіки дозволяють поєднати дані різних датчиків і експертні знання у єдиній моделі ухвалення рішення. Нечітка система оцінювання стану електропривода може містити на вході множину показників: середнє значення струму двигуна, рівень вібрації на корпусі насоса, температуру підшипників, відхилення напруги живлення тощо. Кожен з цих параметрів переводиться в нечіткі лінгвістичні змінні, наприклад: струм – «нормальний», «підвищений», «перевантаження», вібрація – «низька», «середня», «висока»,

температура – «нормальна», «висока», «критична». Функції належності для цих термів налаштовуються на основі технічних стандартів і експертних оцінок граничних значень. Далі будується база правил нечіткого висновку типу: IF струм є «підвищений» AND вібрація є «висока», THEN стан є «передаварійний». Така база правил охоплює різні комбінації ознак несправностей. Механізм нечіткого логічного висновку (наприклад, алгоритм Мамдані) опрацьовує поточні значення показників та видає на виході узагальнену оцінку стану у вигляді нечіткої змінної «технічний стан». Після дефазифікації отримують кінцевий числовий або категоріальний індикатор стану (наприклад, 0...1 – «індекс здоров'я» або лінгвістичні оцінки «норма», «попередження», «аварія»).

Запропонований підхід дозволяє врахувати неточність та розмитість даних датчиків. Наприклад, невелике перевищення струму та температури може не виходити за жорсткі пороги спрацьовування аварійної сигналізації, але нечітка система сприйме їх як «дещо підвищені» значення і при одночасній наявності вібрації кваліфікує стан як наблизений до передаварійного. Таким чином, обслуговуючий персонал отримає завчасне попередження про деградацію обладнання. У розподілених системах водопостачання така система моніторингу може бути розгорнута на кожній насосній станції або централізовано: дані з локальних контролерів передаються до центрального діагностичного центру, де нечіткий експертний модуль оцінює стан всіх агрегатів і видає рекомендації щодо їх обслуговування.

Ефективність підходу з нечіткою логікою підтверджується результатами інших дослідників. Зокрема, в роботі [4, с. 274–275] на основі аналізу спектра струму асинхронного двигуна та системи нечіткого логічного висновку були успішно ідентифіковані характерні несправності насоса: кавітація, блокування тракту та пошкодження робочого колеса. Нечітка система класифікувала стан насоса за встановленими спектральними ознаками несправностей, що довело можливість діагностики складних гідравлічних явищ без прямого вимірювання параметрів потоку. Інший підхід описано в [5, с. 404–408], де використано адаптивну нечітку систему типу ANFIS для класифікації стану відцентрового насоса за вібраційним сигналом. Модель ANFIS навчено розпізнавати різні типи дефектів (дисбаланс, розбаланс ротора, дефекти підшипників) на основі набору ознак, виділених із вібросигналу, і вона продемонструвала високу точність розпізнавання стану насоса. Ці приклади підтверджують, що поєднання методів нечіткої логіки з аналізом сигналів датчиків є дієвим інструментом для моніторингу та діагностики стану насосних агрегатів.

На основі проведеного аналізу було сформовано структуру нечіткої системи оцінки технічного стану електропривода насосної станції. Вона включає підсистему збору даних (датчики струму, вібрації, температури, тиску тощо), модуль попередньої обробки (нормалізація, фільтрація сигналів), нечіткий логічний модуль оцінки стану та модуль видачі результатів і сповіщення. В нечіткому модулі використовуються кілька вхідних змінних (струм, вібрація, температура, час напруження) з трьома-п'ятьма термами кожна, та одна вихідна змінна «стан привода» з термами «добрий», «задовільний», «незадовільний», «критичний». База правил розроблена експертним шляхом на основі аналізу причин відмов насосних електроприводів. Для прикладу, одне з правил: якщо струм «перевантаження» і температура «висока», то стан «критичний (аварійний)», оскільки така комбінація ознак найімовірніше вказує на заклинювання насоса або міжфазне коротке замикання. Інше правило: якщо струм «нормальний» і вібрація «висока», то стан «незадовільний», що може сигналізувати про механічний дисбаланс або знос підшипника при поки що нормальному електричному навантаженні. Всі правила разом охоплюють різні сценарії деградації стану. Для реалізації такої системи можуть бути використані вбудовані контролери з підтримкою нечіткого логічного висновку або програмне забезпечення, інтегроване в систему SCADA підприємства.

Враховуючи проведені дослідження, пропонується метод прийняття рішень на основі представлення нечітких і стохастичних даних у вигляді узагальнювальних функцій (УФ) [7] і застосування алгоритму, аналогічного теорії статистичних розв'язків. Формальна система узагальнюючих функцій G складається з правил утворення формул, правил переходу від формальних систем чітких чисел R , випадкових величин P , нечітких чисел A до системи узагальнювальних функцій G і назад, системи аксіом та правил виведення. Для стохастичного даного УФ збігається за властивостями з щільністю розподілу ймовірностей. Для нечіткого даного УФ визначається нормованою за площею функцією належності. При врахуванні стохастичної і нечіткої

невизначеності формула визначення ризику виникнення несправності за допомогою узагальнюючих функцій наступним чином [7]:

$$R(E) = \iint g(E, N, M) \cdot \frac{\beta(M/N)\beta(N)}{\int \beta(M/N)\beta(N)dN} dN dM$$

де β – узагальнювальні функції.

Якщо система водопостачання розподілена, то загальний ризик її несправності є сумою ризиків несправності її окремих елементів:

$$R(E) = \sum_i R(E_i).$$

Значення ризиків в окремих точках є залежними. Для підрахунку загального ризику введемо поняття “сусідньої точки” [7]. Дві точки будемо вважати сусідніми, якщо інтервал керування T системою більший за час τ передавання впливу між цими точками. При керуванні системою водопостачання точками керування є насосні станції або місця розгалуження трубопроводу, час передавання впливу між сусідніми точками дорівнює часу переміщення води між цими точками. Якщо обрати інтервал керування так, щоб у кожному напрямку від точки X_0 сусідньою була лише одна точка (для чотиристороннього відгалуження це всього чотири точки X_1 – X_4 , то УФ можуть бути знайдені за допомогою рівняння лінійного прогнозу на інтервалі τ .

Очікується, що впровадження запропонованої нечіткої системи моніторингу стану дозволить підвищити ефективність управління технічним обслуговуванням насосних станцій у розподілених мережах. За рахунок раннього виявлення відхилень в роботі електроприводів зменшиться кількість аварійних відмов та простоїв обладнання. Це, у свою чергу, покращить показники безперервності та якості водопостачання споживачам. Додатковою перевагою є можливість адаптації системи до конкретних умов об’єкта: правила нечіткої логіки можуть коригуватися під конкретні типи насосів, потужності двигунів, режими роботи мережі тощо.

Висновки

Застосування методів нечіткої логіки для оцінки технічного стану електроприводів насосних станцій у розподілених системах водопостачання дозволяє підвищити точність діагностики, враховуючи невизначеність і неоднорідність вхідних даних. На відміну від традиційних методів, нечітка логіка інтегрує різні параметри роботи обладнання, що забезпечує своєчасне виявлення передаварійних станів і оптимізацію графіків технічного обслуговування. Запропонований підхід сприяє підвищенню надійності насосних станцій, мінімізації аварійних відмов і забезпеченню безперебійного водопостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шавкун В. М., Лінков В. В. Аналіз сучасних методів діагностики технічного стану асинхронних двигунів. *Комунальне господарство міст*. 2019. №5(151). С. 8–12.
2. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8, №3. P. 338–353.
3. Білюк І. С., Бугрім Л. І., Гаврилов С. О. та ін. Динаміка асинхронного електропривода з нечітким регулятором в системах водопостачання. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2019. Вип. 9, т. 1. С. 28–39.
4. Perović S., Unsworth P. J., Higham E. H. Fuzzy logic system to detect pump faults from motor current spectra. *Industry Applications Conference*, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. 2001. Vol. 1. P. 274–280.
5. More S. R., Bhatt D. V., Menghani J. V. Fault diagnosis and classification of water pump using adaptive neuro-fuzzy inference system based on vibration signals. *Structural Health Monitoring*. 2015. Vol. 14, №5. P. 402–410.
6. Мошноріз М. М., Бабій С., Паянок А., Жуков А., Проценко Д. Підвищення ефективності роботи розподілених систем водопостачання засобами регульованого електропривода. *Scientific Horizons*. 2021. Т. 24, №5. С. 19–34.
7. В. М. Дубовой і О. О. Ковалюк, «Прийняття рішень у розподілених системах за умов комбінованої невизначеності», ІТКІ, вип. 1, вип. 1, с. 8–11, Трав 2016. URL: <https://itce.vntu.edu.ua/index.php/itce/article/view/216>.

Ткачук Андрій Федорович – інженер-програміст, приватний підприємець, аспірант 2-го року навчання, факультет електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: aftvin@gmail.com.

Мошноріз Микола Миколайович – канд. техн. наук, завідувач катедри, доцент катедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: moshnoriz@vntu.edu.ua.

Науковий керівник: **Мошноріз Микола Миколайович** – канд. техн. наук, завідувач катедри, доцент катедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Tkachuk Andrii Fedorovych – software engineer, individual entrepreneur, second-year Ph.D. student, Faculty of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, email: aftvin@gmail.com.

Moshnoriz Mykola Mykolayovych – PhD, Head of Department, Associate Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia national technical university, e-mail: moshnoriz@vntu.edu.ua.

Scientific advisor: Moshnoriz Mykola Mykolayovych – PhD, Head of Department, Associate Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia.