

SYNTHESIS OF THE INTELLECTUAL SYSTEM FOR ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM EQUIPMENT WITH PHOTOELECTRIC PLANTS AND ENERGY STORAGE

S. Baliuta, L. Kopilova, Iu. Kuievda, M. Kondrashevsky, V. Romaniuk
National University of Food Technologies

Key words:

*Electrical equipment
Technical condition
Data analysis
Intellectual technologies
Fuzzy logic
Neural networks
Support systems and
decision making
Energy consumption
Development
Food industry
Trend of modernization*

Article history:

Received 10.01.2024
Received in revised form
26.01.2024
Accepted 13.02.2024

Corresponding author:

V. Romaniuk
E-mail:
v.t.romaniuk@gmail.com

Citation: С. М. Балюта, Л. О. Копилова, Ю. В. Куєвда, М. С. Кондрашевський, В. Т. Романюк (2024). Синтез інтелектуальної системи оцінки технічного стану обладнання системи електропостачання з фотоелектростанціями та накопичувачами енергії. *Наукові праці НУХТ*, 30(1), 105—118. DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-1-11

ABSTRACT

In the conditions of digitalization and the introduction of intellectual systems in various fields, including in the power industry, technologies for working with information of various volumes and content for making management decisions are becoming important. Ensuring the reliability and efficient operation of objects of the electrotechnical complex requires the use of mechanisms for comprehensive assessment of the operability of electrotechnical equipment based on current information about its condition. The purpose of the research is to describe the principles of comprehensive assessment of the state of electrical equipment using the technology of intellectual analysis of data obtained during diagnostics and monitoring of its key elements. A systematic approach to managing the technical condition of electrical equipment based on the results of diagnostics, monitoring, and intellectual data analysis is proposed in the article. Mathematical models of complex assessment of equipment condition using intellectual technologies are considered. A model of the system of proactive management of the condition of the equipment is proposed, which involves the selection and use of various methods of intellectual analysis of information about changes in its key diagnostic parameters. The main distinguishing features of the proposed decision support system are: solving tasks as control, but also forecasting values of diagnostic parameters of electrical equipment; analysis of not only the actual values of the controlled parameters, but also their dynamics, using not only probabilistic statistical methods, but also methods of artificial intelligence, cognitive and fuzzy cognitive modeling. This allows detecting malfunctions, failures of electrical equipment at an early stage of development; prevent emergency situations; produce and take measures to prevent them in conditions of uncertainty and large volumes of raw data; the universality of the system, which consists in the possibility of its application in all branches of industry (chemical, oil, metallurgical, atomic energy, etc.). An example of creating a model of a lithium-ion battery is given, and the method of identifying model parameters is presented.

DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-1-11

СИНТЕЗ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ ТА НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ

С. М. Балюта, Л. О. Копилова, Ю. В. Куєвда, М. С. Кондрашевський,
В. Т. Романюк

Національний університет харчових технологій

В умовах цифровізації та впровадження інтелектуальних систем у різних сферах, зокрема в електроенергетиці, важливого значення набувають технології роботи з інформацією різного обсягу та змісту для прийняття управлінських рішень. Забезпечення надійності та ефективної експлуатації об'єктів електротехнічного комплексу потребує застосування механізмів комплексної оцінки працездатності електротехнічного обладнання (ЕО) на основі актуальної інформації про його стан.

Мета статті полягає в описі принципів комплексної оцінки стану ЕО з використанням технологій інтелектуального аналізу даних, що одержуються в ході діагностики і моніторингу за його ключовими елементами. Запропоновано системний підхід до управління технічним станом ЕО за результатами діагностики, моніторингу та інтелектуального аналізу даних. Розглянуто математичні моделі комплексної оцінки стану обладнання з використанням інтелектуальних технологій. Розроблено модель системи проактивного управління станом обладнання, що передбачає вибір та використання різних методів інтелектуального аналізу інформації про зміну його ключових діагностичних параметрів. Основними відмінними рисами запропонованої інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) є: вирішення завдань як контролю, так і прогнозування значень діагностичних параметрів ЕО; аналіз не тільки фактичних значень контрольованих параметрів, але і їх динаміки, з використанням не тільки ймовірно-статистичних методів, але й методів штучного інтелекту, когнітивного і нечіткого когнітивного моделювання. Це дає змогу виявляти несправності, відмови ЕО на ранній стадії розвитку; запобігати аварійним ситуаціям; виробляти та вживати заходів щодо їх запобігання в умовах невизначеності та великих обсягів вихідних даних; універсальність системи, що полягає у можливості її застосування у всіх галузях промисловості (хімічної, нафтової, металургійної, атомної енергетики тощо). Наведено приклад побудови моделі літій-іонної батареї та представлено методуку ідентифікації параметрів моделі.

Ключові слова: електротехнічне обладнання, технічний стан, аналіз даних, інтелектуальні технології, нечітка логіка, нейронні мережі, системи підтримки та прийняття рішень.

Постановка проблеми. У сучасних умовах ефективна робота будь-яких промислових, технологічних і цивільних об'єктів обумовлюється їх безперебійним електрозабезпеченням. Тенденції цифровізації всіх галузей економіки передбачає

перехід до інтелектуальних електромереж, що характеризуються високою відмовостійкістю, надійністю. Це, у свою чергу, неможливо без комплексного впровадження сучасних цифрових (інформаційно-телекомунікаційних, аналітичних і керуючих) рішень.

Завдання полягає у створенні енергоінформаційної інфраструктури, що буде забезпечувати ефективний контроль і оперативне управління технічним станом (ТС) електрообладнання (ЕО) систем електрозабезпечення за критеріями мінімізації аварійних ситуацій, простою обладнання, а також зниження сукупних витрат на його експлуатацію.

Робота такої складної розподільної структури базується на можливості отримання й обробки інформації про роботу обладнання без його виключення від мережі живлення. Тому основою для прийняття раціональних рішень інженерно-технічним персоналом у короткостроковій і довгостроковій перспективі є інтеграція інтелектуальних методів оцінювання стану ЕО та отримання об'єктивних даних про його роботу. Проте оцінка стану промислового ЕО вимагає використання великої кількості вихідної інформації, що має значний ступінь невизначеності, зумовлений, з одного боку, фактором випадковості, а з іншого, нечіткістю інформації. Погано формалізований характер задачі оцінювання стану промислового ЕО, пов'язаний з неповною вихідною інформацією, отриманою під час експлуатації, зі складністю обладнання та визначенням взаємозв'язків між параметрами, значення яких можуть бути передбачені різними типами даних (чіткими, нечіткими); з необхідністю застосування експертної інформації, отриманої в результаті досвіду персоналу, для підвищення достовірності результатів оцінки, що призводить до обмеження можливості застосування традиційних методів, заснованих на обробці статистичної (сукупної) інформації.

Отже, при розробці інтелектуальної системи оцінки стану ЕО необхідно використовувати інтелектуальні методи, що забезпечують вивчення й обробку не тільки кількісної, але і якісної вихідної інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання розробки моделей та методів підтримки прийняття рішень для оцінки стану промислового електротехнічного обладнання були розглянуті в працях українських і зарубіжних вчених: В. Г. Кузнецова, А. К. Шидловського, О. С. Бешти, І. А. Биргера, О. В. Кириленка, Г. С. Осіпова, Д. А. Поспелова, Г. С. Цейтіна, Б. І. Мокіна, Р. Н. Кветного, В. М. Дубового, І. В. Кузьміна, С. Д. Штовби, О. В. Бісікала, В. Б. Мокіна, Д. Ахєєва (J. Ahyoev), Р. Гілморе (R. J. Gilmore), Я. Джанга (Y. Zhang), П. Кумара (P. Kumar), М. Жарковича (Mileta Žarković), В. Томсона (W. T. Thomson) та багатьох інших.

Однак у зазначених працях більшість методів і моделей підтримки прийняття рішень засновані на механічних джерелах відмов і збоїв, при цьому не враховується вплив основних показників якості електричної енергії, хоча ЕО дуже чутливе до них; не у всіх методах враховується зовнішня інформація, наприклад, інформація про кліматичні умови (перепади температур, грози тощо); відсутня систематизація різнотипної діагностичної інформації при її аналізі й обробці.

Незважаючи на значну кількість досліджень українських і зарубіжних вчених з проблеми підтримки прийняття рішень при оцінюванні стану промислового ЕО за допомогою різних моделей та методів, це завдання вирішено не повністю.

При проведенні оцінки стану ЕО в більшості випадків використовуються традиційні моделі та методи підтримки прийняття рішень, які не дають змоги врахувати всі необхідні діагностичні параметри та фактори. Тому виникає необхідність у розробці нових моделей і методів, що враховують всілякі діагностичні параметри та фактори, які мають як кількісний, так і якісний характер.

Вирішення зазначених завдань неможливе без застосування систем діагностування ЕО і систем підтримки та прийняття рішень (СППР), що полягають у допомозі оперативному персоналу та особі, що приймає рішення (ОПР), у контролі й аналізі його технічного стану; у генерації можливих рішень щодо справності обладнання на основі цього аналізу, а також у запобіганні аварійним ситуаціям на ранній стадії.

Натепер існує велика кількість методів підтримки прийняття рішень для оцінки стану ЕО, проте найцікавіші такі складові: нечітка логіка, генетичні алгоритми, штучні нейронні мережі (ШНМ).

У праці (Manusov, & Ahyoev, 2015) розглянуто метод оцінки ТС ЕО підстанцій та електричних мереж з використанням нечітких логічних моделей, заснованих на нечітких зв'язках між прогнозованими та реальними причинами відмов, а також на матриці нечітких співвідношень. Метод дає змогу вибрати найбільш достовірну ознаку відмов за наявності кількох альтернатив і критеріїв. Процес прийняття рішень на основі результатів щодо ТС обладнання може здійснюватися з використанням методу Сааті. Очевидними перевагами використання теорії нечітких множин і нечіткої логіки в задачах оцінки стану ЕО є: гнучкість подання вихідної інформації та інтерпретування кінцевого результату; простота побудови моделей, зокрема з використанням експерта; скорочення обсягу обчислень і висока швидкодія.

У праці (Arbuzov, Ivchenko, Matiukhina, Pavelyev, & Ostroukh, 2018) розглядається підхід до застосування ШНМ у задачах технічного стану турбогенераторів для вимірювання вібрацій спектрограмів електростанцій. Вирішувалися два завдання: фільтрація перешкод у вимірювальних даних з використанням лінійної нейронної мережі та діагностика (класифікація) стану турбогенераторів на основі аналізу спектрограм вібраційних вимірів з використанням нейронної мережі персептронного типу. Запропонований підхід сприяє ранньому виявленню передаварійних ознак. ШНМ є методом моделювання складних залежностей у завданнях прогнозу, класифікації, управління та діагностики з можливістю навчання й адаптації до різних змін.

У праці (Imoru, Odun Ayo, Nelwamondo, Fulufhelo, Jimoh, Adisa, & Ayodele, Temitore Raphael, 2021) розглядається підхід до виявлення несправностей обмоток в електричній машині на основі використання зразків даних електричної машини як у справному стані, так і в умовах різних несправностей. Створюється дворівнева мережа з прямим зв'язком з алгоритмом зворотного поширення Левенберга-Марквардта із зібраним вхідним набором даних. Запропонований підхід дає змогу ідентифікувати стан електричної машини із високою точністю. До переваг моделей оцінки стану ЕО з використанням ШНМ необхідно віднести: стійкість під час роботи з недостовірною інформацією; стійкість до шумів у вхідній діагностичній інформації; можливість адаптації до нових умов; здатність ефективно обробляти інформацію високої розмірності; мінімальне втручання користувача в

процес навчання. До недоліків ШНМ відносять: складність реалізації та навчання мережі; необхідність у великому обсязі архівної діагностичної інформації для якісного навчання розробленої ШНМ.

Отже, проведений аналіз існуючих методів діагностування ЕО встановити, що (Kolodenkova, Vereshchagina, & Muntyan, 2020):

- методи розроблені для конкретного обладнання, враховують конкретні діагностичні параметри та їх використання для іншого обладнання не застосовується;
- у методах підтримки прийняття рішень не враховується вплив зовнішнього середовища, наприклад, інформація про кліматичні умови (перепади температур, грози тощо);

- більшість моделей і методів підтримки прийняття рішень для оцінки стану ЕО засновані на механічних джерелах відмов та збоїв, при цьому не враховується вплив основних показників якості електроенергії (ПЯЕ), хоча ЕО дуже чутливі до них.

Для підвищення ефективності прийняття рішень щодо стану ЕО необхідно розробляти та застосовувати нові моделі та методи підтримки прийняття рішень для оцінки стану ЕО з використанням засобів нечіткої логіки та ШНМ, заснованих на застосуванні кількох видів діагностичних параметрів, що дає великий обсяг інформації, одночасно знижуючи трудомісткість та спрощуючи обробку інформації. Розроблені моделі та методи дають змогу оцінювати не тільки механічні й електричні несправності, що викликають відмови та збої ЕО, але й отримувати та використовувати знання, накопичені оперативним і ремонтним персоналом.

Мета дослідження: удосконалення системи оцінки технічного стану ЕО систем електропостачання з фотоелектростанціями (ФЕС) та накопичувачами енергії (НЕ) шляхом застосування інтелектуальних методів обробки інформації, формалізації знань і досвіду експертів, а також автоматизації процесу прийняття рішень.

Матеріали і методи. Комплексна оцінка ТС ЕО повинна здійснюватися відповідно до сучасних механізмів діагностування (предиктивний, проактивний, прескриптивний).

Викладення основних результатів дослідження. Відповідно до (Eltyshev, 2020) спрощена модель комплексної оцінки ТС ЕО на основі технології збору й обробки даних може бути розглянута як функція виду:

$$K(t) = f(M, X(t), N, Y), \quad (1)$$

де $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ — набір методів і програмно-технічних засобів оцінювання стану ЕО; $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ визначає набори діагностичних параметрів ЕО для кожного виду контролю $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$, $i = 1 : n$; N — вектор граничних умов працездатності ЕО; $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ — безліч класів нормативних чи дефектних станів.

Підставами для інтелектуалізації процедури оцінки та прогнозування ТС ЕО є: характер завдання, який є неструктурований і погано формалізується; неоднозначність у нормуванні діагностичних ознак і частка суб'єктивізму, що вноситься персоналом, який приймає рішення; можлива неповнота даних за деякими знака-

ми; необхідність вироблення обґрунтованих рішень за умов тимчасових обмежень; необхідність коригування та введення додаткової інформації й ітеративний характер формування рішень (Eltyshev, & Boyarshinova, 2016).

Питання підготовки даних для формування інтелектуальних моделей, а також логічного опису діагностичних параметрів за допомогою нечітких функцій і процедур кластерного аналізу частково розглянуті в (Eltyshev, & Gnutova, 2018). Варто зазначити, що вирішення завдань у цій галузі з урахуванням особливостей розвитку електроенергетичної галузі, як і раніше, є актуальним.

Ефективна реалізація наведеного на рис. 1 підходу до організації системи контролю ТС ЕО передбачає використання сучасних методів аналізу й обробки даних. Приклади використання інструментів обробки даних на основі інтелектуальних технологій, нечіткої логіки, машинного навчання наведено в (Khal'yasmaa, Dmitriev, & Kokin, 2016).

На рис. 1 представлена структура інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) оцінювання та діагностування ЕО, що включає чотири основні модулі: модуль збору та зберігання вихідних даних; модуль обробки вихідних даних і знань; модуль діагностування та прогнозування; модуль формування рекомендацій і прийняття рішень (Kolodenkova, Vereshchagina, & Muntyan, 2020).

Розглянута ІСППР є програмним комплексом для автоматизованого збору первинної інформації про ЕО, обробки та візуалізації різної різномірної діагностичної й експертної інформації, а також формування вихідної інформації у вигляді поточного стану ЕО (справний стан ЕО/справний стан ЕО, але з невеликими відхиленнями).

Модуль збору та зберігання вихідних даних забезпечує прийом інформації від різних різномірних вимірювальних приладів і датчиків (наприклад, частоти, напруги фаз А, В, С, напруги інверторів тощо), зовнішнього середовища (наприклад, інформація про кліматичні умови (температура, освітленість, блискавка тощо)), а також при візуальному огляді оперативним персоналом.

Уся інформація з оцінки стану ЕО, необхідна оперативному персоналу, зберігається у базі даних (БД). У БД зберігається інформація за всіма діагностичними параметрами протягом усього періоду часу проведення випробувань і дані вимірювань, отримані в режимі реального часу, що зберігаються у файлах формату Excel (*.xls). Також БД містить довідкову інформацію за діагностичними параметрами.

У модулі обробки вихідних даних здійснюється обробка даних, що надходять із БД, які будуть використані в модулі діагностування та прогнозування (Kolodenkova, Vereshchagina, & Khalikova, 2020). Обробка передбачає структурування знань і нормалізацію діагностичної й експертної інформації, поданої у вигляді чітких даних, інтервалів, лінгвістичних змінних, з метою застосування методів і технологій м'яких обчислень. Для застосування ймовірно-статистичних методів обробка даних не обов'язкова.

У модулі діагностування та прогнозування здійснюється діагностування та прогнозування стану ЕО на основі даних бази знань (БЗ) і бази методів. БЗ — це ядро ІСППР, яка поповнюється за допомогою знань і досвіду оперативного персоналу (заміна правил чи фактів у БЗ).

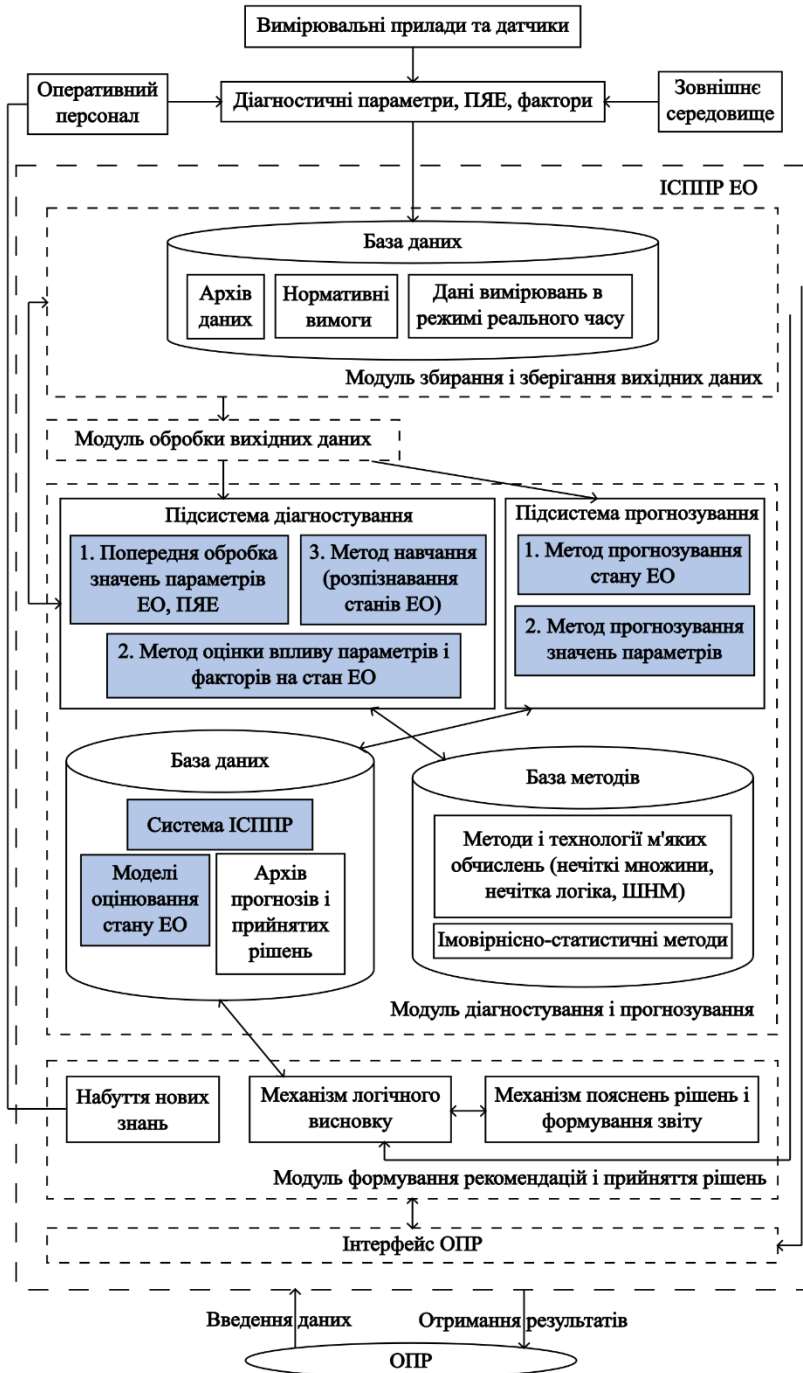


Рис. 1. Структура ІСПП оцінки та прогнозування стану ЕО

Пропонована БЗ може містити різні інтелектуальні методи оцінки стану ЕО, сценарії розвитку ситуацій, архіви прогнозів, а також рекомендації та ухвалені діагностичні рішення. Результати діагностування та прогнозування надходять у модуль формування рекомендацій і прийняття рішень. Якщо після застосування підсистеми діагностування виявиться, що стан ЕО справний/справний, але з невеликими відхиленнями, то інформація передається в модуль формування рекомендацій і прийняття рішень.

ОПР видається рекомендація ухвалити рішення за принципом «так»—«ні» (наприклад, чи здійснювати подальше діагностування та прогнозування ЕО), в результаті якого в режими функціонування СППР вносяться відповідні зміни. Підсистема діагностування тісно пов'язана з підсистемою прогнозування.

Модуль формування рекомендацій і прийняття рішень відповідає за видачу ОПР рішення з урахуванням виявлених відхилень у роботі ЕО у зручному та наочному для нього вигляді (наприклад, звіт у текстовій формі).

До складу цього модуля входять такі компоненти:

1) придбання та поповнення нових знань. Цей компонент забезпечує роботу оперативного персоналу з підтримки інтелектуальних методів ІСППР, генерації БЗ, поповнення новими знаннями, її перевірки на повноту та несуперечність, а також адаптації БЗ системи до умов її функціонування. Адаптація ІСППР до змін у предметній галузі полягає у перевизначенні діагностичних параметрів, ПЯЕ, факторів у інтелектуальних методах оцінювання, заміні ІСППР у БЗ. Знання в модуль діагностування та прогнозування передаються у вигляді завершеної інформації про ЕО (значення яких параметрів відхилялися від норми, у який час спостерігалось відхилення і як довго воно тривало, які заходи були вжиті тощо) для подальшого їх використання в підсистемі діагностування та прогнозування. Результатом цього компонента є заповнення БЗ;

2) механізм логічного виведення. Цей компонент призначений для виконання аналізу й отримання нових знань у порівнянні вихідних даних із БД і БЗ, тобто забезпечує пошук відповіді на питання ОПР;

3) механізм пояснення рішень і формування звітів необхідний для запиту пояснення ходу рішення ОПР у процесі або за результатами розв'язання задачі (пояснює, як отримано чи не отримано рішення задачі, які знання при цьому були використані, задіяні), що полегшує оперативному персоналу тестування ІСППР та підвищує довіру ОПР до отриманих результатів.

Інтерфейс дає змогу ОПР запускати обчислювальні експерименти та переглядати отримані результати.

Основними можливостями пропонованої ІСППР є:

- побудова, редагування та аналіз інтелектуальних методів для оцінки стану ЕО;
- побудова та редагування БЗ, що містить ІСППР для ухвалення остаточних діагностичних рішень;
- побудова прогнозних моделей як функціональних залежностей будь-яких контрольованих параметрів ЕО, і навіть розрахунок прогнозних значень контрольованих параметрів за даними моделей;
- пошук відхилень значень параметрів ЕО від допустимих норм із застосуванням БД та БЗ;

- моделювання та прогнозування розвитку несприятливих ситуацій, що виникають на етапі експлуатації ЕО.

Основними характерними рисами запропонованої ІСППР є можливості:

1) вирішення завдань як контролю та прогнозування значень діагностичних параметрів ЕО;

2) аналізу не тільки фактичних значень контрольованих параметрів, але і їх динаміки, з використанням не тільки ймовірносно-статистичних методів, але й методів штучного інтелекту, когнітивного і нечіткого когнітивного моделювання. Це дає змогу виявляти несправності, відмови електрообладнання на ранній стадії розвитку; запобігати аварійним ситуаціям; виробляти та вживати заходів щодо їх запобігання в умовах невизначеності та великих обсягів вихідних даних;

3) універсальність системи, що полягає у можливості її застосування у всіх галузях промисловості (хімічної, нафтової, металургійної, атомної енергетики тощо).

Отже, пропонується ІСППР дає змогу не тільки оцінювати реальний стан ЕО на певний момент часу в умовах широкого переліку параметрів, що діагностуються, ПЯЕ, факторів, а й спрогнозувати їх значення, виявити можливі несправності, відмови ЕО на ранній стадії їх розвитку; запобігти аварійним ситуаціям та знизити ризик техногенних катастроф; прийняти науково обґрунтовані діагностичні рішення щодо стану ЕО.

Система моніторингу ФЕС. Для фотоелектричних систем доступні кілька типів моніторингу: системи, які з'єднані з інверторами та контролюють усі електричні значення, пов'язані з продуктивністю системи та статусом інверторів; системи без комунікаційних протоколів для інверторів, але з вимірювальними підключеннями для моніторингу генерованої сонячної енергії; гібридні системи, які надають інформацію як від інверторів, так і від зовнішніх вимірювань, таких як сонячне випромінювання й температура.

Тільки системи, які вимірюють сонячне випромінювання, можуть надати інформацію про модулі для всієї системи на основі продуктивності інверторів. Оскільки прогнози ефективності, зазвичай, базуються на метеорологічній статистиці, дані про потужність іноді важко оцінити без посилення на сонячне випромінювання. Аномально низька потужність може бути викликана такими причинами: низька сонячна радіація протягом тривалого часу (що не відповідає метеорологічній статистиці), проблема з модулями (відкладення, тіні, помилки підключення тощо), несправність інвертора, пошкодження в колі. Ці несправності можна виявити, лише якщо система оснащена датчиками для вимірювання сонячної радіації й температури, а потужність можна порівняти з фактичною потужністю. Залежно від розміру системи можна контролювати фази окремо або групами, щоб визначити незаплановані відхилення потужності між фазами.

Системи спостереження можуть бути автономними або працювати через віддалений моніторинг. В автономній системі моніторингу дані збираються локально, а тривожні повідомлення надсилаються безпосередньо обслуговуючому персоналу.

У системах віддаленого моніторингу дані збираються локально, а сигнали тривоги та інформація про продуктивність передаються безпосередньо в систему дис-

танційного моніторингу, яка координує час очікування для технічного обслуговування. Це забезпечує точний моніторинг, що важливо для систем із кількома об'єктами, де оператори не завжди можуть бути на місці.

Система моніторингу забезпечується даними від різних датчиків. Датчик для вимірювання поточної енергії світлового випромінювання, наприклад, піранометр (датчик тепла для вимірювання сонячної радіації при природному освітленні (Вт/м^2)) — це стандартна інформація для системи. Вимірювання, що дає змогу виявляти коливання в часі, рекомендовано всім операторам, які хочуть проводити порівняльний аналіз і генерувати статистику продуктивності своїх систем.

Температура є важливим фактором для фотоелектричних систем. Цей датчик є або зовнішнім зондом, або встановленим підмодулями.

Оцінювання стану літій-іонного акумулятора. Для досягнення оптимального терміну служби літій-іонної батареї необхідно обмежити робочий діапазон, уникати градієнтів потужності й обмежувати високі рівні заряду.

При оптимізації систем електрозабезпечення використовуються моделі онлайн-імітації акумуляторної батареї. Основою цього є діагностика стану, завданням якої є виявлення модельних параметрів онлайн-імітаційної моделі у процесі експлуатації.

Для цього потрібні відповідні імітаційні моделі, які відображають електричну, термічну поведінку та поведінку при старінні (рис. 2).

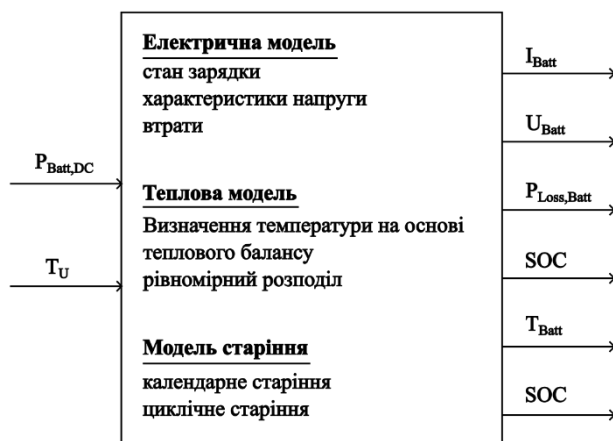


Рис. 2. Модель літій-іонного акумулятора

Вхідними даними імітаційної моделі є потужність батареї $P_{\text{Batt,DC}}$ і температура навколишнього середовища T_U . Вихідними змінними є втрати струму батареї P_{lossBatt} , стан заряду SOC, температура батареї T_{Batt} та старіння батареї як стану працездатності (SOH).

Опис електричних характеристик літій-іонної батареї не включає температурну залежність параметрів моделі.

Електрична модель. Літій-іонний акумулятор моделюється за допомогою підходу, заснованого на електричному колі (Appen, Kneiske, & Braun, 2013). Він характеризується обмеженим числом параметрів моделі, простою реалізацією й

адаптивністю до різних технологій. Крім того, цей підхід добре підходить для реалістичного опису втрат, а також статичної та динамічної поведінки. Усі параметри в запропонованій моделі є функціями стану заряду SOC_{Batt} та поточного струму I_{Batt} . Вибрана модель складається з джерела напруги UOCV , послідовного опору $R_{0,\text{Batt}}$ та послідовно з'єднаних паралельних RC контурів: R_1C_1 та R_2C_2 .

Напруга холостого ходу UOCV визначає статичну поведінку літій-іонної батареї. Нелінійна залежність між напругою холостого ходу UOCV та станом заряду батареї SOC_{Batt} представляється характеристикою UOCV-SOC . Послідовний опір R_0 характеризує омичні втрати на контактах, електродах та електроліті. Вони залежать від напрямку струму та стану заряду SOC_{Batt} . Результуючу напругу U_0 можна розрахувати за законом Ома. Стан заряду SOC_{Batt} обчислюється методом кулонівського рахунку зі струмом батареї I_{Batt} як вхідні дані. У цій моделі нехтують втратами заряду та розряду.

Теплова модель. Теплова поведінка описується відповідно до моделі еквівалентної схеми, представленій в (Rakhmatov, & Vrudhula, 2001), яка зводить просторовий розподіл виділення тепла до зосереджених параметрів. Тепло розсіюється в основному за рахунок випромінювання та конвекції, і його можна вважати лінійним:

$$P_A = A_{\text{Batt}} \cdot (c_{s,\text{Batt}} + c_{k,\text{Batt}}) \cdot (T_{\text{Batt}} - T_U). \quad (2)$$

Крім двох коефіцієнтів теплопередачі $c_{s,\text{Batt}}$ (випромінювання) і $c_{k,\text{Batt}}$ (конвекція), площа поверхні батареї A_{Batt} грає роль розрахунку теплової потужності P_A . Для температури довкілля передбачається постійне значення 20°C . Температура батареї T_{Batt} розраховується на основі теплового балансу та питомої теплоємності температура батареї за рівнянням (3):

$$T_{\text{Batt}} = T_{\text{Batt},0} + \frac{1}{C_{\text{batt},th}} \int (P_{\text{Loss},\text{Batt}} - P_A) dt, \quad (3)$$

де $C_{\text{Batt},th}$ характеризує тепловий коефіцієнт теплопередачі.

Модель старіння. Модель старіння літій-іонної батареї ґрунтується на напівемпіричному підході, представленому в (Schmalstieg, Käbitz, Ecker, & Sauer, 2014).

Структура моделі визначається з урахуванням експериментальних досліджень з урахуванням фізичних законів.

Порівняно з підходами, які враховують лише календарне старіння (Sarasketa-Zabala, Gandiaga, Rodriguez-Martinez, & Villareal, 2014) або циклічне старіння батареї (Sarasketa-Zabala, Gandiaga, Martinez-Laserna, Rodriguez-Martinez, & Villareal, 2015), у цьому підході реалізовано обидва компоненти старіння. Загальне старіння є результатом суми календарного та циклічного старіння.

Зменшення ємності C_n , приведене до одиниці, розраховується так:

$$C_n = 1 - \alpha_{cap} \cdot (t)^{0.75} - \beta_{cap} \cdot \sqrt{Q}. \quad (4)$$

Перший елемент визначає календарне старіння. Коренева залежність від часу є зростанням шару SEI. Температурна залежність за законом Арреніуса і залежність стану заряду відображаються через коефіцієнт α_{cap} . Із зростанням температури батарея старіє швидше. Високі рівні заряду негативно впливають на швидкість старіння.

Циклічне старіння моделюється за допомогою квадратного кореня із циклів та коефіцієнта β_{cap} . Коефіцієнт β_{cap} залежить від середньої напруги за повний цикл та глибини розряду DOD.

Нормований внутрішній опір R_n розраховується так само, як і для зменшення ємності, з тією різницею, що кількість заряду Q включається не через квадратний корінь, а лінійно:

$$R_n = 1 + \alpha_{res} \cdot (t)^{0,75} + \beta_{res} \cdot Q. \quad (5)$$

Метод ідентифікації параметрів. Проводять три характерні експерименти для визначення параметрів моделі. До них відносяться циклічний тест, вимірювання напруги холостого ходу та імпульсний тест.

Ємність акумулятора визначається на основі циклічного тесту. Акумулятор заряджається та розряджається постійним струмом (наприклад, 10 А) у заданих межах напруги, а вимірюваний струм інтегрується. Багаторазове повторення цього циклічного тесту і подальше усереднення ємності зменшує стохастичні змінні, що впливають. Щоб гарантувати, що всі компоненти перенапруги згасли і система простоє, є годинна перерва.

Характеристика напруги холостого ходу визначається зарядкою батареї певним струмом, починаючи з нижньої межі напруги протягом певного періоду часу. Це відповідає значенню SOC, що дорівнює 0%. Потім чекають, поки знизяться складові перенапруги, і після цього вимірюють напругу на клеммах. Ця процедура повторюється до тих пір, поки не буде досягнуто верхньої межі напруги для вибраних станів заряду, які діють як опорна точка для таблиці пошуку.

Третій експеримент включає серію різних імпульсів зарядного і розрядного струму для визначення омичної складової $R_{0,Batt}$ і параметрів першого резистивно-ємнісного елемента залежно від стану заряду. Тривалість імпульсу та пауза — кожні 300 секунд.

Параметри моделі визначаються за декілька етапів. По-перше, оцінюється циклічний тест визначення ємності батареї і тест напруги холостого ходу визначення співвідношення UOCV-SOC. Параметри $R_{0,Batt}$, R_1 і τ_1 для процесу зарядки та розрядки для заданих станів зарядки потім проводиться імпульсний тесту відповідно до наступної процедури. Для кожної послідовності імпульсів внутрішній опір $R_{0,Batt}$ розраховується за рівнянням (6). Усереднення за зареєстрованими імпульсами (чотири в позитивному та негативному напрямку) знижує вплив випадкових помилок виміру:

$$R_0 = \frac{U_{batt,2} - U_{batt,1}}{I_{batt,2} - I_{batt,1}}. \quad (6)$$

На наступному етапі ідентифікується перший RC-елемент залежно від напрямку струму методом найменших квадратів. Мета полягає в тому, щоб вибрати параметри моделі таким чином, щоб сума квадратів помилок знаходилася між вимірними і модельованими напругами батареї були мінімальною. Кількість вимірюваних значень n залежить від вибраної тривалості імпульсу:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{вим}[i] - U_{мод}[i])^2}. \quad (7)$$

Набір даних циклічного тесту використовується для визначення другого елемента РС. Ідентифікація ґрунтується на першому елементі РС, але не залежить від стану заряду. Ефективність зарядки та розрядки $\eta_{ch/disch}$ також визначається за допомогою циклічного тесту.

Отже, запропоновані методи оцінювання стану фотоелементів ФЕС та НЕ на основі літій-іонних батарей забезпечать надійну ефективну роботу системи електрозабезпечення.

Висновки

У статті розглянуто аспекти розробки системи комплексної оцінки та управління технічним станом ЕО з використанням методів інтелектуального аналізу даних.

Запропоновано та розглянуто структуру ІСППР діагностування ЕО в умовах діагностичної та експертної інформації. Запропонована система дає змогу вирішити завдання не тільки контролю, а й прогнозування стану ЕО з використанням засобів нечіткої логіки та ШНМ, прийняти правильні діагностичні рішення щодо стану ЕО. При цьому запропонована ІСППР є універсальною, оскільки існує можливість застосування її у всіх галузях промисловості (харчової, хімічної, металургійної, атомної енергетики тощо).

Використання інтелектуальних методів (нечіткі множини, нечітка логіка, нейронні мережі) надає можливість здійснювати синтез діагностичних моделей, що дають змогу інтуїтивно зрозуміло і з високою точністю визначити стан обладнання, а також здійснювати адаптацію при зміні набору статистичних даних. З цією метою важливо забезпечити підтримку функціонування єдиного інформаційного середовища, яке безперервно або із заданою періодичністю акумулює поточну інформацію про значення діагностичних параметрів ЕО, а також реальні факти зміни стану ЕО.

Реалізація системи комплексної оцінки та проактивного управління ТС ЕО, адаптивної до змін у його роботі, дасть змогу в майбутньому вибудувати ефективну систему інтегрованої логістичної підтримки обладнання та впливати не лише на техніко-економічні показники процесу його експлуатації, а й на якість проектних рішень у галузі створення конкурентоспроможних електротехнічних виробів.

Запропоновані методи оцінювання стану акумуляторів НЕ і моніторингу стану фотомодулів фотоелектростанції дадуть змогу підвищити ефективність використання фотомодулів та забезпечити нормативний термін використання акумуляторів.

Література

Appen, J. von, Kneiske, T., & Braun, M. (2013). Voltage control using PV storage systems in distribution systems, Proceedings of the 22nd International Conference and Exhibition on Electricity, Stockholm, Sweden. doi: 10.1049/cp.2013.1217.

Arbuzov, V., Ivchenko, V., Matiukhina, E., Pavelyev, S., & Ostroukh, A. (2018). Application of neural network technologies for diagnostics of the technical state of power plant turbo generators based on spectrograms of the 150 vibration measurements. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 13(7), 2549—2555.

Eltyshev, D. K. (2020) Electric equipment operation scenarios based on the results of non-destructive condition control. *Journal of Physics: Conference Series*. International Conference on Innovation Energy (IE 2020), 012010.

Eltyshev, D. K., & Boyarshinova, V. V. (2016). Intelligent Decision Support in the Electrical Equipment Diagnostics. Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2016) (pp. 157—160).

Eltyshev, D., & Gnutova, K. (2018). Influence of fuzzy clustering on the accuracy of electrical equipment diagnostic models, Proceedings of the 6th International Conference on Applied Innovations in IT (pp. 23—28).

Imoru, Odyn Ayo, Nelwamondo, Fulufhelo V., Jimoh, Adisa, & Ayodele, Temitope Raphael (2021). A neural network approach to detect winding faults in electrical machine. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 22(1), 31—41. doi: 10.1515/ijeeps-2020-0161.

Khal'yasmaa, A. I., Dmitriev, S. A., & Kokin S. E. (2016). An automated system for taking decisions to assess the actual state of electrical equipment. *Power Technology and Engineering*, 49(5), 389—392.

Kolodenkova, A. E., Khalikova, E. A., & Vereshchagina, S. S. (2020). Development of a diagnostic data fusion model of the electrical equipment at industrial enterprise, Proceedings of the Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI'19), part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series, AISC, vol. 1156 (pp. 499—506). Ostrava-Prague, Czech Republic.

Kolodenkova, A. E., Vereshchagina, S. S., & Muntyan, E. R. (2020). Development of an intelligent decision support system for electrical equipment diagnostics at industrial facilities, Proceedings of the Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI'19), part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series, AISC, vol. 1156 (pp. 225—233). Ostrava-Prague, Czech Republic.

Manusov, V., & Ahyoev, J. (2015). Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models. *Applied Mechanics and Materials*, 792, 324—329.

Rakhmatov, D. N., & Vrudhula, S. B. K. (2001). An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems, Proceedings of the 2001 IEEE/ACM international conference on Computer-aided design. San Jose, Ca, USA: IEEE. doi:10.1109/ICCAD.2001.968687.

Sarasketa-Zabala, E., Gandiaga, I., Martinez-Laserna, E., Rodriguez-Martinez, L. M., & Villarreal, I. (2015). Cycle ageing analysis of a LiFePO₄/graphite cell with dynamic model validations: Towards realistic lifetime predictions. *Journal of Power Sources*, 275, 573—587. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.10.153.

Sarasketa-Zabala, E., Gandiaga, I., Rodriguez-Martinez, L. M., & Villarreal, I. (2014). Calendar ageing analysis of a LiFePO₄/graphite cell with dynamic model validations: Towards realistic lifetime predictions. *Journal of Power Sources*, 272, 45—57. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.08.051.

Schmalstieg J., Käbitz S., Ecker M., & Sauer, D. U. (2014). A holistic aging model for Li(NiMnCo)O₂ based 18650 lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 257, 324—334. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.02.012.