

Г. І. Лагутін, Н. М. Куравська, М. В. Куравський, В. О. Гончаров

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПЕРЕСУВНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОМПЛЕКСІВ ОЗБРОЄННЯ

Анотація. У роботі розглянуто можливості застосування технології цифрового двійника для контролю та прогнозування технічного стану пересувних електростанцій систем електропостачання комплексів озброєння. Проаналізовано принцип формування цифрового двійника на основі поєднання цифрової моделі з фактичними експлуатаційними параметрами електростанції. Визначено основні параметри, що можуть використовуватися для оцінювання зміни її технічного стану. Розглянуто можливість завчасного виявлення передвідмовних станів та переходу до прогнозного технічного обслуговування пересувних електростанцій.

Ключові слова: цифровий двійник, пересувна електростанція, технічний стан, система електропостачання, комплекс озброєння.

Abstract. This paper examines the potential applications of digital twin technology for monitoring and predicting the technical condition of mobile power stations within the power supply systems of weapon systems. The principle of creating a digital twin by combining a digital model with the power station's actual operational parameters is analysed. The key parameters that can be used to assess changes in its technical condition are identified. The possibility of early detection of pre-failure conditions and the transition to predictive maintenance of mobile power stations is examined.

Keywords: digital twin, mobile power station, technical condition, power supply system, weapons system.

Вступ

Надійність електропостачання комплексів озброєння значною мірою залежить від технічного стану пересувних електростанцій, які в умовах автономного функціонування є основними або резервними джерелами електричної енергії. Виникнення несправностей під час їх роботи може призвести до порушення електропостачання відповідальних споживачів та зниження готовності комплексу озброєння до застосування. При цьому традиційний періодичний контроль дозволяє переважно оцінити поточний стан обладнання, але має обмежені можливості щодо завчасного визначення його погіршення. У цьому контексті перспективним напрямом є застосування технології цифрового двійника, яка дозволяє поєднати математичну модель електростанції з фактичними даними про режими її роботи та використовувати отриману інформацію для контролю і прогнозування технічного стану [1–3].

Результати дослідження

Технологія цифрового двійника передбачає створення динамічного цифрового представлення фізичного об'єкта, стан якого уточнюється відповідно до даних, отриманих під час його реального функціонування. На відміну від традиційного математичного моделювання, цифровий двійник передбачає систематичне оновлення моделі на основі фактичних експлуатаційних параметрів, що створює можливість не лише контролювати поточний стан обладнання, але й виявляти тенденції його зміни [2–4].

Стосовно пересувної електростанції цифровий двійник може формуватися на основі моделей її основних функціональних елементів: первинного двигуна, синхронного генератора, системи збудження та автоматичного регулювання напруги, систем керування і захисту, а також підключеного електричного навантаження. Така структура дозволяє враховувати взаємний вплив окремих складових електростанції та аналізувати зміну її параметрів у різних режимах функціонування. Можливість застосування цифрових двійників для контролю

технічного стану електричних та обертових машин розглядається у сучасних дослідженнях як один із напрямів розвитку прогностичного технічного обслуговування [1, 4].

Для оцінювання технічного стану пересувної електростанції до цифрового двійника можуть надходити значення вихідної напруги, струму навантаження, частоти, активної та реактивної потужності, частоти обертання первинного двигуна, струму збудження генератора, температури та вібрації основних вузлів, а також дані про тривалість роботи установки. Сукупне використання зазначених параметрів дозволяє оцінювати стан електростанції не за одним контрольованим показником, а за характером зміни декількох взаємопов'язаних параметрів.

Принцип функціонування запропонованої системи полягає у постійному порівнянні параметрів реальної пересувної електростанції з параметрами її цифрового двійника. За справного стану фактичні значення повинні відповідати розрахунковим у межах допустимих відхилень. Поява та поступове збільшення розбіжності між ними може свідчити про зміну технічного стану окремого елемента установки. Аналіз характеру та швидкості таких змін створює можливість завчасного визначення передвідмовного стану обладнання [1, 5].

Наприклад, поступове підвищення температури генератора при незмінному навантаженні, збільшення вібрації, нестабільність частоти або зміна струму збудження, необхідного для підтримання номінальної напруги, можуть свідчити про розвиток відповідної несправності. При традиційному контролі окреме значення такого параметра може ще знаходитися в допустимих межах. Цифровий двійник дозволяє додатково враховувати динаміку його зміни та взаємозв'язок з іншими контрольованими показниками.

Особливого значення при цьому набуває врахування режиму роботи пересувної електростанції. Значення температури, струму збудження, витрати пального та інших параметрів залежать від величини й характеру навантаження, тривалості роботи та зовнішніх умов. Тому оцінювання технічного стану доцільно здійснювати шляхом порівняння фактичних параметрів не лише з їх номінальними значеннями, а з розрахунковими значеннями цифрового двійника для конкретного режиму функціонування.

На основі накопичення експлуатаційних даних може формуватися історія зміни технічного стану кожної пересувної електростанції. Це дозволяє перейти від виявлення вже наявної несправності до прогнозування моменту, коли зміна контрольованих параметрів може досягти граничних значень. Такий підхід є основою прогностичного технічного обслуговування, при якому рішення щодо проведення технічних робіт приймається з урахуванням фактичного стану обладнання та прогнозу його подальшої зміни [3, 5].

Загальний процес застосування цифрового двійника може включати отримання даних від пересувної електростанції, їх обробку, передачу до цифрової моделі, порівняння фактичних і розрахункових параметрів, визначення тенденцій їх зміни та формування прогнозу технічного стану. За результатами прогнозування обслуговуючий персонал може отримувати інформацію про можливе погіршення стану окремого вузла та необхідність проведення його додаткового діагностування або технічного обслуговування.

Перспективним напрямом подальшого розвитку такого підходу є застосування технологій штучного інтелекту. Накопичення значного обсягу інформації про режими роботи, характерні несправності та відповідні їм зміни контрольованих параметрів створює можливість використання алгоритмів машинного навчання для виявлення складних залежностей між діагностичними ознаками. У цьому випадку цифровий двійник може використовуватися як джерело розрахункових параметрів, а алгоритми штучного інтелекту – для класифікації технічного стану та прогнозування його подальшої зміни.

Разом із тим практичне впровадження цифрових двійників для пересувних електростанцій потребує вирішення низки питань. До них належать визначення найбільш інформативних діагностичних параметрів, забезпечення необхідної точності засобів їх вимірювання, створення адекватних математичних моделей окремих елементів електростанції та накопичення достатнього обсягу експлуатаційних даних. Окремого значення набуває забезпечення працездатності системи в різних режимах навантаження та умовах експлуатації, характерних для застосування пересувних електростанцій у складі систем електропостачання комплексів озброєння.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення структури цифрового двійника пересувної електростанції, визначення переліку контрольованих параметрів та встановлення закономірностей їх зміни при виникненні характерних несправностей. Це дозволить сформувати інформаційну основу для подальшого розроблення алгоритмів прогнозування технічного стану та переходу від планового технічного обслуговування до обслуговування з урахуванням фактичного стану обладнання.

Висновки

Застосування технології цифрового двійника дозволяє розширити можливості існуючих систем контролю пересувних електростанцій шляхом аналізу не лише поточних значень параметрів, але й характеру їх зміни в процесі експлуатації. Поєднання цифрової моделі з фактичними даними про роботу установки створює передумови для завчасного виявлення погіршення технічного стану та прогнозування виникнення несправностей.

Використання такого підходу в системах електропостачання комплексів озброєння дозволить підвищити обґрунтованість планування технічного обслуговування пересувних електростанцій, скоротити ймовірність виникнення раптових відмов та, як наслідок, підвищити надійність електропостачання споживачів.

Список використаних джерел

1. Ma H., Fan C., Zhang Y., Wang Q., Yu K., Ma Z. Digital twin-inspired methods for rotating machinery intelligent fault diagnosis and remaining useful life prediction: A state-of-the-art review and future challenges. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025. Vol. 232. Art. 112770. DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.112770.
2. Wei J., Yan C., Liu Y., Liu B., Wu L. Digital twins assisted for fault diagnosis of rotating machinery: a review. *Measurement*. 2025. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.118843.
3. Zhong D., Xia Z., Zhu Y., Duan J. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, Iss. 4. Art. e14534. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14534.
4. Falekas G., Karlis A. Digital Twin in Electrical Machine Control and Predictive Maintenance: State-of-the-Art and Future Prospects. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 18. Art. 5933. DOI: 10.3390/en14185933.
5. Liu H. Digital Twin-Driven Machine Condition Monitoring: A Literature Review. *Journal of Sensors*. 2022. Vol. 2022. Art. 6129995. DOI: 10.1155/2022/6129995.

Лагутін Геннадій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри електротехнічних систем комплексів озброєння та військової техніки факультету професійної військової та післядипломної освіти Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: genna.lagutin@gmail.com ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6337-1357>.

Куравська Надія Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехнічних систем комплексів озброєння та військової техніки факультету професійної військової та післядипломної освіти Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: kn649533@gmail.com ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7755-2899>.

Куравський Максим Віталійович – старший викладач кафедри електротехнічних систем комплексів озброєння та військової техніки факультету професійної військової та післядипломної освіти Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: darin6612@gmail.com ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9360-6850>.

Гончаров Володимир Олександрович – начальник навчально-лабораторного комплексу кафедри електротехнічних систем комплексів озброєння та військової техніки факультету професійної військової та післядипломної освіти Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул.

Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: yaropolk1972@gmail.com ORCID <https://orcid.org/0009-0001-2595-3380>.

Hennadii Ivanovich Lahutin – PhD in Engineering, Senior Lecturer at the Department of Electrical Systems of Weapons and Military Equipment Complexes, Faculty of professional military and postgraduate education of the Ivan Kozhedub **Kharkiv** National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: genna.lagutin@gmail.com ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6337-1357>.

Nadia Mikolayvna Kuravska – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Electrical Systems of Weapons and Military Equipment Complexes, Faculty of professional military and postgraduate education of the Ivan Kozhedub **Kharkiv** National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: kn649533@gmail.com ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7755-2899>.

Maksym Vitaliyovych Kuravskiy – Senior Lecturer at the Department of Electrical Systems of Weapons and Military Equipment Complexes, Faculty of professional military and postgraduate education of the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: darin6612@gmail.com ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9360-6850>.

Volodymyr Oleksandrovich Honcharov – Lecturer at the Department of Electrical Systems of Weapons and Military Equipment Complexes, Faculty of professional military and postgraduate education of the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: yaropolk1972@gmail.com ORCID <https://orcid.org/0009-0001-2595-3380>.