

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ НА БАЗІ MICROGRID

О. В. Окушко, кандидат технічних наук, доцент

В. А. Наливайко, кандидат технічних наук, доцент

І. П. Радько, кандидат технічних наук, доцент

Д. С. Сорокін, кандидат технічних наук, доцент

Д. Р. Кудрук, студент магістратури

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: ooaleks@ukr.net

Анотація. Розглянуто концепцію побудови інтелектуальної системи моніторингу та прогнозування технічного стану електрообладнання в межах децентралізованої енергетичної системи типу Microgrid. Запропоновано архітектуру системи Predictive Maintenance (PdM), що базується на використанні сенсорних мереж, технологій Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI) та аналітики великих даних (Big Data).

Розроблено математичну модель оцінки технічного стану електродвигунів, що враховує зміну основних електричних та механічних параметрів (струм, напруга, температура, вібрації, частота обертання). Запропоновано структуру PdM-процесу, що включає етапи збору, оброблення, аналізу даних і формування прогнозних рішень на основі алгоритмів машинного навчання.

Ключові слова: *Microgrid, Predictive Maintenance, моніторинг, електродвигун, штучний інтелект, Інтернет речей, Big Data, моделювання, технічний стан, енергоефективність*

Актуальність. Сучасні електроенергетичні системи потребують надійної роботи всіх елементів електрообладнання від низьковольтних споживачів до високовольтних підстанцій. Збої у будь-якій із ланок системи можуть спричинити простої виробництва, втрати енергії та значні фінансові збитки.

Традиційні методи обслуговування, засновані на періодичних оглядах, які не завжди дозволяють своєчасно виявити критичні відхилення. Інтеграція технологій Microgrid, Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту та великих аналітичних даних відкриває нові можливості для створення інтелектуальних систем моніторингу, які зможуть забезпечити повний контроль за станом електрообладнання.

Сучасні електроенергетичні системи розвиваються у напрямку підвищення ефективності, надійності та інтелектуальної взаємодії між споживачами та джерелами енергії. У цьому контексті ключову роль відіграє концепція Microgrid, що забезпечує гнучке управління розподіленими енергетичними ресурсами та можливість автономної роботи від загальної мережі.

Важливими складовими таких систем є електродвигуни, трансформатори, системи автоматизації, силова електроніка, освітлювальні установки та пристрої накопичення енергії. Їх надійність безпосередньо впливає на безперебійність технологічних процесів, енергоефективність та безпеку самого виробництва.

Попри технологічний прогрес, контроль технічного стану електрообладнання малої потужності (до 20 кВт), а саме електроприводів, компресорів, насосів, вентиляторів, зарядних систем тощо, залишається актуальною проблемою. Неконтрольоване зношування або раптові відмови таких пристроїв можуть призвести до зупинки виробничих ліній та суттєвих економічних втрат. При цьому традиційні підходи до технічного обслуговування електротехнологічного обладнання здебільшого мають реактивний характер, а саме, ремонт виконується після виникнення несправності, що збільшує ризики аварій, тривалість простоїв і витрати.

Впровадження систем моніторингу та прогнозування на базі Microgrid дає змогу перейти від планово-реактивного до проактивного й предиктивного обслуговування. Використання сенсорних мереж, технологій IoT, Big Data та AI забезпечує безперервний контроль параметрів роботи обладнання, раннє виявлення відхилень і прогнозування відмов. Це дозволяє оптимізувати режими роботи з урахуванням енергоефективності та продовжити термін служби обладнання.

Інтеграція таких технологій у рамках Smart Grid та Microgrid відкриває також нові перспективи для використання відновлюваних джерел енергії, зменшення експлуатаційних витрат і підвищення надійності енергопостачання промислових, комерційних і комунальних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Microgrid – це інтелектуальна енергосистема, яка інтегрує генерацію, споживачів і накопичувачі енергії, при цьому

забезпечуючи автономність, надійність і ефективність енергопостачання. Ключовою особливістю таких систем є постійний моніторинг і керування електрообладнанням у режимі реального часу.

Система керування Microgrid базується на поєднанні IoT-сенсорів, SCADA-систем, алгоритмів штучного інтелекту (AI) та цифрових двійників обладнання. Такий підхід забезпечує комплексний моніторинг, прогнозування відмов та диспетчерське управління мікромережею (рис. 1).

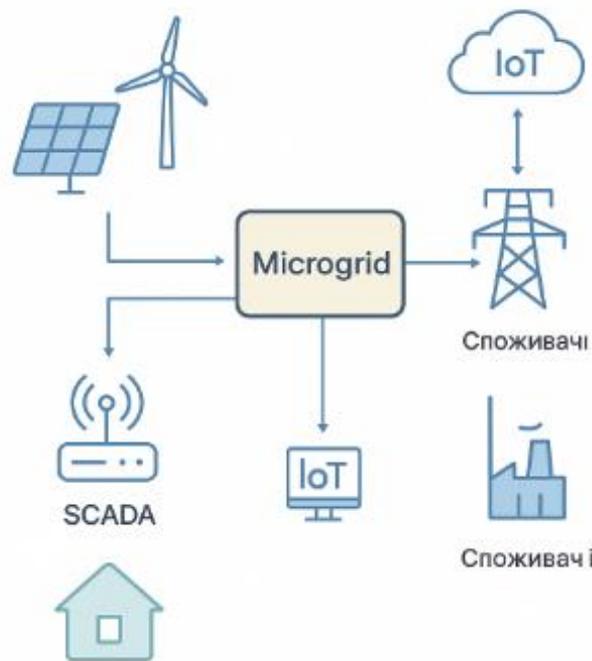


Рис. 1. Функціональна структура системи Microgrid SCADA та IoT

Так, зокрема, у дослідженнях [1, 2] описується PLC-SCADA система для автономної (islanded) мікромережі, яка об'єднує диспетчеризацію через НМІ (Human-Machine Interface), автоматичне завантаження даних у хмару, сигналізацію несправностей та обробку подій. Ця архітектура забезпечує інтеграцію з системами захисту, прогнозування навантаження та балансування потужностей, що дозволяє відстежувати параметри генераторів, трансформаторів, інверторів і кабельних мереж у режимі реального часу, тобто, такі централізовані SCADA-системи є системами, яка виконує диспетчерську функцію керування мікромережею.

При цьому в дослідженнях [3] SCADA розглядається вже не лише як інструмент диспетчеризації, але й як middleware-рівень, який забезпечує взаємодію

між локальними контролерами обладнання та системами веб-моніторингу. Такий підхід дозволяє зформувати багаторівневу архітектуру Microgrid, де локальні вузли (контролери генераторів, інверторів, систем накопичення) відповідають за швидке реагування, а SCADA координує енергетичний баланс і обмін даними між усіма компонентами системи. У цьому випадку інтеграція SCADA з веб-моніторингом забезпечить віддалене керування та діагностику електрообладнання, що особливо актуально для розподілених енергетичних систем із кількома географічно віддаленими вузлами.

Таким чином, у дослідженні [4] SCADA виступає інтелектуальним посередником між обладнанням та цифровою інфраструктурою. Ця концепція є перспективною для України, де зростає потреба у віддаленому контролі, прогнозуванні відмов і забезпеченні стійкості енергопостачання в умовах децентралізації.

Іншим напрямом використання SCADA-систем є інтеграції технологій автоматизації будівель із розподіленою генерацією. Так, наприклад в роботах [5] демонструється адаптація SCADA-систем для управління мікромережею у житлово-комунальному секторі (смарт-блдинги). Використання протоколів Modbus і KNX забезпечує сумісність між системами керування будівлею та енергетичними компонентами Microgrid.

Інтеграція фотоелектричних установок (PV) та акумуляторних систем у єдине кероване середовище при цьому дозволить оптимізувати розподіл енергії між локальним споживанням, зарядом батарей і мережею, здійснювати взаємодію з силовим обладнанням (інвертори, контролери заряду тощо) через Modbus та інтегрувати електричне освітлення, вентиляцію та інші інженерні системи будівлі через KNX.

У результаті це дасть змогу оптимізувати енергобаланс споживача, тобто система зможе динамічно балансувати енергоспоживання, визначаючи, коли вигідніше використовувати енергію з мережі, а коли із PV або накопичувачів. Це, в свою чергу, дасть змогу знизити пікові навантаження, витрати на електроенергію та підвищить ефективність керування, а моніторинг стану електрообладнання у режимі

реального часу надасть диспетчеру доступ до ключових параметрів – потужності PV, рівня заряду батарей, параметрів мережі тощо.

Для України така інтеграційна модель має досить високий потенціал у сфері енергоефективності громадських і комерційних будівель. Поєднання фотоелектричних установок та акумуляторів може значно знизити витрати, поліпшити інтеграцію з системами «розумних будинків», які вже частково використовують KNX та підвищити локальну стійкість до аварій у мережі, забезпечуючи автономне живлення критично важливих об'єктів (школи, лікарні, адміністративні будівлі тощо [2]).

Мета дослідження - розробка концепції інтелектуальної системи моніторингу та прогнозування стану різних типів електрообладнання на базі Microgrid.

Матеріали та методи дослідження. Одним із ключових напрямів розвитку сучасних Microgrid є прогностичне технічне обслуговування (Predictive Maintenance, PdM) електрообладнання, зокрема електродвигунів (рис. 2). Його сутність полягає у використанні алгоритмів аналізу даних, методів машинного навчання та систем моніторингу для передбачення потенційних відмов до їх фактичного виникнення. Це означає перехід від традиційного планово-попереджувального до проактивного управління життєвим циклом обладнання.

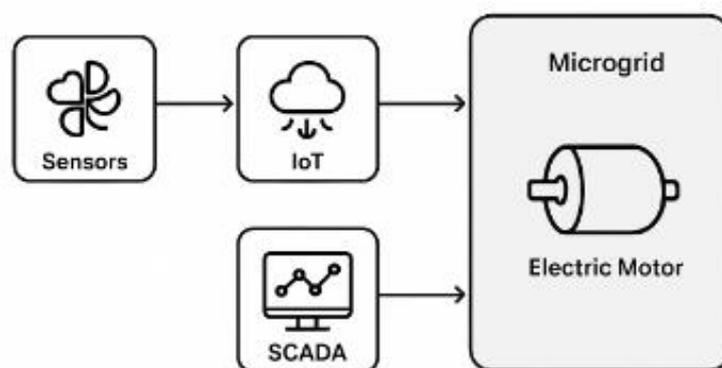


Рис. 2. Архітектура системи Predictive Maintenance для електродвигунів у складі Microgrid

На рис. 3 наведено порівняння традиційного планово-попереджувального і прогностичного обслуговування електрообладнання.

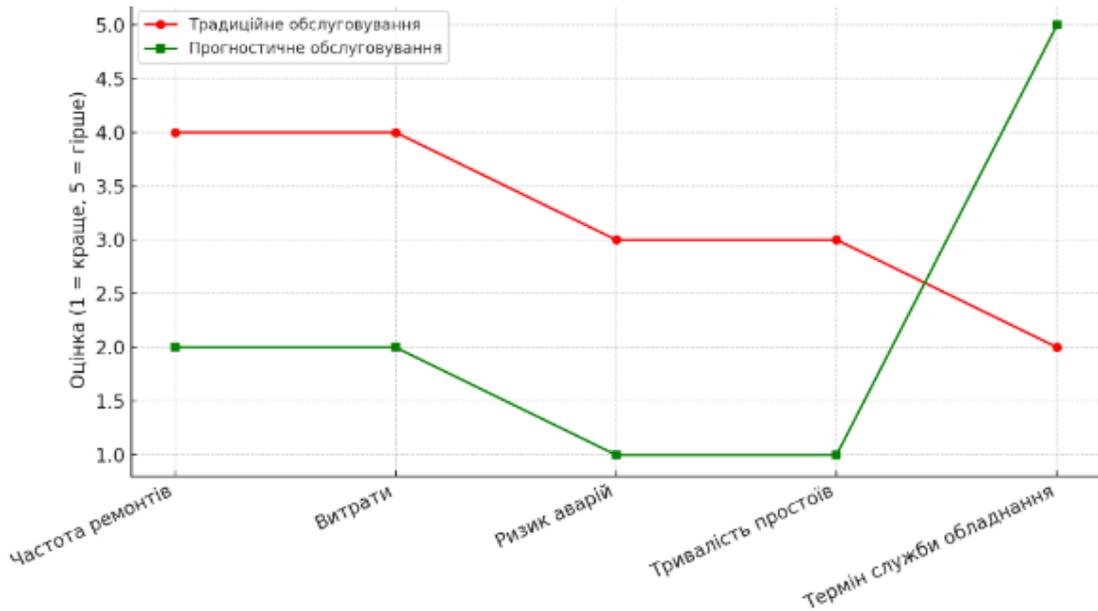


Рис. 3. Порівняльний графік традиційного планово-попереджувального і прогностичного технічного обслуговування

PdM базується на аналізі великих масивів даних, отриманих від сенсорів, і дозволяє своєчасно виявляти ознаки деградації елементів системи. Таким чином, технічне обслуговування виконується лише за необхідності, що знижує експлуатаційні витрати, скорочує простої та підвищує надійність роботи обладнання.

У дослідженнях [3, 4] запропоновано інтеграцію технологій Інтернету речей (IoT) і штучного інтелекту (AI) для моніторингу параметрів роботи електродвигунів у режимі реального часу. Автори показали, що застосування методів машинного навчання дозволяє прогнозувати відмови з точністю понад 94 %, зменшуючи при цьому простої електрообладнання майже на 30 %.

Українські дослідники також приділяють значну увагу проблемі моніторингу технічного стану електроприводів. Так, у [6, 7] підкреслюється важливість інтеграції цифрових сенсорів і систем обліку енергії в рамках промислових IoT-мереж. Це забезпечує безперервний контроль параметрів електродвигунів та дозволяє знизити енергетичні втрати на 10–15 % і скоротити кількість аварійних зупинок на понад 20 %.

Останні тенденції розвитку систем для прогностичного технічного обслуговування пов'язані з упровадженням інтелектуальних сенсорних систем, здатних генерувати великі обсяги даних, та використанням технологій Big Data для їх аналізу, що дозволяє досліджувати взаємозв'язки між ключовими параметрами роботи двигунів, а саме температурою, струмом, вібраціями та напругою. Як зазначено в дослідженнях [1, 5], глибокий аналіз таких даних забезпечує раннє виявлення аномалій і підвищує точність прогнозування відмов.

Результати досліджень та їх обговорення. Концепція Microgrid виступає базовою платформою для інтеграції систем моніторингу та управління електродвигунами. Вона об'єднує локальні джерела енергії, накопичувачі, споживачів і контролери у децентралізовану систему з автономним керуванням, що забезпечує гнучкість і стійкість енергопостачання.

Як показують наші дослідження [7, 8], впровадження системи моніторингу електродвигунів у Microgrid забезпечить не лише контроль технічного стану, але й оптимізацію енергопотоків, яка досягається не лише гнучкому розподілу навантаження між агрегатами, але й можливості балансування енергії з відновлюваних джерел.

Особливої ваги впровадження прогностичного технічного обслуговування набуває в умовах України, де актуальними є завдання підвищення стійкості локальних енергетичних систем в умовах нестабільного енергопостачання. Впровадження таких систем для прогностичного технічного обслуговування сприятиме зниженню витрат підприємств на ремонт і технічне обслуговування, підвищить їх енергоефективність та забезпечить безперебійне живлення критично важливих об'єктів, наприклад лікарень, шкіл, адміністративних і військових установ [8, 9].

Таким чином, прогностичне технічне обслуговування виступає не лише технічним інструментом, але й стратегічним елементом розвитку Microgrid, що поєднує надійність, економічність та безпеку енергопостачання. Його інтеграція з IoT, AI, Big Data та цифровими двійниками створює основу для інтелектуальних енергосистем нового покоління.

Наші дослідження охоплювали моделювання процесів прогнозування у системах Predictive Maintenance (PdM), які є ключовим елементом формування інтелектуальної інфраструктури Microgrid. Такі системи забезпечують своєчасне виявлення потенційних відмов електродвигунів та іншого електрообладнання, що дозволяє переходити від реактивного до проактивного технічного обслуговування.

Моделювання передбачало побудову взаємозв'язків між основними етапами PdM-процесу, а саме збором, обробленням, аналізом даних та формуванням прогнозних рішень на основі алгоритмів машинного навчання.

Розроблена інтелектуальна система моніторингу є складовою локальної енергомережі Microgrid і включає такі компоненти сенсорну підсистему для вимірювання електричних і механічних параметрів (струму, напруги, температури, вібрацій), модуль збору даних, який забезпечує передавання інформації у хмарне середовище, обчислювальний модуль із застосуванням елементів штучного інтелекту для аналізу та прогнозування технічного стану та систему візуалізації, яка відображає результати аналізу та формує рекомендації для технічного персоналу.

Математична модель оцінки технічного стану електродвигуна базується на сукупності параметрів, що змінюються у часі. Узагальнено її можна подати у вигляді системи функціональних залежностей:

$$S(t) = f(I(t), U(t), T(t), \alpha(t), \omega(t)) \quad (1)$$

де $S(t)$ – інтегральний показник технічного стану електродвигуна в момент часу t ; $I(t)$ – миттєве значення струму; $U(t)$ – напруга живлення; $T(t)$ – температура обмоток або корпусу електродвигуна; $\alpha(t)$ – вібраційне прискорення; $\omega(t)$ – частота обертання ротора.

За результатами моделювання та випробувань встановлено, що похибка прогнозування відмов електродвигунів не перевищує 8 %, система здатна виявляти аномалії за 1 – 2 години до фактичного виходу з ладу, економія витрат на обслуговування становить 15–20 % у порівнянні з планово-попереджувальним підходом.

Математична модель і розроблена система підтверджують ефективність інтеграції методів штучного інтелекту, IoT і Microgrid у моніторинг

електродвигунів. Її впровадження дозволяє переходити від реактивного до прогнозного технічного обслуговування, підвищувати надійність і енергоефективність електромеханічних систем та забезпечувати автономність і адаптивність енергетичних процесів у локальних мережах.

Висновки та перспективи

1. У роботі проведено комплексне дослідження принципів побудови інтелектуальної системи моніторингу та прогнозування технічного стану електрообладнання в межах енергетичної мікромережі (Microgrid). Розроблена архітектура системи базується на поєднанні сенсорних мереж, технологій Інтернету речей (IoT), алгоритмів штучного інтелекту (AI) та аналітики великих даних (Big Data).

2. Отримані результати підтверджують ефективність використання концепції Predictive Maintenance (PdM) для забезпечення безперервного контролю параметрів роботи електродвигунів і підвищення надійності енергосистеми. Запропонована математична модель стану обладнання, яка дозволяє комплексно оцінювати зміну електричних і механічних характеристик двигуна в часі.

3. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення адаптивних алгоритмів прогнозування з використанням глибоких нейронних мереж для аналізу параметрів електродвигунів, створення цифрових двійників (Digital Twins) для моделювання деградаційних процесів і віртуального тестування режимів роботи та інтеграцію PdM-систем із платформами SCADA/EMS для автоматичного формування заявок на обслуговування;

4. Реалізація зазначених напрямів сприятиме підвищенню рівня цифровізації, надійності та гнучкості локальних енергосистем в Україні, а також створенню основи для розвитку енергетичних платформ нового покоління – Smart Microgrid.

Список використаних джерел

1. Melo, J. J. R., Ishraque, M. F., Shafiullah, G. M., & Shezan, S. A. (2023). Centralized monitoring of a cost-efficient PLC-SCADA based islanded microgrid considering dispatch techniques. *The Journal of Engineering*, 2023(8), 1–11. <https://doi.org/10.1049/tje2.12293>

2. Іноземцев Г. Б., Окушко О. В., Козирський В. В. Енергозбереження в системах електропостачання сільського господарства. Київ: ЦП «Компринт», 2015. 151 с.
3. Li, S., Jiang, B., Wang, X., & Dong, L. (2017). Research and application of a SCADA system for a microgrid. *Technologies*, 5(2), 12. <https://doi.org/10.3390/technologies5020012>
4. Kermani, M., Adelmanesh, B., Shirdare, E., Sima, C. A., Carni, D. L., & Martirano, L. (2021). Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications. *Renewable Energy*, 171, 1115-1127. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.008>
5. Benninger, M., Liebschner, M., & Kreischer, C. (2023). Fault detection of induction motors with combined modeling- and machine-learning-based framework. *Energies*, 16(8), 3429. <https://doi.org/10.3390/en16083429>
6. Денисюк, С. П., & Бойко, І. Ю. (2021). Підвищення енергоефективності Microgrid з дизель-генераторами. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2021.247354>
7. Nalyvaiko, V., Radko, I., Okushko, O., Bereziuk, A., Antypov, I., & Mrachkovska, N. (2023). Research of roof solar power plant in hot water supply installations. *Przegląd Elektrotechniczny*, 99(4), 98–101. <https://doi.org/10.15199/48.2023.04.17>
8. Радько І. П., Лут М. Т., Наливайко В. А., Окушко О. В. Розробка проекту теплового пункту навчального корпусу НУБіП України. *Енергетика і автоматика*. 2021. С. 86–94.
9. Радько І. П., Наливайко В. А., Окушко О. В., Міщенко А. В., Антипов Є. О. Дослідження шляхів зменшення витрат теплоносіїв в НУБіП України. *Енергетика і автоматика*. 2019. С. 114 – 127.

References

1. Melo, J. J. R., Ishraque, M. F., Shafiullah, G. M., & Shezan, S. A. (2023). Centralized monitoring of a cost-efficient PLC-SCADA based islanded microgrid considering dispatch techniques. *The Journal of Engineering*, 2023(8), 1–11. <https://doi.org/10.1049/tje2.12293>
2. Inozemtsev G. B., Okushko O. V., Kozyrskiy V. V. (2015). Enerhozberezhennia v systemakh elektropostachannia silskoho hospodarstva [Energy saving in agricultural power supply systems]. Kyiv: CP "Komprint", 151.
3. Li, S., Jiang, B., Wang, X., & Dong, L. (2017). Research and application of a SCADA system for a microgrid. *Technologies*, 5(2), 12. Available at: <https://doi.org/10.3390/technologies5020012>
4. Kermani, M., Adelmanesh, B., Shirdare, E., Sima, C. A., Carni, D. L., & Martirano, L. (2021). Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications. *Renewable Energy*, 171, 1115-1127. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.008>
5. Benninger, M., Liebschner, M., & Kreischer, C. (2023). Fault detection of induction motors with combined modeling- and machine-learning-based framework. *Energies*, 16(8), 3429. Available at: <https://doi.org/10.3390/en16083429>

6. Denisyuk, S. P., Boyko, I. Yu. (2021). Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti Microgrid z dyzel-heneratoramy [Increasing the energy efficiency of Microgrid with diesel generators]. Energy: economics, technologies, ecology, 2. Available at: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2021.247354>

7. Nalyvaiko, V., Radko, I., Okushko, O., Bereziuk, A., Antypov, I., & Mrachkovska, N. (2023). Research of roof solar power plant in hot water supply installations. Przegląd Elektrotechniczny, 99(4), 98–101. Available at: <https://doi.org/10.15199/48.2023.04.17>

8. Radko I. P., Lut M. T., Nalyvaiko V. A., Okushko O. V. (2021). Rozrobka proektu teplovoho punktu navchalnoho korpusu NUBiP Ukrainy [Development of a project for a heating station for the educational building of the NULES of Ukraine]. Energy and Automation, 86–94.

9. Radko I. P., Nalyvaiko V. A., Okushko O. V., Mishchenko A. V., Antipov I. O. (2019). Research on ways to reduce coolant costs at NUBiP of Ukraine [Research on ways to reduce coolant costs in NULES of Ukraine]. Energy and Automation, 114 – 127.

INTELLIGENT SYSTEM FOR MONITORING AND FORECASTING THE STATE OF ELECTRICAL EQUIPMENT BASED ON MICROGRID

O. Okushko, V. Nalyvaiko, I. Radko, D. Sorokin, D. Kydryk

Abstract. *The concept of building an intelligent system for monitoring and forecasting the technical condition of electrical equipment within a decentralized energy system of the Microgrid type is considered. The architecture of the Predictive Maintenance (PdM) system is proposed, based on the use of sensor networks, Internet of Things (IoT) technologies, artificial intelligence (AI) and big data analytics (Big Data).*

A mathematical model for assessing the technical condition of electric motors is developed, which takes into account changes in the main electrical and mechanical parameters (current, voltage, temperature, vibrations, speed). The structure of the PdM process is proposed, which includes the stages of collecting, processing, analyzing data and forming predictive solutions based on machine learning algorithms.

Key words: *Microgrid, Predictive Maintenance, monitoring, electric motor, artificial intelligence, Internet of Things, Big Data, modeling, technical condition, energy efficiency*