

## **ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ МАСЦО: ПІДХОДИ, ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ**

**Y.B. Maksymyak**

### **INTELLIGENT HEALTH-MONITORING SYSTEMS FOR LACAS: APPROACHES, CHALLENGES, AND DEVELOPMENT PROSPECTS**

Сучасні МАСЦО, інтегровані з системами цивільного захисту та протиповітряного оповіщення, працюють в умовах підвищених ризиків: тривалі відключення електроенергії, деградація радіоканалів, перевантаження мережевої інфраструктури, старіння акумуляторів та силового обладнання. Відмова одного вузла в момент надзвичайної ситуації може призвести до втрати часу на оповіщення населення, що робить задачу підвищення надійності й прогнозованості роботи МАСЦО критично важливою.

Світовий досвід використання ШІ для структурного та інфраструктурного моніторингу (structural health monitoring, SHM) показує ефективність ML-методів для раннього виявлення деградації й ушкоджень у мостах, будівлях, енергетичній та міській інфраструктурі [2, 3]. Для підвищення надійності під час НС доцільна гібридна архітектура: поєднання центральної аналітики з легкими edge-модулями, що здатні локально оцінювати базові індикатори здоров'я вузла навіть при частковій втраті зв'язку. Ефективність ШІ-моделей визначається насамперед якістю та репрезентативністю даних [1, 4]. Для МАСЦО потрібні різні типи телеметрії: енергетичні параметри, теплові параметри, мережеві параметри, службові журнали та події.

Основні проблеми з даними для навчання ШІ: різна частота опитування сенсорів та відсутність єдиної часової сітки, пропуски даних при збоях живлення або зв'язку, розсинхронізація часових міток між вузлами, неоднорідні формати та протоколи (SNMP, власні API, файли логів, модбус тощо), сильний дисбаланс класів: реальні відмови трапляються рідко, а більшість спостережень відповідає «нормі» [1]. У такій ситуації особливо важливими стають симулятори телеметрії (цифрові двійники вузлів МАСЦО), які дозволяють: відтворювати сценарії з рідкісними, але критичними подіями (відмова АКБ у розпал тривалого відключення мережі, незапуск підсилювача під час тривоги, деградація радіоканалу в окремому мікрорайоні), генерувати збалансовані датасети для навчання та валідації моделей, перевіряти стійкість алгоритмів до «брудних» даних (NaN, одиничні викиди, стрибки показників). Доцільно будувати конвеєр обробки даних (data pipeline), що включає: інжест даних (реальні вузли поєднанні з симуляторами), нормалізацію часової сітки, фізичні валідації (узгодженість напруги й SOC, енергетичний баланс, теплові обмеження), виявлення та маркування аномалій, формування ML-датасету з чітко визначеними ознаками й цільовими змінними.

Порівняно з класичним регламентним обслуговуванням (періодичні огляди) та реактивним підходом («ремонт після відмови»), використання ШІ в МАСЦО дає низку практичних переваг [1, 2, 5]:

- Зменшення ймовірності недоступності вузлів у момент НС.
- Оптимізація виїздів та ремонтних робіт.
- Інтегральний індекс здоров'я вузла (health index).

- Прогнозування моменту виходу з ладу (RUL-оцінки).
- Підтримка прийняття рішень операторами та органами управління.

Запропоноване рішення передбачає побудову інтелектуальної системи моніторингу працездатності МАСЦО, яка аналізує телеметрію з робочих станцій (живлення, акумулятор, підсилювач, мережа, температура, диски) та автоматично визначає їхній технічний стан у режимі 24/7.

Для навчання обрано градієнтний бустинг над деревами рішень (модель LightGBM) як основну модель класифікації стану вузла (класи типу *Normal / Degraded / Critical / Failed*), оскільки вона добре працює з табличними даними, враховує нелінійні зв'язки між параметрами та стійка до шуму в телеметрії.

Планується досягти: високої якості класифікації (цільовий показник — масго F1 не нижче ~0.85 для основних класів), зменшення кількості хибних тривог при збереженні чутливості до реальних відмов, можливості раннього виявлення деградації (за кілька годин/днів до фактичного відмовлення вузла) для переходу від реактивного до проактивного обслуговування МАСЦО.

Інтелектуальні системи контролю працездатності МАСЦО на базі методів III є перспективним інструментом підвищення надійності та стійкості систем оповіщення населення. На відміну від традиційних підходів, що спираються переважно на періодичні регламентні перевірки або реагування «за фактом» відмови, такі системи здатні виявляти ранні ознаки деградації вузлів, прогнозувати ймовірність відмови та оцінювати ризики недоступності окремих елементів або цілих фрагментів інфраструктури оповіщення. Це створює основу для переходу від реактивного або суто регламентного обслуговування до ризик-орієнтованих стратегій технічної експлуатації, коли обсяг, пріоритетність і черговість робіт з обслуговування та ремонту визначаються не лише формальним графіком, а й поточним технічним станом обладнання, критичністю об'єкта, прогнозованим впливом відмови в умовах надзвичайних ситуацій та воєнних загроз.

### Література

1. Tsallis C., Papageorgas P., Piromalis D., Munteanu R.A. Application-Wise Review of Machine Learning-Based Predictive Maintenance: Trends, Challenges, and Future Directions // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 9. Article 4898. URL: <https://doi.org/10.3390/app15094898> (Дата звернення: 28.11.2025)
2. Plevris V., Papazafeiropoulos G. AI in Structural Health Monitoring for Infrastructure Maintenance and Safety // Infrastructures. 2024. Vol. 9, No. 12. – Article 225. – URL: <https://doi.org/10.3390/infrastructures9120225> (Дата звернення: 28.11.2025)
3. OECD. Artificial Intelligence for Advancing Smart Cities. Issues Note of the OECD Programme on Smart Cities and Inclusive Growth. Paris : OECD, 2025. – 70 p URL: <https://www.oecd.org/> – Дата звернення: 28.11.2025.
4. Abd Wahab N.H., Hasikin K., Lai K.W. та ін. Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices // PeerJ Computer Science. – 2024. – Vol. 10. – Article e1943. URL: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1943> (Дата звернення: 28.11.2025)
5. Smart City Systems & Solutions. Proactive Urban Management: AI and Predictive Maintenance Systems for Smart City Infrastructure. 30.05.2025. URL: <https://www.smartcityss.com/resources/proactive-urban-management-ai-and-predictive-maintenance-systems-for-smart-city-infrastructure> (Дата звернення: 28.11.2025).