

УДК 004.85:004.05:621.311.26

DOI: 10.31673/2412-9070.2026.025711

**О. В. БАРАБАШ**, д-р техн. наук, професор;

ORCID: 0000-0003-1715-0761

**О. В. СВИНЧУК**, канд. фіз.-мат. наук, доцент;

ORCID: 0000-0001-9032-6335

**О. І. БАНДУРКА**, PhD, старший викладач;

ORCID: 0000-0002-8059-1861

**О. С. РУДЕНКО**, студент,

ORCID: 0009-0008-6748-1685

Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»

### ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ АУТОНОМНИХ ЕНЕРГОКОМПЛЕКСІВ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

*У статті вирішується актуальна науково-практична задача забезпечення функціональної стійкості систем моніторингу автономних енергокомплексів в умовах динамічних технічних збоїв, системних аномалій та критичних навантажень. Актуальність дослідження зумовлена гострою необхідністю збереження цілісності телеметричних даних в умовах нестабільного функціонування енергетичної інфраструктури, де традиційні методи резервування демонструють надмірну інертність і не здатні забезпечити необхідну швидкість реакції на стрімку зміну параметрів мережі.*

*Розроблено інтелектуальний програмний комплекс, що поєднує функції предиктивної діагностики та адаптивного резервного копіювання у режимі реального часу. Особливість запропонованого підходу полягає у синергетичному використанні двох алгоритмів машинного навчання: Isolation Forest для миттєвого виявлення поточних аномалій у багатовимірних масивах даних та Random Forest для прогнозування майбутніх критичних станів на основі аналізу історичних даних. Такий комплексний підхід дозволяє реалізувати стратегію випереджувального управління, ініціюючи збереження даних до моменту настання фактичного збою.*

*Програмна реалізація системи базується на тривірневій архітектурі та включає модулі інтелектуального аналізу, автоматизованого планування резервування та рольову модель доступу. Експериментальна апробація на реальних масивах телеметрії підтвердила високу ефективність системи: модуль предиктивного аналізу забезпечує стабільну роботу навіть при пікових навантаженнях, що гарантує високу функціональну стійкість та цілісність інформації в автономних енергетичних мережах.*

**Ключові слова:** функціональна стійкість, автономні енергокомплекси, архітектура програмного забезпечення, інтелектуальний моніторинг, машинне навчання, аномалії, аналіз даних, резервне копіювання даних.

#### Постановка завдання

Сьогодні стабільне електропостачання є фундаментом життєдіяльності приватного та державного секторів. Його надійність напряму залежить від точності керування мережами, тому в умовах систематичних руйнувань енергетичної інфраструктури України завдання збереження даних щодо роботи енергосистеми стає пріоритетним. Відсутність доступу до цієї інформації або її втрата через знеструмлення тягне за собою ризики критичних технічних помилок та економічних збитків.

© Барабаш О. В., Свинчук О. В., Бандурка О. І., Руденко О. С., 2026

У сучасних умовах експлуатації автономних енергетичних комплексів одним із пріоритетних завдань є забезпечення функціональної стійкості програмного забезпечення моніторингу. Під цим терміном розуміється здатність системи продовжувати виконання критично важливих операцій, а саме збору телеметрії, аналізу станів та збереження цілісності даних, навіть у моменти виникнення аномальних навантажень або технічних збоїв. Вперше поняття функціональної стійкості було введено професором Машковим О. А. та професором Барабашом О. В. для складних технічних систем [1-2]. Подальші дослідження функціональної стійкості проводилися для моніторингу та прогнозування стану багатомодульних інформаційних систем відповідального призначення критичної інфраструктури [3], для підприємств металургійної та енергетичної промисловості [4-5]. Для автоматизації системи контролю та діагностування мікропроцесорних систем реалізовано методи самодіагностування на основі штучного інтелекту [6]. Проводилися дослідження функціональної стійкості також для структури інформаційної телекомунікаційної мережі [7] та навігаційного забезпечення повітряних суден цивільної авіації [8].

Незважаючи на значний науковий доробок у цій сфері, практична реалізація подібних концепцій у сучасній енергетиці стикається з новими технологічними бар'єрами. Інертність традиційних методів збереження даних не дозволяє повною мірою реалізувати концепцію функціональної стійкості в умовах високошвидкісних потоків інформації, характерних для новітніх енергетичних комплексів. Саме тому, надзвичайно важливим стає розроблення комплексного програмного рішення, яке буде поєднувати у собі функціонал автоматизованого резервного копіювання з можливостями інтелектуального аналізу даних та виявленням аномалій у роботі енергетичних систем.

#### *Аналіз останніх досліджень та публікацій*

Сучасний стан розвитку інформаційних технологій характеризується активним впровадженням методів машинного навчання для аналізу великих масивів даних у поєднанні з алгоритмами автоматизованого резервування для забезпечення відмовостійкості складних систем. Питання кількісної оцінки функціональної стійкості за допомогою багатопараметричних нейронних мереж було розглянуто у статті [9]. Дослідження методів оптимізації та розпаралелювання алгоритмів кластеризації на основі машинного навчання в інтелектуальних інформаційних системах представлено у роботі [10]. Для забезпечення функціональної стійкості програмно-керованих мереж в умовах стохастичних коливань трафіку запропоновано метод прогнозування навантаження на основі авторегресійних моделей та розкладання випадкового процесу за схемою Карунена–Лоева [11]. Для оптимізації автономного управління мікромережами та підвищення їхньої надійності у [12] запропоновано використання глибокого навчання з підкріпленням. Питання проактивного технічного обслуговування на основі штучного інтелекту та цифрових двійників для забезпечення життєздатності промислових систем в умовах невизначеності розглянуто в роботі [13]. Дослідження ефективності комбінованих моделей Transformer-GAN для детекції аномалій в інтелектуальних мережах розподілу електроенергії, представлено у [14].

Для створення надійної системи також необхідно проаналізувати існуючі системи, які використовують резервне копіювання та методи машинного навчання.

Veeam Backup & Replication – це програмне забезпечення для захисту даних та їх відновлення після аварійних ситуацій, яке дозволяє створювати резервні копії на рівні образу для віртуальних, фізичних та хмарних машин [15]. Система використовує інтелектуальні механізми моніторингу та аналітики, що дозволяють створювати резервні копії та виявляти аномалії у процесах захисту даних. Проте це програмне забезпечення орієнтоване на IT-інфраструктуру та віртуалізовані середовища.

Acronis Cyber Protect – це програмне забезпечення, яке має функціонал резервного копіювання, кібербезпеки та управління кінцевими точками в єдиній платформі [16]. Проте архітектура цього рішення орієнтована передусім на протидію зовнішнім атакам, залишаючи поза увагою специфічні завдання моніторингу та предиктивної діагностики технічних аномалій, притаманних саме енергетичному сектору.

IBM Storage Protect – це платформа для захисту даних, яка забезпечує масштабоване резервне копіювання, відновлення даних, а також довготривале зберігання інформації в гібридних хмарах і локальних середовищах [17]. Ключовою перевагою даного рішення є механізм детекції аномалій, що базується на інтелектуальному аналізі процесів реплікації та збереження даних. Проте, даний продукт має високу вартість, складність впровадження та орієнтованість на великі корпоративні середовища.

Отже, аналіз наукових джерел свідчить, що попри значні успіхи у використанні інтелектуальних методів моніторингу, питання створення цілісного механізму зв'язку результатів ML-аналізу з процесами випереджувального резервування даних в автономних енергосистемах залишається недостатньо опрацьованим. Водночас наявні комерційні рішення, хоч і пропонують потужний функціонал для IT-інфраструктури, не враховують специфічні вимоги та динаміку енергетичних систем.

### *Формулювання мети статті*

Метою дослідження є розробка інтелектуальної програмної системи автоматизованого резервного копіювання даних, що базується на методах машинного навчання для моніторингу та прогнозування технічних станів автономних енергосистем у режимі реального часу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- спроектувати базу даних для збереження інформації про параметри стану енергетичної системи;
- обґрунтувати та реалізувати алгоритми машинного навчання для детекції аномалій у потоці телеметрії;
- розробити програмний модуль інтелектуального резервування даних, що автоматично ініціюється при прогнозуванні критичних збоїв у роботі мережі.

### *Виклад основного матеріалу*

Автоматизація резервного копіювання в енергетичних системах базується на виявленні аномалій – суттєвих відхилень параметрів від штатного режиму експлуатації. Простіше кажучи, аномалією є будь-яка поведінка системи, що суперечить її «звичним» робочим ритмам. Наприклад, якщо напруга або температура обладнання раптово виходять за межі прогнозованого графіку, алгоритм розпізнає це як сигнал про можливу аварію та автоматично ініціює збереження даних. Процес розпізнавання та прогнозування таких порушень базується на моделях машинного навчання, які інтегровані в систему для безперервного аналізу вхідних даних. Завдяки навчанню на історичних вибірках, програма здатна автоматично класифікувати стан системи та оцінювати ймовірність виходу обладнання з ладу у реальному часі.

Для виявлення аномалій у системі моніторингу енергетичної системи було обрано алгоритм Isolation Forest, який здатний ефективно обробляти багатовимірні масиви взаємозалежних параметрів енергетичної системи. Алгоритм не потребує репрезентативної вибірки аномальних ситуацій для навчання, що дозволяє впроваджувати систему на об'єктах, де історичні дані про технічні порушення обмежені або відсутні. Важливою перевагою є адаптивність моделі до динамічних змін у системі.

Для прогнозування потенційних відхилень та майбутніх аномальних станів було обрано алгоритм Random Forest, яким має високу точність передбачень у задачах регресії та класифікації, а також стійкий до проблеми перенавчання через використання ансамблевого підходу та стохастичності у процесі побудови окремих дерев рішень. Застосування цього методу дозволяє моделювати критичні зміни в роботі енергосистеми на основі аналізу поточних трендів та історичних патернів.

Синергетична інтеграція обох алгоритмів дозволяє реалізувати багаторівневу систему моніторингу, що поєднує виявлення поточних аномалій у реальному часі з предиктивним аналізом майбутніх ризиків. Використання гібридного підходу дозволяє операторам переходити до стратегії випереджувального управління. Результати аналізу створили міцну теоретичну основу для розробки спеціалізованого програмного забезпечення резервного копіювання даних енергетичних систем на базі методів машинного навчання. Перехід до практичної пло-

щини висвітлює складність цього процесу, адже програмна реалізація такої системи базується на синергії архітектурних рішень та інтелектуальних обчислень.

Розроблена система складається з таких функціональних компонент:

- модулі збору та первинної обробки даних з енергетичної системи;
- інтегровані алгоритми машинного навчання для автоматичного виявлення потенційних аномалій та інтелектуального прогнозування майбутніх відхилень;
- комплексні механізми автоматичного та планового резервного копіювання критично важливих даних;
- підсистема управління користувачами для забезпечення гнучкого розмежування прав доступу та функціональних можливостей відповідно до ролей та рівня відповідальності різних категорій фахівців, що працюють з енергетичними системами.

Система має трирівневу архітектуру, яка представлена на рис. 1.

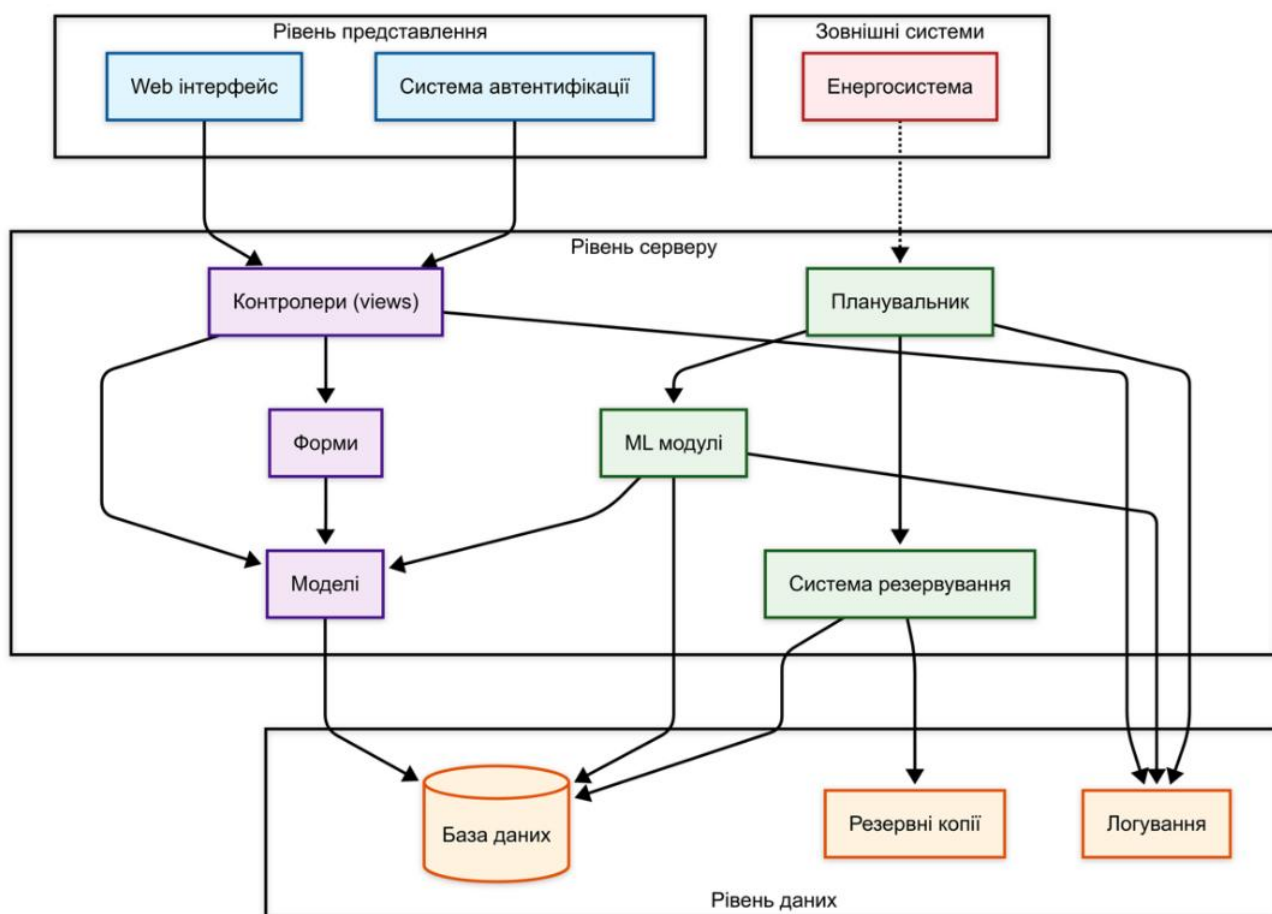


Рис. 1. Архітектура програмної системи

Рівень даних реалізовано на базі системи управління базами даних PostgreSQL, яка забезпечує надійне та ефективне зберігання критично важливої інформації про стан енергетичної системи. База даних містить взаємопов'язані таблиці для ключових параметрів (напруга, струм, потужність навантаження, температура обладнання) та даних про виявлені аномалії і результати їх аналізу. Є таблиці, у яких зберігається інформація про резервні копії, їх метадані, статус, системні налаштування та конфігураційні параметри. Схема бази даних, адаптована до специфіки часових рядів, оптимізована для швидкого доступу до великих обсягів історичних записів із можливістю їх фільтрації та агрегації.

Рівень серверу на базі вебфреймворку Django структурований як набір спеціалізованих модулів. Основними компонентами є модулі збору та первинної обробки даних, інтелектуальні модулі виявлення аномалій та прогнозування відхилень, а також підсистеми автоматичного резервного копіювання. Цей рівень забезпечує централізовану обробку, комплексний

аналіз даних, які надійшли, реалізує логіку автоматичного реагування та координує взаємодію компонентів.

Рівень представлення реалізований через Django Template Engine та фреймворк Bootstrap, що забезпечує сучасний адаптивний та інтуїтивно зрозумілий вебінтерфейс для користувачів. Інтерфейс структурований навколо центральної панелі моніторингу, яка надає комплексну візуалізацію поточного стану енергетичної системи у режимі реального часу.

Також система включає спеціалізовані сторінки для детального перегляду історичних даних, аналізу виявлених аномалій та їх тенденцій, а також повнофункціональний інтерфейс користувача для управління процесами резервного копіювання, налаштування системних параметрів та адміністрування користувачів.

Теоретичний аналіз архітектури серверного рівня дозволяє перейти до детального розгляду інтелектуальної складової системи. Програмна реалізація включає два основні алгоритми машинного навчання, які працюють синергетично для забезпечення комплексного аналізу стану енергосистеми.

Isolation Forest для виявлення аномалій – цей алгоритм реалізований як спеціалізований компонент для безперервного аналізу багатовимірних даних та автоматичної ідентифікації відхилень від патернів нормальної поведінки [18]. Перед подачею на вхід алгоритму всі ознаки (напруга, струм, потужність, температура) проходять етап підготовки, що забезпечує стабільність аналізу. Модель генерує числову оцінку аномальності для кожного нового запису, базуючись на принципі ізоляції об'єктів у структурі випадкових дерев. В основі алгоритму лежить розрахунок показника аномальності для кожного об'єкта. Оцінка базується на довжині шляху  $h(x)$ , необхідного для ізоляції точки  $x$  у випадково побудованому дереві. Оскільки довжина шляху залежить від обсягу даних  $n$ , для порівняння результатів використовується нормалізований показник, який обчислюється за формулою (1):

$$s(x, n) = 2 \frac{E(h(x))}{c(n)}, \quad (1)$$

де  $E(h(x))$  – середнє значення довжини шляху до точки  $x$  за всією сукупністю дерев у лісі,  $c(n)$  – це середня довжина шляху невеликого пошуку у бінарному дереві, яка використовується як нормалізуючий коефіцієнт для приведення результату на відрізок  $[0, 1]$ , де показник близько 1 свідчить про аномалію, а 0,5 і менше – про звичайний об'єкт.

Для вибірки об'ємом даних  $n$  середній шлях у формулі (1) розраховується як:

$$c(n) = 2H(n-1) - \frac{2(n-1)}{n}, \quad (2)$$

де  $H(i)$  – це гармонічне число, яке апроксимується як  $\ln(i)+0,58$  (стала Ейлера-Маскероні). Цей коефіцієнт дозволяє нівелювати вплив розміру на фінальну оцінку.

Random Forest для предиктивного аналізу – цей алгоритм функціонує як багатовимірна регресійна модель, налаштована на передбачення майбутніх значень критичних параметрів на основі історичних тенденцій [19]. Завдяки використанню сукупності незалежних регресійних моделей, алгоритм ефективно враховує складні нелінійні часові залежності між показниками. Система автоматично порівнює прогнозовані значення з граничними допусками. У разі виходу за межі безпечних діапазонів запис класифікується як «аномальний прогноз». Математично цей процес реалізується через обчислення підсумкового значення  $\hat{y}$  як середнього арифметичного результатів усіх дерев у сукупності за формулою (3):

$$\hat{y} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T f_t(x), \quad (3)$$

де  $T$  – загальна кількість дерев у сукупності,  $f_t(x)$  – прогноз  $t$ -го дерева для вектора вхідних даних  $x$ . Такий підхід дозволяє суттєво знизити дисперсію помилки прогнозу.

Для кожного дерева у сукупності вибір оптимального параметра для розділення даних у вузлах здійснюється шляхом мінімізації середньоквадратичної помилки (MSE). Для вузла  $v$

алгоритм шукає таку умову розподілу даних, яка забезпечує найменшу сумарну дисперсію цільової змінної в утворених гілках як:

$$Q = \sum_{i \in D_{left}} (y_i - \bar{y}_{left})^2 + \sum_{i \in D_{right}} (y_i - \bar{y}_{right})^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

де  $y_i$  – фактичне значення параметра телеметрії, а  $\bar{y}_{left}$  та  $\bar{y}_{right}$  – локальне середнє значення у відповідній гілці розщеплення.

Інтеграція цих двох алгоритмів здійснюється через центральний модуль ML, який координує життєвий цикл моделей. Він забезпечує автоматизоване навчання на історичних даних, регулярне застосування моделей до поточних даних, періодичне перенавчання для адаптації до еволюції характеристик енергетичної системи.

Підсистема резервного копіювання функціонує як інтелектуальний виконавчий компонент, що зберігає критично важливу інформацію у разі ідентифікації поточних аномалій або отримання предиктивного прогнозу про ймовірні збої. Дана підсистема базується на чотирьох взаємопов'язаних компонентах:

- механізм створення резервних копій – використовує стандартні утиліти PostgreSQL для генерації повного дампу бази даних. Це забезпечує цілісність історичних даних моніторингу, результатів ML-аналізу та системних конфігурацій для можливості повного відновлення стану системи;

- підсистема управління копіями, яка відповідає за життєвий цикл архівів, включаючи їх каталогізацію з детальними метаданими та автоматичне видалення згідно з політиками збереження. Кожна копія ідентифікується за часовою міткою та асоціюється з подією (аномалією), що спричинила її створення;

- планувальник резервного копіювання – для забезпечення регулярного створення резервних копій згідно з встановленим розкладом, незалежно від поточного стану виявлення аномалій в енергетичній системі;

- інтерфейс відновлення даних надає користувачам зручні можливості для вибору та відновлення системи з будь-якої доступної резервної копії.

Інтеграція з аналітичними компонентами забезпечується через тісну взаємодію підсистеми резервного копіювання з підсистемами виявлення аномалій та предиктивного аналізу. Це дозволяє автоматично та миттєво реагувати на виявлені або прогнозовані потенційні проблеми шляхом превентивного збереження критично важливих даних енергетичної системи у найбільш критичних ситуаціях.

Розроблена система пропонує адаптивний вебінтерфейс, що забезпечує зручний доступ до функцій моніторингу енергосистеми, аналізу виявлених аномалій, управління резервними копіями та налаштування системних параметрів відповідно до їхнього рівня доступу. Початковий доступ до вебзастосунку реалізовано через систему автентифікації. У системі реалізовано три ієрархічні рівні користувачів:

- звичайний користувач, який має права на моніторинг і перегляд даних про поточний стан системи в режимі реального часу без можливості внесення конфігураційних змін;

- менеджер, який володіє вже більш розширеним набором інструментів, що включає управління процесами резервного копіювання, проведення симуляції аномальних станів для перевірки роботи моделей та виконання інших технічних операцій;

- адміністратор, який має повний доступ до всього функціоналу, включаючи управління обліковими записами, зміну рівнів доступу та глобальне налаштування параметрів.

Після успішної авторизації користувач потрапляє на головну панель моніторингу (рис.2).

Панель моніторингу автоматично оновлюється із визначеним інтервалом без необхідності додаткового перезавантаження сторінки та містить наступні ключові елементи:

- інформаційні картки, які відображають зведену статистику;

- графік останніх показників візуалізує зміну основних параметрів енергетичної системи за останній період;

- список останніх записів показує останні зібрані дані з індикацією аномалій;

- список останніх аномалій виділяє найновіші виявлені аномалії з описом їх можливих причин;
- інформація про останні резервні копії, що відображає статус останніх створених резервних копій.

Для детального аналізу даних користувач може перейти на сторінку перегляду записів, яка надає розширені можливості для роботи з даними енергетичної системи (рис. 3).

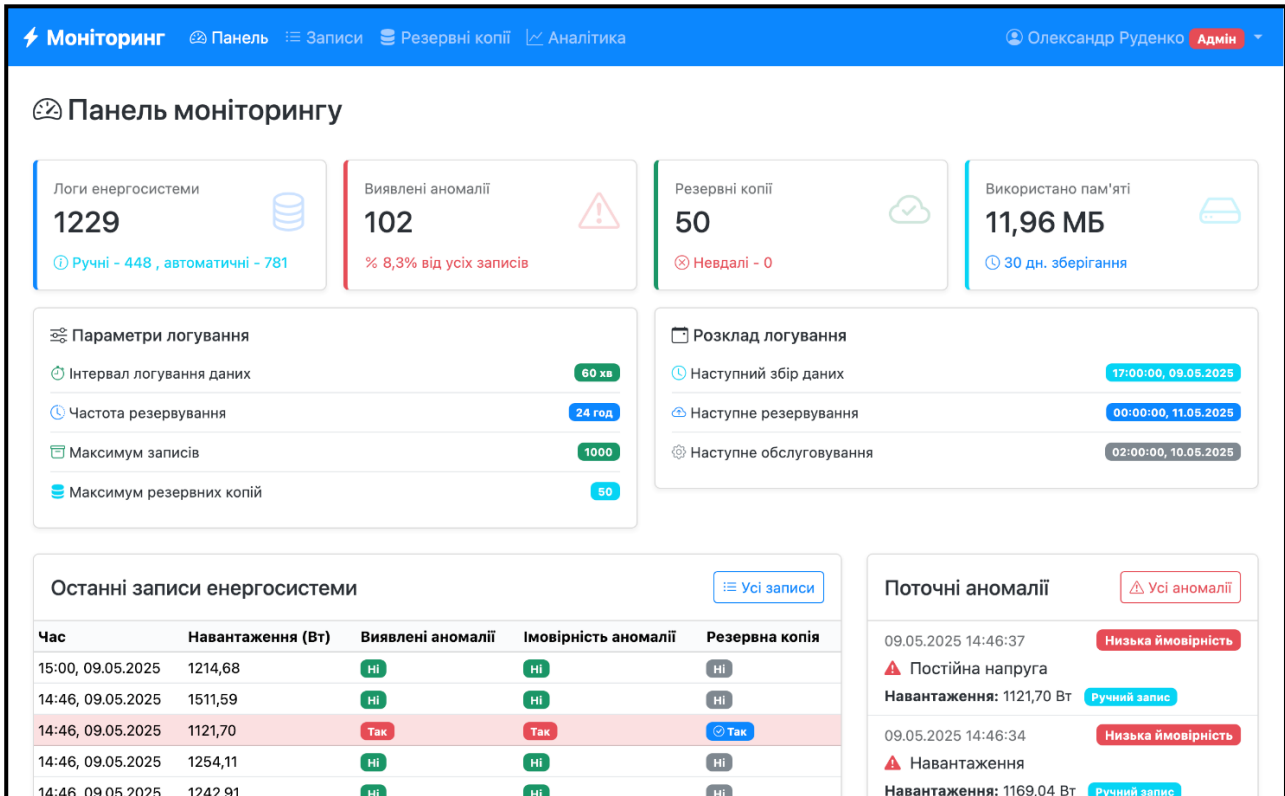


Рис. 2. Головна панель моніторингу системи

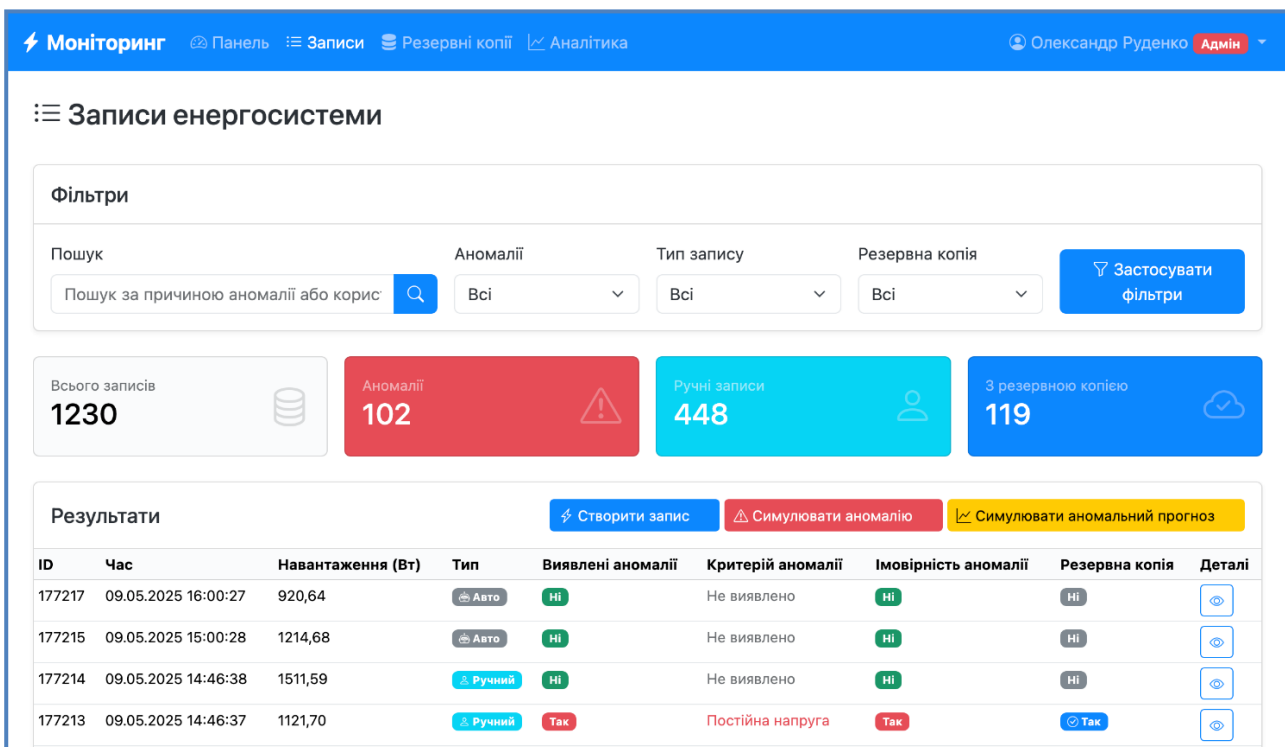


Рис. 3. Сторінка з детальною інформацією про енергосистему

Функціонал управління резервними копіями доступний користувачам з рівнем доступу «Менеджер» або ж «Адміністратор». Інтерфейс управління копіями надає можливості перегляду їхнього списку, фільтрації та пошуку, створення ручної, відновлення з копії та їхнє видалення. Система автоматично створює резервні копії при аномаліях, прогнозуванні потенційних проблем або за розкладом, встановленим адміністратором.

Працездатність розробленого програмного забезпечення та ефективність інтегрованих алгоритмів машинного навчання були перевірені в ході експериментального тестування на масивах даних телеметрії автономної енергосистеми (рис. 4). Практична апробація програмного забезпечення на масивах даних телеметрії енергосистеми підтвердила високу ефективність обраної архітектури та інтегрованих алгоритмів. Згідно з отриманими даними візуалізації аналітичної панелі, за звітний місяць системою було опрацьовано 959 записів, серед яких модуль на базі алгоритму Isolation Forest успішно ідентифікував 96 аномальних станів, що становить приблизно 10% від загального обсягу вибірки. Аналіз динаміки навантаження показав, що при середньому значенні у 1496,7 Вт система стабільно фіксувала пікові стрибки до 3962,3 Вт, які корелювали з періодами зростання кількості технічних відхилень. Особливу увагу привертає стрімке збільшення частоти аномалій наприкінці досліджуваного періоду, яке було завчасно класифіковано предиктивним модулем Random Forest як критичний прогноз, що дозволило системі ініціювати процедуру превентивного резервного копіювання до моменту настання потенційного збою.

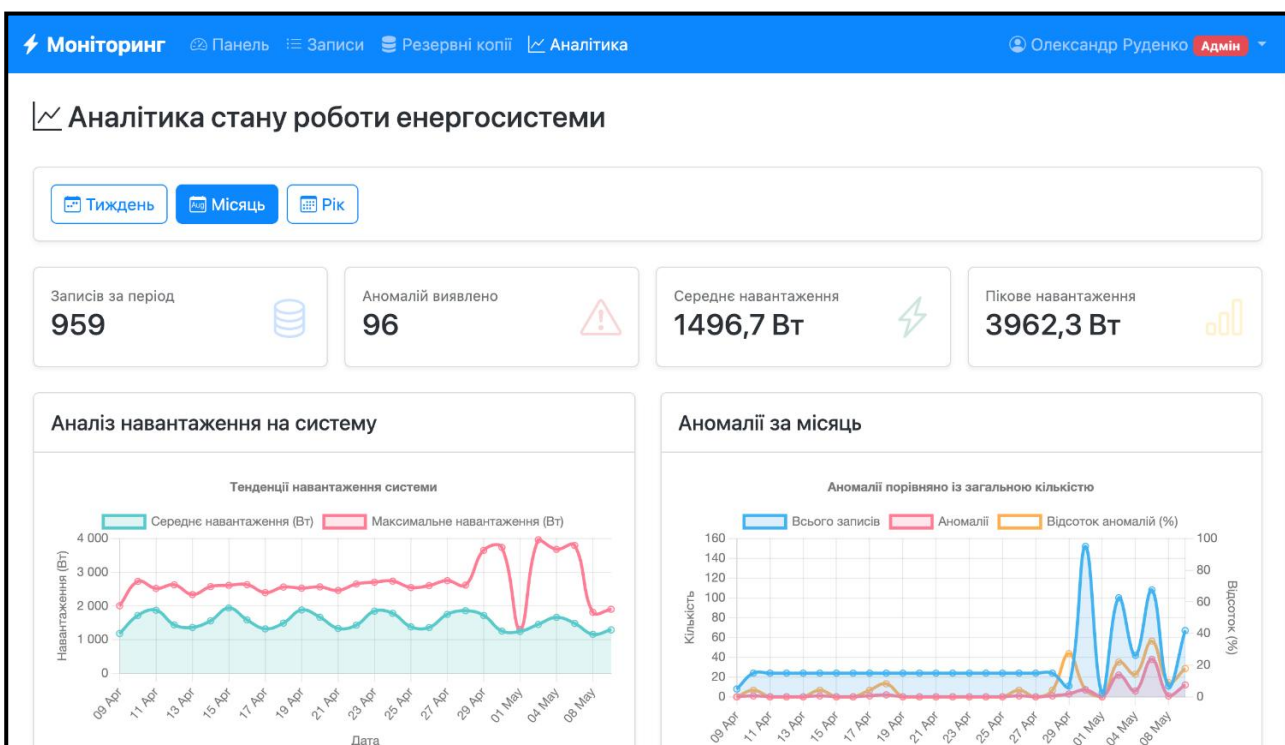


Рис. 4. Сторінка аналітики роботи системи

Таким чином, отримані результати демонструють здатність системи забезпечувати високу функціональну стійкість та цілісність даних в умовах нелінійної зміни робочих параметрів енергосистеми. Доведення високої функціональної стійкості розробленої системи базується на інтеграції предиктивних моделей, що дозволяють реалізувати стратегію випереджувального управління. Як демонструють результати тестування, система зберігає повну працездатність та консистентність бази даних при екстремальних навантаженнях та різкому зростанні кількості аномалій.

### Висновки

В результаті проведеного дослідження розроблено інтелектуальний програмний комплекс, який суттєво підвищує функціональну стійкість систем моніторингу автономних енергокомплексів шляхом інтеграції методів машинного навчання у процеси управління даними. Наукова новизна роботи полягає у впровадженні алгоритмів для виявлення аномалій (Isolation Forest) та прогнозування технічних станів (Random Forest), що забезпечує перехід від реагування на збої за фактом до завчасного захисного резервного копіювання даних енергетичної системи. Практична реалізація системи на базі трирівневої архітектури та її експериментальна апробація підтвердили високу ефективність запропонованих алгоритмів: система демонструє стабільну роботу при критичних навантаженнях, гарантуючи цілісність даних у моменти наближення до граничних режимів експлуатації, що є ключовим фактором живучості об'єктів енергетичної інфраструктури в умовах невизначеності.

### Внесок авторів

Олег БАРАБАШ – консультування щодо методології забезпечення функціональної стійкості; Ольга СВИНЧУК – розробка концепції та методів забезпечення функціональної стійкості на основі машинного навчання; Олена БАНДУРКА – аналіз джерел, підготовка огляду літератури; Олександр РУДЕНКО – програмне забезпечення, емпіричного дослідження.

### Декларація про штучний інтелект

Автор не використовував штучний інтелект при створенні матеріалів статті.

### Конфлікт інтересів

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів та підтверджує, що під час підготовки цієї роботи не існувало жодних комерційних, фінансових чи інших взаємовідносин, які могли б бути розцінені як такі, що здатні вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. Робота виконана відповідно до принципів академічної доброчесності, етичних норм проведення наукових досліджень та вимог редакційної політики щодо запобігання конфлікту інтересів.

### Список використаної літератури

1. Барабаш О.В. Побудова функціонально стійких розподілених інформаційних систем. Київ: НАОУ, 2004. 226 с. <https://bit.ly/3wM5tDL>
2. Собчук В.В., Барабаш О.В., Мусієнко А.П. Основи забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем підприємств в умовах впливу дестабілізуючих факторів: монографія. Київ: Міленіум, 2022. 272 с.  
[https://www.researchgate.net/publication/363474851\\_Basis\\_for\\_functional\\_stability\\_of\\_information\\_systems\\_businesses\\_under\\_the\\_influence\\_of\\_destabilizing\\_factors](https://www.researchgate.net/publication/363474851_Basis_for_functional_stability_of_information_systems_businesses_under_the_influence_of_destabilizing_factors)
3. Barabash, O., Sobchuk, V., Musienko, A., Laptiev, O., Bohomia, V., Kopytko, S. System Analysis and Method of Ensuring Functional Sustainability of the Information System of a Critical Infrastructure Object. In: Zgurovsky, M., Pankratova, N. (eds) System Analysis and Artificial Intelligence. Studies in Computational Intelligence, 2023. Vol 1107. Springer, Cham. P. 117-192.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-031-37450-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-37450-0_11)
4. Собчук А.В., Олімпієва Ю.І. Застосування нейромереж для забезпечення функціональної стійкості виробничих процесів. Телекомунікаційні та інформаційні технології. К.: ДУТ, 2020. № 2 (67). С. 13-28. <http://doi.org/10.31673/2412-4338.2020.021328>
5. Sobchuk V., Barabash O., Musienko A., Svyinchuk O. Adaptive accumulation and diagnostic information systems of enterprises in energy and industry sectors. E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 250. P. 82-87. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125008002>
6. Тюлюпа С.В., Самохвалов Ю.Я., Хусайнов П.В., Штатенко С.С. Самодіагностування як спосіб підвищення кіберстійкості термінальних компонентів технологічної системи.

*Кібербезпека: освіта, наука і техніка.* № 2 (22). 2023. С. 134-147. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.22.134147>

7. Обідін Д.М. Оцінка функціональної стійкості інформаційно-телекомунікаційних мереж на основі автоматизованих систем управління. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України.* 2014. № 1. С. 167-169. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps\\_2014\\_1\\_40](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2014_1_40)

8. Калашиник Г.А., Обідін Д.М., Калашиник М.А. Забезпечення стійкого функціонування засобів навігації літальних апаратів під впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів. *Системи обробки інформації.* 2016. № 3 (140). С. 52-56. <http://doi.org/10.30748/nitps.2021.44.07>

9. Барабаш О.В., Макаруч А.В., Майстров О.О., Миронюк М.Ю. Метод і алгоритм обчислення мінімальної та максимальної ймовірності зв'язності за допомогою машинного навчання. *Науково-практичний журнал «Зв'язок».* 2025. № 2 (174). С. 50 – 58. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2025.025563>

10. Запрій І.В. Технології машинного навчання функціонально стійкої інтелектуальної інформаційної системи закладу вищої освіти. *Телекомунікаційні та інформаційні технології.* 2023. №1 (78). С. 42-52. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2023.014252>

11. Фісун О.С. Забезпечення функціональної стійкості програмно-керованої комп'ютерної мережі на основі авторегресійних методів машинного навчання. *Телекомунікаційні та інформаційні технології.* 2025. №4 (89). С. 29-39. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2023.014252>

12. Ioannou I., Javaid S., Tan Y., Vassiliou, V. Autonomous Reinforcement Learning for Intelligent and Sustainable Autonomous Microgrid Energy Management. *Electronics.* 2025. Vol. 14(13), 2691. <https://doi.org/10.3390/electronics14132691>

13. Bukowski L., Werbinska-Wojciechowska S. Towards Maintenance 5.0: Resilience-Based Maintenance in AI-Driven Sustainable and Human-Centric Industrial Systems. *Sensors.* 2025. Vol. 25(16), 5100. <https://doi.org/10.3390/s25165100>

14. Duan J. Deep learning anomaly detection in AI-powered intelligent power distribution systems. *Frontiers in Energy Research.* 2024. Vol.12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1364456>

15. About Veeam Backup & Replication. URL: <https://helpcenter.veeam.com/docs/backup/vsphere/>

16. Welcome to Acronis Cyber Protect 15. URL: [https://acronis.com/support/documentation/AcronisCyberProtect\\_15/](https://acronis.com/support/documentation/AcronisCyberProtect_15/)

17. IBM Storage Protect. URL: <https://www.ibm.com/products/storage-protect>

18. Hariri S., Kind M.C., Brunner R.J. Extended Isolation Forest. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering.* 2021. Vol. 33(4). P. 1479-1489. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2019.2947676>

19. Biau G., Scornet E. (2016). A random forest guided tour. *Test.* 2016. Vol. 25(2). P.197-227. <https://doi.org/10.1007/s11749-016-0481-7>

*O. Barabash, O. Svynchuk, O. Bandurka, O. Rudenko*

### **ENSURING THE FUNCTIONAL ROBUSTNESS OF MONITORING SYSTEMS FOR AUTONOMOUS ENERGY COMPLEXES BASED ON MACHINE LEARNING METHODS**

*The article addresses an urgent scientific and practical problem of ensuring the functional resilience of monitoring systems for autonomous power complexes under conditions of dynamic technical failures, systemic anomalies, and critical loads. The relevance of the study is driven by the acute need to preserve the integrity of telemetry data during the unstable operation of power infrastructure, where classical routine backup methods demonstrate excessive inertia and fail to provide the necessary reaction speed to rapid changes in network parameters.*

*An intelligent software system has been developed that combines predictive diagnostics and adaptive real-time backup functions. The scientific novelty of the work lies in the synergistic use of two machine learning algorithms: Isolation Forest for instantaneous detection of current anomalies*

*in multidimensional data arrays and Random Forest for forecasting future critical states based on the analysis of historical patterns. Such a comprehensive approach allows for the implementation of a proactive management strategy, initiating data preservation before the occurrence of an actual failure.*

*The software implementation of the system is based on a three-tier architecture and includes modules for intelligent analysis, automated backup planning, and a role-based access model. Experimental testing on real telemetry datasets confirmed the high efficiency of the system: the predictive analysis module ensures stable operation even under peak loads, which guarantees high functional resilience and data integrity in autonomous power networks.*

**Keywords:** functional stability, autonomous power systems, software architecture, intelligent monitoring, machine learning, anomaly detection, predictive analytics, adaptive data backup.

---

Надійшла до редакції: 02.03.2026

Прийнята до друку: 21.04.2026

Опубліковано: 27.04.2026

© 2026 Барабаш О. В., Свинчук О. В., Бандурка О. І., Руденко О. С.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>