

Свинчук Ольга Василівна*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

ORCID 0000-0001-9032-6335

Мангуплі Юлія Дмитрівна*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ***Котова Анна Андріївна***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

ПІДВИЩЕННЯ ЖИВУЧОСТІ ПІДСИСТЕМ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ТА СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ СИСТЕМИ ГЕНЕРАЦІЇ, РОЗПОДІЛУ ТА ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ

Анотація. Сучасні системи генерації, розподілу та зберігання енергії все більше залежать від надійності та живучості своїх підсистем, включаючи підсистеми сонячного контролера, акумуляторних батарей та сонячних панелей. Завдяки розвитку відновлюваної енергетики такі підсистеми покращуються та ускладнюють свою архітектуру, що у свою чергу створює структуру із великою кількістю взаємопов'язаних елементів. Важливим завданням є забезпечення їх безперебійної роботи, своєчасне виявлення відмов і мінімізація наслідків пошкоджень, які можуть виникнути через як зовнішні, так і внутрішні фактори. Відмова або зниження ефективності роботи підсистем може призвести до серйозних енергетичних, економічних та технічних проблем, у зв'язку з чим дослідження процесу підвищення живучості акумуляторних батарей і сонячних панелей є актуальною науково-практичною задачею.

Актуальність дослідження обумовлена глобальними тенденціями енергетичного переходу, спрямованими на скорочення викидів парникових газів та зменшення залежності від викопного палива. Сонячна енергетика, як одна з найбільш динамічних галузей відновлюваної енергетики, потребує високого рівня надійності обладнання, адже навіть незначні відмови можуть призвести до тривалих простоїв і значних економічних втрат. Особливу небезпеку становлять відмови акумуляторних батарей, які відповідають за балансування навантаження та стабілізацію роботи енергосистеми. Нестабільність їх функціонування може стати причиною виходу з ладу всієї системи.

У рамках роботи розроблено програмне забезпечення для підвищення живучості підсистем акумуляторних батарей та сонячних панелей системи генерації, розподілу та зберігання енергії. Воно ґрунтується на методах аналізу та прогнозування стану елементів, а також методах збереження робочого стану системи без втрат енергії. Програмний комплекс реалізує моніторинг параметрів роботи акумуляторів і сонячних панелей у режимі реального часу, здійснює автоматичне виявлення відхилень і потенційних відмов, інформує користувача про критичні зміни за допомогою системи сповіщень, локалізує несправні елементи й ініціює перерозподіл навантаження на резервні компоненти.

Ключові слова: інформаційна система, підсистема, архітектура програмного забезпечення, енергія, живучість, сонячні панелі, акумуляторні батареї, відмови.

Svynchuk Olha*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv*

ORCID 0000-0001-9032-6335

Manhupli Yuliia*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv***Kotova Anna***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv*

INCREASING THE VIABILITY OF BATTERY AND SOLAR PANELS SUBSYSTEMS OF ENERGY GENERATION, DISTRIBUTION AND STORAGE SYSTEM

Abstract. Modern systems of energy generation, distribution, and storage are increasingly dependent on the reliability and survivability of their subsystems, including solar controllers, battery storage, and solar panels. With the development of renewable energy, such subsystems are becoming more advanced and complex in their architecture, which in turn creates a structure with a large number of interconnected elements. An important task is to ensure their uninterrupted operation, timely detection of failures, and minimization of the consequences of damages that may arise from both external and internal factors. A failure or a decrease in the efficiency of these subsystems can lead to serious energy, economic, and technical problems, which makes the study of improving the survivability of batteries and solar panels a relevant scientific and practical challenge.

The relevance of this research is determined by global trends in the energy transition, aimed at reducing greenhouse gas emissions and decreasing dependence on fossil fuels. Solar energy, as one of the most dynamic sectors of renewable energy, requires a high level of equipment reliability, since even minor failures can result in prolonged downtime and significant economic losses. Failures of battery storage systems pose a particular threat, as they are responsible for load balancing and stabilizing the operation of the power system. Instability in their functioning may cause the failure of the entire system.

Within the framework of this work, software has been developed to enhance the survivability of battery and solar panel subsystems of the energy generation, distribution, and storage system. It is based on methods of analyzing and predicting the state of elements, as well as methods of maintaining the operable state of the system without energy losses. The software complex implements real-time monitoring of battery and solar panel parameters, performs automatic detection of deviations and potential failures, informs the user about critical changes through a notification system, localizes faulty elements, and initiates load redistribution to backup components.

Keywords: information system, subsystem, software architecture, energy, survivability, solar panels, batteries, failures.

1. Постановка проблеми

Сучасний світ не може існувати без такого знайомого для усіх поняття, як електроенергія. Вона необхідна майже для усіх пристроїв, які існують в наших будинках, офісах, магазинах, тощо. Електроенергія забезпечує роботу освітлення, побутової техніки, комп'ютерів, засобів зв'язку, медичного обладнання та транспортних систем. Вона стала основою функціонування промисловості, науки, освіти та сфери послуг, фактично визначаючи якість життя сучасної людини. З розвитком цифрових технологій потреба в електроенергії постійно зростає, адже нові пристрої, системи автоматизації, центри обробки даних та інтелектуальні мережі вимагають безперебійного та надійного енергопостачання.

Сонячна генерація енергії стала однією із відповідей на питання про потребу безперебійної електроенергії. Вона забезпечує світло в різноманітних складних умовах і дозволяє економити ресурси, зменшуючи залежність від традиційних джерел енергії, таких як вугілля, газ чи нафта. Використання сонячних панелей сприяє зниженню викидів шкідливих речовин в атмосферу та відповідає сучасним екологічним вимогам. Крім того, сонячна енергія є невичерпним і доступним джерелом, яке може застосовуватися як у великих промислових масштабах, так і для потреб окремих домогосподарств. Однак для забезпечення стабільної та надійної роботи таких систем необхідно враховувати низку факторів — зміну погодних умов, деградацію панелей з часом, коливання навантажень та ефективність роботи акумуляторних батарей, що зберігають енергію.

Живучість інформаційної системи мають вирішальне значення для її надійного функціонування, адже вона допомагає зберігати працездатність повністю або частково навіть за умов дії негативних факторів, зокрема виходу з ладу окремих компонентів, виникнення відмов чи надмірного зростання навантаження [1-2]. Ця властивість системи відображає здатність адаптуватися до змін зовнішнього середовища за допомогою власних ресурсів: перебудови структури, перерозподілу функцій та гнучкого реагування підсистем відповідно до поставлених цілей. Однак у сучасних умовах енергетичні системи залишаються вразливими до відмов акумуляторних батарей та сонячних панелей, що знижує їхню надійність, тому виникає проблема розробки підходів і засобів підвищення живучості цих підсистем.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Проблемам систем сонячних панелей та акумуляторних батарей, а також поняттям живучості присвячено велику низку робіт, кожна з яких описує різні сторони питань. Багато наукових дослідників зацікавлені розробкою нових систем моніторингу та управління сонячними панелями [3], де для прогнозування роботи та живучості використовується система трекінгу сонця. Робота [4] присвячена розробці та впровадженню системи управління енергоспоживання сонячних панелей. У статті представлено блокову діаграму системи, що ілюструє її основні компоненти та їхню взаємодію, наприклад, контролер, який відіграє ключову роль у керуванні роботою сонячних панелей,

забезпечуючи оптимальне регулювання їхньої продуктивності. Стаття [5] присвячена відмовам у роботі розумної системи управління сонячною енергією, зокрема здійснюються обчислення, пов'язані з втратами енергії під час експлуатації, аналізуються фактори, що впливають на ефективність, та запропоновані шляхи їх мінімізації.

Нововведенням щодо систем моніторингу роботи таких систем є використання девайсів IoT [6], що збирають дані, та використання штучного інтелекту з машинним навчанням для прогнозування роботи [7]. Такі складові систем моніторингу роботи почали поширюватися для підсистем батарей у автомобільному виробництві, завдяки чому багато джерел розглядають стратегії управління такими системами [8], а також майбутні технології та тренди, що можуть бути пов'язані з ними [9].

Великою гілкою технічної індустрії, яка також сильно зацікавлена поняттям живучості системи, є комунікаційні мережі. Це пов'язано із збереженням надійності роботи комунікаційних систем, які є великою складовою наших життів. Зокрема існують різні підходи до оцінки роботи їх надійності, які описані у джерелі [11], такі як: блокові діаграми надійності, деревовидні моделі відмов, марковські ланцюги, а також аналітичні, імітаційні та формальні методи аналізу. У роботі [12] також запропоновані інші стохастичні обчислювальні моделі для аналізу надійності та критичності мережевих з'єднань. Стаття [13] присвячена оцінці ефективності методів резервування в електронних комунікаційних мережах, зокрема впливу різних факторів, таких як структурне, навантажувальне та часові резервування, на надійність функціонування обладнання.

У статті [14] розглянуто проблему стійкості інформаційних систем енергетичних мереж, зокрема питання автоматичного перерозподілу навантаження для забезпечення стабільної та ефективної роботи систем на основі балансування навантаження. У [15] науковцями розроблений програмний застосунок, який дозволяє відстежувати стан різних компонентів інформаційної системи та своєчасно виявляти можливі проблеми або відмови з метою підтримки безперервної роботи системи.

Аналіз наукових джерел показав, що, попри наявність значної кількості досліджень у сфері сонячних панелей та акумуляторних батарей, проблема забезпечення їхньої живучості залишається актуальною та потребує вирішення шляхом розробки інформаційних систем моніторингу, діагностики та прогнозування.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є розробка інформаційної системи моніторингу, діагностики та прогнозування стану підсистем акумуляторних батарей і сонячних панелей, що забезпечить підвищення їхньої живучості у складі системи генерації, розподілу та зберігання енергії.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- проаналізувати існуючі підходи до моніторингу та діагностування стану акумуляторних батарей і сонячних панелей, визначити їхні переваги та обмеження;
- запропонувати підхід для підвищення живучості підсистем на основі моніторингу ключових параметрів, виявлення відхилень та прогнозування можливих відмов;
- розробити алгоритм аналізу та локалізації несправностей із забезпеченням можливості перерозподілу навантаження між справними елементами системи;
- інтегрувати методи резервування у програмне забезпечення системи та визначити їхню ефективність за різних умов експлуатації.

4. Результати дослідження

На основі проведеного дослідження та порівняння різних методів та методик для забезпечення живучості підсистем акумуляторних батарей та сонячних панелей було обрано комплексний підхід, який поєднує резервування елементів системи та сучасні методи машинного навчання. Головне завдання полягає не тільки у фіксуванні поточного стану компонентів і своєчасній реакції на відмови та збої, але й у передбаченні можливих відмов, повідомленні про них та автоматичному реагуванні, що дозволяє підтримувати безперебійну роботу всієї підсистеми.

Для виявлення аномалій у підсистемах акумуляторних батарей та сонячних панелей використовується модель машинного навчання Isolation Forest [16], яка дозволяє своєчасно ідентифікувати нетипові значення параметрів, таких як напруга, струм, рівень заряду або температура. Наприклад, якщо напруга батареї різко підскакує або падає нижче допустимого рівня, система фіксує цю аномалію. У разі виявлення аномального елемента він автоматично відключається від роботи, а функції та навантаження перерозподіляються на інші працездатні фрагменти підсистеми. Паралельно здійснюється резервування даних, що дозволяє переглянути історію змін, визначити причину збою та при необхідності повернутися до попередніх значень.

Для забезпечення живучості підсистем використовується методи резервування, який передбачає наявність запасних копій критично важливих компонентів або дублюючих механізмів, які можуть автоматично підключатися до роботи. У межах дослідження розглянуто кілька підходів до резервування: загальне, роздільне та змішане.

Загальне резервування полягає у створенні повних дублікативних копій усіх ключових елементів підсистеми, що дозволяє у разі відмови будь-якого компонента швидко замінити його на резервний і продовжити роботу без перерви. Роздільне резервування передбачає резервування лише критично важливих елементів, що забезпечує економію ресурсів і підвищує ефективність системи, при цьому зберігаючи високий рівень надійності. Змішане резервування поєднує обидва підходи, забезпечуючи баланс між ефективним використанням резервних ресурсів та забезпеченням безперебійної роботи системи.

Крім того, розглянуто пасивний та динамічний методи резервування. Пасивне резервування активується лише тоді, коли основний елемент відмовляє, тобто резервні компоненти перебувають у сплячому режимі до моменту необхідності їх використання. Динамічне резервування передбачає постійну участь резервів у роботі системи, що дозволяє рівномірно розподіляти навантаження між основними та резервними елементами, знижуючи ймовірність перевантаження окремих компонентів та підвищуючи загальну ефективність підсистеми. Всі методи інтегровані у програмне забезпечення системи, що дозволяє користувачу обирати оптимальну стратегію резервування залежно від конкретних умов експлуатації.

Перерозподіл навантаження реалізується за допомогою алгоритмів, які автоматично визначають, які елементи можуть прийняти додаткову роботу від відключених фрагментів. Для прогнозування майбутніх станів використовується модель Random Forest Regression [17], яка оцінює можливі значення ключових параметрів, таких як напруга або температура, у наступні проміжки часу. Якщо прогнозовані значення виходять за допустимі межі, система також відключає потенційно проблемний елемент, перерозподіляє навантаження на інші блоки та створює резервну копію даних, попереджаючи про можливу загрозу.

Для реалізації програмного забезпечення застосовано класичну клієнт-серверну архітектуру веб-застосунку (рис. 1), яка забезпечує чіткий розподіл функціональних завдань між різними рівнями системи. На клієнтському рівні розроблено веб-інтерфейс із використанням бібліотеки React, вибір якої зумовлений високою продуктивністю, гнучкістю та зручністю створення інтерактивних користувацьких інтерфейсів.

Обмін даними між інтерфейсом та серверною частиною реалізовано за допомогою HTTP-запитів для виконання стандартних операцій (отримання даних, управління параметрами) та WebSocket-з'єднання для синхронізації інформації в режимі реального часу. Такий підхід забезпечує своєчасне отримання актуальних даних і оперативне сповіщення користувачів про виявлені відхилення чи можливі несправності.

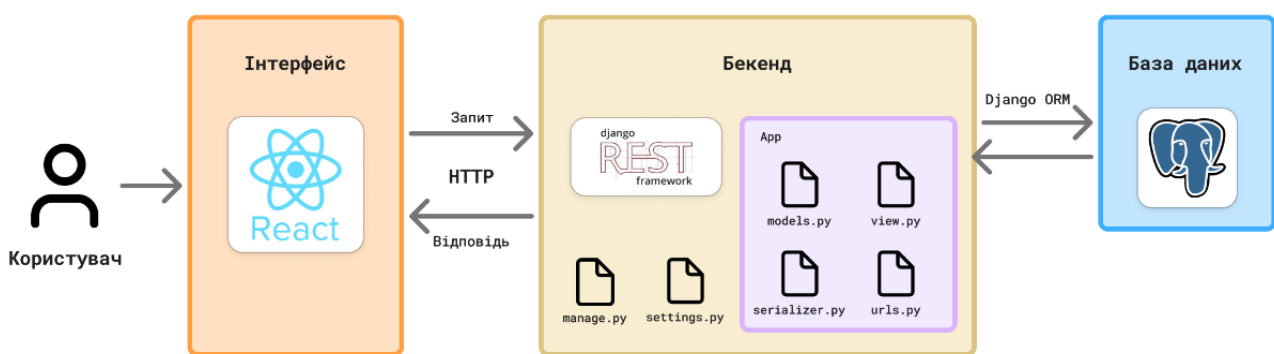


Рис. 1. Архітектура веб-застосунку для моніторингу підсистем акумуляторних батарей та сонячних панелей

Серверна частина реалізована на основі мови програмування Python та фреймворку Django, що дало змогу організувати надійну систему обробки даних, інтегрувати алгоритми машинного навчання для виявлення аномалій і прогнозування стану елементів системи, а також забезпечити резервування та перерозподіл навантажень. Для збереження даних застосовується реляційна база даних, яка накопичує інформацію з датчиків, результати аналітичних обчислень та історичні показники роботи акумуляторних батарей і сонячних панелей.

Головна сторінка веб-застосунку представлена у вигляді інтерактивного дашборду, який відображає узагальнену інформацію про роботу енергосистеми (рис. 2). На ній користувач може побачити, скільки енергії генерується сонячними панелями, який обсяг споживається, скільки імпортується ззовні та експортується, а також яку частину енергії спрямовано на зарядку чи розрядку акумуляторних батарей. Система автоматично оновлює дані кожні 15 хвилин, що дозволяє постійно отримувати актуальні показники. Водночас для зручності користувача передбачена можливість примусового оновлення даних за допомогою спеціальної кнопки.

Моніторинг електроенергії

10 вересня 2025 р.

Оновити дані

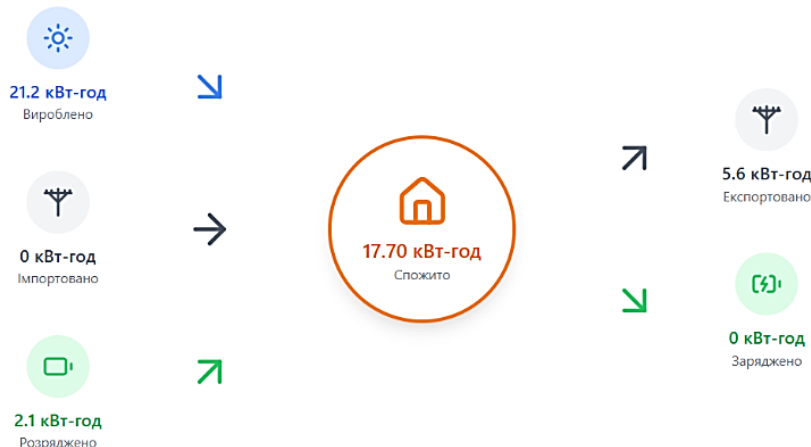


Рис. 2. Головна сторінка веб-застосунку для моніторингу підсистем акумуляторних батарей та сонячних панелей

Сторінки «Батареї» та «Сонячні панелі» мають майже однаковий вміст, тому для зручності розглянемо лише сторінку «Батареї». Вона призначена для відображення детальної інформації про кожен накопичувач енергії в системі. Для кожної батареї подається загальна характеристика, її назва, модель, номінальна ємність та поточний рівень заряду. Також відображається її статус у реальному часі: чи перебуває батарея в режимі зарядки, розрядки або очікування. Додатково система визначає технічний стан батареї. Для цього використовується алгоритм машинного навчання, який аналізує показники датчиків і виявляє аномальні відхилення. Завдяки цьому користувач може бачити, чи батарея працює в нормальному режимі («ОК»), чи виявлено ознаки несправності («Несправна»), або ж система попереджає про можливі майбутні проблеми («Підозріла»). Із загальної сторінки батарей можна перейти до детальної сторінки конкретної батареї (рис. 3).

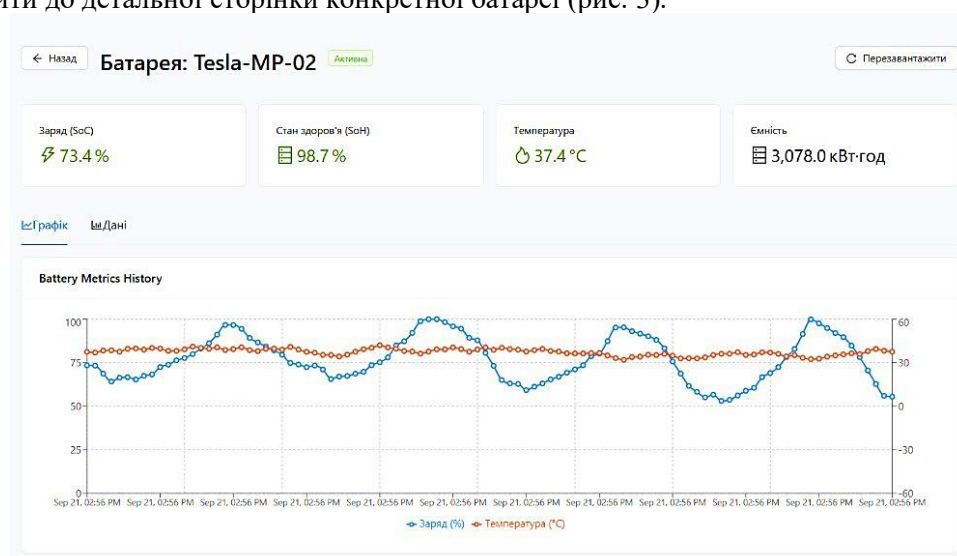


Рис. 3. Детальна сторінка акумуляторної батареї у веб-застосунку

Користувачу доступні динамічні графіки зміни ключових параметрів (напруга, сила струму, температура, рівень заряду), а також таблиця логів із часовими мітками. Також користувач може

перейти на сторінку з прогнозом, яка відображає прогнозовані показники роботи акумуляторів. За допомогою алгоритмів машинного навчання виконується аналіз історичних даних і будується прогноз рівня заряду, циклів зарядки та розрядки, температурних змін і загального ресурсу батареї.

Окрему функціональність системи становить вкладка «Репорти», яка надає користувачеві можливість формувати та завантажувати історичні дані у зручному форматі (наприклад, CSV або PDF). У репортах відображається повна інформація про генерацію, споживання, імпорт та експорт енергії, а також показники зарядки й розрядки акумуляторних батарей за вибраний період.

Таким чином, реалізоване програмне забезпечення підвищує живучість системи в цілому, забезпечує її стійкість до зовнішніх і внутрішніх факторів впливу та сприяє підвищенню надійності й ефективності сучасних енергетичних інфраструктур. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє своєчасно виявляти потенційні відмови та зменшувати ризик критичних збоїв, а механізми резервування й автоматичного перерозподілу навантажень забезпечують безперервність функціонування підсистем. Хоча кількісні показники ефективності потребують додаткових експериментальних досліджень, представлені результати демонструють перспективність застосованого підходу для підвищення надійності та живучості енергетичних систем.

5. Висновки і перспективи подальших досліджень

У ході дослідження розглянуто актуальну задачу підвищення живучості підсистем акумуляторних батарей та сонячних панелей у складі системи генерації, розподілу та зберігання енергії. Основні засоби підвищення живучості системи полягають у поєднанні моніторингу та діагностики параметрів підсистем, застосуванні алгоритмів машинного навчання для прогнозування можливих відмов, реалізації різних стратегій резервування, автоматичному перерозподілі навантаження між працездатними елементами та локалізації несправностей. Використання алгоритмів машинного навчання (Isolation Forest та Random Forest Regression) підвищує ефективність виявлення аномалій та прогнозування стану елементів, що у свою чергу знижує ризик критичних відмов і забезпечує безперервність функціонування системи. Інтеграція методів резервування різних типів створює умови для підтримання стабільної роботи навіть у випадку виходу з ладу окремих компонентів.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні функціоналу системи за рахунок впровадження додаткових алгоритмів штучного інтелекту для точнішого прогнозування стану підсистем, інтеграції з іншими джерелами відновлюваної енергії з метою формування комплексних рішень для «розумних» енергетичних мереж, дослідженні можливостей масштабування запропонованого підходу для великих промислових об'єктів і міських енергосистем, а також у створенні мобільних застосунків для віддаленого моніторингу та керування, що забезпечить зручність і доступність використання розробленого програмного забезпечення.

6. Список використаної літератури

1. Додонов А.Г., Путятін В.Г., Додонов В.О., Куценко С.А., Германюк А.П., Ізварин І.В., Кравчук К.О. Технологія забезпечення живучості територіально-розподілених інформаційних комп'ютерних систем в єдиному інформаційному просторі. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2024. Т. 26, № 1. С. 121–143.
2. Залужний В.Ф. Показники ефективності (якості) комплексної системи забезпечення живучості розподілених автоматизованих систем організаційного управління силами та засобами. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2025. Т. 27, № 1. С. 42–50.
3. Ковальчук О. А., Пилипенко Ю.М. Система управління сонячними панелями. Технології та дизайн. 2020. № 1. С. 1–9.
4. Pokalekar S., Patil R. Development and implementation of Solar Panel based power management system. SSRG International Journal of Mechanical Engineering. 2017. С. 82–84.
5. Liptak B. G., Eren H. Process Software and Digital Networks. Instrument Engineers. Handbook, Vol. 3. CRC Press, 2018. 1139 p.
6. Umoh V. B., Obot J. J., Ekpe U. M. Development Of A Smart Solar Energy Management System. International Journal of Advanced Research and Publications. 2019. Т. 3, № 2. С. 1–5.
7. Krishna G., Singh R., Gehlot A., Almogren A., Altameem A., Rehman A. & Hussien S. Advanced battery management system enhancement using IoT and ML for predicting remaining useful life in Li-ion batteries. Scientific Reports. 2024. Vol. 14, 30394.
8. Praba R., Darshan G., Roshanraj K., Surya Prakash B. Study On Machine Learning Algorithms. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. 2021. Vol. 7, Issue 4. P. 67–72.
9. Vishwakarma V. K., Srivastava S., Mishra V. Strategies of battery management systems in electric vehicles: a review. International Journal of Modelling and Simulation. 2025. P. 1–31.

10. Rahmani P., Chakraborty S., Mele I., Katrašnik T., Bernhard S., Pruefling S., Wilkins S., Hegazy O. Driving the future: A comprehensive review of automotive battery management system technologies, and future trends. *Journal of Power Sources*. 2025. Vol. 629, 235827.
11. Ahmad W., Hasan O., Pervez U., Qadir J. Reliability modeling and analysis of communication networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. Vol. 78. P. 191–215.
12. Zhu P., Han J., Guo Y., Lombardi F. Reliability and Criticality Analysis of Communication Networks by Stochastic Computation. *IEEE Network*. 2016. Vol. 30, No. 6. P. 70–76.
13. Subach I. Y., Mogylevych D. I., Uriadov A. V. Evaluation of the efficiency of redundancy methods in the complex use of redundancy. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2024. Vol. 2, No. 3. P. 89–93.
14. Барабаш О. В., Свинчук О. В., Шуклін Г. В., Копійка О. В. Вебзастосунок для динамічного перерозподілу навантаження в інформаційних системах енергетичних мереж. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 36 (75), № 2. С. 9-16.
15. Barabash O., Svynchuk O., Salanda I., Mashkov V., Myroniuk M. Ensuring the functional stability of the information system of the power plant on the basis of monitoring the parameters of the working condition of computer devices. *Advanced Information Systems*. 2024. Vol. 8, No. 2. P. 107 – 117.
16. Aschepkov V. The use of the Isolation Forest model for anomaly detection in measurement data. *Innovative Technologies And Scientific Solutions For Industries*. 2024. No. 1 (27). P. 236–245.
17. Salman H. A., Kalakech A., Steiti A. Random Forest Algorithm Overview. *Babylonian Journal of Machine Learning*. 2024. Vol. 2024. P. 69–79.