

УДК 621.311.243:004:681.518

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.2.6>

Олег ЖВАЛІК

аспірант кафедри програмних засобів і технологій,
Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0009-0000-2729-2865

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЦІЇ ІТ В УПРАВЛІННІ СОНЯЧНОЮ ЕНЕРГЕТИКОЮ

Анотація. Стаття присвячена комплексному дослідженню інтеграції інформаційних технологій (ІТ) у системи управління сонячною енергетикою.

Метою роботи є ідентифікація інноваційних інструментів і методів, які сприяють підвищенню ефективності, оптимізації операційних процесів, а також підвищенню рівня контролю та прогнозованості функціонування систем сонячної енергетики.

У статті розглянуто різні аспекти застосування ІТ, включно з використанням програмного забезпечення для моніторингу та управління, систем великих даних, машинного навчання та хмарних обчислень. Описано сучасні рішення, які включають інтегровані системи управління, що дозволяють підвищити автоматизацію, зменшити ризики людських помилок і мінімізувати експлуатаційні витрати.

Актуальність цього дослідження зумовлена глобальним переходом на відновлювані джерела енергії, які відіграють ключову роль у забезпеченні сталого розвитку та боротьбі зі зміною клімату. Зростаюча складність сучасних систем сонячної енергетики вимагає нових підходів до управління, які можуть забезпечити високу продуктивність за мінімальних витрат.

Основні результати дослідження включають ідентифікацію ключових технологій і методів, які сприяють ефективному управлінню сонячною енергетикою. Проведений аналіз продемонстрував значний потенціал автоматизації для зниження операційних витрат і підвищення стабільності роботи систем.

Наукова новизна роботи полягає у розробці концептуального підходу до впровадження інноваційних ІТ-інструментів, які орієнтовані на специфічні вимоги сонячної енергетики.

Практична значущість роботи полягає у можливості застосування запропонованих рішень на реальних об'єктах сонячної енергетики. Це дозволить не лише оптимізувати витрати, але й підвищити надійність системи, забезпечуючи стабільне енергопостачання в умовах змінного попиту та кліматичних умов.

Висновки. Теоретична значущість дослідження проявляється в розширенні наукового уявлення про роль ІТ в енергетичному секторі. Результати дослідження можуть слугувати основою для подальших наукових розробок у сфері управління відновлюваними джерелами енергії та сприяти розробці нових методологій управління високотехнологічними енергетичними системами.

Ключові слова: ІТ-інструменти, машинне навчання, моніторинг, прогнозування, автоматизація, IoT, сонячна енергетика.

Oleh ZHVALIK. ADVANCED INTEGRATION OF IT IN THE MANAGEMENT OF SOLAR ENERGY INDUSTRY

Abstract. This article is devoted to a comprehensive investigation of the integration of information technologies (IT) into the solar energy management system.

The purpose of this work is to identify innovative tools and methods that enhance efficiency, optimize operational processes, and improve control and predictability in the functioning of solar energy systems.

The article examines various aspects of IT implementation, including the use of software for monitoring and management, big data systems, and computational technologies.

Current solutions are described, including integrated management systems that enable greater automation, reduce human labor risks, and minimize operational costs.

The relevance of this research is driven by the global transition to modern energy sources, which play a key role in sustainable development and combating climate change. The increasing complexity of modern solar energy systems necessitates new management approaches that ensure high productivity with minimal investment.

The main results of the research include the identification of key technologies and methods that support the effective management of solar energy. The analysis demonstrated the significant potential of automation in reducing operational costs and increasing system stability.

The scientific novelty of this work lies in the development of a conceptual approach to the creation of innovative IT tools tailored to specific applications in the solar energy sector.

The practical significance of this research is reflected in the potential for implementing the proposed solutions in real-world solar energy projects. This not only optimizes expenditures but also enhances system reliability, ensuring a stable energy supply in the face of climate change and increasing environmental awareness.

The theoretical significance of the study lies in expanding scientific knowledge about the role of IT in the energy sector. The research findings may serve as a foundation for further studies in modern energy resource management and the development of new methodologies for managing high-tech energy systems.

Key words: IT tools, machine learning, monitoring, forecasting, automation, IoT, solar energy.

© О. Жвалік, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми. Сонячна енергетика є одним із найперспективніших напрямів у галузі відновлюваних джерел енергії, адже вона забезпечує стійкий розвиток і сприяє зменшенню залежності від викопного палива. Об'єкт дослідження – системи сонячної енергетики – має ключове значення в забезпеченні глобального переходу до екологічно чистих джерел енергії. Водночас предмет дослідження – інтеграція інформаційних технологій в управління цими системами – відіграє вирішальну роль у підвищенні ефективності їхньої роботи, зменшенні експлуатаційних витрат і адаптації до змінних умов.

На сьогодні підприємства стикаються з низкою викликів, серед яких підвищення складності управління через зміни кліматичних умов, нерівномірність енергоспоживання та необхідність відповідати екологічним стандартам. Традиційні методи управління вже не здатні забезпечити необхідну гнучкість і продуктивність, що зумовлює потребу у впровадженні інноваційних рішень. Інтеграція сучасних ІТ у системи сонячної енергетики дозволяє розв'язати ці проблеми завдяки автоматизації, покращенню моніторингу та оптимізації процесів виробництва та розподілу енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У світі активно ведуться дослідження у сфері відновлюваної енергетики [1; 2]. Багато науковців вивчають питання прогнозування продуктивності сонячних станцій за допомогою штучного інтелекту та машинного навчання [3]. Зокрема, застосування методів аналізу великих даних і технологій IoT [4] дозволяє створювати інтелектуальні системи управління. Однак, не всі аспекти інтеграції ІТ достатньо досліджені. Існує обмежена кількість робіт, що розглядають комплексну інтеграцію інноваційних ІТ-рішень у всі етапи – від виробництва до споживання енергії.

Особливу увагу приділяють використанню хмарних платформ [5] для централізованого управління, та автоматизації процесів за допомогою IoT. Попри це, існує дефіцит досліджень, що враховують такі фактори, як інтеграція кібербезпеки, управління складними системами з високим ступенем змінності та створення адаптивних моделей, які зможуть працювати в умовах швидко змінного середовища.

Тема інтеграції інформаційних технологій в управлінні сонячною енергетикою є міждисциплінарною і охоплює дослідження у галузях відновлюваної енергетики, інформаційних технологій, машинного навчання, аналітики великих даних та оптимізації процесів.

Ось деякі дослідники, які працюють над проблематикою сонячної енергетики: Шахід Наваз Хан (Shahid Nawaz Khan et al.) [12], Делвар Хуссейн (Delwar Hussain et al.) [11], Минли Ли (Mingli Li et al.) [13], Юсеф Еломари (Youssef Elomari et al.) [10], Ашиф Мохаммад (Ashif Mohammad et al.) [14].

Більшість досліджень зосереджуються на окремих аспектах: прогнозуванні, моніторингу чи оптимізації. Відсутність інтегрованих моделей, що враховують взаємодію всіх компонентів системи, є проблемою. Попередні роботи [1–5] недостатньо приділяли увагу безпеці інтегрованих систем, що є критично важливим у контексті їх цифровізації. Більшість існуючих моделей не враховують швидкі зміни кліматичних умов і нерівномірний попит на енергію.

Попри значний прогрес, потреба у вдосконаленні моделей інтеграції інформаційних технологій у сонячну енергетику залишається високою. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення інтегрованих рішень, які враховують як технічні, так і економічні аспекти.

Формулювання мети дослідження. Головною метою роботи є створення інтегрованого підходу до використання інформаційних технологій в управлінні сонячною енергетикою, який забезпечить підвищення ефективності, стабільності та адаптивності таких систем. Для досягнення мети в дослідженні використовуються сучасні методи, включаючи аналіз кліматичних даних, прогнозування виробництва енергії, розробку алгоритмів для автоматизації управління та інтеграцію хмарних технологій. Особливу увагу приділено адаптації технологій до специфічних умов експлуатації, що включають змінний попит на енергію та необхідність забезпечення безперебійного енергопостачання.

Викладення основного матеріалу дослідження. Дана проблематика була обрана через її актуальність у контексті глобального переходу на відновлювані джерела енергії та зростання потреби у впровадженні сучасних інформаційних технологій для управління складними енергетичними системами. Унікальність цього дослідження полягає у розробці інтегрованого підходу до використання ІТ в управлінні сонячною енергетикою, який враховує сучасні виклики та можливості автоматизації, прогнозування та оптимізації операцій.

Науковою концепцією, покладеною в основу дослідження, є ідея створення адаптивних і масштабованих систем управління, що інтегрують технології машинного навчання, великі дані та IoT. Ця концепція дозволяє забезпечити гнучке та ефективне управління енергетичними ресурсами з урахуванням змін кліматичних умов, нерівномірності попиту та впливу зовнішніх факторів. У межах дослідження було розроблено модель інтегрованої системи, яка поєднує можливості моніторингу, прогнозування та оптимізації для забезпечення стабільності функціонування енергетичних систем. Вона складається з основних компонентів, які наведено на (рис. 1).



Рис. 1. Модель інтегрованої системи

Ця модель забезпечує ефективне управління енергетичною системою, підвищує надійність та зменшує втрати енергії.

Для прогнозування вироблення енергії використовується регресійна модель на основі кліматичних даних.

Наприклад, спрогнозуємо виробництво сонячної електроенергії на наступний період, ґрунтуючись на даних Укренерго [11].

Формула лінійної регресії має вигляд:

$$y = ax + b \quad (1)$$

Знаючи дві точки (3,56 ГВт в 2019 році та 5,36 ГВт в 2020) можна побудувати лінію-тренд, яка показує тенденцію зростання виробництва сонячної електроенергії в наступному (2021) році.

Розрахунок показав очікування на 2021 рік 7,16 ГВт. Фактично, за даними Укренерго [12] – 7,59 ГВт. Тобто похибка виявилася 6 %, що характеризує даний метод прогнозування, як доволі точний.

Далі, оскільки сонячна інсоляція дуже залежить від пори року, зробимо помісячний розрахунок виробництва сонячної енергії з урахуванням коефіцієнтів сезонності. Маємо таблицю (табл. 1) інсоляції по містах України [13].

Ділимо середньорічну інсоляцію на середню по відповідному місяцю, отримуємо коефіцієнти сезонності (табл. 2).



Рис. 2. Структура виробництва електроенергії в Україні та динаміка зростання встановлених потужностей

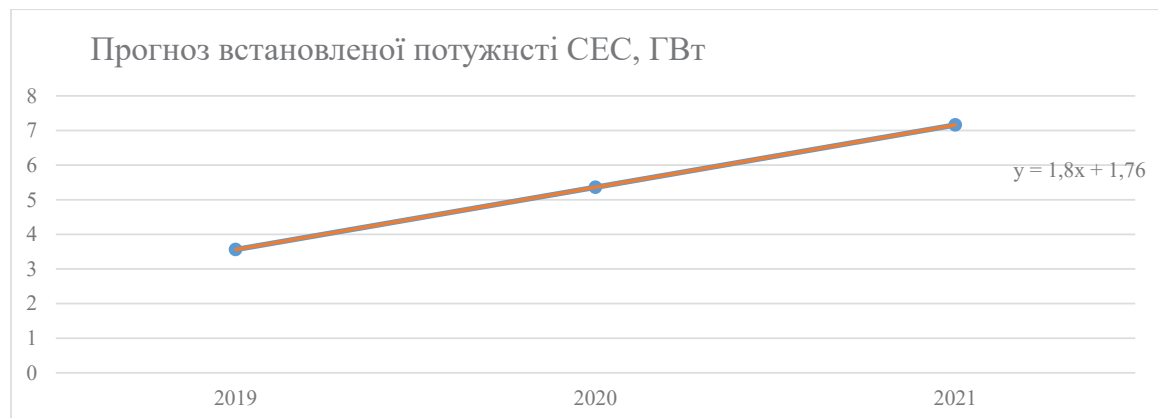


Рис. 3. Прогноз встановленої потужності СЕС в Україні

Таблиця 1

Таблиця сонячної інсоляції по містах України, 1985–2005 рр.													
	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру	рік
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Сімферополь	1,3	2,1	3,1	4,3	5,4	5,8	6,2	5,3	4,1	2,7	1,6	1,1	3,6
Вінниця	1,1	1,9	2,9	3,9	5,2	5,3	5,2	4,7	3,2	2,0	1,1	0,9	3,1
Луцьк	1,0	1,8	2,8	3,9	5,1	5,1	4,9	4,6	3,0	1,8	1,1	0,8	3,0
Дніпро	1,2	2,0	3,0	4,1	5,6	5,6	5,7	5,1	3,7	2,3	1,2	1,0	3,4
Донецьк	1,2	2,0	2,9	4,0	5,5	5,6	5,7	5,1	3,7	2,2	1,2	1,0	3,3
Житомир	1,0	1,8	2,9	3,9	5,2	5,2	5,0	4,7	3,1	1,9	1,0	0,8	3,0
Ужгород	1,1	1,9	3,0	4,0	5,0	5,3	5,3	4,8	3,3	2,0	1,2	0,9	3,2
Запоріжжя	1,2	2,0	2,9	4,2	5,6	5,7	5,9	5,2	3,9	2,4	1,3	1,0	3,4
Івано-Франківськ	1,2	1,9	2,8	3,7	4,5	4,8	4,8	4,4	3,1	2,0	1,2	0,9	2,9

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Київ	1,1	1,9	3,0	4,0	5,3	5,2	5,3	4,7	3,1	1,9	1,0	0,9	3,1
Кропивницький	1,2	2,0	3,0	4,1	5,5	5,5	5,6	4,9	3,6	2,2	1,1	1,0	3,3
Луганськ	1,2	2,1	3,1	4,1	5,5	5,6	5,7	5,0	3,6	2,2	1,3	0,9	3,3
Львів	1,1	1,8	2,8	3,8	4,7	4,8	4,8	4,5	3,0	1,9	1,1	0,8	2,9
Миколаїв	1,3	2,1	3,1	4,4	5,7	5,9	6,0	5,3	3,9	2,5	1,4	1,0	3,6
Одеса	1,3	2,1	3,1	4,4	5,7	5,9	6,0	5,3	3,9	2,5	1,4	1,0	3,6
Полтава	1,2	2,0	3,1	4,0	5,4	5,4	5,5	4,9	3,4	2,1	1,2	0,9	3,3
Рівно	1,0	1,8	2,8	3,9	5,1	5,2	5,0	4,6	3,0	1,9	1,0	0,8	3,0
Суми	1,1	1,9	3,1	4,0	5,3	5,3	5,4	4,7	3,2	2,0	1,1	0,9	3,2
Тернопіль	1,1	1,9	2,9	3,9	4,8	5,0	4,9	4,5	3,1	1,9	1,1	0,9	3,0
Харків	1,2	2,0	3,1	3,9	5,4	5,5	5,6	4,9	3,5	2,1	1,2	0,9	3,3
Херсон	1,3	2,1	3,1	4,4	5,7	5,8	6,0	5,3	4,0	2,6	1,4	1,0	3,6
Хмельницький	1,1	1,9	2,9	3,9	5,1	5,2	5,0	4,6	3,1	2,0	1,1	0,9	3,1
Черкаси	1,2	1,9	2,9	4,0	5,4	5,5	5,5	4,9	3,4	2,1	1,1	0,9	3,2
Чернігів	1,0	1,8	2,9	4,0	5,2	5,2	5,1	4,5	3,0	1,9	1,0	0,8	3,0
Чернівці	1,2	1,9	2,8	3,7	4,5	4,8	4,8	4,4	3,1	2,0	1,2	0,9	2,9

Таблиця 2

Коефіцієнти сезонності

	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру	рік
Сезонність	0,36	0,60	0,92	1,25	1,63	1,67	1,68	1,50	1,06	0,66	0,37	0,28	1,00

Накладаючи коефіцієнти сезонності на лінію (рис. 4), отримуємо дані помісячно за минулі періоди 2019–2020 рр. та прогнозований 2021 р. у припущенні, що тенденція до зростання не зміниться.

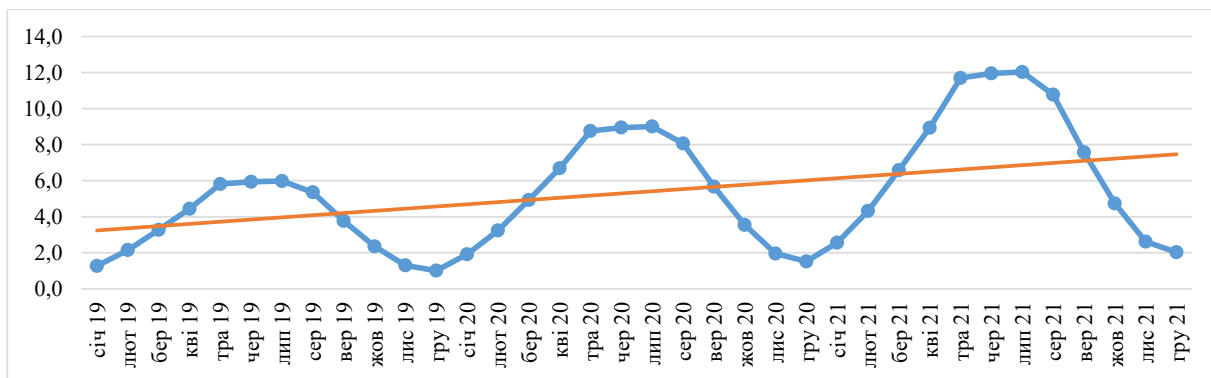


Рис. 4. Помісячні дані виробництва сонячної електроенергії, ТВт*год

Сонячна радіація – основний параметр, що впливає на виробництво електроенергії. Але існують і інші кліматичні фактори, що впливають, такі як температура навколишнього середовища та вологість повітря [14].

Для визначення і мінімізації теплових втрат енергії під час її передачі скористаємось законом Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R \Delta t = IU \Delta t \quad (2)$$

Де:

- Q – втрати енергії в мережі;
- I, U – відповідно сила струму та напруга;
- R – опір провідника;
- t – час протікання струму.

За допомогою закону Ома можна його перетворити і представити у вигляді:

$$Q = P^2 R \left(\frac{\Delta t}{U^2} \right) \quad (3)$$

Оскільки Δt і U для усіх варіантів мережі постачання енергії є сталими величинами, будемо зважувати лише на зміну P і R :

$$Q \sim P^2 R \quad (4)$$

Отже для мінімізації теплових втрат енергії під час її передачі та розподілу використовуємо цільову функцію:

$$\text{Min} \rightarrow Q = \sum_{i=1}^n P_i^2 R_i \quad (5)$$

Де:

- Q – втрати енергії в мережі;
- P_i – потужність передана через лінію i ;
- R_i – опір лінії i ;
- n – кількість ліній передачі.

Для прикладу розглянемо мережу:

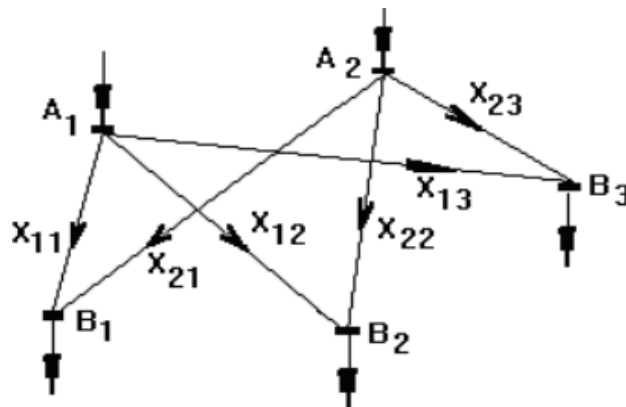


Рис. 5. Схема шляхів доставки електроенергії від виробників до споживачів

Де:

A_1, A_2 – джерела (постачальники) енергії;

B_1, B_2, B_3 – споживачі енергії;

X_i – втрати енергії на відповідному маршруті.

Задаємо потрібні обмеження для споживачів та виробників.

Таблиця 3

Матриця значень для теплових втрат шляхів передачі енергії, Вт²Ом

Постачальник	Споживач			Виробництво постачальником, кВт*год.
	B1	B2	B3	
A1	6000	5000	2000	2500
A2	5000	7000	4000	3100
Потреба споживача, кВт*год.	1500	1600	2500	min

За допомогою інструмента MS Excel «Пошук рішення» отримуємо оптимальні шляхи постачання електроенергії (табл. 4).

Бачимо, що маршрути A1-B1 та A2-B2 найменш вигідні.

До системи управління сонячною енергетикою входять такі компоненти: сонячні панелі, IoT-датчики, центральна система збору даних (сервер), аналіз даних, прогнозування генерації та оптимізація розподілу енергії, зберігання енергії (акумулятори), споживачі (будинки, підприємства, мережа).

Таблиця 4

Результат оптимізації, кВт*год.

Постачальник	Споживач			Виробництво постачальником
	B1	B2	B3	
A1	0	1600	900	2500
A2	1500	0	1600	3100
Потреба споживача	1500	1600	2500	min

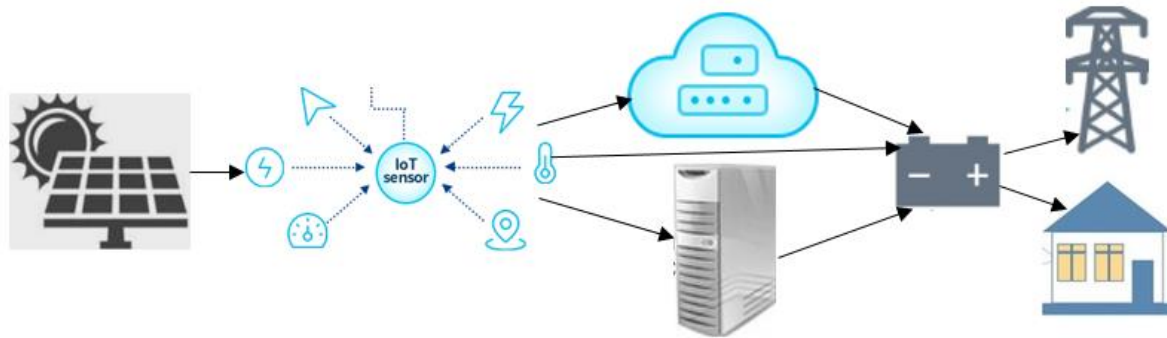


Рис. 6. Схема з'єднання компонентів енергетичної системи з впровадженням ІТ

Інтелектуальна сонячна система має низку переваг порівняно з традиційними підходами. Зокрема, у традиційній системі керування здійснюється вручну, а навантаження залишається фіксованим, що обмежує її адаптивність і ефективність. Натомість інтелектуальна система ґрунтується на застосуванні прогнозування, автоматизованого налаштування параметрів у реальному часі та технологій Інтернету речей (IoT), що забезпечує гнучкість, оптимізацію роботи та підвищену енергоефективність. Запропонований підхід має суттєві переваги над традиційними методами, зокрема забезпечує швидшу адаптацію до змін зовнішніх умов і підвищує ефективність використання енергетичних ресурсів. Інтеграція інформаційних технологій у систему управління дозволяє досягти оптимального балансу між попитом і пропозицією енергії, що є критично важливим для стабільного функціонування енергетичної інфраструктури. Результати дослідження також засвідчують, що застосування алгоритмів машинного навчання сприяє точнішому прогнозуванню генерації, знижуючи ризики як дефіциту, так і надлишку енергії. Наукова новизна роботи полягає в розробленні комплексного підходу до інтеграції інформаційних технологій із урахуванням особливостей сонячної енергетики. Зокрема, запропоновано модель, яка забезпечує інтеграцію різних технологічних рішень в уніфіковану систему з високим рівнем гнучкості та адаптивності. Представлені інженерні рішення відкривають перспективи для створення інтелектуальних систем управління, здатних динамічно реагувати на зміну умов експлуатації та ринкових вимог. Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості їх застосування в реальних умовах експлуатації. Запропоновані технологічні підходи сприяють зниженню експлуатаційних витрат і мінімізації впливу людського чинника на процеси управління. Розроблені методики можуть бути використані як основа для створення новітніх рішень у сфері енергетики, орієнтованих на забезпечення сталого розвитку та ефективного використання ресурсів.

Перспективи подальших досліджень передбачають розроблення нових моделей управління з урахуванням інтеграції інших джерел відновлюваної енергії, зокрема вітрової та гідроенергетики. Крім того, пріоритетним напрямом є забезпечення високого рівня кібербезпеки з метою захисту інтегрованих енергетичних систем. Додаткову увагу слід приділити підвищенню енергоефективності та оптимізації роботи енергетичної інфраструктури в умовах зростання вимог до її надійності та стійкості.

Висновки. У статті проаналізовано можливості інтеграції ІТ-рішень у системи управління сонячною енергетикою з метою підвищення ефективності їхнього функціонування. На основі проведеного дослідження сформульовано такі основні висновки:

1. Автоматизація та цифровізація процесів управління сприяють зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню прозорості у використанні енергетичних ресурсів і забезпеченню оперативної адаптації до змін у споживанні або кліматичних умовах.

2. Інтеграція алгоритмів машинного навчання для прогнозування вироблення та споживання енергії забезпечує вищу точність планування, що дає змогу оптимізувати використання ресурсів і зменшити залежність від невідновлюваних джерел енергії.

3. Використання інтелектуальних систем накопичення енергії та адаптивного розподілу навантаження підвищує стабільність енергопостачання, зокрема за умов пікових навантажень або раптового зниження вироблення енергії.

4. IT-рішення забезпечують повніше використання потенціалу відновлюваних джерел енергії, що сприяє зменшенню викидів парникових газів і відповідає завданням сталого розвитку.

5. Незважаючи на численні переваги, повноцінна інтеграція IT-рішень потребує подолання викликів, пов'язаних із забезпеченням кібербезпеки, масштабуванням інфраструктури та необхідністю значних стартових інвестицій. Водночас очікувана ефективність цих заходів у довгостроковій перспективі підтверджує доцільність їхнього впровадження.

Таким чином, впровадження IT-рішень у системи управління сонячною енергетикою є важливим чинником забезпечення її конкурентоспроможності, функціональної ефективності та стійкості. Подальші дослідження у цьому напрямі мають бути зосереджені на вдосконаленні методів прогнозування, створенні оптимальних алгоритмів керування та зниженні витрат на інтеграцію відповідних технологій.

Список використаних джерел:

1. Бутенко Л. А., Гладкий А. А. Інтелектуальні системи управління відновлюваною енергетикою: огляд та перспективи. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 3. С. 15–23.
2. Герасименко О. С., Лещенко П. М. Моделювання енергетичних систем із використанням машинного навчання. *Технічні науки: сучасні дослідження*. 2021. Т. 8, № 4. С. 45–52.
3. Кузьменко В. В., Чайковський І. С. Використання IoT у системах моніторингу сонячних електростанцій. *Інформаційні технології і системи управління*. 2020. Т. 5, № 2. С. 89–96.
4. Мапа сонячної інсоляції України. URL: https://www.artenergy-com-ua.translate.google.com/novosti/karta-solnechnoi-insoliatsii-ukrainy?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=uk&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=wapp (дата звернення: 05.04.2025)
5. Павлов І. В., Журкін М. О. Вплив цифрових рішень на ефективність відновлюваної енергетики. *Енергетика України*. 2021. № 6. С. 25–32.
6. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sector-vidnovlyuvanoji-energetyki-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-vijny> (дата звернення: 05.04.2025)
7. Частка "зеленої" енергетики в Україні за рік зросла вдвічі. URL: https://biz-liga-net.translate.google.com/ekonomika/tek/novosti/dolya-ses-i-ves-v-proizvodstve-elektroenergii-v-ukraine-vyrosla-v-dva-raza-za-god?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=uk&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=wapp (дата звернення: 05.04.2025)
8. Шмельова О. В., Кириленко П. Г. Перспективи використання хмарних обчислень у сфері сонячної енергетики. *Інноваційні технології в енергетиці*. 2020. № 4. С. 33–41.
9. Як вологість впливає на ефективність сонячних батарей? URL: <https://www.raggienergy.com/uk/news/how-does-humidity-affect-solar-panel-efficiency/> (дата звернення: 05.04.2025)
10. Elomari Y., Maach A., Hasnaoui M. et al. Integration of Solar Photovoltaic Systems into Power Networks: A Scientific Evolution Analysis. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 15. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/15/9249> (date of access: 05.04.2025)
11. Hussain D., Baloch M. S., Khan M. S. et al. Solar Energy Integration into Smart Grids: Challenges and Opportunities. *Letters in High Energy Physics*. 2024. URL: <https://lettersinhighenergyphysics.com/index.php/LHEP/article/view/916> (date of access: 05.04.2025)
12. Khan S. N., Ahmad J., Tariq M. et al. Impact and performance efficiency analysis of grid-tied solar photovoltaic system based on installation site environmental factors. *Letters in High Energy Physics*. 2022. Vol. 34, No. 5. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0958305X221106618> (date of access: 05.04.2025)
13. Li M., Hou B., Zhang Z. The enhancement of power system stability with large-scale renewable energy integration: Collaborative application research on big data, artificial intelligence, energy storage, and intelligent control technology. *Advances in Resources Research*. 2025. Vol. 5, No. 1. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/arr/5/1/5_79/_article/-char/en (date of access: 05.04.2025)
14. Mohammad A., Mahjabeen F. Revolutionizing Solar Energy with AI-Driven Enhancements in Photovoltaic Technology. *BULLET: Jurnal Multidisiplin Ilmu*. 2023. Vol. 2, No. 4. URL: <https://www.neliti.com/publications/592250/revolutionizing-solar-energy-with-ai-driven-enhancements-in-photovoltaic-technol> (date of access: 05.04.2025)

Дата надходження статті: 25.06.2025

Дата прийняття статті: 30.06.2025

Опубліковано: 23.09.2025