

УДК 697.329

Юрій Гижко, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-5702-4738>

Валерій Зварич*, д-р. техн. наук., ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0002-1271-4954>

Людвиг Остапчук, канд. техн. наук, ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0002-5565-0313>

Інститут електродинаміки НАН України, просп. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

*Автор-кореспондент: zvaritch@gmail.com

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ТА ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У ПОВОЄННИЙ ЧАС

Анотація. Природні коливання вітрової та сонячної енергії є бар'єром для надійної роботи електричних мереж із відновлюваними джерелами енергії. Для забезпечення стабільної генерації в таких енергетичних системах використовують технології, що компенсують цю нестабільність. У статті здійснено аналітичний огляд механічних, електромагнітних, електрохімічних та теплових методів акумулювання енергії. Подано огляд та порівняння накопичувачів енергії на базі акумуляторних батарей, висвітлено особливості накопичувачів теплової енергії та наведено приклади їх ефективного практичного використання. Показана доцільність спільного застосування акумуляторів теплової енергії та відновлюваних джерел енергії в системах теплозабезпечення споруд у повоєнний час. Відзначається, що надійність теплозабезпечення значною мірою залежить від технічного стану теплових мереж. Ця проблема загострюється у повоєнний період внаслідок пошкодження систем водо- та теплозабезпечення таких джерел як ТЕЦ, насосних станцій, котелень, що забезпечують тиск у трубопроводах. У статті відзначено важливу роль систем контролю та діагностування технічного стану як основного енергетичного обладнання, так і допоміжного, а саме трубопроводів, елементів систем з відновлюваними джерелами енергії та систем діагностування накопичувачів енергії для надійного енергозабезпечення. Виконано огляд існуючих систем діагностування технічного стану систем з відновлюваними джерелами енергії та показана доцільність їх використання у повоєнний час.

Ключові слова: акумулятори електричної енергії, акумулятори теплової енергії, теплозабезпечення, діагностичні системи.

1. Вступ

Як відзначав у своїй доповіді В.Ф. Залужний, «головний урок сучасної війни – без енергії будь-яка технологічна система перетворюється на купу мертвого заліза» [1]. Війна на виснаження – це насамперед війна проти економічних можливостей держави. У такій війні саме енергетика визначає межу витривалості всієї нації та реалізацію потенційних спроможностей держави.

Сьогодні енергосистема – це не просто тилова інфраструктура, це новий театр воєнних дій, де старі методи централізованого захисту стають головною вразливістю.

Централізовані об'єкти (великі тепло-, гідроелектростанції, атомні електростанції, лінії електропередач) перетворюються на ахіллесову п'яту національної безпеки під час війни.

Як відзначено в [1], необхідно перейти до принципу енергетичної стільниковості. Енергетична система країни повинна складатися з тисяч автономних енергетичних «клітин», здатних підтримувати життя всього організму, навіть коли центральні магістралі перебиті. Це не питання екології чи тарифів – це питання національної безпеки та спроможності тримати удар у довгій війні ресурсів.

Одним із кроків згідно з умовами Паризької кліматичної угоди, яку підписали 177 країн та Європейський Союз (ЄС), є перехід до низьковуглецевої економіки та поступове збільшення в електроенергетиці частки відновлюваних джерел (ВДЕ).

© Гижко Ю., Зварич В., Остапчук Л., 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC0 1.0 Universal
<https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0>

Природні коливання вітрової та сонячної енергії, які генерували вже 12 % світової електроенергії у 2022 році [2], є бар'єром для масштабованості та надійності мережі. Зростаючий попит на енергію та періодичне старіння інфраструктури вимагають модернізації мереж для пристосування розподіленої генерації та динамічного управління навантаженням [3].

Ще з початку 1990-х років почалося створення єдиного європейського енергетичного ринку. У статті 194 Договору про функціонування Європейського Союзу закріплені основні положення політики ЄС. У 2021 році було прийнято пакет «Fit for 55», згідно з яким держави-члени Євросоюзу розробляють національні плани з енергетики та зміни клімату (NEC) з 2021 по 2030 рік.

Необхідно відзначити, що відповідні структури Європейського Союзу приділяють велику увагу створенню ефективних систем накопичення енергії для відновлюваних джерел. Згідно з планами Європейської комісії REPowerEU ЄС може до 2050 року стати першим кліматично нейтральним континентом.

Для прискорення декарбонізації європейської енергетичної системи шляхом розгортання стійких та екологічно чистих рішень для зберігання енергії була створена Коаліція зі зберігання енергії. Коаліція складається з європейських асоціацій чистої енергії: SolarPower Europe, Європейської асоціації зберігання енергії (EASE) та WindEurope, а також Breakthrough Energy, яку підтримує Білл Гейтс.

З точки зору сфер компетенції робота всіх складових Коаліції спрямована на ринок електроенергії та безпеку її постачання. Через такі перешкоди, як відсутність довгострокових контрактів, а також складність отримання дозволів та доступу до фінансової підтримки, проекти накопичення енергії ще не настільки привабливі для інвесторів. Однак подвійна проблема забезпечення енергетичної безпеки при досягненні мети кліматичної нейтральності вимагає прискорення впровадження накопичувачів енергії разом та паралельно з виробництвом електроенергії з відновлюваних джерел.

Для подолання нестабільної генерації енергетичних систем з відновлюваними джерелами, пов'язаної з добовими і сезонними коливаннями обсягів виробництва електроенергії, використовують спеціальні технології, які компенсують таку нестабільність. Якщо електричні станції на основі відновлюваних джерел працюють у складі, наприклад, об'єднаної енергетичної системи, необхідно мати резервні потужності ТЕС та ГЕС або технології накопичення та зберігання енергії.

Технології накопичення енергії можуть відігравати помітну роль у впровадженні електростанцій з ВДЕ. Використання системи накопичення енергії сприяло б їх підключенню до мережі в періоди, коли вона стикається з високим піковим попитом. Дослідження показали, що впровадження накопичувачів енергії може дати змогу збільшити використання ВДЕ, наприклад, для вітрової енергії до 30 % [2].

Воєнні дії росії призвели до значних пошкоджень енергетичної інфраструктури України. Це значно прискорило необхідність переходу до децентралізованої енергетичної системи, зокрема відновлюваної енергетики.

2. Методи акумулювання енергії

Метою даної роботи є огляд існуючих технологій зберігання енергії, огляд систем діагностування енергетичних об'єктів, у складі яких є установки накопичення енергії, та визначення їх переваг і недоліків, а також доцільності їх застосування у повоєнний час.

Існують різноманітні технології накопичення, які використовуються у відновлюваній енергетиці [2, 4–8].

Методи акумулювання енергії згідно з [3] можна класифікувати наступним чином: механічні, електромагнітні, електрохімічні та теплові.

Гідроакумулюючі системи, Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

Найбільшою та найдосконалішою технологією з насосними системами є гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС). У всьому світі працюють приблизно 300 таких систем. PHES складається з двох резервуарів, розташованих на різних висотних рівнях: вода, накопичена у верхньому резервуарі, має потенційну або накопичену енергію. Прикладом такої системи може бути Київська ГАЕС.

ГАЕС можуть використовувати реверсивні машини (реверсивні турбіни / насоси) або різні машини (насоси) для накопичення та скиду води. Технічні характеристики насосних гідроакумулюючих систем роблять їх придатними для об'ємного зберігання надлишків змінних відновлюваних джерел енергії. Енергетичні потужності варіюються від 10 до 4000 МВт. При номінальній потужності тривалість робочого режиму коливається від 1 до 24 годин, що дозволяє зберігати енергію від годин до днів. Коефіцієнт корисної дії в обох напрямках становить 70–85 %.

Зараз пропонуються альтернативні технології ГАЕС, наприклад на морській воді (SWPHES), де використовуються резервуари з морською водою на вершинах скель для зменшення площі використання землі та розширення робочих майданчиків. Однак менші перепади висот зменшують потенціал накопиченої енергії, а корозійна природа морської води збільшує витрати на технічне обслуговування. Тому тільки плануються такі нові проєкти на Гаваях, в Ірландії та Греції [9].

Системи зберігання енергії за допомогою стисненого повітря, Compressed Air Energy Storage (CAES)

CAES також є досить старою технологією, однак кількість установок у світі не така велика. CAES, світова встановлена потужність якої становить 450 МВт (0,3 % від загальної потужності сховищ), перетворює електричну енергію на механічну шляхом стиснення повітря за допомогою електричних компресорів у підземних порожнинах (соляні печери, покинуті шахти, скельні споруди тощо). Стиснене повітря зберігають під високим тиском. Потрібна енергія – воно вивільняється через турбіну. Порівняно з іншими ця технологія має такі переваги, як тривалий термін служби, низький рівень технічного обслуговування та мінімальний вплив на навколишнє середовище.

Системи зберігання енергії за допомогою стисненого повітря можна поділити на адіабатичні, діабатичні, ізотермічні, майже-ізотермічні та інші. Найбільш перспективними, на наш погляд, є адіабатичні та майже-ізотермічні установки.

На сьогодні почало використовуватися вдосконалене адіабатичне накопичення енергії стисненого повітря (AA-CAES). Уловлюючи та повторно використовуючи тепло стиснення, ці накопичувачі можуть мати ККД до 70 %.

Різновидом ізотермічних установок є ізотермічні накопичувачі енергії стисненого повітря (ICAES). Ці установки характеризуються вищою ефективністю порівняно із традиційними сховищами стисненого повітря та можуть теоретично досягати ефективності до 95 %.

У світі налічується 28 діючих систем зі зберігання енергії стисненого повітря, з найбільшими об'єктами у Німеччині (Ханторф), США (Макінтош) та Китаї. Більшість систем CAES зосереджено у Північній півкулі, зокрема 16 – у Північній Америці (14 – у США, 2 – у Канаді), 5 – у Європі та 3 – у Китаї. Їх поширеність у розвинених країнах пов'язана з лібералізацією енергетичних ринків, проблемами зміни клімату, цілями розвитку відновлюваної енергетики та політикою підтримки таких проєктів. Створення таких установок у країні в умовах воєнного стану є економічно недоцільним.

Накопичувачі енергії за допомогою маховика, Flywheel Energy Storage (FES)

FES – це накопичувачі енергії, які зберігають енергію у формі кінетичної енергії у вигляді обертової маси маховика. Вони поділяються залежно від швидкості на низько- та швидкохідні. Низькошвидкісні системи мають оберти менше ніж 10000 об/хв. Одним із прикладів є маховики, що складаються з вала, який обертається на двох магнітних підшипниках для зменшення тертя, підшипникової системи та електричних і електронних пристроїв [3]. Щоб зменшити втрати, всю конструкцію поміщають у вакуум. Під час процесу «заряджання» ротор прискорюється двигуном до дуже високої швидкості, і енергія підтримується в системі як кінетична. У процесі «розрядки» маховики вивільняють енергію та рухають машину.

Зберігання механічної енергії за допомогою маховиків базується на використанні обертальної кінетичної енергії та її подальшому вивільненні під час гальмування ротора [9]. Сучасні системи використовують високошвидкісні композитні або сталеві ротори, причому сталь є більш економічно вигідною. Досягнення в галузі активних магнітних підшипників збільшили швидкість та зменшили знос, що робить маховики ідеальними для швидких сплесків енергії з часом розрядки, що тривають секунди або хвилини.

Суперконденсаторне накопичення енергії, Supercapacitor Energy Storage (SES)

У SES енергія накопичується в електричному полі. Принцип роботи такий самий, як і у звичайного конденсатора, однак суперконденсатори використовують шари поляризованої рідини між провідним іонним електролітом і провідним електродом для збільшення ємності. Через те, що ємність також залежить від площі поверхні електродів, для збільшення площі використовується високопористий матеріал.

Найпотужнішими виробниками суперконденсаторів є: Panasonic (Японія), Maxwell Technology (Японія), Elna America Inc. (США), NESS CAP Ultracapacitors (Південна Корея).

Серед найбільш перспективних суперконденсаторів є суперконденсатори з графеновими обкладками, розроблені в KAIST (Південнокорейський інститут науки і технологій).

Накопичувачі на базі акумуляторних батарей

Акумуляторні батареї залежно від матеріалів, які використовуються, поділяються на свинцево-кислотні, нікель-кадмієві, літій-іонні, сірчано-натрієві, хлоридно-натрієві, а також акумуляторні батареї потокового типу.

Використання систем зберігання енергії з мережевими акумуляторами швидко розширюється, і за своєю потужністю вони можуть перевершити гідроакумулюючі електростанції. До початку 2022 року встановлена потужність акумуляторних батарей досягла 16 ГВт при щорічному зростанні на 60 % (насамперед таке зростання спостерігається у США, Китаї та Європі).

А. Свинцево-кислотні батареї зберігання енергії, Lead Acid Energy Storage (LAES)

Це найбільш відпрацьована технологія зберігання енергії на сьогодні [3]. Можна виділити два типи свинцево-кислотних акумуляторів: залиті (flooded Acid FLA) і клапанно-регульовані (Valve-regulated Acid VRLA). Останні поділяються на абсорбуючі електролітом батареї і гелеві акумулятори. Найбільш дешеві – FLA, їх часто використовують для автономних сонячних систем.

Б. Нікель-кадмієві батареї зберігання енергії, Nickel Cadmium Battery Energy Storage (NCES)

NCES-батареї є ефективним рішенням накопичення енергії. Такі батареї були першими, що використовувалися в мобільних телефонах. NCES складається з позитивного (гідроксид нікелю) та негативного (металічний кадмій) електродів. Вони розділені нейлоновою перегородкою, а водний гідроксид калію є електролітом. Гідроксид нікелю реагує з водою та утворює гідроксид нікелю та гідроксид-іон. На негативному електроді утворюється гідроксид кадмію. Під час заряджання батареї відбувається зворотний процес. NCES мають ефект пам'яті, тому їх часто використовують як резервні батареї.

В. Літій-іонні батареї зберігання енергії, Lithium Ion Battery Energy Storage (LIES)

Ця технологія вперше була впроваджена у 1990 році. Тут в якості катода використовується літєвий оксид металу, а в якості анода – графічний вуглець із шаровою структурою [10]. Електроліт – сіль літію в органічному розчиннику. Під час розряду літій мігрує від анода до катода. Під час зарядки відбувається зворотний процес. Вага літій-іонної батареї становить приблизно половину ваги нікель-кадмієвої батареї аналогічної потужності NCES [11]. Послідовне або паралельне з'єднання таких батарей формує акумуляторні модулі або акумуляторні ланцюги. Це дозволяє створювати автономну систему накопичення енергії від акумуляторів. Так, наприклад, у Німеччині в м. Ярделунд (Järderlund), поблизу кордону з Данією, розташовано акумуляторний ланцюг потужністю 48 МВт і кількістю близько 10 000 літій-іонних батарей, яких достатньо для зберігання електроенергії від мережі вітрогенераторів для понад 5 000 німецьких домогосподарств протягом 24 годин.

Сучасним типом літій-іонних акумуляторів є акумулятори LiFePO_4 (літій-залізо-фосфатні), в яких катодом служить LiFePO_4 , а анодом – графіт. Перевага таких акумуляторів порівняно з іншими літій-іонними технологіями (такими як літій-кобальт-оксид або літій-марганець-оксид) полягає в його підвищеній стабільності та безпеці. Вони мають менший ризик загоряння та вибухів, оскільки їх хімічна структура більш стійка за високих температур та фізичного пошкодження.

Г. Сірчано-натрієві батареї зберігання енергії, Sodium Sulphur Battery Energy Storage (NaSES)

У 2000 році вперше було впроваджено сірчано-натрієві акумулятори, в яких хімічна енергія перетворюється на електричну. Електрод з позитивним зарядом занурюють у розплавлену сірку, а

негативний електрод – у розплавленій натрії [3]. Електролітом у цьому випадку є оксид β -алюмінію. Таким чином, під час розрядки батареї іони натрію проходять через електроліт і з'єднуються на позитивному електроді з сіркою, створюючи полісульфід натрію. Такі батареї працюють при температурі 300–500 градусів Цельсія та достатньо небезпечні. На сьогодні NaSES масово виробляє тільки компанія Nippon NGK Corporation (NGK), яка використала їх у понад 200 розробках електростанцій. Нові варіанти сірчано-натрієвих акумуляторів для роботи при кімнатній температурі (RT-Na-S) пропонують енергетичну щільність, яка порівняна з літій-іонними акумуляторами, хоча традиційні високотемпературні Na-S-системи демонструють нижчі діапазони температур використання. Літій-іонні акумулятори залишаються галузевим стандартом для компактного зберігання енергії завдяки сприятливому співвідношенню маси до заряду літію [9]. Однак Na-S-системи мають обмежений термін служби через деградацію ємності з часом, тоді як літій-іонні батареї залишаються довговічними з моменту їх комерціалізації у 1990 році.

Д. Натрієво-нікель-хлоридні батареї зберігання енергії, Sodium Nickel Chlorid Energy Storage

Натрієво-нікель-хлоридні батареї належить до сімейства високотемпературних батарей останнього покоління. Електрод з негативним зарядом складається з рідкого натрію (наприклад, NaS), а електрод з позитивним зарядом – з хлор-нікелю. Також використовується електроліт із оксиду β -алюмінію, але крім цього є другий рідкий електроліт (хлоралюмінат натрію), який використовується для швидкого транспортування іонів натрію. Найкраща продуктивність електролізера досягається в діапазоні температур 250–350°C. Прикладом використання можуть бути промислові батареї Durathon для фотоелектричних, вітрових та інших типів електростанцій, а також акумуляторні батареї типу ZEBRA для комп'ютерів і сканерів.

Е. Акумуляторні батареї потокового типу, Flow Battery Energy Storage (FBES)

Акумуляторної батареї потокового типу використовують принцип окислювально-відновного переходу. Існує три основні типи таких батарей: окисно-відновний ванадій (Vanadium Redox VR), бромідний полісульфід (Polysulphide Bromide PSB), бромний цинк (Zinc Bromine ZnBr). Принцип роботи потокових батарей відрізняється від звичайних. Енергія зберігається як потенційна хімічна енергія за допомогою оборотної реакції між двома електролітами. Енергія накопичується у розчинах електролітів. Розмір стека елементів визначає потужність, тоді як об'єм електроліту визначає енергетичну ємність [3]. Акумуляторні батареї потокового типу можна адаптувати для використання як в приватних будинках, так і в промисловості.

Ринок акумуляторів диверсифікується, при цьому свинцево-кислотні батареї залишаються переважаючими в автомобілях і стаціонарних пристроях (понад 100 млн кВт, встановлених у всьому світі), а літій-іонні батареї домінують в електромобілях та портативній електроніці (понад 5 мільярдів одиниць). Перспективними є батареї на основі натрію і цинку, а також нікелеві батареї, які, за прогнозами, перевищать 500 мільйонів установлених батарей [9]. Накопичувачі на основі акумуляторних батарей різної потужності знайшли широке використання у повоєнний час як у приватних домогосподарствах, так і в промисловості. Вони є актуальними (як у вигляді павербанків різної потужності, так і зарядних станцій різної потужності) під час як аварійних, так і планових відключень електроенергії.

Водневі технології зберігання енергії, Hydrogen Energy Storage (HES)

Зберігання енергії з використанням водню є однією зі складних та небезпечних технологій [12], яка має декілька складових: створення водню, зберігання водню, створення енергії з водню.

Водень можна створити шляхом: видобутку викопного палива, реакції пари з метаном та електролізу [3]. На сьогодні зберігання водню здійснюється як у стисненому, так і в рідкому стані. Перспективним методом є розроблення технологій використання металевих гідридів. Енергію з водню можна отримати різними способами. Одним з перспективних є паливні комірки.

Системи перетворення надлишку відновлюваної електроенергії на газ, Power-to-Gas (P2G)

Системи Power-to-Gas (P2G) перетворюють надлишок відновлюваної електроенергії у водень шляхом електролізу з додатковим метануванням з використанням CO₂ для виробництва синтетичного метану, що дозволяє зберігати енергію у газоподібній формі, сумісній з існуючою інфраструктурою

природного газу [9]. P2G сприяє створенню інтегрованих енергетичних систем шляхом об'єднання електричних та газових мереж, що особливо важливо для віддалених вітрових електростанцій, зменшуючи обмеження та забезпечуючи багатосекторне використання енергії [9]. Методи зберігання водню включають стиснені / рідкі форми та геологічні рішення, такі як соляні каверни, які мають мінімальні ризики витоку. Синтез метану шляхом метанування здійснюється з використанням металоорганічних каркасів (MOF) або клатратних гідратів для ефективного зберігання.

Накопичувачі теплової енергії, Thermal Energy Storage (TES)

За характером фізико-хімічних процесів, що протікають у теплових акумуляторах, такі технології можна розподілити на чотири групи [23]:

1. Акумулятори ємнісного типу, в яких використовується теплоємність акумуляуючого матеріалу (що нагрівається або охолоджується) без зміни його агрегатного стану (природний камінь, галька, пісок, бетон, солі та їх розчини, вода та інше);
2. Акумулятори фазового переходу, в яких використовується теплота зміни агрегатного стану речовин (плавлення, затвердіння, конденсації, випаровування);
3. Акумулятори, засновані на виділенні та поглинанні теплоти при зворотних хімічних і фотохімічних реакціях;
4. Абсорбційні накопичувачі використовують тепло абсорбції пари матеріалів, таких, наприклад, як цеоліт-вода (адсорбція) або вода-бромід літію (абсорбція).

TES є економічно ефективним, довговічним та екологічно чистим накопичувачем енергії [3, 24].

Згідно з нормативними документами для акумуляції теплової енергії можуть бути використані виключно магістральні теплові мережі [19]. Використання теплових мереж для зберігання теплової енергії було досліджено в роботах [12–21].

Найпоширенішою конфігурацією TES є двобачова система зі зберіганням та вивільненням теплової енергії шляхом нагрівання та охолодження накопичувального середовища та з використанням сонячної солі (бінарної суміші 60 % NaNO_3 і 40 % KNO_3) як рідини для передачі тепла (HTF). Розплавлену сіль обирають як одну з найкращих рідин для накопичення енергії, а низька вартість розплавленої солі TES (MSTES) робить проекти економічно доцільними.

На сьогодні найбільш поширеними є TES ємнісного типу [19]. Питома ємність таких акумуляторів становить 10–80 кВт·год/т, робоча температура може досягати 1000°C. Теплові акумулятори енергії (ТАЕ) такого типу найпростіші та найдешевші порівняно з іншими технологіями акумуляування теплової енергії.

Велике значення для ефективної роботи енергетики має якість теплових мереж. У багатьох містах України пошук витоків став невід'ємною щоденною складовою виконання необхідних робіт із забезпечення водо- та теплопостачання населення. Зростання загального з роками зносу трубопроводів та необхідність інтенсифікації робіт з оперативного усунення витоків підвищує вимоги до точності та оперативності інструментального визначення їхніх місць. Проблема загострюється у повоєнний період внаслідок додаткових пошкоджень систем водо- та теплопостачання, зокрема джерел – ТЕЦ, котельень, насосних станцій, оскільки саме вони повинні забезпечувати достатньо високий тиск у трубопроводах.

Труднощі виникають при визначенні пошкодженої ділянки, наприклад при з'ясуванні причин підвищеного підживлення мережевої води на її джерела, а також при з'ясуванні точного розташування витоків для виконання у цих місцях розкопок. Причиною труднощів є низка факторів, що ускладнюють пошук витоків, а саме:

- розгалуженість підземної трубопровідної мережі у поєднанні зі зносом запірної арматури;
- часта відсутність надходження води, що втрачається через пошкодження, у теплові камери або колодязі;
- занадто низький тиск у трубах, що ускладнює пошук акустичними методами;
- неоднозначність показань течешукачами координат пошкоджень через складну хвильову структуру реєстрованих акустичних шумів витоків;
- відсутність чіткої реєстрації течешукачем витоку через мале відношення сигнал-завада у реєстрованих сигналах;

- помилковість показань координат витоків через відмінність фактичної швидкості акустичних хвиль у трубопроводі від заданої у приладі;
- залежність показань приладу від вибору місць встановлення датчиків на трубопроводі;
- наявність, крім витоків, критичних стоншень стінок трубопроводів, що резонують з шумом витоків, та ряд інших факторів.

Тому оперативний ремонт трубопроводів та наявність відповідного технічного оснащення для діагностики витоків трубопроводів відіграє значну роль в процесі функціонування систем теплозабезпечення [18]. Виток завжди супроводжується вібрацією або звуковим сигналом, тому вібродіагностика дає змогу знайти місцезнаходження течії. Для оперативного визначення місць витоків найбільш поширеними на сьогодні є акустичні та кореляційні течешукачі. При акустичному методі пошуку витікання дефект супроводжується акустичними сигналами, які можна зафіксувати на або над трубопроводом. Одним з основних недоліків акустичних течешукачів є їх підвищена чутливість до сторонніх шумів. У кореляційних течешукачах датчики розміщені безпосередньо на трубопроводі по обидва боки від місця витоків, відстань між ними може досягати декількох сотень метрів.

3. Приклади ефективного практичного використання накопичувачів електроенергії

У країнах, де енергія вітру забезпечує виробництво великої кількості електроенергії, значна її частина може використовуватися для підтримки системи централізованого теплопостачання (ЦТ) у періоди низького попиту на електроенергію [10, 11, 14]. Вже до 2011 року половина міських районів Китаю мала системи ЦТ. Також більше 60 % опалення у приватних датських будинках забезпечує ЦТ [15]. Використовуючи переваги добре обладнаних теплотерез цих районів, вітрова електростанція може бути рентабельною і підключеною до звичайних теплових терміналів [16].

Дослідження Оказакі [13] показали економічну ефективність вітрової електростанції з використанням прямого перетворення теплової енергії та TES порівняно з традиційними технологіями вітрових електростанцій.

Методи акумулювання енергії, розглянуті в [4], показали, що для систем з вітроустановками найбільш ефективною системою накопичення енергії є гідроакумулююче накопичення енергії (PHES). У світі збудовано приблизно 240 гідроакумулюючих накопичувачів загальною потужністю близько 90 ГВт; період надійної експлуатації таких систем становить близько 50 років.

Також вважається перспективним використання накопичувачів енергії за допомогою стисненого повітря, хоча у світі таких працюючих установок тільки дві – на заводі Хинторф у Німеччині (Huntorf plant), потужністю 321 МВт, та заводі Макінтош у США (McIntosh plant), потужністю 110 МВт. Період надійної експлуатації таких систем становить вже близько 40 років.

На сьогодні швидко розвиваються різноманітні технології накопичувачів на базі акумуляторних батарей. Характеристики деяких систем накопичення енергії наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Характеристики деяких систем накопичення енергії

	Максимальна потужність (МВт)	Час розряджання	Максимальна кількість циклів, або життєвий цикл	Ефективність
Гідроакумулюючі системи	3000	4–16 год	30–60 років	75–85 %
Системи акумулювання на основі стисненого повітря	1000	2–30 год	20–40 років	40–70 %
Розплавлена сіль (терм.)	150	години	30 років	80–90 %
Літій-іонні акумулятори	100	1 хв – 8 год	1000–10 000 циклів	85–95 %
Свинцево-кислотні акумулятори	100	1 хв – 8 год	6–40 років	80–90 %
Акумуляторні батареї потокового типу	100	години	12000–14000	60–85 %
Водневі технології накопичення енергії	100	Хвилини-тижні	5–30 років	25–45 %
Накопичувачі енергії за допомогою маховика	20	Секунди-хвилини	20000–100000	70–95 %

Потужність літій-іонних батарей зберігання енергії уже може досягати декількох мегават. Вони допускають до 6000 циклів заряду / розряду.

Сірчано-натрієві акумуляторні батареї NaSES можуть досягти потужності 200 МВт, допускають 4500 циклів заряду / розряду, а період їх надійної експлуатації може становити 15 років. Такі системи накопичення експлуатуються на підприємствах Японії – у Роккашо (Rokkasho), потужністю 34 МВт, та у Хітачі (Hitachi), потужністю 8 МВт [25].

Економічні характеристики деяких технологій зберігання енергії наведено в таблиці 2 [9].

Таблиця 2. Економічні характеристики деяких технологій зберігання енергії

Технологія	LCOST (Нормована ціна зберігання енергії (дол./кВт)	Фактори, що впливають на вибір технології	Прибутковість NPV>0
Літій-іонні батареї	0,08-0,15	Зниження капітальних витрат (300 доларів США/кВт·год), висока ефективність (95 %), але обмежена кількість циклів	NPV>0
Гідроакумуляуючі системи	0,12-20	Низькі експлуатаційні витрати, тривалий термін експлуатації (60 років), але високі початкові капітальні витрати	NPV>0
Акумуляторні батареї потокового типу	0,06-0,12	Винятковий термін експлуатації (14 000 циклів) компенсує помірну ефективність	NPV>0
Водневі технології накопичення енергії	0,40-0,60	Високі капітальні витрати (2000 доларів США/кВт), низький ККД (45 %) та енергоємний процес стиснення	NPV<0
Накопичувачі енергії за допомогою маховика	0,25-0,50	Високий цикл експлуатації (100 000 циклів), але низька енергетична щільність (80 Вт·год/кг)	NPV>0

Потужність зберігання енергії свинцево-кислотних батарей може досягати 10 МВт. Накопичувачі допускають 2000 циклів заряду / розряду, а їх використання відоме у Каліфорнії, на Гаваях (США) та в Пуерто-Ріко [25].

Все більше накопичувачів великої потужності використовують при підключенні станцій з відновлюваними джерелами енергії в енергосистему. Оцінка ефективності роботи накопичувачів електроенергії у складі енергетичних мереж України в мирний час представлена в роботі [8].

Деякі дослідження щодо накопичувачів енергії, їх порівняльні характеристики та економічні показники представлено в роботі [9].

Необхідно відзначити, що представлені характеристики накопичувачів оцінювались для мирного часу, вони можуть суттєво відрізнятися у повоєнний час.

4. Спільне використання накопичувачів електроенергії і відновлюваних джерел

Використання накопичувачів електроенергії великої потужності спільно з відновлюваними джерелами має як переваги, так і труднощі, одним з напрямів подолання яких є контроль та діагностика технічного стану таких систем.

Прикладом спільного використання накопичувачів і відновлюваних джерел є розроблення та створення компанією Siemens спільно з Технічним університетом Гамбурга експериментальної установки системи термального накопичення енергії для вітроенергетики [17]. Така система перетворює енергію вітру на теплову до 600 градусів Цельсія, а потім накопичується в ізольованому кам'яному накопичувачі, інтегрованому у природний ландшафт. Якщо необхідно, за допомогою парової турбіни ця теплова енергія знову перетворюється на електричну. Siemens оцінював, що така система має можливість накопичувати 36 МВт теплової енергії. Котел може генерувати пар потужністю до 1,5 МВт 24 години на добу. Розробники оцінюють ефективність такої експериментальної установки у 25 % на етапі розробки з потенційним збільшенням ефективності до 50 %.

Особливо великого значення набуває спільне використання накопичувачів теплової енергії та відновлюваних джерел енергії в Україні у повоєнний період, оскільки дає можливість підвищити стійкість енергосистеми та забезпечити не тільки електроенергією, а також і тепловою енергією інфраструктуру, яка частково зруйнована. Але такі системи теплозабезпечення повинні відповідати певним умовам. Використання теплових мереж є економічно вигідним методом короткострокового зберігання теплової енергії в рамках систем централізованого теплопостачання.

Зважаючи на повоєнний час, доцільно максимально використати уцілілу енергетичну інфраструктуру. Наприклад, якщо зберіглася електрична станція, що працює на основі відновлюваних джерел енергії, а також розподільча мережа 10 кВ (або навіть 380 В), яка з'єднує станцію з житловим комплексом (або навіть будинком), де необхідно відновити теплозабезпечення, тоді за умови руйнування теплових мереж доцільно використати локальні ТАЕ.

Дослідження щодо спільного використання відновлюваних джерел та накопичувачів енергії представлено в роботі [22]. Відзначається, що незважаючи на військовий стан, у 2024 році сонячні електростанції України подали приблизно 800–850 МВт потужності завдяки бізнесу та домогосподарствам. Це пов'язано з можливістю достатньо швидко відновити роботу сонячної електростанції після можливих ворожих ударів порівняно з вітровою енергетикою. В роботі показана доцільність впровадження проєктів сонячних електростанцій спільно з акумуляторними установками збереження енергії (BESS). Необхідно відзначити, що 16 червня 2022 року набрав чинності Закон № 2046-IX «Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії», який вперше врегульовує питання експлуатації установок зберігання енергії на ринку електроенергії. Робота [22] містить дані Національної лабораторії відновлюваної енергетики (NREL), що регулярно публікує звіти з оцінки витрат, які деталізують вартість встановлення фотоелектричних і накопичувальних систем. Однак необхідно підкреслити, що ці дані стосуються мирного часу.

З метою виявлення несправностей енергетичного обладнання на ранніх стадіях їх виникнення важливо використовувати різні види діагностики та контролю, особливо у повоєнний час, оскільки в цей період накладається необхідність швидкого відновлення енергообладнання.

Ефективність систем контролю та діагностики, якими оснащене енергетичне обладнання, визначають надійність їх роботи. Побудова таких систем відбувається в кілька етапів: розроблення математичних моделей інформаційних сигналів таких систем, виділення на основі аналізу таких моделей найбільш інформативних діагностичних ознак, побудова навчальних сукупностей і розв'язувальних правил, розроблення алгоритмів діагностики та самої системи на основі отриманих наукових результатів.

Методи діагностики енергетичного обладнання різноманітні [26] і залежать від типів накопичення та типів систем генерування, що використовуються.

5. Системи діагностування вітрогенераторів як елементів енергетичних систем з відновлюваними джерелами

Надійність локальних енергетичних систем, які включають системи з вітрогенераторами, залежить від надійності систем діагностування таких об'єктів [27–29].

Середній кошторис ремонту вітротурбіни потужністю 1,5 МВт з урахуванням оренди крана та кошторису робіт становить 300 000\$ і виконується протягом 10 днів. Тому важливою є превентивна діагностика таких електричних агрегатів.

Розробкою подібних систем діагностики займаються такі компанії, як Brüel & Kjær, PCB, SPM, Deriton, Bently Nevada, Timken, а також виробники великого електротехнічного обладнання – Siemens, ABB та ін. Зрозуміло, що у повоєнний час доцільно мати мобільні системи моніторингу та діагностики.

Необхідно відзначити, що на базі платформи Predix™ General Electric розробила додатки, сумісні зі стандартними системами моніторингу новітніх вітротурбін власного виробництва [30].

Спеціалізована система вібродіагностування розроблена компанією Bently Nevada, яка успішно співпрацює з General Electric [31]. Серед розробок слід відзначити Bently Nevada ADAPT wind monitoring system, до складу якої входить Bently Nevada 3701/60 monitor, який має зв'язок через Ethernet

із мережевою системою контролю супервізора та обробки сигналів (SCADA) та із сервером вітроелектростанції. Програмне забезпечення на базі платформи ADAPT автоматично визначає зміни швидкості обертання вітротурбіни та виділяє специфічні частоти, що несуть інформацію про несправності.

Система вібраційного моніторингу вітротурбін (Vibro Vind Monitoring System) розроблена Брюль і К'єр (Brüel & Kjær). Система встановлена на вітрогенераторах Gamesa, Vestas, GE, Repower [32].

Компанія Timken спеціалізується як на розробці самих підшипників кочення для вітрогенераторів (які мають конструктивні особливості), так і на створенні приладів та систем їх моніторингу. Прилади є як на основі використання методу ударних імпульсів, так і інших методів. Найбільш цікавою є система StatusCheck. Це безпроводна система оперативного моніторингу. Відстань передачі може досягати 1 кілометра [33].

В Інституті електродинаміки НАН України проводяться дослідження з розроблення багаторівневих інформаційно-вимірювальних систем (IBC) вібродіагностики електротехнічного обладнання та безпроводних елементів таких систем; створено лабораторний зразок такої системи.

Бездротова IBC вібродіагностики має блоки, що забезпечують вимірювання, перетворення та передачу інформації (технічні засоби), та блоки, які реалізують програмне управління IBC, статистичну обробку виміряних сигналів та побудову розв'язуючих правил з визначення технічного стану обладнання, що діагностується (програмні засоби) [34]. При розробці таких безпроводних систем доцільно використовувати протокол передачі даних LoRaWAN, який дає можливість надійного безпроводного зв'язку на декілька сотень метрів. Таке обладнання випускає компанія ADVANTECH [35].

Важливим для побудови ефективної системи діагностування є вибір алгоритмів функціонування такої системи, яка включає як особливості фізики виникнення діагностичних сигналів, так і особливостей функціонування вітрогенераторів, вибраних методів аналізу інформаційних сигналів та побудови розв'язувальних правил діагностики [26, 36].

6. Системи діагностування фотоелектричних станцій як елементів енергетичних систем з відновлюваними джерелами

Для забезпечення надійної та безпечної роботи фотоелектричних установок їх необхідно комплектувати системами моніторингу та діагностики несправностей. Основними катастрофічними несправностями в елементах фотоелектричних станцій є замикання між фазами, замикання на землю та дугові розряди [37].

З метою вирішення цих питань було досліджено численні методи моніторингу та діагностики несправностей, які відрізняються за швидкістю, складністю та вимогами до датчиків, а також за здатністю виявляти велику кількість несправностей. Ці методи повинні захистити компоненти фотоелектричних систем (модулів, акумуляторних батарей та інверторів) від пошкодження та усунути можливі ризики виникнення пожежі. На великих фотоелектричних станціях серйозною проблемою залишається локалізація несправностей.

Огляд застосування неелектричних методів (наприклад, інфрачервоного, тепловізійного) для виявлення та діагностики несправностей фотоелектричних систем наведено в [38].

Будь-яка несправність, що виникає у фотоелектричній станції, автоматично призводить до непередбачуваних загроз безпеці, зниження ефективності, доступності електроенергії, надійності та безпеки системи. До таких дефектів належать: зміна кольору, утворення тріщин, «сліди равлика», пошкодження антивідбивального покриття, бульбашки, забруднення, окислення та корозія шин, розрив герметизації над елементами та з'єднаннями, втрата адгезії заднього листа тощо.

Несправності у фотоелектричних модулях можна класифікувати за двома основними категоріями: перманентні (permanent) та тимчасові (temporally). До перманентних дефектів належать, наприклад: розшарування, бульбашки, пожовтіння комірок, подряпини та обгорілі комірки. Отже, цю категорію дефектів можна усунути просто шляхом заміни несправних модулів. Водночас тимчасові несправності, як правило, зумовлені ефектами часткового затінення, накопиченням пилу

(забрудненням), брудом на фотопанелях та снігом, оператори можуть усунути без заміни несправної фотопанелі.

Вирішальну роль у керуванні, нагляді та виявленні несправностей фотоелектричних станцій відіграють системи моніторингу, тому останнім часом було запропоновано чимало систем моніторингу фотоелектричних станцій у режимі реального часу (стандарт ІЕС 61724 [39, 40]).

Системи діагностики фотоелектричних модулів можна поділити на дві основні категорії:

- візуальні та теплові методи, які можна використовувати для виявлення зміни кольору, потемніння, забруднення поверхні, гарячих точок, руйнування та розшарування;
- електричні методи, які можна використовувати для виявлення та діагностики несправностей фотоелектричних модулів (PVM), ланцюгів та масивів, включаючи дугові замикання, замикання на землю, несправності діодів тощо.

Більшість електричних методів діагностики несправностей (FDD, fault detection and diagnostic) базуються на певних моделях PVS (photovoltaic system) фотоелектричних систем для виявлення різних типів несправностей, які можна класифікувати на п'ять груп:

- методи статистичного аналізу та обробки сигналів (SSPA);
- аналіз I-V-характеристик (I-VCA);
- аналіз втрат потужності (PLA);
- вимірювання напруги та струму (VCM);
- методи штучного інтелекту (AIT).

7. Системи контролю та діагностування накопичувачів електроенергії

Для безперебійної експлуатації систем енергопостачання, окрім іншого, необхідні діагностика та контроль параметрів накопичувачів енергії. Оскільки методи накопичення енергії кардинально відрізняються, то і системи діагностики досить різноманітні і залежать від таких методів накопичення енергії. Розглянемо тільки деякі з них.

Для оперативного контролю параметрів накопичувачів енергії (на основі акумуляторних батарей) найчастіше використовують імпульсні методи, де порівнюють короточасні зовнішні імпульси струму або напруги з параметрами накопичувача, такі як гальваностатичний та потенціостатичний (одно- та багатімпульсні). У таких методах сигнали відгуку представлені тимчасовими залежностями напруги або струму для гальваностатичного та потенціостатичного методів відповідно [41].

Сучасні системи енергоменеджменту все більше покладаються на штучний інтелект та машинне навчання (ML) для оптимізації накопичення енергії та роботи енергосистеми [9]. Прогностична аналітика, реалізована за допомогою алгоритмів ML, значно покращує короткострокові графіки шляхом динамічного прогнозування попиту на енергію та моделі генерації відновлюваної енергії, як показують нейронні мережі, що прогнозують попит на тепло від комбінованих ТЕЦ з похибкою менше 5 % [9]. Раніше пристрої для зберігання енергії використовували перетворювачі для регулювання потужності шляхом переривання струму або регулювання напруги, але останні тенденції у силовій електроніці зробили цю технологію більш придатною для існуючих систем електропостачання. Технології зберігання енергії раніше розглядалися як техніка зберігання у великих масштабах, але зараз їх застосування вважається більш доцільним для підтримки стабільності та поліпшення якості електроенергії [41]. Складність енергосистеми зростає з підвищенням електричних навантажень та передачі енергії, що також впливає на безпеку системи. Зростає також занепокоєння щодо якості електроенергії, у зв'язку з чим виникає потреба в більш гнучкій та керованій енергосистемі. Під час збурення в енергетичній системі генератор іноді не в змозі швидко реагувати та підтримувати її стабільність. Швидке регулювання активної або реактивної потужності може запобігти таким ситуаціям, як падіння напруги генератора або скидання навантаження.

В роботі [41] розглянуто деякі особливості систем контролю накопичення енергії, таких як акумуляторні батареї, суперконденсаторні системи накопичення енергії, системи накопичення енергії

за допомогою стисненого повітря. Нова технологія контролю накопичувачів за допомогою маховика приведена у [42].

При проєктуванні систем зберігання відновлюваної енергії у схемах одночасно розміщують акумулятори, інвертори та інше обладнання. Ефективність, масштабованість та адаптованість до різних відновлюваних джерел мають найвищий пріоритет [43]. Однією з основних областей концентрації є інтеграція інтелектуальних мереж, яка гарантує двосторонній зв'язок для оптимального використання енергії. Пріоритетними є контроль помилок і стійкість системи, що забезпечує надійну роботу в різних екологічних умовах.

Розроблення складних алгоритмів для ефективного управління енергією є основними етапами проєктування систем. Алгоритми створюються для прогнозування енергоспоживання, максимізації циклів заряджання-розряджання та поліпшення загальної продуктивності системи. Програмування передбачає створення кодових баз, які забезпечують безперебійну комунікацію між різними елементами, такими як джерела відновлюваної енергії, контролери енергомережі та системи управління акумуляторними батареями. Точність показань датчиків гарантується процесами калібрування, а енергоефективне кодування сприяє стабільному функціонуванню системи. Постійне вдосконалення алгоритмів ґрунтується на реальних випробуваннях, що дозволяє створити надійну та зручну для користувача платформу для зберігання енергії [43].

Важливим компонентом досліджень та розробок у сфері зберігання енергії є створення зрозумілого інтерфейсу користувача для моніторингу та контролю в режимі реального часу. За допомогою програми користувачі можуть відстежувати виробництво відновлюваної енергії, бачити кількість збереженої енергії та стежити за загальною роботою системи. Завдяки доданій функції зворотного зв'язку користувачі можуть пропонувати покращення та ділитися своїми думками щодо правильності роботи системи. Цей двосторонній обмін інформацією сприяє орієнтованому на користувача підходу, що гарантує вдосконалення системи та реагування на потреби користувачів. Загальна ефективність системи зберігання відновлюваної енергії та задоволеність користувачів підвищуються завдяки процесу розробки програмного забезпечення [43].

На завершальних етапах проводять всебічні випробування для забезпечення точності, надійності та ефективності системи зберігання відновлюваної енергії. Надійність системи підтверджується шляхом моделювання різних сценаріїв, таких як зміни у виробництві відновлюваної енергії, а також перевіркою відповідності вимогам до продуктивності. На основі результатів тестування оптимізація включає вдосконалення користувацьких інтерфейсів, модифікацію порогових значень та точне налаштування алгоритмів. Система вводиться в експлуатацію в реальних умовах після того, як вона задовольняє вимоги до продуктивності. Доступність для користувачів, стабільне електропостачання та оптимальне розташування – це лише деякі зі змінних розгортання, які ретельно враховуються. Після впровадження постійний моніторинг гарантує, що система може ефективно зберігати та розподіляти відновлювану енергію, одночасно покращуючи загальну енергетичну стійкість [43].

Інноваційним підходом є віртуальні локальні (муніципальні) системи накопичення енергії [44]. Одним із лідерів у сфері таких енергетичних систем є Німеччина. Вже створено такі мережі віртуальних систем накопичення енергії, як Sonnen Community® (Вільдпольдсрід), Lichtblick-Schwarm batterie® (Кельн) та Nextkraftwerke® (Кельн). Nextkraftwerke® організовує та керує віртуальними електростанціями (VPP virtual power plant). VPP складається з багатьох невеликих домогосподарств, що мають накопичувачі енергії (просумери, prosumers), та споживачів, з'єднаних через мережу накопичення енергії та взаємодію між просумерами та споживачами в реальному часі. Кожен блок підключається та керується за допомогою «Next Box» як мобільного з'єднання блока з системою та власником. Система з'єднання «Next Box» складається з ПЛК (програмованого логічного контролера), модема (каналу зв'язку між віддаленим блоком та системою керування) та антени (підсилює прийом сигналу та може бути розташована на відстані до 15 м від Next Box). Основним напрямком діяльності компанії є збір оперативних даних, їх аналіз, прогнозування та енергетичний баланс. Невеликі просумери використовують вітрогенератори, геотермальну енергію, фотоелектричні системи, біогаз, а також займаються виробництвом (та зберіганням) водню.

8. Висновки

Приведено огляд існуючих методів накопичення енергії, зокрема різних типів акумулюючих батарей. Показано їх переваги та недоліки, а також приклади використання таких накопичувачів.

Показано деякі особливості використання акумуляторів теплової енергії, зокрема особливості моніторингу та діагностики теплових мереж.

Відзначається, що для ефективної роботи новітніх розподілених електричних SMART-мереж необхідним є контроль та діагностика елементів таких мереж. Приведено огляд існуючих та перспективних систем моніторингу та діагностики вітрогенераторів, фотоелектричних станцій та накопичувачів електроенергії, а також методів їх функціонування. Показано, що використання таких систем моніторингу та діагностики є особливо важливим у повоєнний час для швидкого відновлення енергоспоживання.

Фінансування роботи

Дослідження виконано в рамках НДР «Діагностика ЕМ-4» та НДР «Агрегат-4».

Посилання

1. Залужний В.Ф. Енергетичний Інтергрід: Архітектура живучості у новому домені воєнних дій. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Енергетичний фронт: шостий театр воєнних дій» (стратегія захисту, управління та відновлення) (27 березня 2026, м. Київ, Україна) С. 5–8. URL: <https://ipme.kiev.ua/konferencii/energy-front-2026/> (дата звернення: 12.05.2026).
2. Liu C., Cheng M.-S., Zhao B.-C., Dai Z.-M. A Wind Power Plant with Thermal Energy Storage for Improving the Utilization of Wind Energy. MDPI. *Energies*. 2017. Vol. 10. Iss. 12. <https://doi.org/10.3390/en10122126>
3. Amrouche S. O., Rekioua D., Rekioua T. Overview of energy storage in renewable energy systems. 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) (December 2015, Marrakech, France). P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7454988>
4. Guo L., Peng Y., Li W., Yu H., Gu T., Wang K. Economic Analysis of the Energy Storage Systems for Frequency Regulation. In S. Yadav, Y. Arya, N. A. Muhamad, K. Sebaa, (Eds.). *Energy Power and Automation Engineering. ICEPAE 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2024. Vol. 1118. P. 147–153. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8878-5_16
5. Hotra O., Kulyk M., Babak V., Kovtun S., Zgurovets O., Mroczka J., Kisala P. Organization of the Structure and Functioning of Self-Sufficient Distributed Power Generation. *Energies*. 2024. Vol. 17. Iss. 1. 27. <https://doi.org/10.3390/en17010027>
6. Babak V.P., Kulyk M.M. Increasing the Efficiency and Security of Integrated Power System Operation Through Heat Supply Electrification in Ukraine. *Science and Innovation*. 2023. Vol. 19. No. 5. P. 100–116. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.100>
7. Kulyk M., Zgurovets O. Modeling of power systems with wind, solar power plants and energy storage. In V. Babak, V. Isaenko, A. Zaporozhets (Eds.). *Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. Vol. 298. P. 231–245. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_15
8. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Трач І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 44–54. <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
9. Afreh P., Gao L., Passi B. J., Onwuagbu C. C. Future energy storage: technologies, management systems, and pathways for sustainable integration. *Academia Green Energy*. 02.04.2025. <https://doi.org/10.20935/AcadEnergy7640>
10. The Technology of Molten Salt Thermal Energy Storage by Utilizing Valley Electricity for Heat Helps Realize the Heating Reform Project. Xinhuanet. 25.01.2016. URL: http://news.xinhuanet.com/2016-01/25/c_1117885895.htm (Last accessed: 12.05.2026).
11. Martin M., Thornley P. The Potential for Thermal Storage to Reduce the Overall Carbon Emissions from District Heating Systems. *The Tyndall Centre: Tyndall Manchester*. UK, 2012. P. 4–8.
12. Білодід В.Д., Дерій В.О. Акумуляційна здатність теплових мереж. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. № 3(42). С. 31–35. <https://doi.org/10.15407/pge2015.03.031>
13. Okazaki T., Shirai Y., Nakamura T. Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage. *Renewable Energy*. 2015. Vol. 83. P. 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.027>
14. Arabkoohsar A., Andresen G.B. Design and analysis of the novel concept of high temperature heat and power storage. *Energy*. 2017. Vol. 126. P. 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.001>
15. Regulation and planning of district heating in Denmark & Danish Energy Agency. Frederiksberg, Denmark, 2017. https://dbdh.org/wpcontent/uploads/2022/07/regulation_and_planning_of_district_heating_in_denmark.pdf (Last accessed: 12.05.2026).

16. Liu C., Cheng M.-S., Zhao B.-C., Dai Z.-M. A Wind Power Plant with Thermal Energy Storage for Improving the Utilization of Wind Energy. *Energies*. 2017. Vol. 10. Iss. 12. 2126. <https://doi.org/10.3390/en10122126>
17. Siemens Developing New Thermal Storage System for Wind Energy. *Power Engineering*. 2016. Vol. 19. URL: <https://www.power-eng.com/renewables/wind-energy/siemens-developing-new-thermal-storage-system-for-wind-energy/> (Last accessed: 19.05.2026).
18. Владимирський О.А., Владимирський І.А. Кореляційні параметричні методи визначення координат витоків підземних трубопроводів. *Електронне моделювання*. 2021. №3(43). С. 3–16. <https://doi.org/10.15407/emodel.43.03.003>
19. ДБН В.2.5-39:2008. Теплові мережі. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Київ. Мінрегіонбуд України, 2009. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-204> (дата звернення: 12.05.2026).
20. Дерій В.О. Технічний потенціал акумуляції теплової енергії в мережах. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. № 1(40). С. 34–38. <https://doi.org/10.15407/pge2015.01.034>
21. Дерій В.О. Аналіз динамічних процесів акумуляції теплової енергії в системах централізованого теплопостачання. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. № 2(41). С. 57–61. <https://doi.org/10.15407/pge2015.02.057>
22. Гавриленко Я., Дерій В. Енергетичні комплекси на основі сонячних електростанцій та акумуляторних систем зберігання енергії. *Системні дослідження в енергетиці*. 2025. №3(83). С. 17–30. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.03.017>
23. Дерій В., Згуровець О. Акумулятори теплової енергії. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 3(74). С. 4–14. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.004>
24. Singh N., Longani S., Pande S. Advancements and efficiency of solar thermal heating Advancement and efficiency of solar thermal heating system. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. 2024. Vol. 9. Iss. 5. P. 210–213. <https://doi.org/10.33564/IJEAST.2024.v09i05.029>
25. Four ways 2026 will chart the future of Europe's power sector. URL: <https://aliresources.hexagon.com/operations-maintenance/four-ways-2026-will-chart-the-future-of-europe-s-power-sector> (Last accessed: 19.05.2026).
26. Zvaritch V., Gyzhko Yu. Some peculiarities of the functioning of Power Engineering of Ukraine and possibilities to increase it resilience in the post-war period. Proceeding of NATO ARW «Digital Technologies for Enhanced Resilience» (September 8–11, 2024, Varna, Bulgaria). P. 110–122. IOS Press, 2025. <https://doi.org/10.3233/NICSP250014>
27. Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zaporozhets A.O., Zvaritch V.M. Diagnostic Systems For Energy Equipments. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. Vol. 281. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3>
28. Babak V., Zaporozhets A., Zvaritch V., Scherbak L., Myslovych M., Kuts Yu. Models and Measures in Theory and Practice of Manufacturing Processes. Proceeding of 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM 2022 (June 22–24, 2022, Nantes, France). IFAC Papers OnLine. 2022. Vol. 55. Iss. 10. P. 1956–1961. URL: www.sciencedirect.com/journal/ifac-papersonline/vol/55/issue/10 (Last accessed: 12.05.2026).
29. Гижко Ю.І., Головка В.М., Гуторова М.В., Зварич В.М., Коханевич В.П., Кудря С.О., Мислович М.В., Остапчук Л.Б. Підвищення надійності та подовження ресурсу вітроустановок за рахунок регулюючих засобів та систем діагностики, гармонізованих з європейськими стандартами. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2020. № 4. С. 17–22. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.04.03>
30. Bently Nevada. URL: <https://www.bakerhughes.com/bently-nevada/success-stories/remote-monitoring-diagnostics-service-teams-quick-response-saves-wind> (Last accessed: 12.05.2026).
31. General Electric Digital. URL: https://indusoft.com.ua/docs/GE/Predix-Essentials-from-GE-Digital-datasheet_ru.pdf (Last accessed: 12.05.2026).
32. Brüel & Kjær Vibro. URL: <https://www.bkvb.com/industries/wind-power/condition-monitoring-for-wind-turbines/> (Last accessed: 12.05.2026).
33. Timken StatusChek. URL: <https://www.timken.com/contact-suppliers/supplier-requirements-manual/#9-1> (Last accessed: 12.05.2026).
34. Гижко Ю., Зварич В. Особливості побудови компонентів обладнання з урахуванням використанням бездротових блоків зв'язку. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5. С. 94–98. <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.094>
35. ADVANTECH. URL: <https://www.advantech.com/en-us/contact> (Last accessed: 17.05.2026).
36. Зварич В.М., Гижко Ю.І. Деякі алгоритми вібродіагностики енергетичного обладнання на основі моделей лінійних випадкових процесів. Матеріали міжнародної науково-практичної «Енергетичний фронт: шостий театр воєнних дій» (стратегія захисту, управління та відновлення) (27 березня 2026 р., Київ, Україна). С. 44–48. URL: <https://ipme.kiev.ua/konferencii/energy-front-2026/>
37. Mellit A., Tina G.M., Kalogirou S.A. Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.062>
38. Tsanakas J.A., Ha L.D., Al Shakarchi F. Advanced inspection of photovoltaic installations by aerial triangulation and terrestrial georeferencing of thermal/visualimagery. *Renewable Energy*. 2017. Vol. 102. P. 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.046>

39. IEC 61724 S. Photovoltaic System Performance Monitoring – Guidelines for Measurement, Data Exchange and Analysis. IEC, 1998. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/5733> (Last accessed: 12.05.2026).
40. Eaton, AES Unit Selling Energy Storage in Europe, Africa, Middle East. *Power GRID International*. 2016. Iss. 3. P. 8. URL: <https://www.enlit-europe.com/host-publications/powergrid-international> (Last accessed: 12.05.2026).
41. Patil S. Various Energy Storage Devices and Their Control Techniques. *International Journal of Innovative Technology and Research*. 2014. Vol. 2. Iss. 5. P. 1207–1213. URL: https://www.academia.edu/91670761/Various_Energy_Storage_Devices_and_Their_Control_Techniques (Last accessed: 12.05.2026).
42. Berabez K., Hacini I., Hamoudi F., Idjdarene K. Enhancement DTC Control for SEIG in Variable-Speed Wind Turbines, Associated with an Energy Storage System. *Journal of Renewable Energies*. 2024. Vol. 1. Iss. 1. P. 87–97. <https://doi.org/10.54966/jreen.v1i1.1175>
43. Lakshmi Poorani S., Jeya Rani S., Ravi R., Madhu Varsha M.C., Abdul Malik R. Review of Renewable Energy Storage Research and Development. *International Journal on Engineering Technology and Sciences – IJETS*. 2024. Vol. 11. Iss. 1. P. 17–20. URL: <https://ijets.in/Downloads/Published/E0202401004.pdf> (Last accessed: 17.05.2026).
44. Anastasovski A., Andreucci M. B., Kádár J., Delli Paoli M. Energy Storage in Urban Areas: The Role of Energy Storage Facilities, a Review. *Energies*. 2024. Vol. 17. Iss. 5. 1117. <https://doi.org/10.3390/en17051117>

References

1. Zaluzhnyi, V.F. (2026, March, 27). *Energy Intergrid: Resilience Architecture in the New Domain of Warfare, Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «The Energy Front: The Sixth Theatre of Warfare» (Strategy for Defence, Management and Recovery)* (pp. 5–8). Kyiv, Ukraine. Retrieved May 12, 2026, from <https://ipme.kiev.ua/konferencii/energy-front-2026/> [in Ukrainian].
2. Liu, C., Cheng, M.-S., Zhao, B.-C., & Dai, Z.-M. (2017). A Wind Power Plant with Thermal Energy Storage for Improving the Utilization of Wind Energy. MDPI. *Energies*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/en10122126>
3. Amrouche, S. O., Rekioua, D., & Rekioua, T. (2015, December). Overview of energy storage in renewable energy systems. *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)* (pp. 1–6). Marrakech, France. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7454988>
4. Guo, L., Peng, Y., Li, W., Yu, H., Gu, T., & Wang, K. (2024). Economic Analysis of the Energy Storage Systems for Frequency Regulation. In S. Yadav, Y. Arya, N. A. Muhamad, K. Sebaa (Eds.), *Energy Power and Automation Engineering. ICEPAE 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 1118. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8878-5_16
5. Hotra, O., Kulyk, M., Babak, V., Kovtun, S., Zgurovets, O., Mroczka, J., & Kisala, P. (2024). Organization of the Structure and Functioning of Self-Sufficient Distributed Power Generation. *Energies*, 17(1), 27. <https://doi.org/10.3390/en17010027>
6. Babak, V.P., & Kulyk, M.M. (2023). Increasing the Efficiency and Security of Integrated Power System Operation Through Heat Supply Electrification in Ukraine. *Science and Innovation*, 19(5), 100–116. <https://doi.org/10.15407/scine19.5.100>
7. Kulyk, M., & Zgurovets, O. (2020). Modeling of power systems with wind, solar power plants and energy storage. In V. Babak, A. Isaenko, A. Zaporozhets (Eds.), *Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control*, 298 (pp. 231–245). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_15
8. Kyrlyenko, O.V., Blinov, I.V., Parus, Ye.V., & Trach, I.V. (2021). Evaluation of efficiency of use of energy storage system in electric networks. *Technical Electrodynamics*, 4, 44–54 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
9. Afreh, P., Gao, L., Passi, B. J., & Onwuagbu, C. C. (2025, April 2). Future energy storage: technologies, management systems, and pathways for sustainable integration. *Academia Green Energy*. <https://doi.org/10.20935/AcadEnergy7640>
10. The Technology of Molten Salt Thermal Energy Storage by Utilizing Valley Electricity for Heat Helps Realize the Heating Reform Project. (2016, January 25). *Xinhuanet*. Retrieved May 12, 2026, from http://news.xinhuanet.com/2016-01/25/c_1117885895.htm
11. Martin, M., & Thornley, P. (2012). The Potential for Thermal Storage to Reduce the Overall Carbon Emissions from District Heating Systems. *The Tyndall Centre: Tyndall Manchester* (pp. 4–8). UK.
12. Bilodid, V.D., & Derii, V.O. (2015). Heating system accumulative capability. *The Problems of General Energy*, 3(42), 31–35 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2015.03.031>
13. Okazaki, T., Shirai, Y., & Nakamura, T. (2015). Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage. *Renewable Energy*, 83, 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.027>
14. Arabkoohsar, A., & Andresen, G.B. (2017). Design and analysis of the novel concept of high temperature heat and power storage. *Energy*, 126, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.001>
15. Regulation and planning of district heating in Denmark & Danish Energy Agency. Frederiksberg, Denmark, 2017. Retrieved May 12, 2026, from https://dbdh.org/wpcontent/uploads/2022/07/regulation_and_planning_of_district_heating_in_denmark.pdf
16. Liu, C., Cheng, M.-S., Zhao, B.-C., & Dai, Z.-M. (2017). A Wind Power Plant with Thermal Energy Storage for Improving the Utilization of Wind Energy. *Energies*, 10(12), 2126. <https://doi.org/10.3390/en10122126>.

17. Siemens Developing New Thermal Storage System for Wind Energy. (2016). *Power Engineering*, 19. Retrieved May 19, 2026, from <https://www.power-eng.com/renewables/wind-energy/siemens-developing-new-thermal-storage-system-for-wind-energy/>
18. Vladimirskyi, O.A., & Vladimirskyi, I.A. (2021). Correlation parametric methods for determining the coordinates of leaks in underground pipelines. *Electronic Modelling*, 43(3), 3–16 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/emodel.43.03.003>
19. DBN V.2.5-39:2008. (2009). Heating Networks. Engineering Systems for Buildings and Structures. External Networks and Structures. Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine. Retrieved May 12 2026, from <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-204> [in Ukrainian].
20. Derii, V.O. (2015). The technical potential for thermal energy storage in networks. *The Problems of General Energy*, 1(40), 34–38 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2015.01.034>
21. Derii, V.O. (2015). Analysis of dynamic processes of thermal energy storage in district heating systems. *Problems of General Energy*, 2(41), 57–61 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2015.02.057>
22. Gavrilenko, Y., & Derii, V. (2025). Energy complexes based on solar power stations and battery energy storage systems. *System Studies in Energy*, 3(83), 17–30 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.03.017>
23. Derii, V., & Zgurovets, O. (2023). Thermal energy storage systems. *System Studies in Energy*, 3(74), 4–14 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.004>
24. Singh, N., Longani, S., & Pande, S. (2024). Advancements and efficiency of solar thermal heating Advancement and efficiency of solar thermal heating system *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 9(5), 210–213. <https://doi.org/10.33564/IJEAST.2024.v09i05.029>
25. Four ways 2026 will chart the future of Europe's power sector, Retrieved May 19, 2026, from <https://aliresources.hexagon.com/operations-maintenance/four-ways-2026-will-chart-the-future-of-europe-s-power-sector>
26. Zvaritch, V., & Gyzhko, Yu. (2024, September 8–11). Some peculiarities of the functioning of Power Engineering of Ukraine and possibilities to increase it resilience in the post-war period. *Proceeding of NATO ARW «Digital Technologies for Enhanced Resilience»* (pp. 110–122). Varna, Bulgaria. <https://doi.org/10.3233/NICSP250014>
27. Babak, V.P., Babak, S.V., Myslovych, M.V., Zaporozhets, A.O., & Zvaritch V.M. (2020). Diagnostic Systems For Energy Equipments. *Studies in Systems, Decision and Control*, 281. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3>
28. Babak, V., Zaporozhets, A., Zvaritch V., Scherbak, L., Myslovych, M., & Kuts, Yu. (2022, June 22–24). Models and Measures in Theory and Practice of Manufacturing Processes. *Proceeding of 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control*, MIM 2022 (pp. 1956–1961). Nantes, France. Retrieved May 12, 2026, from www.sciencedirect.com/journal/ifac-papersonline/vol/55/issue/10
29. Gyzhko, Y.I., Golovko, V.M., Gutorova, M.V., Zvarych, V.M., Kokhanievych, V.P., Kudria, S.O., Myslovych, M.V., & Ostapchuk, L.B. (2020). Increase of reliability and extension of service life of windpower units due to application of regulation means and diagnostic systems harmonized with the european standards. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 4, 17–22 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.04.03>
30. Bently Nevada. Retrieved May 12, 2026, from <https://www.bakerhughes.com/bently-nevada/success-stories/remote-monitoring-diagnostics-service-teams-quick-response-saves-wind>
31. General Electric Ddigital. Retrieved May 12, 2026, from https://indusoft.com.ua/docs/GE/Predix-Essentials-from-GE-Digital-datasheet_ru.pdf
32. Brüel & Kjær Vibro. Retrieved May 12, 2026, from <https://www.bkvibro.com/industries/wind-power/condition-monitoring-for-wind-turbines/>
33. Timken StatusChek. Retrieved May 12, 2026, from <https://www.timken.com/contact-suppliers/supplier-requirements-manual/#9-1>
34. Gyzhko, Yu., & Zvarych, V. (2024). Features of the design of equipment components taking into account the use of wireless communication units. *Technical Electrodynamics*, 5, 94–98 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/technd2024.05.094>
35. ADVANTECH. Retrieved May 17, 2026, from <https://www.advantech.com/en-us/contact>
36. Zvarich, V.M., & Gyzhko, Y.I. (2026, March 27). *Some algorithms for vibration diagnosis of power equipment based on models of linear random processes. «The Energy Front: The Sixth Theatre of Warfare» (Strategy for Defence, Management and Recovery)* (pp. 5–8). Kyiv, Ukraine. Retrieved May 12, 2026, from <https://ipme.kiev.ua/konferencii/energy-front-2026/> [in Ukrainian].
37. Mellitb, A., Tina, G.M., & Kalogirou, S.A. (2018). Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.062>
38. Tsanakas, J.A., Ha, L.D., & Al Shakarchi, F. (2017). Advanced inspection of photovoltaic installations by aerial triangulation and terrestrial georeferencing of thermal/visualimagery. *Renewable Energy*, 102, 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.046>
39. IEC 61724 S. (1998). Photovoltaic System Performance Monitoring – Guidelines for Measurement, Data Exchange and Analysis. IEC. Retrieved May 12, 2026, from <https://webstore.iec.ch/en/publication/5733>
40. Eaton, AES Unit Selling Energy Storage in Europe, Africa, Middle East. (2016). *Power GRID International*, 3, 8. Retrieved May 12, 2026, from <https://www.enlit-europe.com/host-publications/powergrid-international>

41. Patil, S. (2014). Various Energy Storage Devices and Their Control Techniques. *International Journal of Innovative Technology and Research*, 2(5), 1207–1213. Retrieved May 12, 2026, from https://www.academia.edu/91670761/Various_Energy_Storage_Devices_and_Their_Control_Techniques
42. Berabez, K., Hacini, I., Hamoudi F., & Idjdarene, K. (2024) Enhancement DTC Control for SEIG in Variable-Speed Wind Turbines, Associated with an Energy Storage System. *Journal of Renewable Energies*, 1(1), 87–97. <https://doi.org/10.54966/jreen.v1i1.1175>
43. Lakshmi Poorani, S., Jeya Rani, S., Ravi, R., Madhu Varsha, M. C., & Abdul Malik, R. (2024). Review of Renewable Energy Storage Research and Development. *International Journal on Engineering Technology and Sciences – IJETS*, 1(11), 17–20. Retrieved May 12, 2026, from <https://ijets.in/Downloads/Published/E0202401004.pdf>
44. Anastasovski, A., Andreucci, M. B., Kádár, J., & Delli Paoli, M. (2024). Energy Storage in Urban Areas: The Role of Energy Storage Facilities, a Review. *Energies*, 17(5), 1117. <https://doi.org/10.3390/en17051117>

SOME PECULIARITIES OF ENERGY STORAGE USAGE IN THE POST-WAR PERIOD

Yurii Gyzhko, PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0002-5702-4738>

Valerij Zvaritch*, Dr. Sci. (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1271-4954>

Liudvyga Ostapchuk, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5565-0313>

Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, 56, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine

*Corresponding author: zvaritch@gmail.com

Abstract. *Natural fluctuations in wind and solar energy are a barrier to the reliability of electrical grids that include renewable energy systems. To ensure the stable generation of energy systems using renewable sources, which are associated with fluctuations in the volume of electricity production, technologies are employed to compensate for such instability. The article provides brief information on mechanical, electromagnetic, electrochemical, and thermal methods of energy storage. An analytical review of various methods of accumulating electrical and thermal energy has been carried out, and it has been noted that the most advanced energy storage technology is pumped storage power stations. Supercapacitor energy storage devices have great potential. An overview and comparison of battery-based energy storage devices is provided. Some features of thermal energy storage devices are shown. Examples of the effective practical use of electricity storage devices are given. It has been noted that the relevant structures of the European Union are paying great attention to the creation of effective energy storage systems for renewable sources. The feasibility of combining thermal energy storage batteries and renewable energy sources in post-war building heating systems has been demonstrated. It is noted that the condition of heating networks is of great importance for a reliable heat supply. This problem is exacerbated in the post-war period due to damage to water and heat supply systems, such as CHPs, pumping stations, and boiler rooms, which provide pressure in pipelines. Prompt repair of pipelines plays a significant role in heating systems. The article is defined an importance of control and diagnostic systems in ensuring a reliable energy supply of both primary and auxiliary energy equipment, pipelines, renewable energy system components, and energy storage diagnostic systems for reliable power consumption. A review of existing systems for diagnosing the technical condition of renewable energy systems has been conducted, and the feasibility of their use in the post-war period has been demonstrated.*

Keywords: accumulators of electric energy, accumulators of thermal energy, heat supply in the post-war period, diagnostic system.

Дата першого надходження статті до журналу: 17.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.05.2026

Дата публікації (оприлюднення): 30.05.2026