

РОЛЬ БАТАРЕЙНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ (BESS) У ПІДВИЩЕННІ СТІЙКОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ НЕЗАЛЕЖНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ

Отримано 27 лист. 2025 р.; рекомендовано до публікації 09 груд. 2025 р.
Доступно онлайн 31 груд. 2025 р.

Дьяченко О. С.

Автор для кореспонденції: Кузнецов Микола,
e-mail: kuznietsov.m.m@gmail.com

PhD

<https://orcid.org/0009-0003-4651-5253>

Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, м. Київ, Україна

Анотація. Енергетичний сектор України є одним з ключових фундаментів національної безпеки та сталого розвитку держави: від його надійної роботи залежить функціонування промисловості, транспорту, соціальної інфраструктури та об'єктів критичної важливості [1, 2]. Масовані пошкодження генерувальних потужностей і мереж унаслідок воєнних дій наочно продемонстрували вразливість традиційної централізованої моделі та висунули на перший план завдання переходу до стійкішої й гнучкішої архітектури енергосистеми [1, 3].

Міжнародний досвід останнього десятиліття показує, що прискорений розвиток батарейних систем накопичення енергії (Battery Energy Storage Systems, BESS) зумовлений поєднанням кількох чинників: суттєвим здешевленням літій-іонних технологій, швидким зростанням частки змінної відновлюваної генерації (передусім сонячної та вітрової), підвищеними вимогами до гнучкості енергосистем, а також формуванням нових ринкових механізмів, орієнтованих на послуги з балансування та регулювання потужності [4–6]. На цьому тлі системи накопичення на базі акумуляторних батарей розглядаються як один з ключових інструментів підвищення керованості енергосистеми, зменшення обсягів вимушених обмежень генерації з ВДЕ та ефективнішого використання наявної мережевої інфраструктури [4, 5, 7, 8].

Для України, яка одночасно проходить шлях синхронізації з європейською енергосистемою та стикається з руйнуванням традиційних генерувальних об'єктів і мереж, інтеграція систем накопичення енергії набуває подвійного змісту. З одного боку, такі рішення здатні підвищити живучість енергосистеми і стійкість до пошкоджень, забезпечити електроживлення критичних споживачів та роботу локальних мікромереж за умов обмеженої пропускної спроможності або повної відсутності магістральних ліній [1–3]. З іншого боку, BESS можуть стати важливим елементом довгострокової стратегії енергетичної незалежності та декарбонізації, створюючи передумови для глибокої інтеграції відновлюваних джерел енергії та зменшення залежності від імпортованих енергоносіїв [4–7].

Метою цієї статті є дослідження ролі батарейних систем накопичення енергії в підвищенні стійкості та енергетичної незалежності енергосистеми України в умовах воєнних загроз і подальшого відновлення, а також визначення основних рівнів і сценаріїв застосування BESS та ключових технічних, економічних і регуляторних передумов для їх масштабного впровадження.

Ключові слова: батарейні системи накопичення енергії (BESS), стійкість енергосистеми, гнучкість енергосистеми, відновлювані джерела енергії, мікромережі.

Вступ. Енергетичний сектор України є одним з ключових чинників економічного зростання та соціальної стабільності: від нього залежить робота промисловості, транспорту, інженерної інфраструктури та побутове життя домогосподарств. До початку повномасштабної агресії країна послідовно розвивала сектор відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) як інструмент зменшення залежності від імпортованих енергоресурсів та поступової декарбонізації енергетики. За даними міжнародних досліджень, у 2020–2021 роках частка електроенергії з ВДЕ в Україні сягала орієнтовно 8–12 % загального виробництва, з домінуванням сонячної та вітрової генерації [9, 10].

Повномасштабна війна радикально змінила рамкові умови функціонування енергетичної системи. Прицільні удари по об'єктах генерації та мережевій інфраструктурі призвели до значних руйнувань і поставили під загрозу безперервність електропостачання для населення та критично важливих споживачів. Міжнародні організації фіксують систематичні атаки на електростанції та об'єкти передачі електроенергії, що суттєво підвищує ризики тривалих відключень і висуває підвищені вимоги до живучості та гнучкості енергосистеми [12, 13].

Досвід країн, де стрімко зростає частка сонячної та вітрової генерації, свідчить, що саме батарейні системи

накопичення енергії (Battery Energy Storage Systems, BESS) поступово стають одним з ключових інструментів підтримання надійності енергопостачання. Аналітичні огляди Міжнародного енергетичного агентства (IEA) та IRENA показують: зі збільшенням частки змінної генерації з ВДЕ різко зростає потреба в системній гнучкості, а мережеві та промислові акумуляторні системи розглядаються як необхідний елемент інтеграції високих частот «зеленої» електроенергії, згладжування погодинних коливань виробітку та підтримання стабільної роботи енергосистем [5–7].

Для України в умовах воєнних загроз і подальшої відбудови впровадження BESS виходить далеко за межі звичайного технологічного оновлення. Фактично йдеться про формування нової конфігурації електроенергетичного комплексу, у якій батарейні системи накопичення – на локальному, громадському та магістральному рівнях – можуть стати одним з визначальних чинників підвищення стійкості та енергетичної самодостатності.

Виклад основного матеріалу

Енергетична система України сьогодні перебуває в точці перетину масштабних викликів і нових структурних можливостей. З одного боку, зростає частка відновлюваних джерел енергії, з іншого – тривають системні загрози цілісності інфраструктури в умовах війни. Міжнародні організації фіксують суттєві пошкодження генерувальних потужностей, мережевої інфраструктури та об'єктів теплопостачання, що прямо впливає на надійність електро- і теплопостачання для населення та об'єктів критичної інфраструктури [15, 16].

У такій ситуації модернізація енергосистеми не може обмежуватися лише відновленням зруйнованих потужностей чи добудовою нової генерації. Потрібно переосмислення самої архітектури управління потужністю та потоками енергії. У цій оновленій моделі батарейні системи накопичення енергії (Battery Energy Storage Systems, BESS) розглядаються як один з базових елементів, що підсилює стійкість системи та наближає Україну до реальної енергетичної незалежності.

Світові тенденції свідчать про прискорене поширення BESS як на рівні великих енергосистем, так і на розподіленому рівні. За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), середня вартість літій-іонних батарей для стаціонарних і транспортних застосувань зменшилася приблизно на 90 % з 2010 року: орієнтовно від 1400 до менш ніж 140 дол. США за 1 кВт·год у 2023 році, що є одним з найпомітніших здешевлень серед сучасних енергетичних технологій [9]. Аналіз IRENA показує, що до 2030 року сумарно встановлені потужності систем зберігання енергії зростуть у багато разів, а BESS послідовно розглядаються як ключовий інструмент інтеграції високої частки сонячної та вітрової генерації та балансування попиту й пропозиції в режимі реального часу [11, 12].

У поєднанні зі зростанням частки ВДЕ та розвитком ринків гнучкості й допоміжних послуг ці зрушення фактично змінюють статус BESS: з «нішевого» рішення вони

перетворюються на один із системотворчих інструментів енергетичного переходу. У країнах ЄС фіксується стабільне нарощування потужностей зберігання: за оцінками Європейської комісії та профільних асоціацій, встановлена потужність батарейних систем зберігання енергії вже вимірюється кількома десятками гігаватів і надалі зростатиме прискореними темпами, щоб виконати цілі з декарбонізації та підвищення гнучкості енергосистем [14].

У контексті України значення BESS пов'язане одразу з двома групами завдань: з одного боку, це короткострокове підвищення «живучості» енергосистеми в умовах цілеспрямованих атак на генерацію та мережі, з іншого – формування децентралізованої низьковуглецевої та економічно стійкої моделі енергопостачання у довгостроковій перспективі. За оцінками IEA, у перші роки повномасштабної війни Україна втратила значну частину диспетчеризованих потужностей унаслідок окупації, руйнування та пошкодження енергетичних об'єктів, а удари по електроенергетичній інфраструктурі й надалі підтримують високий рівень ризику для надійності енергопостачання [6, 7].

Сучасні дослідження гнучкості енергосистем ЄС свідчать, що до 2030 року потреба в гнучких ресурсах (накопичувачі, керування попитом, мережеві рішення) може зрости щонайменше вдвічі, а до 2050 року – наблизитися до трикратного збільшення порівняно з поточним рівнем [13]. У документах ENTSO-E та Європейської комісії підкреслюється, що без суттєвого розгортання технологій гнучкості, зокрема систем зберігання енергії, інтеграція високих частот змінної генерації з ВДЕ без втрати надійності постачання буде вкрай складною. Ці висновки в повному обсязі стосуються й України, з огляду на курс на синхронізацію з європейським енергоринком та задекларовані цілі щодо розширення використання ВДЕ.

Значення батарейних систем накопичення енергії для підвищення стійкості та енергетичної незалежності української енергосистеми доцільно розглядати в трьох взаємопов'язаних вимірах.

По-перше, BESS підсилюють операційну стійкість і живучість системи: дають змогу підтримувати електроживлення критичних споживачів у разі пошкодження мереж, скорочують тривалість і масштаб відключень, прискорюють відновлення після аварійних та воєнних подій.

По-друге, вони сприяють посиленню енергетичної самодостатності, дозволяючи повніше задіювати потенціал сонячної та вітрової генерації, зменшувати залежність від імпортного палива та обмежувати потребу в пікових теплових потужностях.

По-третє, BESS є важливим інструментом для повноцінного функціонування децентралізованої архітектури: забезпечують балансування в мікромережах, підтримують міжрівневі перетоки та дають змогу залучати розподілені ресурси до загальносистемного управління (віртуальні електростанції, агреговані потужності тощо) [15].

Якщо дивитися на ситуацію з погляду практичного застосування, можна виокремити щонайменше три базові рівні інтеграції BESS в енергосистему України (рис. 1).

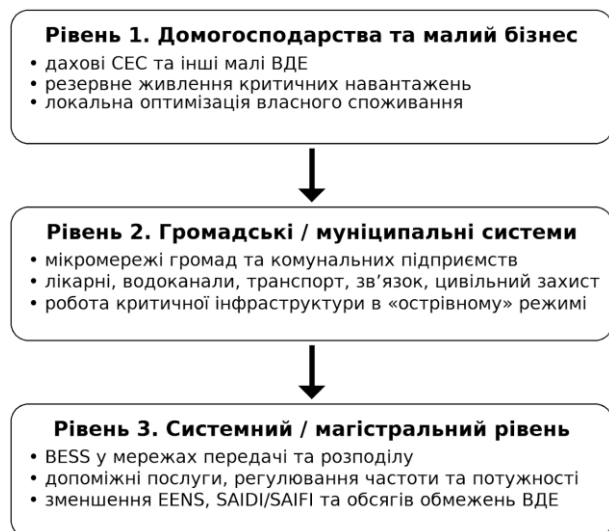


Рис. 1. Концептуальна схема багаторівневого застосування батарейних систем накопичення енергії (BESS) в енергосистемі України

Домогосподарства та малий бізнес

На цьому рівні BESS зазвичай поєднують з малою розподіленою генерацією, передусім з даховими сонячними установками. Такі системи виконують дві основні функції: резервне електроживлення та локальну оптимізацію споживання. В умовах воєнних загроз вони дають змогу підтримувати роботу найважливіших навантажень – зв'язку, освітлення, базового опалення, побутового обладнання – під час тривалих відключень мережі, зменшуючи потребу в дизель-генераторах і паливі. У післявоєнний період такі установки можуть бути залучені до схем «віртуальних електростанцій» та програм керування попитом.

Громадський рівень

На рівні територіальних громад BESS здатні виконувати роль ядра локальних мікромереж для об'єктів критичної інфраструктури – лікарень, водоканалів, транспортних вузлів, систем зв'язку та цивільного захисту. У поєднанні з місцевою генерацією (сонячні електростанції, біоенергетичні установки, малі ГЕС) накопичувачі забезпечують роботу таких вузлів в «острівному» режимі, підтримуючи принаймні базовий рівень енергопостачання навіть за відсутності підключення до магістральної мережі. Це створює основу для керованої децентралізації, коли частина функцій балансування й резервування поступово переходить від загальнонаціонального рівня до рівня громад.

Системний (магістральний) рівень

Великі BESS, підключені до мереж передачі та розподілу, можуть надавати широкий спектр допоміжних послуг: первинне й вторинне регулювання частоти, регулювання потужності, швидкодіючий резерв, згладжу-

вання коливань генерації з ВДЕ та зменшення обсягів вимушених обмежень сонячних і вітрових електростанцій. Для України цей рівень є особливо важливим, зважаючи на втрату частини диспетчеризованих потужностей та зростання частки змінної генерації. Показовим є приклад розгортання компанією DTEK спільно з Fluence портфеля BESS загальною потужністю 200 МВт та ємністю 400 МВт-год, спрямованого на підвищення стійкості енергосистеми та зниження ризику відключень в умовах постійних атак [16].

Спираючись на ці три рівні, можна окреслити два основні часові сценарії використання BESS в Україні.

У коротко- та середньостроковій перспективі (період війни та раннього післявоєнного відновлення) на перший план виходить забезпечення живучості системи: резервне живлення об'єктів критичної інфраструктури, підтримка роздрібнених фрагментів мережі, скорочення тривалості відключень, а також можливість здійснювати «чорний пуск» окремих енергетичних об'єктів.

У довгостроковому горизонті (етап структурної модернізації) акцент зміщується на інтеграцію високої частки ВДЕ, участь BESS у ринках допоміжних послуг, зменшення потреби в пікових теплових потужностях, оптимізацію завантаження мережевої інфраструктури та реалізацію потенціалу експортно-імпорتنих операцій на синхронізованому з ENTSO-E ринку електроенергії [4, 5, 9]. Міжнародні оцінки показують, що без прискореного розвитку систем зберігання енергії та інших інструментів гнучкості інтеграція значних часток ВДЕ неминуче веде до зростання обсягів вимушених обмежень генерації та системних ризиків, а тому розгортання BESS слід розглядати не як додаткову опцію, а як обов'язковий елемент стратегічного планування [13].

Реалізація описаного потенціалу потребує не лише технічних, а й належних регуляторних передумов. Водночас варто зазначити, що низка документів уже містить релевантні норми, зокрема: Закон України «Про ринок електричної енергії» № 2019-VIII від 13.04.2017 (зі змінами); Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року, затверджений розпорядженням КМУ від 13.08.2024 № 761-р; Стратегія розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року, схвалена розпорядженням КМУ від 18.07.2024 № 713-р. Попри наявність таких напрацювань, реалізація потенціалу BESS потребує дотримання низки технічних передумов. Насамперед необхідно оновити мережеві кодекси та проєктні норми так, щоб вони враховували специфіку BESS як активного елемента системи, здатного не лише споживати, а й віддавати електроенергію в мережу.

Далі критично важливим є розвиток цифрової інфраструктури керування: систем прогнозування генерації з ВДЕ, платформ моніторингу та диспетчеризації мікромереж, а також інструментів кіберзахисту для накопичувачів як об'єктів критичної інфраструктури. Окремий блок завдань стосується стандартизації технічних вимог до BESS – від вимог безпеки та вогнестійкості до елек-

тромагнітної сумісності, що набуває особливого значення в умовах масового поширення систем зберігання енергії на розподіленому рівні [14].

Не менш важливими для масштабного впровадження BESS є економічні та регуляторні передумови. З економічного погляду ключовим завданням є формування прозорих і передбачуваних механізмів оплати послуг гнучкості та резервування, забезпечення недискримінаційного доступу систем накопичення до ринків електроенергії та допоміжних послуг, а також залучення міжнародних інструментів кліматичного та відновлювального фінансування для зниження капітальних витрат у критичний період. У нормативній площині необхідно чітко визначити правовий статус систем зберігання енергії (як споживачів, виробників чи окремого класу активів), встановити зрозумілі правила їх приєднання до мережі, участі в балансувальному сегменті та ринках допоміжних послуг, а також узгодити національну регуляторну базу з підходами ЄС у сфері гнучкості та зберігання енергії [15].

У підсумку батарейні системи накопичення енергії в українських реаліях виступають не просто технологічним «додатком» до відновлюваної генерації, а одним з ключових структурних елементів майбутньої енергосистеми, зорієнтованої на стійкість, децентралізацію та енергетичну самодостатність. Окреслені рівні застосування, часові сценарії використання, а також розглянуті технічні, економічні та регуляторні передумови створюють підґрунтя для подальших кількісних досліджень

впливу BESS на показники надійності та стійкості енергосистеми України.

У міжнародній практиці для характеристики надійності та живучості енергосистем застосовують, зокрема, такі індикатори, як середня тривалість перерв в електропостачанні (SAIDI), середня частота перерв (SAIFI), очікуваний недовідпуск електроенергії (EENS), імовірність втрати навантаження (LOLP). Рівень енергетичної незалежності зазвичай описують через частку імпортованого палива в структурі генерації, частку ВДЕ в балансі, а також обсяги вимушених обмежень (curtailment) змінної генерації [14]. Інтеграція BESS дає змогу впливати на ці показники кількома основними шляхами:

- зменшувати EENS і показники SAIDI/SAIFI завдяки скороченню тривалості та глибини відключень споживачів у разі аварій і пошкоджень мереж;
- знижувати обсяги вимушених обмежень генерації з ВДЕ, що фактично підвищує корисну, реально використану частку відновлюваної енергії в балансі;
- скорочувати потребу в пікових теплових потужностях і в імпорті електроенергії в години дефіциту, у такий спосіб опосередковано підвищуючи рівень енергетичної самодостатності.

Навіть за відсутності детальної кількісної моделі для України вже на концептуальному рівні можна виокремити кілька типових сценаріїв розвитку, які різняться ступенем інтеграції BESS в енергосистему (рис. 2).

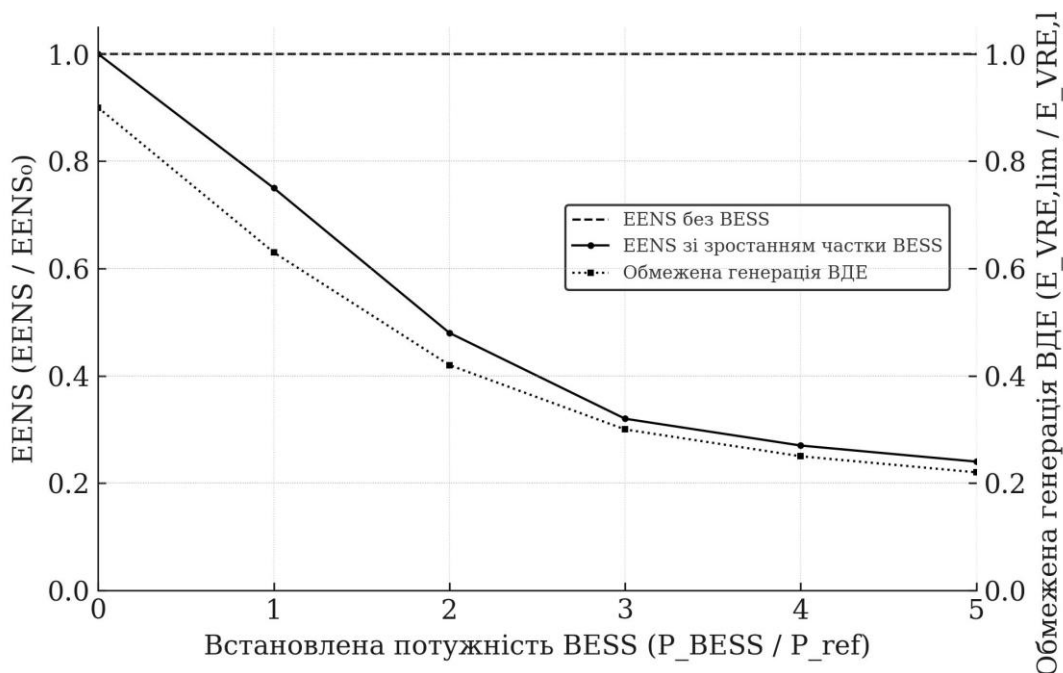


Рис. 2. Концептуальна залежність очікуваного недовідпуску електроенергії (EENS) та обсягів вимушених обмежень генерації з ВДЕ від встановленої потужності BESS в енергосистемі

$EENS / EENS_0$ – значення показника Expected Energy Not Supplied (EENS), нормоване до EENS у випадку без BESS.
 P_{BESS} / P_{ref} – встановлена потужність BESS, нормована до вибраної опорної потужності P_{ref} (наприклад, максимальна потужність, що розглядається в дослідженні).

$E_{VRE,lim} / E_{VRE,0}$ – обмежена генерація ВДЕ, нормована до випадку без BESS.

Сценарій А – обмежене впровадження BESS

Системи накопичення встановлюються точково, переважно на окремих об'єктах критичної інфраструктури та частково на промислових підприємствах. Їх вплив на загальносистемні показники стійкості та частку ВДЕ в балансі залишається невеликим; основна функція BESS у цьому разі – локальне резервування та підвищення надійності окремих вузлів.

Сценарій В – розвинений розподілений рівень

Відчутна частка домогосподарств із власною генерацією, а також значна кількість громадських та муніципальних об'єктів обладнуються BESS. Формується шар стійких мікромереж, які зменшують навантаження на магістральні лінії та дають змогу обмежувати просторовий масштаб відключень. Вплив на показники надійності та EENS стає помітним, однак інтеграція ВДЕ на рівні всієї системи й надалі стримується пропускнуною спроможністю та конфігурацією мереж.

Сценарій С – багаторівнева інтеграція BESS

Накопичувачі присутні на всіх рівнях – від індивідуальних споживачів і громад до магістральної мережі. Потужні BESS беруть участь у ринках допоміжних послуг та балансувальної енергії, тоді як розподілені системи забезпечують локальне резервування й реалізацію програм керування попитом. За такого підходу досягається максимальний сукупний ефект: скорочується недовідпуск електроенергії, зростає фактична частка ВДЕ в балансі, зменшується залежність від імпортованих енергоресурсів, поліпшуються показники стійкості до зовнішніх збурень [11, 13].

Графічно залежність сукупного ефекту від рівня проникнення BESS доцільно подати у вигляді кривої зі спадною граничною віддачею: на початкових етапах додавання нових потужностей накопичення дає помітне зниження недовідпуску та покращення індикаторів надійності, однак зі зростанням встановленої потужності приріст ефекту від кожної додаткової одиниці BESS поступово зменшується.

Окремого аналізу потребують потенційні обмеження та ризики масштабного впровадження BESS в Україні. По-перше, це технологічні та ресурсні чинники. Попри суттєве здешевлення акумуляторних технологій, великомасштабні BESS залишаються капіталомісткими об'єктами й істотно залежать від вартості сировини (літій, нікель, кобальт, графіт тощо) та стабільності глобальних ланцюгів постачання. Для України, яка перебуває в стані війни та значною мірою залежить від імпорту високотехнологічного обладнання, це означає потребу в ретельному плануванні закупівель, диверсифікації постачальників і, за можливості, локалізації окремих ланок виробничого циклу (наприклад, складання шаф, інтеграція систем керування) [10, 15].

По-друге, важливими є екологічні та соціальні аспекти. Масове використання акумуляторних систем неминуче піднімає питання управління життєвим циклом обладнання: від видобутку та переробки сировини до утиліза-

ції й вторинної переробки відпрацьованих батарей. Для України, яка декларує довгостроковий курс на декарбонізацію, критично важливо інтегрувати BESS у ширший контур «зеленої» промислової політики: розвивати інфраструктуру переробки акумуляторів, запроваджувати стандарти поводження з відходами та мінімізувати екологічні ризики на всіх етапах життєвого циклу.

По-третє, особливу вагу мають питання кібербезпеки та системної інтеграції. У міру того, як BESS перетворюються на активні елементи мережі, зростає кількість потенційних точок зовнішнього впливу на енергосистему. Накопичувачі, обладнані системами дистанційного моніторингу та керування, можуть стати цілями кібератак, здатних порушити режим роботи мережі. Для України, що вже має досвід масштабних кібератак на енергетичну інфраструктуру, інтеграція BESS має супроводжуватися запровадженням стандартів кібербезпеки, сертифікацією програмно-апаратних комплексів і створенням спеціалізованих процедур моніторингу та реагування на інциденти.

Окремий вимір стосується вбудовування BESS у модель децентралізованої енергосистеми, заснованої на активній участі споживачів і громад у виробництві енергії та управлінні нею. У такій моделі батарейні системи накопичення енергії стають не лише технічним, а й інституційним елементом:

- на рівні домогосподарств – частиною прос'юмерських моделей (споживач – виробник), коли власники BESS можуть надавати системні послуги й отримувати за це винагороду;
- на рівні громад – складником енергетичних кооперативів та муніципальних енергетичних компаній, що управляють локальними мікромережами й активами;
- на системному рівні – частиною «віртуальних електростанцій», які агрегують значну кількість розподілених накопичувачів та генерувальних установок для участі в оптовому ринку електроенергії та ринках послуг [11, 17].

У цьому контексті BESS фактично стають ланкою, що поєднує технічний, економічний і соціальний виміри енергетичного переходу. Без систем накопичення децентралізована енергосистема з високою часткою ВДЕ неминуче стикається з обмеженнями за стійкістю й керованістю; водночас за відсутності відповідних ринкових і регуляторних механізмів самі BESS не здатні повністю реалізувати свій потенціал, а інвестиції в них залишаються поодинокими й фрагментарними.

Висновки

Батарейні системи накопичення енергії (BESS) є одним з ключових елементів нової архітектури енергосистеми України. Вони виконують не допоміжну, а структуруювальну функцію: забезпечують гнучкість за високої частки ВДЕ, підсилюють стійкість до зовнішніх збурень і

формують основу для децентралізованої моделі енергопостачання.

В умовах воєнних загроз BESS відіграють критичну роль у підвищенні живучості та стійкості енергосистеми. Багаторівнева інтеграція накопичувачів – на рівні домогосподарств, об'єктів критичної інфраструктури та магістральних мереж – допомагає обмежувати масштаб і тривалість відключень, підтримувати роботу мікромереж і ключових вузлів, а також пришвидшувати відновлення електропостачання після аварій і атак.

У довгостроковій перспективі BESS сприяють поглибленню енергетичної незалежності України. Системи накопичення забезпечують повніше використання потенціалу сонячної та вітрової генерації, зменшують обсяги вимушених обмежень ВДЕ, скорочують потребу в пікових теплових потужностях та імпортованому паливі й покращують умови інтеграції України до європейського ринку електроенергії.

Найбільший ефект досягається за умов багаторівневої й системно спроектованої інтеграції BESS. Поєднання розподілених накопичувачів (у домогосподарств, малого бізнесу, громад) з великомасштабними системами на рівні мережевої інфраструктури дає змогу одночасно поліпшувати показники надійності (SAIDI, SAIFI, EENS), зменшувати системні ризики за високої частки ВДЕ та підтримувати розвиток децентралізованої енергосистеми з активною участю споживачів.

Реалізація потенціалу BESS потребує виконання комплексу технічних, економічних і регуляторних передумов. Серед ключових – оновлення мережевих кодексів і стандартів з урахуванням специфіки систем накопичення; розвиток цифрової інфраструктури керування та механізмів кібербезпеки; запровадження прозорих ринкових моделей оплати послуг гнучкості й резервування; нормативне закріплення статусу BESS і гармонізація регулювання з підходами ЄС. Без виконання цих завдань масштабне впровадження накопичувачів залишатиметься фрагментарним і не дасть очікуваного ефекту для стійкості та енергетичної незалежності системи.

BESS виступають зв'язувальною ланкою між стійкістю, енергетичною незалежністю та децентралізацією. Інтеграція систем накопичення в децентралізовану модель – через мікромережі, енергетичні спільноти та віртуальні електростанції – створює можливість поєднати технічні й інституційні аспекти енергетичного переходу в цілісну стратегію повоєнної модернізації енергетичного сектору України.

ПОСИЛАННЯ

1. Програма розвитку ООН (ПРООН). Towards a Green Transition of the Energy Sector in Ukraine: Update on the Energy Damage Assessment. Ukrainian Energy Sector Damage Assessment Report 2022 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.undp.org/ukraine/publications/towards-green-transition-energy-sector-ukraine>
2. Секретаріат Енергетичного співтовариства / International Energy Charter. Ukrainian Energy Sector Evaluation and Damage Assessment [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2023_05_24_UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_Version_X_final.pdf
3. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА). Ukraine's Energy Security and the Coming Winter [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter>
4. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА). Batteries and Secure Energy Transitions [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>
5. Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA). Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>
6. ENTSO-E – Європейська мережа операторів систем передачі електроенергії. System Flexibility Needs for the Energy Transition [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.entsoe.eu/system-flexibility/>
7. Європейська Комісія. Key Facts on Energy Storage [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/energy-storage/key-facts-energy-storage_en
8. SolarPower Europe. European Market Outlook for Residential Battery Storage 2024–2030 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlooks/european-market-outlook-for-residential-battery-storage-2024-2030>
9. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА). Batteries and Secure Energy Transitions [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>
10. Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA). Battery Energy Storage Systems: Key to Renewable Power Supply–Demand Gaps [Електронний ресурс].

- ресурс]. Режим доступу:
<https://www.irena.org/publications/2022/Dec/Battery-energy-storage-systems-key-to-renewable-power-supply-demand-gaps>
11. Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA). Electricity Storage: Technology Brief; World Energy Transitions Outlook 2023 [Електронний ресурс]. Режим доступу: Electricity Storage:
<https://www.irena.org/publications/2012/Jul/Electricity-Storage>
12. ENTSO-E – Європейська мережа операторів систем передачі електроенергії. System Flexibility Needs for the Energy Transition [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.entsoe.eu/system-flexibility/>
13. Європейська Комісія. Key Facts on Energy Storage та супровідні документи щодо ролі накопичувачів в енергетичному переході [Електронний ресурс]. Режим доступу:
https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/energy-storage/key-facts-energy-storage_en
14. Міжнародне енергетичне агентство (MEA). Ukraine's Energy Security and the Coming Winter та пов'язані аналітичні огляди щодо наслідків війни для енергетики України [Електронний ресурс]. Режим доступу:
<https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter>
15. Управління Верховного комісара ООН з прав людини (OHCHR). Attacks on Ukraine's Energy Infrastructure: Harm to the Civilian Population [Електронний ресурс]. Режим доступу:
<https://www.ohchr.org/en/documents/thematic-reports/attacks-ukraines-energy-infrastructure-harm-civilian-population>
16. DTEK; Fluence; галузеві ЗМІ. Ukraine's Largest Battery Energy Storage System (BESS) Enters Operation: 200 MW / 400 MWh Portfolio [Електронний ресурс]. Режим доступу (приклад):
<https://renewablesnow.com/news/dtek-and-fluence-complete-200-mw-battery-storage-project-in-ukraine-xxxxxxx/>
17. SolarPower Europe. Flexibility: Strengthening the Grid with Battery Storage and Demand Response [Електронний ресурс]. Режим доступу:
<https://www.solarpowereurope.org/press-releases/solar-power-europe-publishes-new-recommendations-on-energy-flexibility>

THE ROLE OF BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS (BESS) IN ENHANCING THE RESILIENCE AND ENERGY INDEPENDENCE OF UKRAINE'S POWER SYSTEM

Received Nov. 27, 2025; accepted Dec. 09, 2025
Available online Dec. 31, 2025

Diachenko O.

Author for correspondence: Diachenko Olexandr,
e-mail: das_23@icloud.com

PhD

<https://orcid.org/0009-0003-4651-5253>

Institute of Renewable Energy of the NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Abstract. *The energy sector of Ukraine is one of the key foundations of national security and sustainable development: the reliable operation of the power system underpins the functioning of industry, transport, social infrastructure and critical facilities [1; 2]. The large-scale damage to generation assets and networks caused by military actions has clearly demonstrated the vulnerability of the traditional centralised model and brought to the forefront the need to transition towards a more resilient and flexible power system architecture [1; 3].*

International experience of the past decade shows that the rapid development of battery energy storage systems (BESS) is driven by a combination of factors: a substantial reduction in the cost of lithium-ion technologies, the fast growth of variable renewable generation (primarily solar and wind), increasing requirements for system flexibility, as well as the emergence of new market mechanisms focused on balancing and capacity regulation services [4–6]. Against this background, battery-based storage systems are increasingly seen as one of the key instruments for enhancing power system controllability, reducing the volume of forced curtailment of renewable generation and enabling more efficient use of existing grid infrastructure [4; 5; 7; 8].

For Ukraine, which is simultaneously progressing towards synchronisation with the European power system and facing the destruction of conventional generation assets and networks, the integration of energy storage systems has a dual dimension. On the one hand, such solutions can strengthen the resilience and survivability of the power system under conditions of damage, ensure electricity supply for critical consumers and support the operation of local microgrids when transmission capacity is limited or backbone lines are unavailable [1–3]. On the other hand, BESS can become an important pillar of a long-term strategy for energy independence and decarbonisation, creating the preconditions for deeper integration of renewable energy sources and reducing dependence on imported fuels [4–7].

The aim of this article is to examine the role of battery energy storage systems in enhancing the resilience and energy independence of Ukraine's power system under conditions of war-related threats and subsequent recovery, as well as to identify the main levels and scenarios of BESS deployment and the key technical, economic and regulatory preconditions for their large-scale implementation.

Keywords: *battery energy storage systems (BESS); power system resilience; power system flexibility; renewable energy sources; microgrids.*

Introduction. The energy sector of Ukraine is one of the key determinants of economic growth and social stability: the functioning of industry, transport, engineering infrastructure, and the everyday life of households depend on it. Prior to the full-scale aggression, the country consistently developed the renewable energy (RES) sector as an instrument for reducing dependence on imported energy resources and for the gradual decarbonization of the energy system. According to international studies, in 2020–2021, the share of electricity generated from RES in Ukraine reached approximately 8–12% of total production, with solar and wind power dominating the mix. [9; 10]

The full-scale war has radically transformed the framework conditions of the energy system's operation. Targeted strikes on generation facilities and grid infrastructure have

resulted in extensive destruction and jeopardized the continuity of electricity supply for the population and for critical consumers. International organizations report systematic attacks on power plants and electricity transmission assets, which significantly increase the risk of prolonged outages and impose stricter requirements for the resilience and flexibility of the power system. [12; 13]

The experience of countries with rapidly growing shares of solar and wind generation indicates that battery energy storage systems (BESS) are increasingly becoming one of the key instruments for maintaining the reliability of energy supply. Analytical reviews by the International Energy Agency (IEA) and IRENA demonstrate that, as the share of variable RES generation increases, the need for system flexibility rises sharply, and grid-scale and industrial battery

storage systems are regarded as essential components for integrating high levels of “green” electricity, smoothing hourly fluctuations in output, and ensuring stable system operation. [5–7]

For Ukraine, under conditions of wartime threats and forthcoming reconstruction, the deployment of BESS extends far beyond a conventional technological upgrade. In essence, it concerns the formation of a new configuration of the national power system, in which battery storage — at the local, community, and transmission levels — may become one of the decisive factors in enhancing resilience and achieving greater energy self-sufficiency.

Presentation of the Main Material

The energy system of Ukraine is currently positioned at the intersection of profound challenges and emerging structural opportunities. On the one hand, the share of renewable energy sources is increasing; on the other hand, systemic threats to the integrity of infrastructure persist under wartime conditions. International organizations report significant damage to generation capacities, grid infrastructure, and heat supply facilities, which directly affects the reliability of electricity and heat supply for the population and critical infrastructure assets [15; 16].

Under such circumstances, the modernization of the energy system cannot be limited to rebuilding destroyed assets or constructing new generation facilities. A rethinking of the very architecture of power management and energy flows is required. Within this updated model, battery energy storage systems (BESS) are viewed as one of the fundamental elements that enhance system resilience and bring Ukraine closer to genuine energy independence.

Global trends indicate an accelerated deployment of BESS both at the level of large power systems and in distributed applications. According to the International Energy Agency (IEA), the average cost of lithium-ion batteries for stationary and transport applications has decreased by approximately 90% since 2010—from roughly USD 1,400 to less than USD 140 per kWh in 2023—representing one of the most substantial cost reductions among modern energy technologies [9]. Analyses by IRENA demonstrate that by 2030 the total installed capacity of energy storage systems will multiply severalfold, and BESS are consistently regarded as a key instrument for integrating high shares of solar and wind generation and for balancing supply and demand in real-time operation [11; 12].

In combination with the growing share of RES and the development of flexibility markets and ancillary services, these shifts are effectively changing the status of BESS: from a “niche” solution, they are transforming into one of the system-forming instruments of the energy transition. EU countries demonstrate a stable increase in storage capacities: according to estimates by the European Commission and sectoral associations, the installed capacity of battery energy storage systems is already measured in several tens of gigawatts and will continue to expand at an

accelerated pace to meet decarbonization targets and enhance system flexibility [14].

In the context of Ukraine, the significance of BESS is linked simultaneously to two groups of tasks: on the one hand, short-term enhancement of the system’s “survivability” under targeted attacks on generation and grid infrastructure; on the other hand, the formation of a decentralized, low-carbon, and economically resilient model of energy supply in the long term. According to IEA assessments, during the first years of the full-scale war, Ukraine lost a substantial share of dispatchable capacity due to occupation, destruction, and damage to energy facilities, while ongoing strikes on the electricity infrastructure continue to pose a high risk to supply reliability [6; 7].

Contemporary studies on the flexibility of EU energy systems indicate that by 2030, the need for flexible resources (storage, demand response, and grid-based solutions) may at least double, and, by 2050, approach a threefold increase compared to current levels [13]. ENTSO-E and the European Commission emphasize in their documents that without substantial deployment of flexibility technologies, including energy storage systems, integrating high shares of variable RES generation without compromising supply reliability will be extremely challenging. These conclusions fully apply to Ukraine, given its course toward synchronization with the European energy market and its declared objectives for expanding the use of renewable energy.

The significance of battery energy storage systems for enhancing the resilience and energy independence of the Ukrainian power system should be considered across three interrelated dimensions.

First, BESS strengthen the system’s operational resilience and survivability: they enable the maintenance of electricity supply to critical consumers in the event of network damage, reduce the duration and scale of outages, and accelerate recovery after emergency and wartime events.

Second, they contribute to increasing energy self-sufficiency by enabling fuller utilization of solar and wind generation potential, reducing dependence on imported fuels, and limiting the need for peak thermal capacities.

Third, BESS represent an important instrument for the effective functioning of a decentralized architecture: they ensure balancing within microgrids, support inter-level power flows, and enable the integration of distributed resources into system-wide management (virtual power plants, aggregated capacities, etc.) [15].

From the perspective of practical implementation, at least three fundamental levels of BESS integration into Ukraine’s energy system can be identified (Fig. 1).

Households and small businesses

At this level, BESS are typically combined with small-scale distributed generation, primarily rooftop solar installations. These systems perform two main functions: backup power supply and local consumption optimization. Under wartime

threats, they allow the operation of essential loads—communications, lighting, basic heating, and household equipment—during prolonged grid outages, reducing reliance on diesel generators and fuel. In the post-war period, such systems may be integrated into virtual power plant schemes and demand-response programs.

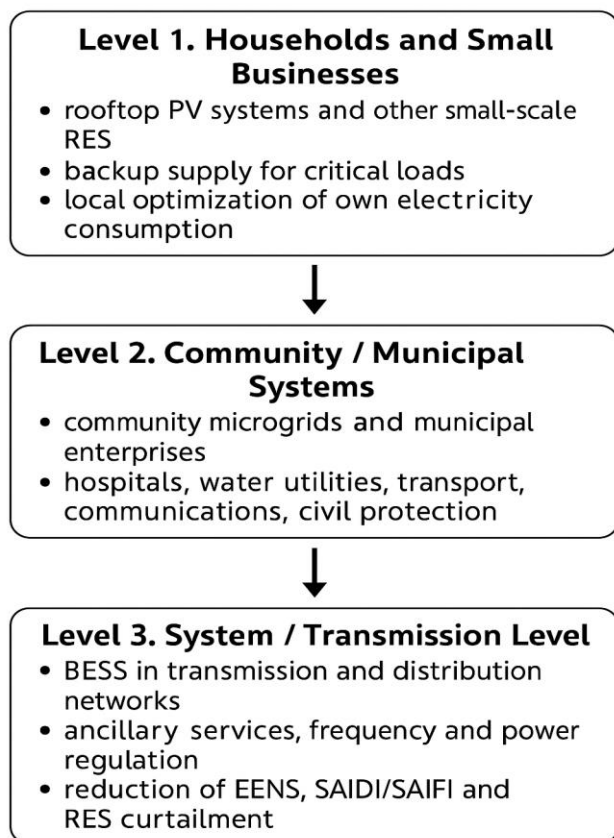


Fig. 1. Conceptual scheme of a multi-level application of battery energy storage systems (BESS) in the energy system of Ukraine

Community level

At the level of territorial communities, BESS can function as the core of local microgrids serving critical infrastructure facilities—hospitals, water utilities, transport hubs, communication systems, and civil protection units. In combination with local generation (solar power plants, bioenergy installations, small hydropower plants), storage systems enable these nodes to operate in an “islanded” mode, maintaining at least a basic level of energy supply even in the absence of connection to the transmission grid. This forms the basis for managed decentralization, whereby part of the balancing and backup functions is gradually transferred from the national level to the level of communities.

System (transmission-level) scale

Large-scale BESS connected to transmission and distribution networks can provide a wide range of ancillary services: primary and secondary frequency control, power regulation, fast-response reserves, smoothing of RES generation fluctuations, and reduction of curtailment volumes for solar and wind power plants. For Ukraine, this

level is particularly important given the loss of a portion of dispatchable capacity and the increasing share of variable generation. A representative example is the deployment by DTEK, in cooperation with Fluence, of a BESS portfolio with a total capacity of 200 MW and an energy rating of 400 MWh, aimed at enhancing the resilience of the energy system and reducing outage risks amid ongoing attacks [16].

Building on these three levels, two principal temporal scenarios for the use of BESS in Ukraine can be outlined.

In the short- and medium-term perspective (the period of war and early post-war recovery), the primary emphasis is on ensuring system survivability: backup power supply for critical infrastructure facilities, support for fragmented segments of the grid, reduction of outage duration, and the possibility of performing black start operations for individual energy assets.

In the long-term horizon (the stage of structural modernization), the focus shifts toward integrating a high share of RES, enabling BESS participation in ancillary service markets, reducing the need for peak thermal capacities, optimizing the loading of grid infrastructure, and realizing the potential of export–import operations within the electricity market synchronized with ENTSO-E [4; 5; 9]. International assessments indicate that without accelerated development of energy storage systems and other flexibility instruments, the integration of substantial RES shares inevitably leads to increased levels of forced curtailment and systemic risks. Therefore, the deployment of BESS should be regarded not as an additional option but as an essential component of strategic planning [13].

The realization of this potential requires not only technical measures but also appropriate regulatory preconditions. At the same time, it should be noted that several existing documents already contain relevant provisions, including: the Law of Ukraine “On the Electricity Market” No. 2019-VIII of 13 April 2017 (as amended); the National Renewable Energy Action Plan until 2030, approved by Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 761-r of 13 August 2024; and the Strategy for the Development of Distributed Generation until 2035, approved by Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 713-r of 18 July 2024. Despite these advancements, the implementation of BESS potential requires compliance with a number of technical preconditions. First of all, grid codes and design standards must be updated so that they account for the specific characteristics of BESS as an active system element capable not only of consuming electricity but also of injecting it into the grid.

The further development of digital control infrastructure is critically important: systems for forecasting RES generation, platforms for monitoring and dispatching microgrids, as well as cybersecurity instruments for storage facilities as components of critical infrastructure. A separate set of tasks concerns the standardization of technical requirements for BESS — from safety and fire-resistance criteria to electromagnetic compatibility, which becomes particularly

significant in the context of the large-scale deployment of energy storage systems at the distributed level [14].

Equally important for the widespread implementation of BESS are economic and regulatory preconditions. From an economic perspective, the key task is to establish transparent and predictable mechanisms for compensating flexibility and reserve services, ensuring non-discriminatory access for storage systems to electricity and ancillary service markets, and mobilizing international climate and recovery financing instruments to reduce capital expenditures during the critical period. In the regulatory dimension, it is necessary to clearly define the legal status of energy storage systems (as consumers, producers, or a distinct class of assets), to establish clear rules for their grid connection, participation in the balancing segment and ancillary service markets, and to align the national regulatory framework with EU approaches in the field of flexibility and energy storage [15].

In conclusion, battery energy storage systems in the Ukrainian context represent not merely a technological “add-on” to renewable generation but one of the key structural elements of the future energy system oriented toward resilience, decentralization, and energy self-sufficiency. The outlined levels of application, temporal scenarios of use, and the technical, economic, and regulatory preconditions examined above form the basis for further quantitative studies into the impact of BESS on the reliability and resilience indicators of Ukraine’s energy system.

In international practice, the reliability and “survivability” of power systems are typically characterized using indicators such as the System Average Interruption Duration

Index (SAIDI), the System Average Interruption Frequency Index (SAIFI), Expected Energy Not Supplied (EENS), and Loss of Load Probability (LOLP). The level of energy independence is usually described by the share of imported fuel in the generation mix, the share of RES in the balance, as well as the volume of forced curtailment of variable generation [14]. The integration of BESS enables an impact on these indicators in several principal ways:

- reducing EENS and SAIDI/SAIFI values by decreasing the duration and depth of consumer outages in the event of accidents and network damage;
- lowering the volume of forced curtailment of RES generation, which effectively increases the useful, actually utilized share of renewable energy in the balance;
- decreasing the need for peak thermal capacities and electricity imports during deficit hours, thereby indirectly increasing the level of energy self-sufficiency.

Even in the absence of a detailed quantitative model for Ukraine, it is already possible at a conceptual level to distinguish several typical development scenarios that differ in the degree of BESS integration into the power system (Fig. 2).

Scenario A – limited BESS deployment

Storage systems are installed selectively, primarily at individual critical infrastructure facilities and partially at industrial enterprises. Their influence on system-wide indicators of resilience and on the RES share in the balance remains minor; the primary function of BESS in this case is local backup and enhancing the reliability of specific nodes.

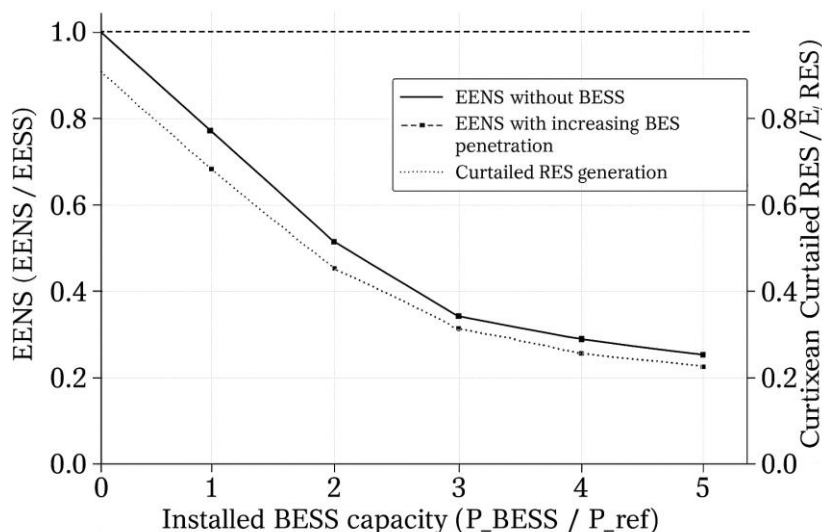


Fig. 2. Conceptual dependence of Expected Energy Not Supplied (EENS) and the volume of forced RES curtailment on the installed BESS capacity in the power system

$E_{\text{ENS}} / E_{\text{ENS}_0}$ — value of the Expected Energy Not Supplied (EENS) indicator normalized to the EENS in the case without BESS.

$P_{\text{BESS}} / P_{\text{ref}}$ — installed BESS capacity normalized to a selected reference capacity P_{ref} (for example, the maximum capacity considered in the study).

$E_{\text{VRE,lim}} / E_{\text{VRE,lim},0}$ — curtailed variable renewable energy generation normalized to the case without BESS.

Scenario B – advanced distributed level

A substantial share of households with their own generation, as well as a significant number of community and municipal facilities, are equipped with BESS. A layer of resilient microgrids is formed, reducing the load on transmission lines and enabling spatially limited outages. The impact on reliability indicators and EENS becomes noticeable; however, the integration of RES at the system-wide level remains constrained by network capacity and configuration.

Scenario C – multi-level BESS integration

Storage systems are present at all levels — from individual consumers and communities to the transmission grid. Large-scale BESS participate in ancillary service and balancing energy markets, while distributed systems provide local backup and facilitate demand-response programs. This approach yields the maximum aggregate effect: expected energy not supplied decreases, the actual share of RES in the balance increases, dependence on imported energy resources declines, and resilience to external disturbances improves [11; 13].

Graphically, the dependence of the aggregate effect on the level of BESS penetration can be represented as a curve with diminishing marginal returns: at early stages, additional storage capacity produces a significant reduction in unserved energy and improves reliability indicators; however, as installed capacity grows, the incremental benefit from each additional unit of BESS gradually decreases.

A separate analysis is required for the potential constraints and risks associated with large-scale BESS deployment in Ukraine. First, these concern technological and resource-related factors. Despite the substantial reduction in battery technology costs, utility-scale BESS remain capital-intensive assets and are significantly dependent on the cost of raw materials (lithium, nickel, cobalt, graphite, etc.) and the stability of global supply chains. For Ukraine, which is in a state of war and heavily dependent on the import of high-technology equipment, this implies the need for careful procurement planning, diversification of suppliers, and, where possible, localization of certain stages of the production cycle (e.g., cabinet assembly, integration of control systems) [10; 15].

Second, environmental and social aspects are of significant importance. The large-scale deployment of battery systems inevitably raises questions regarding equipment lifecycle management: from raw material extraction and processing to disposal and secondary recycling of spent batteries. For Ukraine, which has declared a long-term commitment to decarbonization, it is critically important to integrate BESS into the broader framework of a “green” industrial policy: to develop battery recycling infrastructure, introduce waste-management standards, and minimize environmental risks at all stages of the lifecycle.

Third, cybersecurity and system-integration issues carry particular weight. As BESS evolve into active elements of the grid, the number of potential external points of influence on the energy system increases. Storage systems

equipped with remote monitoring and control functionalities may become targets of cyberattacks capable of disrupting grid operation. For Ukraine, which already has experience with large-scale cyberattacks on its energy infrastructure, the integration of BESS must be accompanied by the introduction of cybersecurity standards, certification of software–hardware systems, and the establishment of specialized procedures for incident monitoring and response.

A separate dimension concerns the embedding of BESS within a model of a decentralized energy system based on the active participation of consumers and communities in energy production and management. In such a model, battery energy storage systems become not only technical but also institutional elements:

- at the household level — components of prosumer models (consumer–producer), in which BESS owners may provide system services and receive compensation;
- at the community level — elements of energy cooperatives and municipal energy companies that manage local microgrids and assets;
- at the system level — components of “virtual power plants” that aggregate a large number of distributed storage units and generation facilities for participation in the wholesale electricity market and ancillary service markets [11; 17].
- In this context, BESS effectively become the link connecting the technical, economic, and social dimensions of the energy transition. Without storage systems, a decentralized energy system with a high share of RES inevitably encounters limitations in terms of resilience and controllability; at the same time, in the absence of appropriate market and regulatory mechanisms, BESS themselves cannot fully realize their potential, and investments in them remain isolated and fragmented.

Conclusions

1. Battery energy storage systems (BESS) constitute one of the key elements of the new architecture of Ukraine’s power system. They perform not an auxiliary but a system-forming function: they provide flexibility under a high share of RES, strengthen resilience to external disturbances, and form the foundation for a decentralized energy supply model.
2. Under wartime conditions, BESS play a critical role in enhancing the survivability and resilience of the energy system. Multi-level integration of storage systems—at the household level, at critical infrastructure sites, and within transmission networks—helps to limit the scale and duration of outages, support the operation of microgrids and key nodes, and accelerate the restoration of electricity supply after accidents and attacks.
3. In the long-term perspective, BESS contribute to strengthening Ukraine’s energy independence. Storage

systems enable fuller utilization of solar and wind generation potential, reduce the volume of forced RES curtailment, decrease the need for peak thermal capacities and imported fuels, and improve the conditions for Ukraine's integration into the European electricity market.

4. The greatest effect is achieved through multi-level and systematically designed integration of BESS. The combination of distributed storage systems (in households, small businesses, and communities) with large-scale storage at the level of grid infrastructure allows simultaneous improvement of reliability indicators (SAIDI, SAIFI, EENS), reduction of system risks under a high share of RES, and support for the development of a decentralized energy system with active consumer participation.
5. Realizing the potential of BESS requires fulfilling a set of technical, economic, and regulatory preconditions. Among the key ones are: updating grid codes and standards to account for the specific characteristics of storage systems; developing digital control infrastructure and cybersecurity mechanisms; introducing transparent market models for compensating flexibility and reserve services; legally defining the status of BESS and harmonizing regulation with EU approaches. Without addressing these tasks, the large-scale deployment of storage systems will remain fragmented and will not deliver the expected benefits for the resilience and energy independence of the system.
6. BESS serve as a connecting link between resilience, energy independence, and decentralization. Integrating storage systems into a decentralized model — through microgrids, energy communities, and virtual power plants — creates an opportunity to combine the technical and institutional dimensions of the energy transition into a coherent strategy for the post-war modernization of Ukraine's energy sector.

REFERENCES

1. United Nations Development Programme (UNDP). Towards a Green Transition of the Energy Sector in Ukraine: Update on the Energy Damage Assessment. Ukrainian Energy Sector Damage Assessment Report 2022 [Electronic resource]. — Available at: <https://www.undp.org/ukraine/publications/towards-green-transition-energy-sector-ukraine>
2. Energy Community Secretariat / International Energy Charter. Ukrainian Energy Sector Evaluation and Damage Assessment [Electronic resource]. — Available at: https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2023_05_24_UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_Version_X_final.pdf
3. International Energy Agency (IEA). Ukraine's Energy Security and the Coming Winter [Electronic resource]. — Available at: <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter>
4. International Energy Agency (IEA). Batteries and Secure Energy Transitions [Electronic resource]. — Available at: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>
5. International Renewable Energy Agency (IRENA). Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030 [Electronic resource]. — Available at: <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>
6. ENTSO-E – European Network of Transmission System Operators for Electricity. System Flexibility Needs for the Energy Transition [Electronic resource]. — Available at: <https://www.entsoe.eu/system-flexibility/>
7. European Commission. Key Facts on Energy Storage [Electronic resource]. — Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/energy-storage/key-facts-energy-storage_en
8. SolarPower Europe. European Market Outlook for Residential Battery Storage 2024–2030 [Electronic resource]. — Available at: <https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlooks/european-market-outlook-for-residential-battery-storage-2024-2030>
9. International Energy Agency (IEA). Batteries and Secure Energy Transitions [Electronic resource]. — Available at: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>
10. International Renewable Energy Agency (IRENA). Battery Energy Storage Systems: Key to Renewable Power Supply–Demand Gaps [Electronic resource]. — Available at: <https://www.irena.org/publications/2022/Dec/Battery-energy-storage-systems-key-to-renewable-power-supply-demand-gaps>

11. International Renewable Energy Agency (IRENA). Electricity Storage: Technology Brief; World Energy Transitions Outlook 2023 [Electronic resource]. — Available at:
— Electricity Storage: <https://www.irena.org/publications/2012/Jul/Electricity-Storage>
12. ENTSO-E – European Network of Transmission System Operators for Electricity. System Flexibility Needs for the Energy Transition [Electronic resource]. — Available at: <https://www.entsoe.eu/system-flexibility/>
13. European Commission. Key Facts on Energy Storage and related documents on the role of storage in the energy transition [Electronic resource]. — Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/energy-storage/key-facts-energy-storage_en
14. International Energy Agency (IEA). Ukraine's Energy Security and the Coming Winter and related analytical reviews on the impact of the war on Ukraine's energy sector [Electronic resource]. — Available at: <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter>
15. Office of the United Nations High Commissioner for Human Rights (OHCHR). Attacks on Ukraine's Energy Infrastructure: Harm to the Civilian Population [Electronic resource]. — Available at: <https://www.ohchr.org/en/documents/thematic-reports/attacks-ukraines-energy-infrastructure-harm-civilian-population>
16. DTEK; Fluence; industry media. Ukraine's Largest Battery Energy Storage System (BESS) Enters Operation: 200 MW / 400 MWh Portfolio [Electronic resource]. — Available at (example): <https://renewable-snow.com/news/dtek-and-fluence-complete-200-mw-battery-storage-project-in-ukraine-xxxxxxx/>
17. SolarPower Europe. Flexibility: Strengthening the Grid with Battery Storage and Demand Response [Electronic resource]. — Available at: <https://www.solarpowereurope.org/press-releases/solar-power-europe-publishes-new-recommendations-on-energy-flexibility>