

ФУНКЦІОНУВАННЯ УСТАНОВОК ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ НА РИНКУ ДОПОМІЖНИХ ПОСЛУГ У КОНТЕКСТІ РЕЗЕРВУ ПІДТРИМКИ ЧАСТОТИ

Іван Притискач

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри електропостачання
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, prytyskach.ivan@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1892-0054

Віталій Опришко

кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник кафедри електропостачання
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, opryshko@hotmail.com
ORCID: 0000-0003-4963-2490

Юрій Веремійчук

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, y.veremiichuk@kpi.ua
ORCID: 0000-0003-0258-0478

Олена Ярмолук

кандидатка технічних наук, доцентка, доцентка кафедри електропостачання
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, yarmolyuk.lena@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8571-2573

У статті досліджується застосування відносно нових для української енергосистеми установок зберігання енергії та їхніх можливостей на ринку допоміжних послуг. Авторами представлено результати моделювання роботи умовної установки зберігання енергії в контексті надання допоміжної послуги резерву підтримки частоти на основі реальних історичних даних. Підкреслюється перевага установок зберігання енергії, оскільки вони можуть виконувати різні функції на різних сегментах електроенергетичного ринку та забезпечувати інтегральний ефект й окупність інвестицій. Запропоновано модифіковану стратегію управління з погляду підтримання середнього рівня заряду. Застосовано метод оцінки впливу кількості циклів заряду та розряду на рівень деградації установки зберігання енергії. Результати моделювання представлено для чинних регуляторних норм стосовно відхилення частоти порівняно з теоретичним припущенням можливості надання несиметричної послуги резерву підтримання частоти для двох стратегій управління. Результати моделювання представлені для таких характеристик: відсоток часу неактивності батареї через заряд 0 або 100%, кількість годин неактивності батареї через заряд 0 або 100%, розрахункова кількість циклів заряду/розряду, дохід від участі в ринку допоміжних послуг (тис грн), сумарна змодельована деградація у відсотках. Сьогодні в Україні є лише ліцензована для провадження господарської діяльності установка збереження енергії промислового масштабу, яка з початком повномасштабного вторгнення залишається на тимчасово окупованій території. Результати моделювання дають уявлення про потенціал установок зберігання енергії та їхню інвестиційну привабливість. Результати моделювання дають змогу оцінити можливість застосування установок зберігання для надання послуг регулювання частоти в енергосистемі України.

Ключові слова: ринок допоміжних послуг, резерв підтримання частоти, установки зберігання енергії.

Вступ. Сьогодні в Україні та світі спостерігається стрімкий розвиток і впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема сонячних та вітрових електричних станцій. Разом із позитивними тенденціями розвитку та залученням інвестицій у цей сектор енергетики зростання частки ВДЕ у загальному

балансі об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України створює ризики порушення балансової надійності енергосистеми, оскільки дані електростанції мають мінливий графік генерації електричної енергії (ЕЕ) як упродовж доби, так і значні сезонні коливання обсягів виробництва.

Подальше зростання частки ВДЕ у балансі ОЕС України неможливе без забезпечення належного обсягу встановленого резерву первинного та вторинного регулювання частоти та потужності, а також резерву заміщення в енергосистемі. На прикладі Каліфорнії ми можемо спостерігати видозміну кривої попиту, більш відому як «Каліфорнійська качка», де перед початком періоду значної сонячної інсоляції попит на ЕЕ різко зменшується практично до нуля, а після завершення супроводжується різким зростанням, що вимагає швидкої реакції генерації [1–3].

Таким чином, сьогодні актуальним завданням є запровадження нових механізмів, які забезпечуватимуть стабільність роботи ОЕС України за умови подальшого розвитку ВДЕ. Одним із найбільш перспективних засобів регулювання режимів електричних мереж і графіку відпуску ЕЕ з ВДЕ, що набуває широкого застосування у світі, є установки зберігання енергії (УЗЕ) (англ. *energy storage facilities*) [4].

Окрім того, упровадження УЗЕ дає змогу вирішувати інші завдання, пов'язані з наданням допоміжних послуг із регулювання напруги (з урахуванням приєднання у визначених точках), а також забезпечення гнучкості системи розподілу [5; 6], що стають усе більш нагальними у зв'язку з розвитком ринку ЕЕ в Україні [6; 7], створення віртуальних електростанцій і функціонування роздрібного ринку ЕЕ, демпфування частоти [8] та ін.

Характерною перевагою УЗЕ є можливість брати участь у виконанні кількох завдань або виконувати низку функцій у рамках різних сегментів електроенергетичного ринку. Ця особливість дає змогу отримати інтегральний ефект і забезпечити окупність інвестицій у проєкти [9; 10].

У липні 2020 р. в Україні була запущена перша УЗЕ промислового масштабу потужністю 1 МВт і ємністю 2,25 МВт·год у місті Енергодар, який дотепер залишається тимчасово окупованим [11].

Важливим складником під час аналізу та моделювання поведінки УЗЕ є використання реальних даних, які з початком повномасштабного вторгнення російської федерації та терористичних атак на енергетичну інфраструктуру нашої держави закриті з міркування безпеки. Використані у дослідженні історичні дані зміни частоти в ОЕС України відносяться до періоду синхронної роботи з енергосистемами країн-агресорів. Варто зазначити, що після синхронізації з *ENTSO-E* відхилення частоти стали з'являтися частіше та з більшою величиною, що може пояснюватися значним складником ВДЕ в енергооб'єднанні

континентальної Європи та недостатньо розвинутими міжсистемними зв'язками з нашою енергосистемою.

Результати дослідження. Вибір стратегії управління УЗЕ, яка повинна гарантувати їх оптимальну роботу, вимагає першочергово визначитися з критеріями і аналізом існуючого міжнародного досвіду та фактичного стану й умов приєднання ВДЕ малої потужності з погляду українських реалій.

Стратегії управління установками зберігання енергії. Для оцінки ефективності вибору стратегії участі УЗЕ у ринку необхідно проаналізувати історичні дані та ретроспективно, тобто, спираючись на історичні дані, оцінити потенційні можливості участі УЗЕ у цих сегментах.

Участь УЗЕ у регулюванні частоти визначається рівнем перетоку потужності між енергосистемою й УЗЕ. Своєю чергою, потужність визначається стратегією управління. Існують різні варіанти стратегій управління, які вибираються залежно від вимог до роботи УЗЕ та критеріями оптимальності функціонування.

Розглянемо базову стратегію управління УЗЕ, яка визначається графіком, зображеним на рис. 1, і строго відповідає чинним вимогам Кодексу системи передачі до Постачальника допоміжних послуг [12].

Відправними точками в наданні послуги є відхилення частоти δf у діапазоні $[f_2, P_2; f_3, P_3]$, що раніше (до кінця 2022 р.) становили ± 20 мГц, а станом на сьогодні становлять ± 10 мГц [12].

Така стратегія управління підходить для роботи в енергосистемі, де відхилення частоти симетрично розподілені відносно номінального значення частоти f_n та мають нормальний або біноміальний закони розподілу. У такому разі УЗЕ в середньому працює 50% часу за зниженої частоти (і в цей час віддає енергію в енергосистему) та 50% часу за підвищеної частоти (і в цей час споживає енергію з енергосистеми). Однак така стратегія не враховує поступове зниження заряду УЗЕ через внутрішні втрати на саморозряд та резервне живлення. Водночас тривалі періоди перевищення частоти можуть змусити УЗЕ досягти максимального заряду, обмежуючи здатність до участі у регулюванні частоти. Такі ситуації можуть бути усунені ручним утручанням у процес роботи УЗЕ, але це вимагатиме постійної участі персоналу в процесі управління, що є небажаним. Тому доцільно також розглянути модифіковану стратегію управління УЗЕ, яка вводить асиметрію в режим роботи УЗЕ [12].

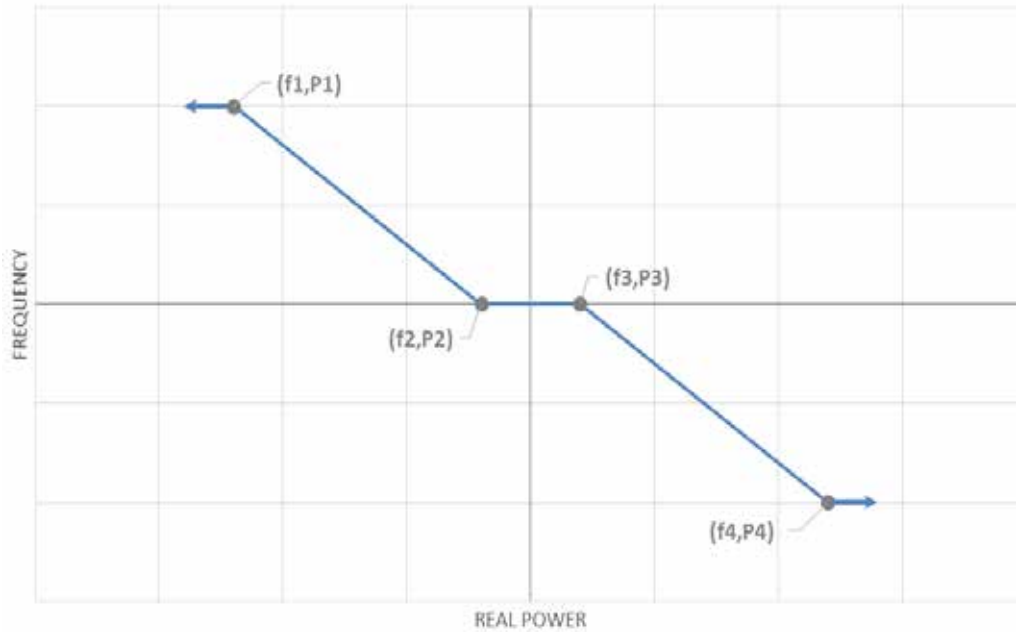


Рис. 1. Базова стратегія управління УЗЕ: P1 – максимальна потужність розряду, P2 – мінімальна потужність розряду, P4 – максимальна потужність заряду, P3 – максимальна потужність розряду [12]

Базова стратегія управління установками зберігання енергії. Для забезпечення роботи ОЕС України важливим завданням системного оператора є підтримання номінального значення частоти. Відповідно до відхилення частоти в ОЕС України, надання послуг, пов'язаних із первинним регулюванням (резерв підтримки частоти (РПЧ)) від УЗЕ, залежатиме від параметрів, що об'єднують обмеження заряду/розряду з погляду ємності батареї, є стан заряду батареї *State of Charge (SOC)*, що для відхилень ± 20 мГц визначається як:

$$\begin{aligned} &\text{якщо } f > 50 + 10 \cdot \delta f \text{ Гц, то } P = P_{\max}, \\ &\text{інакше, якщо } f < 50 - 10 \cdot \delta f, \text{ то } P = -P_{\max}, \\ &\text{інакше, якщо } f \leq 50 - \delta f \text{ Гц, то} \\ &P = (f - 50) \frac{P_{\max}}{200} \cdot 1000, \\ &\text{інакше, якщо } f \geq 50 + \delta f \text{ Гц, то} \\ &P = -(f - 50) \frac{P_{\max}}{200} \cdot 1000, \\ &\text{інакше } P = 0, \end{aligned}$$

де F – значення частоти; δf – відхилення частоти, з котрої починається активація допоміжних послуг; $10\delta f$ – відхилення частоти, за якої УЗЕ зобов'язана видати максимально можливу потужність P_{\max} .

Оскільки УЗЕ на основі літій-іонних накопичувачів чутливі до глибини заряду/розряду (циклюванню), важливим критерієм оптимізації є мінімізація випадків повного розряду під

час роботи УЗЕ на ринках електричної енергії у рамках установлених виробником величин. За результатами моделювання реальних даних зміни частоти й отриманого графіка можна зробити висновок, що ефективність роботи батареї без належного контролю й енергоменеджменту спричиняє режими роботи на низькому рівні *SOC*. Оператори УЗЕ мають планувати роботу з метою підтримання *SOC* на достатньому рівні, вибираючи таку стратегію, котра забезпечить стабільність надання послуг. В іншому разі відсутність можливості симетричного надання послуги потягне накладання штрафів за порушення договору Постачальника допоміжних послуг.

Для розрахунку деградації батареї через присутність циклів «заряд – розряд», а також знаходження батареї у стані глибокого розряду скористаємося методикою [13], основний критерій якої визначає ступінь деградації і залежно від кількості циклів УЗЕ q описується залежністю

$$Y = 1591,1x^{-2,089} \quad (1)$$

Дане формулювання є дещо спрощеним і не враховує весь спектр сучасних технологій УЗЕ на базі літій-іону.

Для розуміння результатів такого розрахунку варто розглянути ілюстрацію на рис. 2 залежності кількості циклів заряду – розряду (*Battery Life Cycles*) до глибини розряду (*DOD*).

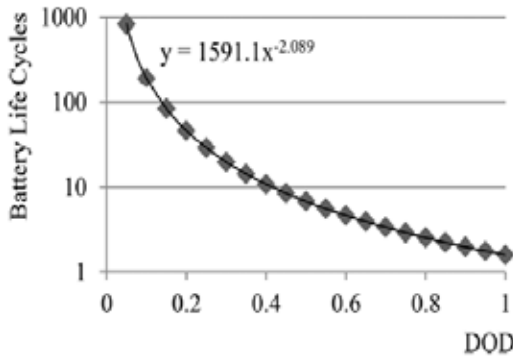


Рис. 2. Залежність деградації УЗЕ від кількості циклів «заряд – розряд» [13]

Очевидно, що режим роботи УЗЕ вимагає підходу до визначення кількості циклів, адже режими УЗЕ передбачають частковий заряд – розряд під час надання послуг. Для визначення кількості циклів за рахунок апроксимації кількості мікроциклів заряду/розряду циклів скористаємося методикою [14]. Методика передбачає використання історичних даних про стан заряду та посекундні зміни стану заряду. Позитивні зміни вказують на заряд, від'ємні – на розряд, а нульові зміни – на стан спокою. Після визначення набору даних додаються позитивні та від'ємні значення для отримання даних про зарядку та розрядку акумулятора. Повний цикл заряду акумулятора розраховується як середнє значення циклів заряду та розряду за певний період. Алгоритм повторюється для всього набору історичних даних про стан заряду, що дає змогу отримати загальну кількість циклів.

Модифікована стратегія управління установками зберігання енергії. Для оптимізації роботи УЗЕ та зменшення рівня деградації необхідно оптимізувати та контролювати режими її роботи (С). Розрахунок SOC виконувався аналогічно до базової стратегії з додатковими обмеженнями, які полягають у тому, що за $SOC < 0,25$ надання послуг УЗЕ буде пов'язано виключно з послугами зменшення генерації (заряд) і, навпаки, з послугами збільшення генерації (розряд). Така стратегія неможлива з погляду поточних регуляторних вимог, проте важлива для врахування у локальних енергетичних мережах, де ресурс із надання будь-яких послуг є обмеженим та можуть мати місце локальні правила

якщо $f > 50 + 10 \cdot f$ Гц, то $P = P_{max}$,
 інакше, якщо $f < 50 - 10 \cdot f$, то $P = -P_{max}$,
 інакше, якщо $f \leq 50 - f$ Гц, то

$$P = (f - 50) \frac{P_{max}}{200} \cdot 1000 \cdot \frac{C}{C_{max}}, \quad (2)$$

інакше, якщо $f \geq 50 + f$ Гц, то

$$P = -(f - 50) \frac{P_{max}}{200} \cdot 1000 \cdot \left(1 - \frac{C}{C_{max}}\right),$$

інакше $P = 0$.

Для розрахунку деградації батареї через присутність циклів «заряд – розряд», а також знаходження батареї у стані глибокого розряду скористаємося аналогічною методикою та відповідною залежністю (2).

Моделювання роботи установки зберігання енергії. Для дослідження використано дані частоти виміряні на кафедрі електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського у м. Київ [12] за період з 01.10.2021 до 03.01.2022 з інтервалом дискретизації 1 сек. Відповідно до даних визначалися відхилення частоти у кожен період часу, та, використовуючи алгоритм стратегії управління, розраховувався плановий перетік потужності з енергосистемою для заданого інтервалу часу. Інтегруючи перетоки потужності, розраховувався поточний рівень заряду УЗЕ. Отримані дані використовувалися для розрахунку рівня деградації акумуляторних батарей УЗЕ. Під час моделювання вважалось, що в початковий момент часу рівень заряду УЗЕ становить 50%.

Для кращого сприйняття великого масиву даних, які збиралися із секундним інтервалом упродовж періоду з 01.10.2021 до 03.01.2022, використаємо просту візуалізацію періодів часу з відхиленнями частоти поза межами інтервалу [49,8; 50,2], які мали би бути компенсовані під час роботи УЗЕ (рис. 3).

Ураховуючи, що УЗЕ має обмеження як по заряду, так і розряду, варто також проілюструвати розподіл частоти окремо для заряду та розряду (рис. 4).

Для розрахунку економічних показників, які будуть характеризувати УЗЕ з погляду організації, яка її експлуатує, приймемо рівень ціни за РПЧ – 1078,54 грн/МВт за годину (що відповідає граничній ціні станом на 09 грудня 2021 р.).

На рис. 4 побудовано різницю між тривалістю роботи УЗЕ в режимах заряду та розряду в межах однієї доби. Цей графік дає змогу оцінити довготермінову тенденцію до розряду чи досягнення максимального заряду в процесі участі у регулюванні частоти. Як видно з графіку (рис. 5), режими роботи розряду переважають над інтервалами часу із зарядом УЗЕ.

Також цікаво було проаналізувати особливості режимів роботи в різні години доби за період роботи УЗЕ. Така залежність показана на рис. 6.

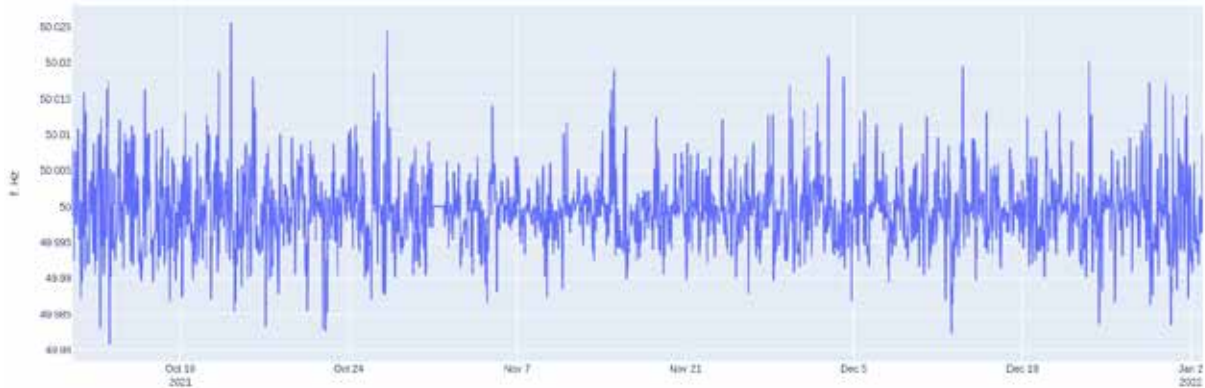


Рис. 3. Графік зміни частоти в енергосистемі

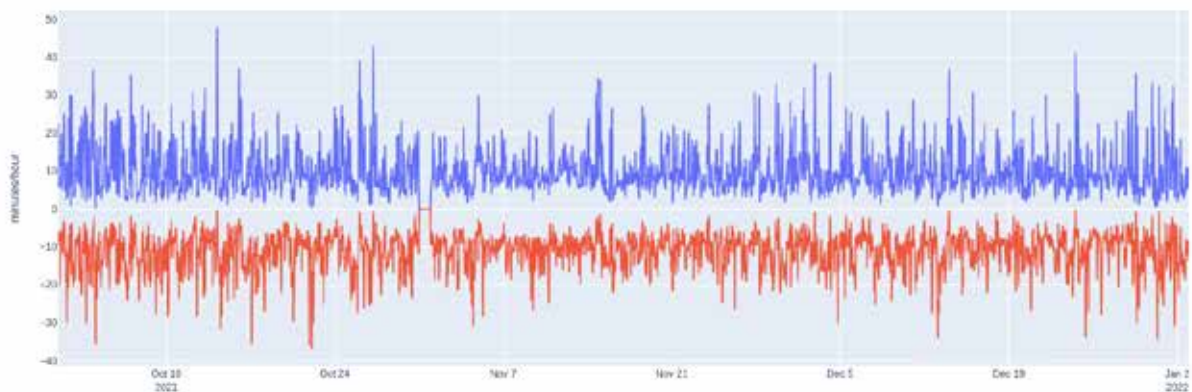


Рис. 4. Погодинна тривалість відхилень за межі [49,8; 50,2]

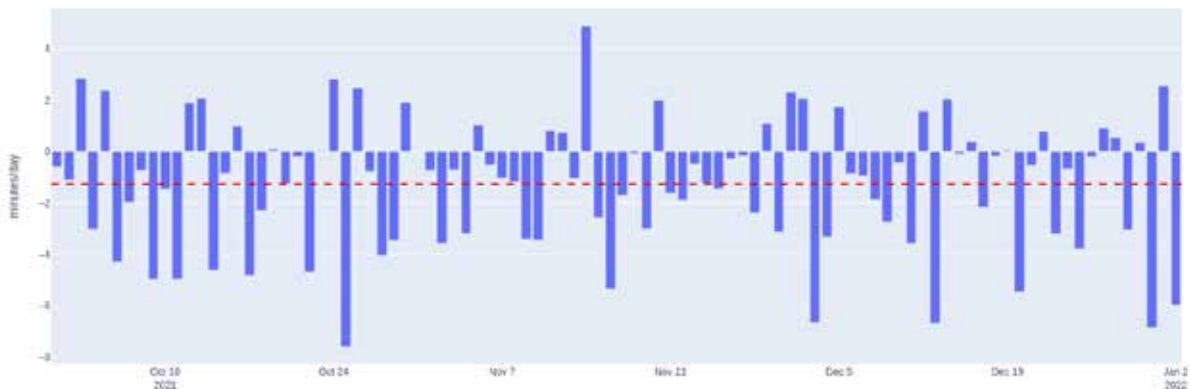


Рис. 5. Усереднена за добу різниця тривалостей відхилень за межі [49,8; 50,2]

Як видно, залежність середнього відхилення частоти від часу доби практично відсутня.

У процесі вибору оптимальної стратегії участі УЗЕ під час надання послуг РПЧ ключовим є планування добових режимів роботи. Із рис. 6 ми бачимо, що найбільші розбіжності у показниках припадають на 8, 14, 15 та 20 години, що може пояснюватися локальними піками споживання, які припадають саме на ці години доби. Також

варто звернути увагу, що найбільші за амплітудою відхилення частоти припадають на завершення періодів торговельних графіків, що може пояснюватися різкою зміною між цільовими величинами генерації та споживання.

Базова стратегія управління установками зберігання енергії за нечутливості $\delta f = 0,02$ Гц. Для кращого розуміння режимів роботи УЗЕ та подальшого аналізу візуалізуємо дані частоти

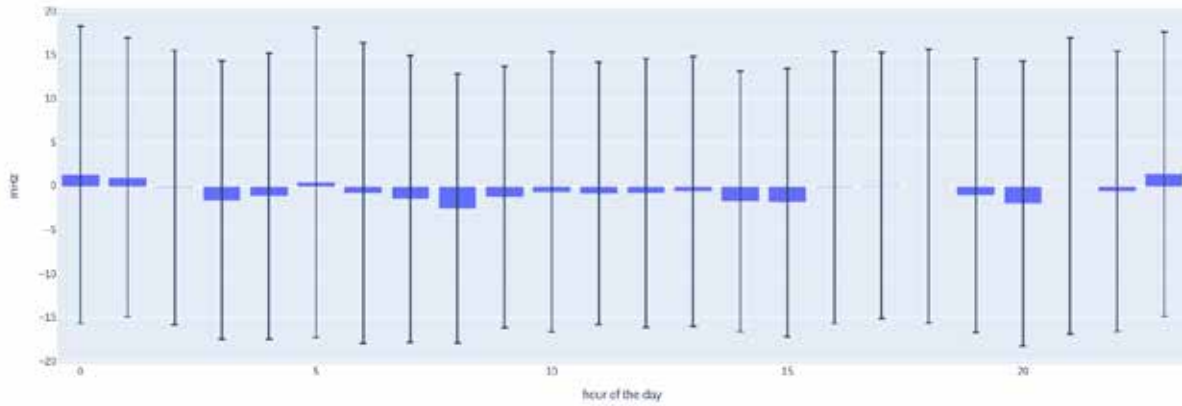


Рис. 6. Погодинний розподіл відхилень частоти з довірчими інтервалами

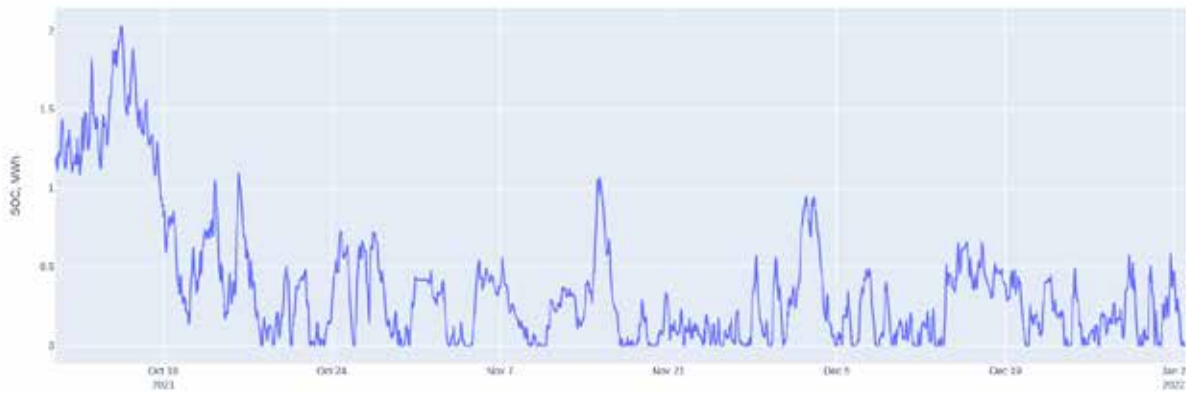


Рис. 7. Стан заряду батареї

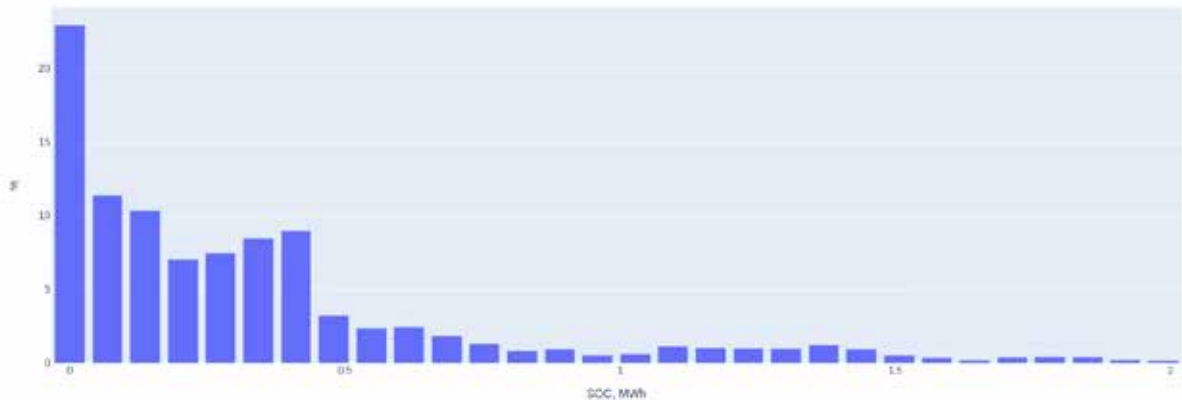


Рис. 8. Розподіл SOC за тривалістю

умовної УЗЕ потужністю 2 МВт та ємністю 2,25 МВт·год з погляду SOC (рис. 7).

Результати з використанням базової стратегії управління УЗЕ показують, що змодельована УЗЕ значну частину часу знаходиться у стані повної розрядки, що не дає змоги брати участь у наданні допоміжних послуг на сегменті РПЧ.

Розрахований час, коли СНЕ не могла брати участь у регулюванні, становив 64 год, або 2,8% від усього часу моделювання. Така поведінка УЗЕ переважно була зумовлена тенденцією до зниження частоти відносно номінальної, зареєстрованими в період моделювання. Розподіл SOC за тривалістю наведено на рис. 8.

Оцінимо рівень тенденції до розряду УЗЕ (рис. 8). Для детального аналізу поведінки *SOC* припустимо, що УЗЕ матиме необмежену ємність. Із рис. 9 видно, що за наявних умов тренд роботи УЗЕ на РПЧ тяжітиме до розряду зі швидкістю 1,079 кВт.

Розрахований сумарний дохід від надання допоміжних послуг РПЧ за весь період моделювання становив 5,47 млн грн (табл. 1).

Таблиця 1

Результати моделювання

Відсоток часу неактивності батареї через заряд 0 або 100%	2,84
Кількість годин неактивності батареї через заряд 0 або 100%	64,06
Розрахункова кількість циклів заряду – розряду	105,1
Дохід від участі на ринку допоміжних послуг (тис грн)	5474
Сумарна змодельована деградація у відсотках	15,16

Для розрахунку деградації змодельованої батареї через присутність циклів «заряд – розряд», а також знаходження УЗЕ у стані глибокого розряду скористаємося (1), використавши змодельований рівень заряду УЗЕ *SOC* (рис. 10). Отриману залежність рівня деградації показано на рис. 10.

Досить високий рівень деградації можна пояснити тим, що змодельована УЗЕ значну частину часу знаходилася у стані з рівнем заряду нижче встановлених.

Модифікована стратегія управління установками зберігання енергії за нечутливості $\delta f = 0,02$ Гц. Виконаємо моделювання режиму роботи УЗЕ із застосуванням модифікованої стратегії управління, яка забезпечує підтримання середнього рівня заряду протягом процесу участі УЗЕ в підтриманні частоти. Розрахунок виконувався аналогічно до базової стратегії з доповненням, що за $SOC < 0,25$ батарея буде заряджатися за частоти від 49,98 до 50,02 Гц, надаючи послугу на симетричну послугу.

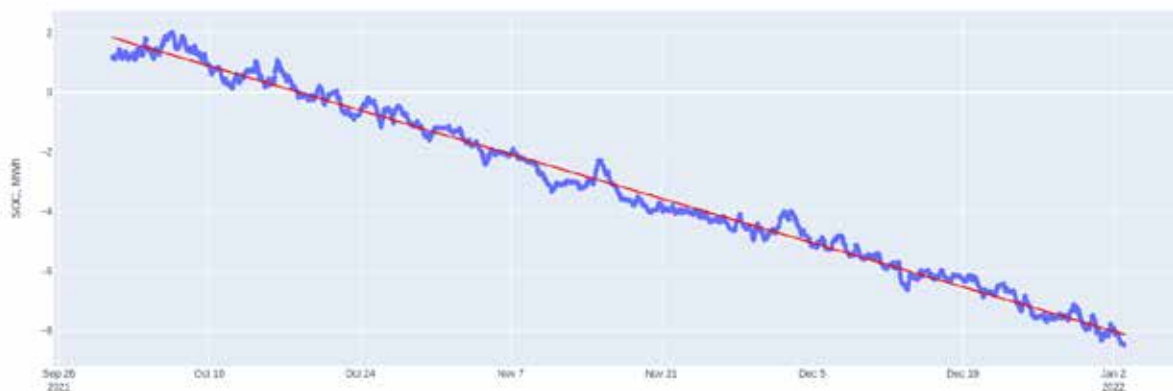


Рис. 9. Тренд зміни заряду за необмеженої ємності

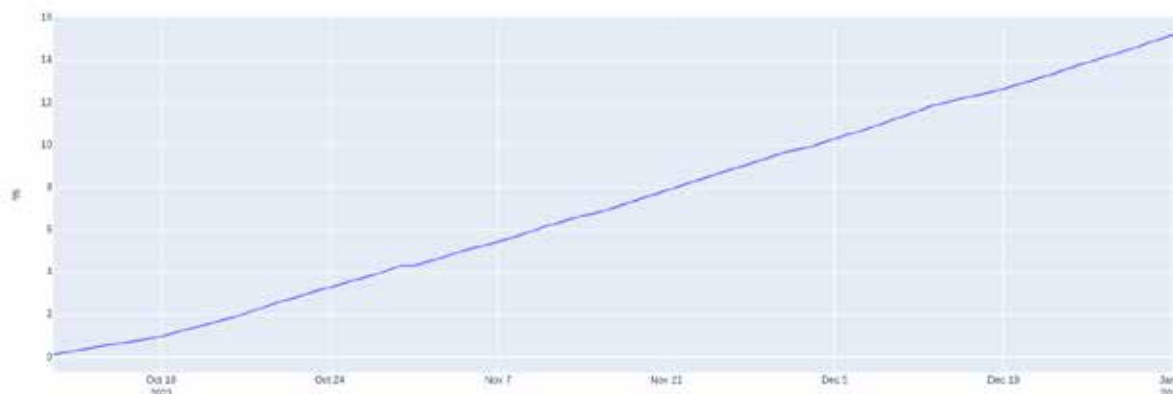


Рис. 10. Деградація батареї

Отриманий графік стану заряду батареї показано на рис. 11. Результати з використанням модифікованої стратегії управління УЗЕ показують, що батарея практично не досягала граничних значень повного розряду чи заряду.

Розрахований час, коли батарея не могла брати участь у регулюванні, відсутній. Очевидно, що такий результат значно кращий із погляду мінімізації впливу деградації, ніж для випадку базової стратегії. На рис. 12 показана гістограма розподілу рівня заряду батареї.

Розрахований сумарний дохід від участі в РПЧ і продажу ЕЕ на ринку небалансів за весь період моделювання практично не змінився порівняно з базовою стратегією і становив 5,47 млн грн (табл. 2).

Розрахунковий рівень деградації батарей УЗЕ показано на рис. 13. Накопичений знос за період моделювання становив 8,4%, що значно менше, ніж для випадку використання базової стратегії. Така значна відмінність пояснюється тим, що під час використання модифікованої стратегії

середній рівень заряду підтримується на значно вищому рівні та відсоток часу, коли батарея знаходиться у стані глибокого розряду, незначний.

Таблиця 2

Результати моделювання

Відсоток часу неактивності батареї через заряд 0 або 100%	0
Кількість годин неактивності батареї через заряд 0 або 100%	0
Розрахункова кількість циклів заряду/розряду	102 96
Дохід від участі на ринку допоміжних послуг (тис грн)	5474
Сумарна змодельована деградація у відсотках	8,4

Базова стратегія управління установками зберігання енергії за нечутливості $\delta f = 0,01$ Гц. Після змін до правил надання допоміжних послуг, відхилення частоти, після яких відбувається активація допоміжних послуг, становлять [49,9; 50,1]. Для розрахунку економічних показників

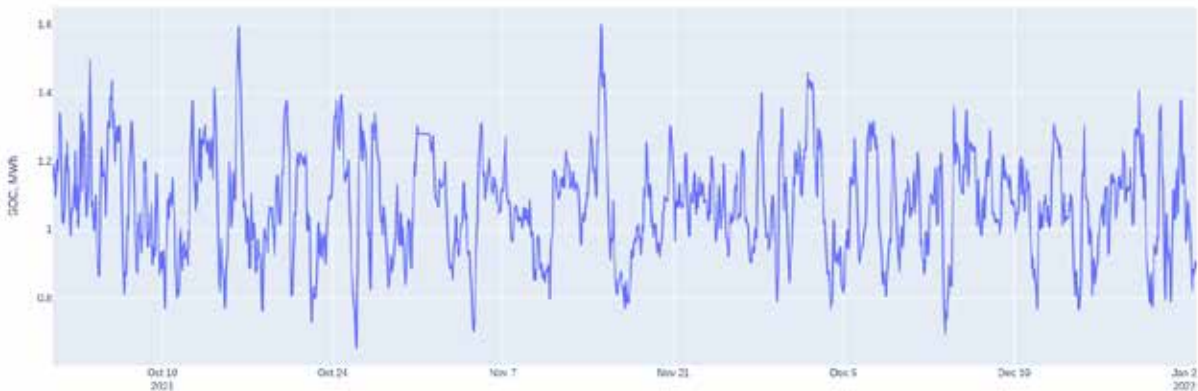


Рис. 11. Стан заряду батареї для модифікованої стратегії управління УЗЕ

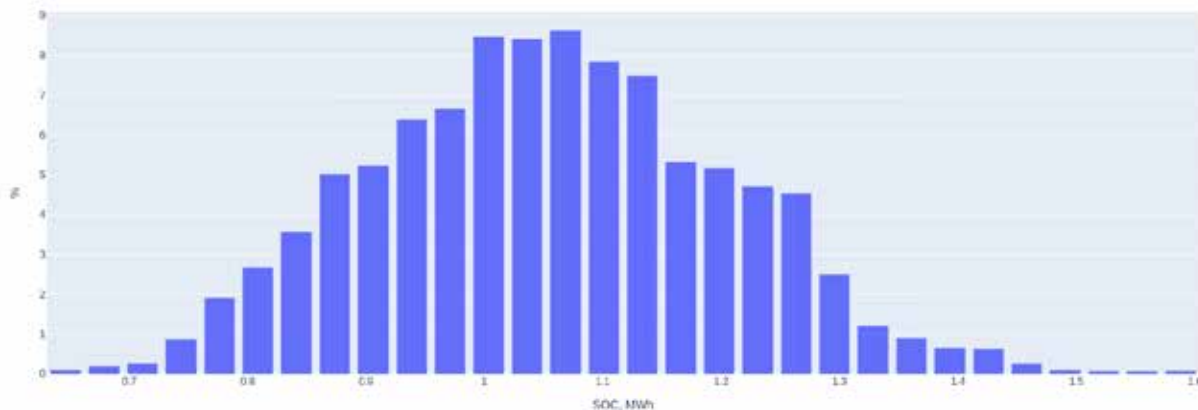


Рис. 12. Гістограма розподілу рівня заряду батареї (секунд) для модифікованої стратегії управління УЗЕ

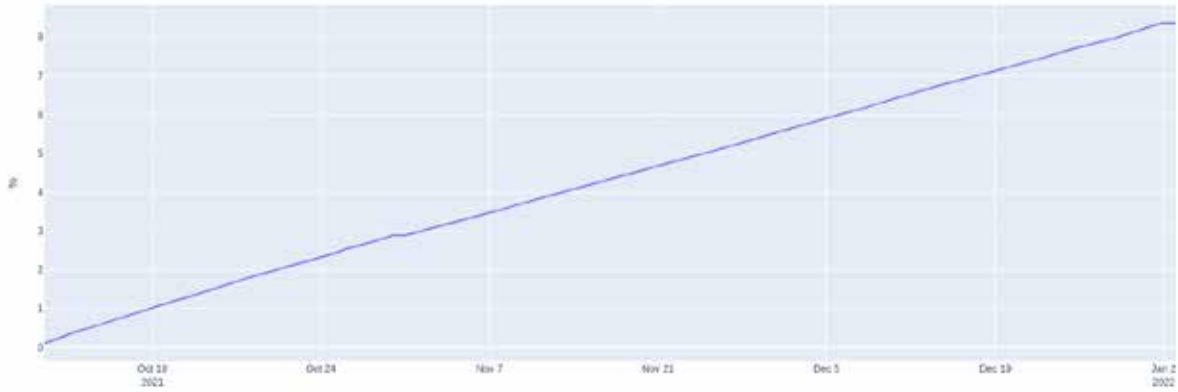


Рис. 13. Деградація батареї для модифікованої стратегії управління УЗЕ

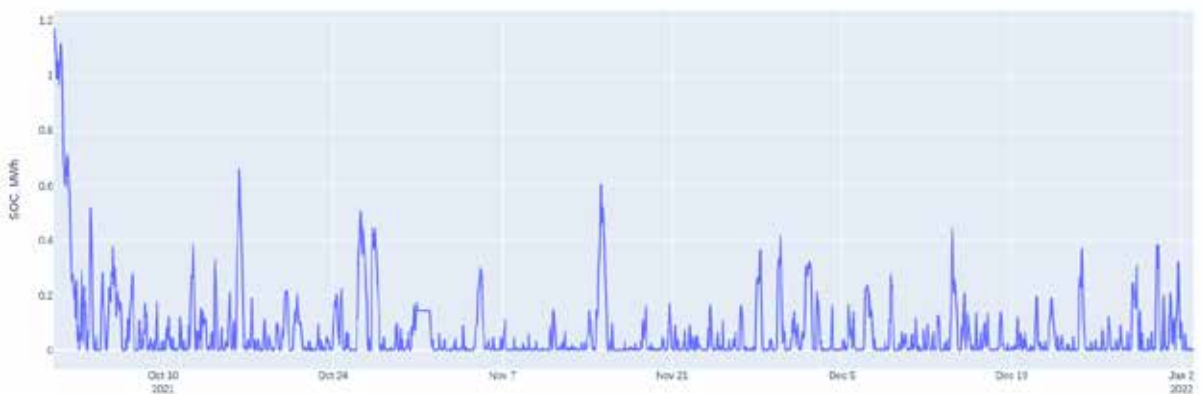


Рис. 14. Стан заряду батареї

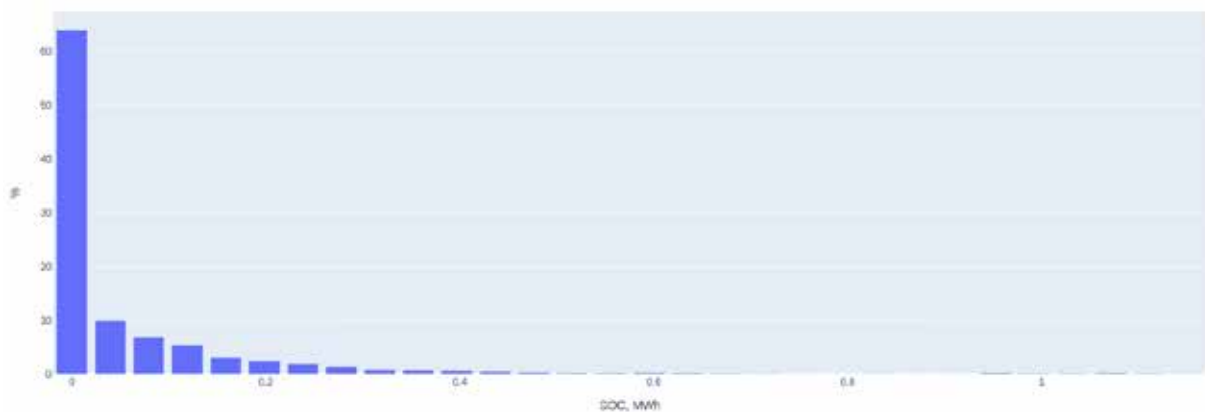


Рис. 15. Розподіл SOC за тривалістю

прийємо рівень ціни за РПЧ – 1339,82 грн/МВт за годину (що відповідає граничній ціні станом на 28 травня 2023 р.).

Для кращого розуміння режимів роботи УЗЕ та подальшого аналізу візуалізуємо попередні дані частоти з погляду SOC (рис. 14).

Результати з використанням базової стратегії управління УЗЕ показують, що змодельована УЗЕ для $\delta f = 0,01$ значну частину часу знаходиться у стані повної розрядки, аналогічно до попередніх умов $\delta f = 0,02$. Розподіл SOC за тривалістю наведено на рис. 15.

Тренд зміни заряду, зображений на рис. 16, є аналогічним до рис. 9 у зв'язку зі збереженням загального тренду.

Аналогічно скористаємося (1), використавши змодельований рівень заряду УЗЕ SOC (рис. 16). Отриману залежність рівня деградації показано на рис. 17.

Розрахований сумарний дохід від участі в РПЧ і продажу ЕЕ на ринку небалансів за весь період моделювання практично не змінився порівняно з базовою стратегією і становив 6,8 млн грн (табл. 3).

Таблиця 3

Результати моделювання

Відсоток часу неактивності батареї через заряд 0 або 100%	20,59
Кількість годин неактивності батареї через заряд 0 або 100%	464,42
Розрахункова кількість циклів заряду/розряду	132
Дохід від участі на ринку допоміжних послуг, тис грн	6800
Сумарна змодельована деградація у відсотках	22,85

Модифікована стратегія управління установками зберігання енергії за нечутливості $\delta f = 0,01$ Гц. Отриманий графік стану заряду батареї показано на рис. 18. Результати з використанням модифікованої стратегії управління УЗЕ показують, що батарея практично не досягала граничних значень повного розряду чи заряду.

Розрахований час, коли батарея не могла брати участь у регулюванні, відсутній. Очевидно, що такий результат значно кращий із погляду мінімізації впливу деградації, ніж для випадку базової стратегії. На рис. 19 показана гістограма розподілу рівня заряду батареї.

Розрахований сумарний дохід від участі в РПЧ і продажу ЕЕ на ринку небалансів за весь період моделювання практично не змінився порівняно з базовою стратегією і становив 6,8 млн грн (табл. 4).

Розрахунковий рівень деградації батарей УЗЕ показано на рис. 20.

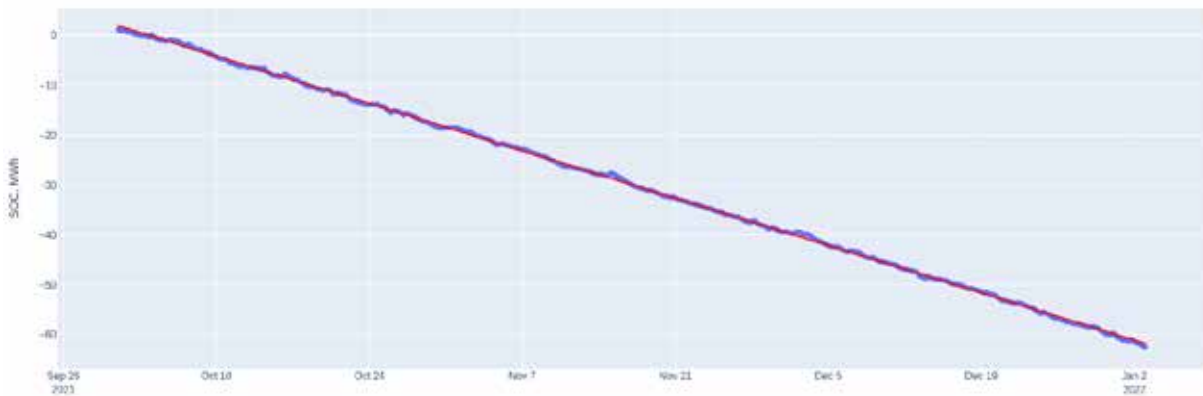


Рис. 16. Тренд зміни заряду за необмеженої ємності

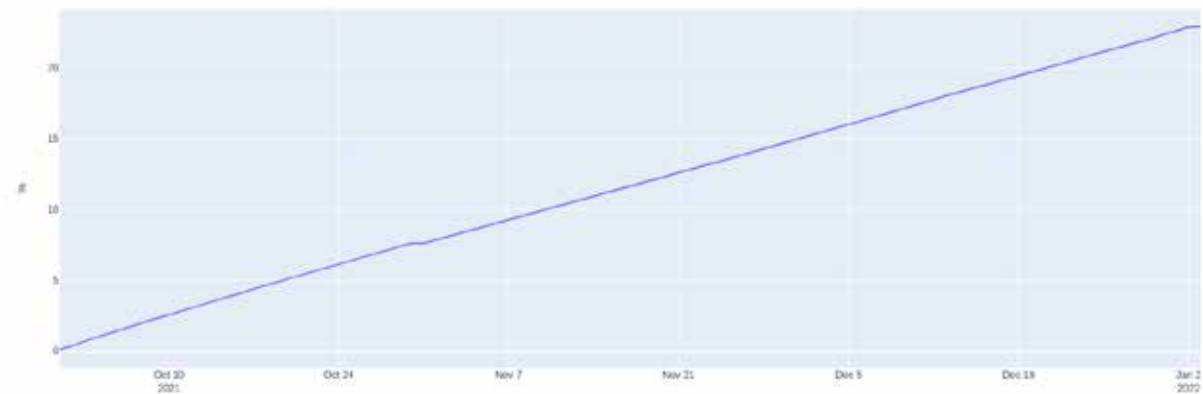


Рис. 17. Деградація батареї

Таблиця 4

Результати моделювання

Відсоток часу неактивності батареї через заряд 0 або 100%	0
Кількість годин неактивності батареї через заряд 0 або 100%	0
Розрахункова кількість циклів заряду/розряду	122
Дохід від участі на ринку допоміжних послуг, тис грн	6800
Сумарна змодельована деградація у відсотках	11,12

Висновки. У роботі представлено математичні моделі та доведено їх доцільність у використанні під час моделювання й оптимізації роботи УЗЕ з погляду економічної доцільності та зменшення рівня деградації.

Виконане моделювання дало змогу оцінити можливість застосування УЗЕ для надання послуг регулювання частоти в енергосистемі України: за період часу з 01.10.2021 до 03.01.2022 очікуваний дохід за нечутливості $\delta f = 0,02$ Гц становив 5,47 млн грн, а за нечутливості $\delta f = 0,01$ Гц – 6,80 млн грн.

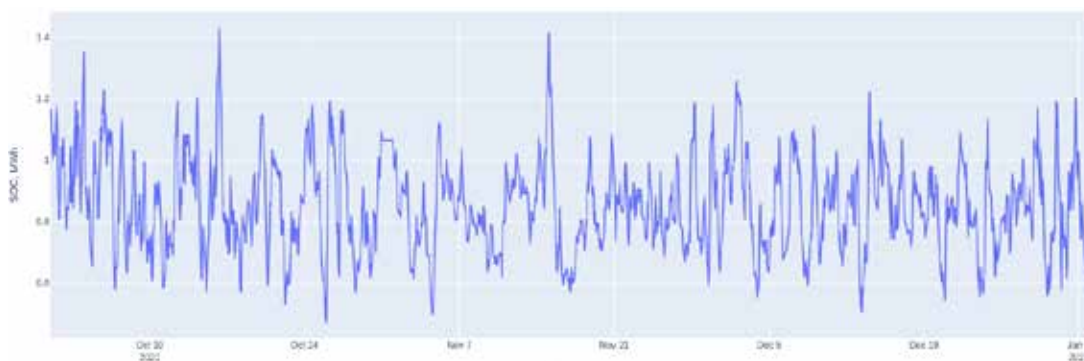


Рис. 18. Стан заряду батареї для модифікованої стратегії управління УЗЕ

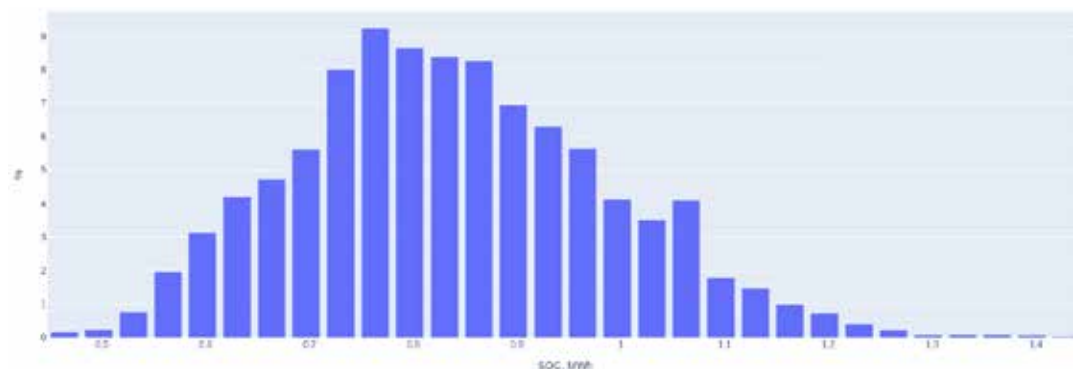


Рис. 19. Гістограма розподілу рівня заряду батареї (секунд) для модифікованої стратегії управління УЗЕ

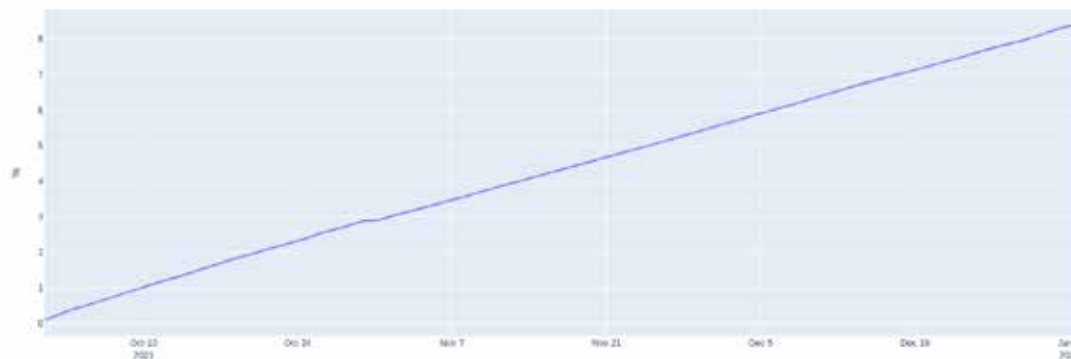


Рис. 20. Деградація батареї для модифікованої стратегії управління УЗЕ

У результаті розгляду двох стратегій управління УЗЕ встановлено, що використання модифікованої стратегії управління, яка забезпечує підтримання середнього рівня заряду протягом процесу участі УЗЕ в підтриманні частоти, дає змогу зменшити час знаходження УЗЕ у стані розряду до нуля та зменшити деградацію батареї в процесі її експлуатації від 22,85% до 11,12%.

ЛІТЕРАТУРА

- Headley J., Copp D.A. Energy storage sizing for grid compatibility of intermittent renewable resources: A California case study. *Energy*. 2020. Vol. 19. Pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117310>.
- Patel S. EPRI Head: Duck Curve Now Looks Like a Canyon. 2023. URL: <https://www.powermag.com/epri-head-duck-curve-now-looks-like-a-canyon/> (дата звернення: 03.05.2023).
- Gallo G., Gerke B., Liu J., Piette M.A., Schwartz-Lawrence P. Mobilizing the anti-duck brigade: technology and market pathways for load-shifting demand response in California. *Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*. 2018. Pp. 6.1–6.13. DOI: <https://doi.org/10.20357/B7C885>.
- Про затвердження Кодексу системи передачі : Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) від 14.03.2018 № 309. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (дата звернення: 28.05.2023).
- Flexibility in the energy transition: A Toolbox for Electricity DSOs. 2018. 52 p.
- Veremiichuk Y., Prytyskach I., Yarmoliuk O., Opryshko V. Energy sources selection for industrial enterprise combined power supply system. Proc. IEEE 6th International conference on *Energy Smart Systems (ESS2019)*. Ukraine, Kyiv, 17–19 April 2019. № 8764188. Pp. 283–288. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764188>.
- Парус Є., Блінов І., Олефір Д. Оцінка економічного ефекту від надання системами накопичення електричної енергії послуги балансування в ОЕС України. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2021. № 60. С. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.028>.
- Мацейко В.В. Демпфування низькочастотних коливань потужності в енергосистемі. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2014. Вип. 4. С. 1–7. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/419> (дата звернення: 28.04.2023).
- Веремійчук Ю.А., Опришко В.П., Притискач І.В., Ярмолюк О.С. Оптимізація функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів. Київ : КІЙ, 2020. 186 с.
- Жаркін А.Ф., Попов В.А., Ярмолюк О.С., Наталіч В.О. Особливості побудови та використання систем накопичення енергії у розподільних мережах. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 3. С. 44–52. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.271492>.
- ДТЕК запустив першу в Україні промислову систему накопичення енергії. *DTEK Group*. URL: <https://dtek.com/media-center/news/dtek-zapustil-pervuyu-v-ukrainepromyshlennuyu-sistemu-nakopleniya-enerгии/> (дата звернення: 26.02.2023).
- Офіційний сайт НЕК Укренерго. URL: <https://ua.energy/> (дата звернення: 26.02.2023).
- Duggal V.B.I. Short-term scheduling of thermal generators and battery storage with depth of discharge-based cost model. Proc. *IEEE Trans Power Syst*. 2015. Vol. 4. № 30. P. 2110.
- Gundogdu B., Gladwin D.T. A Fast Battery Cycle Counting Method for Grid-Tied Battery Energy Storage System Subjected to Microcycles. Proc. *6th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. July 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEECON.2018.8712263>.

FUNCTIONING OF ENERGY STORAGE SYSTEMS IN THE ANCILLARY SERVICES MARKET IN THE CONTEXT OF FREQUENCY RESERVE

Ivan Prytyskach

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Department of Power Supply

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, prytyskach.ivan@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1892-0054

Vitalii Opryshko

Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher at the Department of Power Supply

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, opryshko@hotmail.com

ORCID: 0000-0003-4963-2490

Yurii Veremiichuk

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Power Supply

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, y.veremiichuk@kpi.ua

ORCID: 0000-0003-0258-0478

Olena Yarmoliuk

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Power Supply

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, yarmolyuk.lena@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8571-2573

Purpose. This study investigates the utilization of energy storage facilities in the Ukrainian power system, focusing on their capabilities in the ancillary services market. **Methodology.** The authors present the outcomes of a modelling approach that simulates the operation of a hypothetical energy storage facility using real historical data. Specifically, the study examines the provision of frequency support reserve as an ancillary service. The authors highlight the advantages of energy storage systems, which can fulfil various roles in different segments of the electricity market, leading to integrated benefits and return on investment. They propose a modified management strategy for maintaining an optimal average charge level. Additionally, a method for evaluating the impact of charge and discharge cycles on the degradation of energy storage facilities is employed. **Findings.** The simulation results demonstrate the performance of the modelled energy storage facility under current regulatory standards for frequency deviation. Two control strategies are compared in terms of their ability to provide asymmetric frequency maintenance reserve service. The results encompass various parameters, such as the percentage of battery inactivity time due to charge (0% or 100%), the number of hours of battery inactivity due to charge (0 or 100%), the estimated number of charge/discharge cycles, income from participation in the DG market (in thousands of Ukrainian Hryvnias), and the overall modelled degradation percentage. **Originality.** Currently, Ukraine only has one certified industrial-scale energy storage facility, which is located in a temporarily occupied territory due to a full-scale invasion. **Practical value.** The modelling results offer insights into the potential of energy storage facilities and their investment attractiveness. **Conclusion.** The modelling outcomes provide an assessment of the feasibility of utilizing energy storage facilities for offering frequency regulation services in the Ukrainian power system.

Key words: ancillary services market, frequency containment reserve, energy storage facilities.

REFERENCES

1. Headley, J., & Copp, D.A. (2020). Energy storage sizing for grid compatibility of intermittent renewable resources: A California case study. *Energy*, 19, 1–9.
2. Patel, S. (2023). EPRI Head: Duck Curve Now Looks Like a Canyon. Retrieved from <https://www.powermag.com/epri-head-duck-curve-now-looks-like-a-canyon/>.
3. Gallo, G., Gerke, B., Liu, J., Piette, M.A., & Schwartz-Lawrence, P. (2018). Mobilizing the anti-duck brigade: technology and market pathways for load-shifting demand response in California. *Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 6.1–6.13.
4. Pro zatverdzhennia Kodeksu systemy peredachi. Postanova natsionalnoi komisii, shcho zdiisniuie derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh 14 ber. 2018 roku № 309 [On the approval of the Transmission System Code. Resolution of the National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors from 14 March 2018, № 309]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> [in Ukrainian].
5. Flexibility in the energy transition: A Toolbox for Electricity DSOs. 2018, 52.
6. Veremiichuk, Y., Prytyskach, I., Yarmoliuk, O., & Opryshko, V. (2019). Energy sources selection for industrial enterprise combined power supply system. Proceedings from ESS2019: VI Mizhnarodna konferentsiia «Intelektualni enerhetychni systemy» – The Six International Conference «Energy Smart Systems». (pp. 283–288). Kyiv.
7. Parus, Y., Blinov, I., & Olephir D. (2021). Otsinka ekonomichnoho efektu vid nadannia systemamy nakopychennia elektrychnoi enerhii posluhy balansuvannia v OES Ukrainy [Assessment of the economic effect of providing balancing services by energy storage systems in the IPS of Ukraine]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 60, 28–37 [in Ukrainian].
8. Matseiko, V.V. (2014). Dempfovannia nyzkochastotnykh kolyvan potuzhnosti v enerhosystemi [Damping of low-frequency power fluctuations in the power system]. *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Scientific works of Vinnytsia National Technical University*, 4, 1–7. Retrieved from <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/419> [in Ukrainian].

9. Veremiichuk, Y., Opryshko, V., Prytyskach, I., & Yarmoliuk, O. (2020). *Optimizatsiia funktsionuvannia intehrovanykh system enerhozabezpechennia spozhyvachiv* [Optimizing the functioning of integrated energy supply systems for consumers]. Kyiv: vydavnychiy dim «KYI», 186 [in Ukrainian]

10. Zharkin, A., Popov, V., Yarmoliuk, O., & Natalych, V. (2022). *Osoblyvosti pobudovy ta vykorystannia system nakopychennia enerhii u rozpodilnykh merezhakh* [Features of organization and use of energy storage systems in distribution networks]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia – Energy: economy, technologies, ecolog*, 3, 44–52. [in Ukrainian].

11. DTEK zapustyv pershu v Ukraini promyslovu systemu nakopychennia enerhii [DTEK launched the first industrial energy storage system in Ukraine]. Retrieved

from <https://dtek.com/media-center/news/dtek-zapustil-per-vuyu-v-ukraine-promyshlennuyu-sistemu-nakopleniya-enerhii/> [in Ukrainian].

12. Ofitsiynyi sait NEK Ukrenerho [Official website of NPC Ukrenergo]. Retrieved from <https://ua.energy/> [in Ukrainian].

13. Duggal, V.B.I. (2015). Short-term scheduling of thermal generators and battery storage with depth of discharge-based cost model. *Proceedings from IEEE Trans Power Syst*, 4, 30 (p. 2110).

14. Gundogdu, B., & Gladwin, D.T. (2018). A Fast Battery Cycle Counting Method for Grid-Tied Battery Energy Storage System Subjected to Microcycles. *Proceedings from 6th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. Krabi, Thailand.

Стаття надійшла 17.06.2023