

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ MICROGRID СИСТЕМ З НАКОПИЧУВАЧАМИ

У даній статті проведено аналіз потенціалу використання ВДЕ на потреби теплопостачання громадських і житлових будівель в Україні та світі. Визначено, що Україна має один з найбільших у Європі потенціал по використанню ВДЕ. Проведено аналіз «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» та зроблено висновок, що спостерігається тенденція до децентралізації енергопостачання та збільшення частки використання технологій ВДЕ для генерації теплової енергії. Проаналізовано загальне постачання первинної енергії за типами джерел та обсягами генерування. На основі співставного аналізу фактичних та прогнозованих даних по генеруванню енергії ВДЕ зроблено висновок, що є тренд на поступове зменшення генерації теплової енергії котельнями на вугіллі, газі та нафтопродуктах, та збільшення генерації за допомогою котлів на біомасі, сонячних колекторів та теплових насосів. На основі аналізу стратегії Net Zero зроблено висновок що Україна та світ поступово будуть зменшувати використання традиційної генерації та впроваджувати сучасні технології не тільки на потреби електропостачання, а й на потреби теплопостачання.

Ключові слова: Теплопостачання будівель, відновлювальні джерела енергії, тепла енергія, сонячна енергія, біопаливо, біогаз.

Вступ. За останні кілька років в Україні сформувалася значна кількість інвесторів, зацікавлених інвестувати у розвиток нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (НВДЕ). Згідно даних Української асоціації відновлювальної енергетики, на кінець 2019 року у галузь відновлювальних джерел енергії біло інвестовано 10 млрд. доларів [1]. З яких 6,2 млрд. доларів було залучено у період 2018-2019 років.

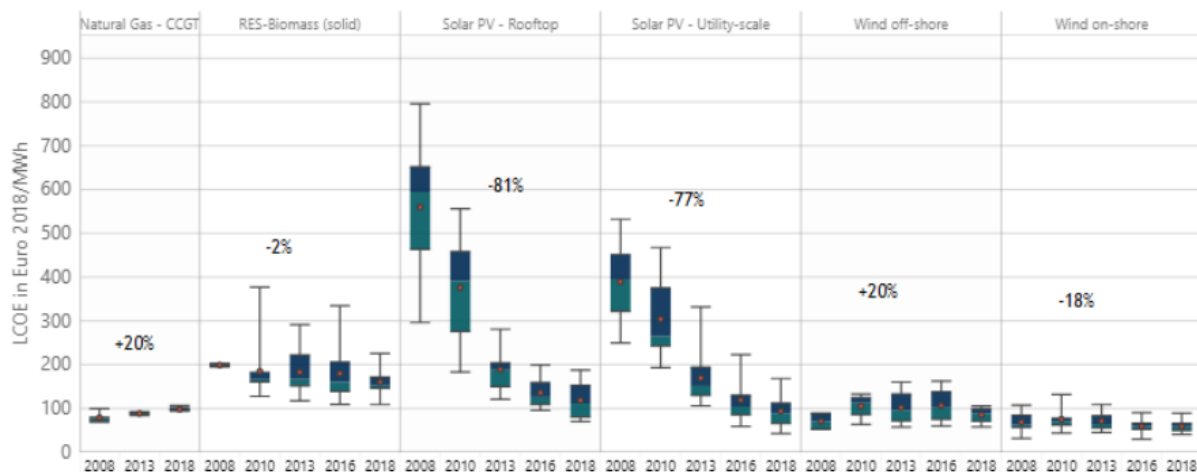
Головною причиною такого росту, став «зелений» тариф та зменшення капіталовкладень на будівництво об'єкту, за рахунок значного розвитку технологій НВДЕ, що в свою чергу вплинуло на зниження вартості сонячних фотоелектричних панелей та систем (див. рис.1) [2,8].

Однак, розглянувши співвідношення вартості будівництва сонячних фотоелектричних станцій до вартості «зеленого» тарифу за 2013-2021 рік наведені у табл. 1 та на рис. 2, можна зробити висновок, що найбільш окупними інвестиціями у сонячні електростанції, для їх експлуатації в умовах «зеленого» тарифу, були інвестиції у 2013 році (оскільки ставка зеленого тарифу була найвища). Разом з тим, найбільше залучення інвестицій у галузь відбулося у 2018-2019 роках.

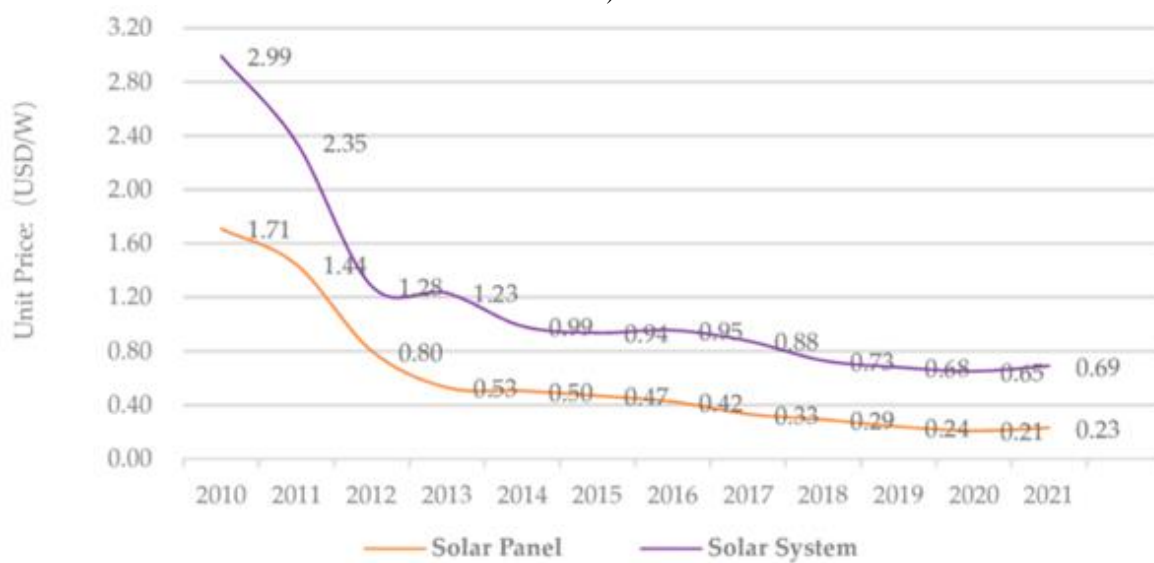
Таблиця 1 – Ціновий тренд вартості сонячних панелей та «зеленого» тарифу

Рік	2013	2014	2015	2015	2016	2017-2019	2020	2021
Зелений тариф, євро за кВт*год [3]	0.47	0.34	0.31	0.17	0.16	0.15	0.11	0.11
Крос курс, долар-євро	1.36	1.36	1.10	1.10	1.14	1.22	1.09	1.17
Зелений тариф, доларів за кВт*год	0.63	0.46	0.34	0.19	0.18	0.18	0.12	0.13
Вартість сонячних панелей, дол. за 1 кВт	650	520	480	480	440	300	240	210
Відношення вартості сонячних панелей до вартості "зеленого" тарифу	1 027.19	1 126.98	1 429.08	2 572.34	2 413.14	1 636.62	1 956.27	1 649.96

Це пояснюється тим, що станом на 2018-й рік галузь НВДЕ була уже достатньо розвинена. Сформувалась велика та конкурентна кількість фахівців та компаній що займаються поставкою обладнання, проектуванням, будівництвом та експлуатацією об'єктів НВДЕ, між ними виникла конкуренція у залученні інвесторів, банки сформували вигідні умови кредитування нових об'єктів та рефінансування існуючих об'єктів. За рахунок цього значно знизився поріг входження у галузь відновлювальних джерел енергії та енергетики загалом для інвесторів з інших галузей.



а)



б)

Рисунок 1 – ціновий тренд: а) зниження LCOE на ВДЕ з 20008 по 2018 рр.; б) вартості фотоелектричних панелей та фотоелектричних систем на одиницю встановленої потужності

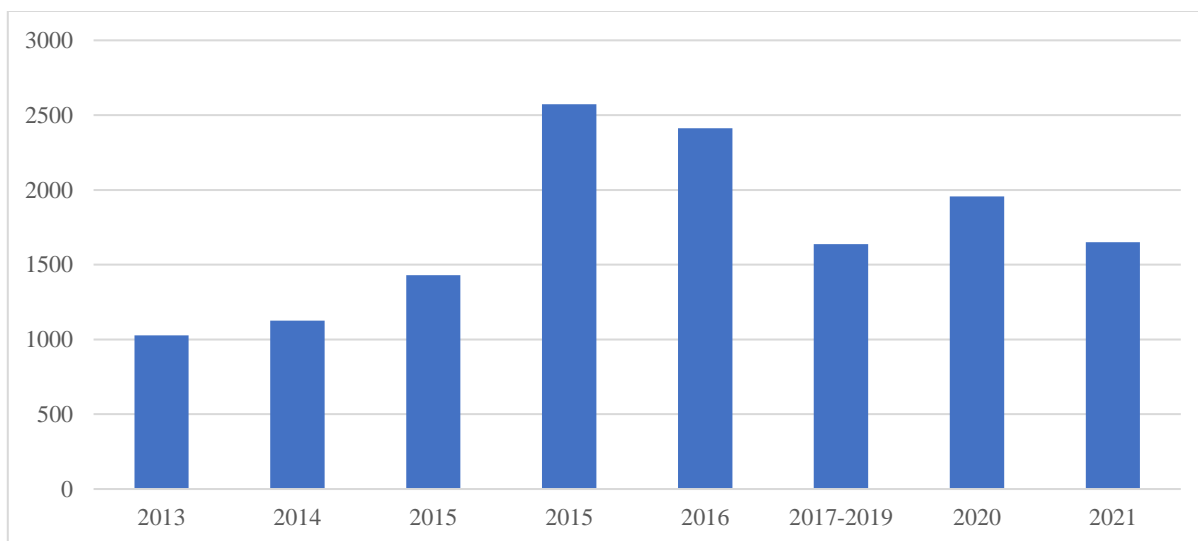


Рисунок 2 - Відношення вартості фотоелектричних панелей до величини "зеленого" тарифу

Подібний розвиток галузі і був метою введення стимулюючого «зеленого» тарифу. Станом на сьогодні, в умовах зростання вартості енергії всіх видів та тарифів на розподіл в електричних мережах, інвестори будують об'єкти ВДЕ для роботи не в умовах пільгового «зеленого» тарифу, а для покриття власних потреб. Вони без проблем можуть знайти, на конкурентному ринку, підрядника для реалізації EPC-контракту (від англ. Engineering, procurement and construction) на будь-який об'єкт, а терміни введення в експлуатацію об'єкта ВДЕ потужністю у десятки мегават може становити кілька місяців (наприклад, для сонячних електростанцій (СЕС)).

Однак, такого стрімкого росту сегменту ВДЕ не відбулося б, без доведеної та ефективної фінансової доцільності, продемонстрованої для перших інвесторів ВДЕ в Україні. Разом з тим, зростання частки ВДЕ у загальному енергетичному балансі України створює необхідність забезпечення керованості означених систем [6, 7], в основному шляхом побудови та використання сучасних систем накопичення електричної енергії [7]. Можна зробити висновок, що подібний шлях проходитиме і розвиток сегменту накопичувачів електричної енергії, а отже на даному етапі розвитку цього сегменту ринку, для інвесторів необхідно продемонструвати найбільш ефективну модель залучення коштів у даний сегмент.

Вплив структури ОЕС України на передумови для реалізації стратегії цінового арбітражу в умовах ринку електричної енергії України

Волатильність спотового ринку електричної енергії обумовлена його структурою. Режим роботи ОЕС України визначається на основі балансу виробництва та споживання електроенергії, ремонту електричних мереж та енергогенеруючого обладнання, а також можливості ліквідації надзвичайних ситуацій у випадку зупинки електроенергетичного обладнання на електростанціях та пошкодження магістральних ЛЕП. У вітчизняній енергосистемі працюють 413 виробників електричної енергії, з яких сім – потужних енергогенеруючих компаній забезпечують близько 90% всього виробництва, 40 підприємств з передачі електроенергії місцевими (локальними) електричними мережами та 147 компаній з постачання електричної енергії [4] (див. рис. 3).

Станом на 1 листопада 2019р., основні генеруючі потужності у складі ОЕС України зосереджені на:

- 4 атомних електростанцій (АЕС), на яких діє 15 енергоблоків, з яких 13 – потужністю по 1 000 МВт і 2 – потужністю 415 та 420 МВт;
- каскадах з 8 ГЕС на річках Дніпро й Дністер із загальною кількістю гідроагрегатів – 103 одиниці, а також трьох гідроакмулюючих станціях (ГАЕС), з яких 11 гідроагрегатів з потужністю від 33 МВт до 324 МВт;
- 12 ТЕС із блоками одиначною потужністю 150, 200, 300 і 800 МВт, з яких 75 енергоблоків, у т.ч. потужністю: 150 МВт – 6, 200 МВт – 31, 300 МВт – 32, 800 МВт – 6 та 3 турбогенератора, а також 3 великих ТЕЦ з енергоблоками 100 (120) МВт та 250 (300) МВт;
- 147 сонячних електростанцій (СЕС), 27 біогазових електростанцій (БіоЕС), 19 вітрових електростанцій (ВЕС), загальний відсоток вироблення електричної енергії яких становить 3,7% сумарного вироблення по ОЕС України, проте їх частка постійно збільшується.

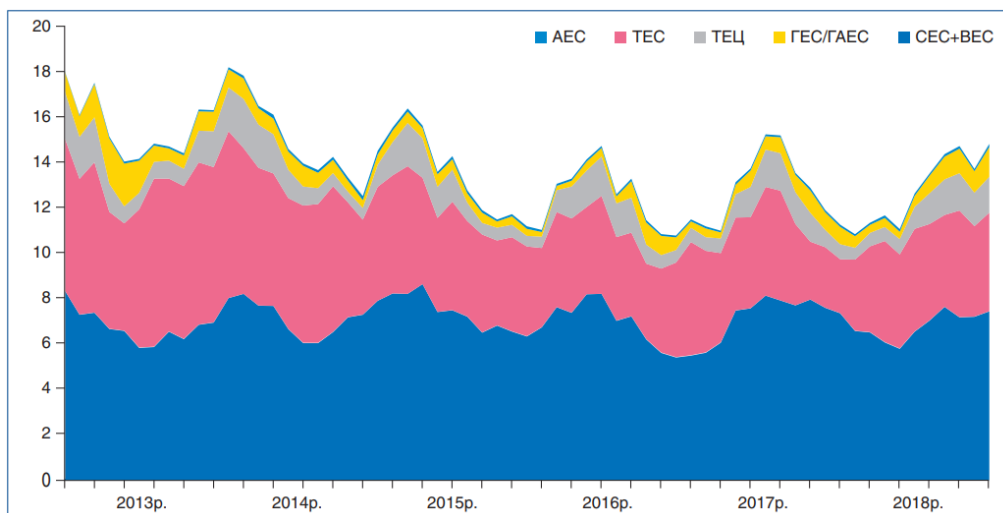


Рисунок 3 – Річна структура генерації України

Для забезпечення стабільної роботи ОЕС України базові електростанції повинні складати 50-55%, напівпікові – 30-35%, пікові (найбільш керовані) – 15%.

Насьогодні у національній енергосистемі спостерігається брак пікових потужностей (10% проти необхідних 15%). Унаслідок цього до регулювання досить активно залучають енергоблоки ТЕС [5].

Хоч дані наведенні станом на листопад 2019, структура генерувальних потужностей не зазнала радикальних змін і можливості її перебудови в середньостроковій перспективі не передбачається.

З іншого боку, навантаження також характеризується значною нерівномірністю, співвідношення нічного навантаження та навантаження у період вечірніх піків знаходиться в межах 0.7. Разом з вищеописаною структурою генерації, це ускладнює завдання управління енергосистемою для підтримання стабільної частоти. Також нерівномірність споживання спостерігається територіально, та в залежності від сезонності року. Це обумовлено тим, що є значна частка споживання електроенергії для побутових потреб населення, яка сильно коливається в залежності від температури навколишнього середовища. Так у 2012-му році частка споживання промисловістю становила майже 47%, а у 2017р. – 42,8%, а побутових споживачів 26,7% у 2012р. до 29,4% у 2017р.

Варто коректно аналізувати дані промислового споживання, адже протягом 2014-2015рр. кілька разів відбувався обвал виробництва. І лише у 2016р. спостерігалася стабілізація економіки. Упродовж 2016-2018рр. форма профілів споживання електроенергії в зимовий і літній періоди суттєво не змінилася (див. рис.4).

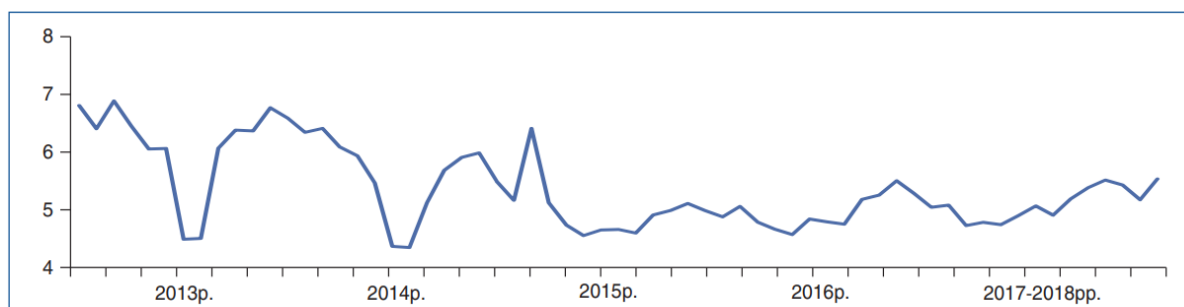


Рисунок 4 - Споживання електроенергії промисловістю в Україні

Причиною цього стало скорочення промисловості у зв'язку з війною росії проти України котра розпочалася у 2014-му році, та окупацією промислово розвинених районів Донецької та Луганської областей.

Попит на електроенергію з боку побутових споживачів має чітко виражений сезонний характер, що пояснюється впливом двох факторів:

-зі збільшенням температури, збільшується використання систем кондиціонування, що мало б збільшувати споживання електроенергії;

-світловий день набагато довший, ніж узимку, а тому витрачається набагато менше електроенергії на освітлення. Для України очевидно цей фактор переважаючий. Узимку споживання досягає піку, що пов'язано зі зменшенням світлового дня та необхідністю ввімкнення обігрівуючих приладів задля економії, зокрема газу.

Наслідки нового вторгнення російської федерації нам ще доведеться оцінювати у майбутньому, однак описана вище структура енергетики, скоріш за все, збережеться.

Особливості роботи спотового ринку електричної енергії України

Ринок електричної енергії в Україні почав працювати з 1 липня 2019 року. Однак, на етапі його впровадження існували різні обмеження нижнього та верхнього рівня цін (прайс-кепи). Також, після нового вторгнення у лютому 2022 року, НКРЕКП встановила нижні прайс-кепи для стабілізації ситуації на ринку електричної енергії, які діють понині.

Таким чином, для оцінки стратегій цінового арбітражу, найбільш доцільно обрати період з найліберальнішим періодом роботи ринку електричної енергії, а саме з серпня 2021 по грудень 2022 року. Вибір цього періоду достатній, так як враховує річну сезонність (рис. 5).

Протягом усього періоду спостерігається тенденція низької ціни в 2-6 період, та високої у 18-22 період. Та дуже широкий діапазон цін в 8-16 періодах. Відповідно, існують умови для цінового арбітражу. Стратегію якого можливо реалізовувати на інших сегментах ринку, однак РДН (Ринок доба наперед) являється індикативним для комерційних споживачів, тому ефективність стратегій доцільно оцінювати на його основі.

Стратегія цінового арбітражу в умовах лібералізованого ринку електричної енергії на основі розрахунку мінімальної рентабельної різниці цін

В умовах ринкової економіки, масове впровадження нової технології залежить від фінансової доцільності їх впровадження для конкретного інвестора, однак це несе у собі додатковий синергетичний ефект, який відображається у зміні структури ОЕС України, підвищенні об'ємів та якості маневрених потужностей, росту стійкості та надійності системи в цілому.

Широке впровадження подібних технологій є свого роду «game changer» («зміною правил гри») для усієї галузі. Дана технологія має широкий діапазон можливостей використання на усіх рівнях. Але виходячи із функціоналу систем накопичення та існуючого ринку електричної енергії зі значною волатильністю, актуальним завданням також є розгляд цінового арбітражу.

У подібних випадках, для швидкого розвитку нового сегменту галузі застосовують стимулюючі тарифи, покращені умови імпорту технологій та інші фінансові та бюрократичні механізми. Головним завданням є пошук ефективної стратегії для впровадження в існуючих умовах.

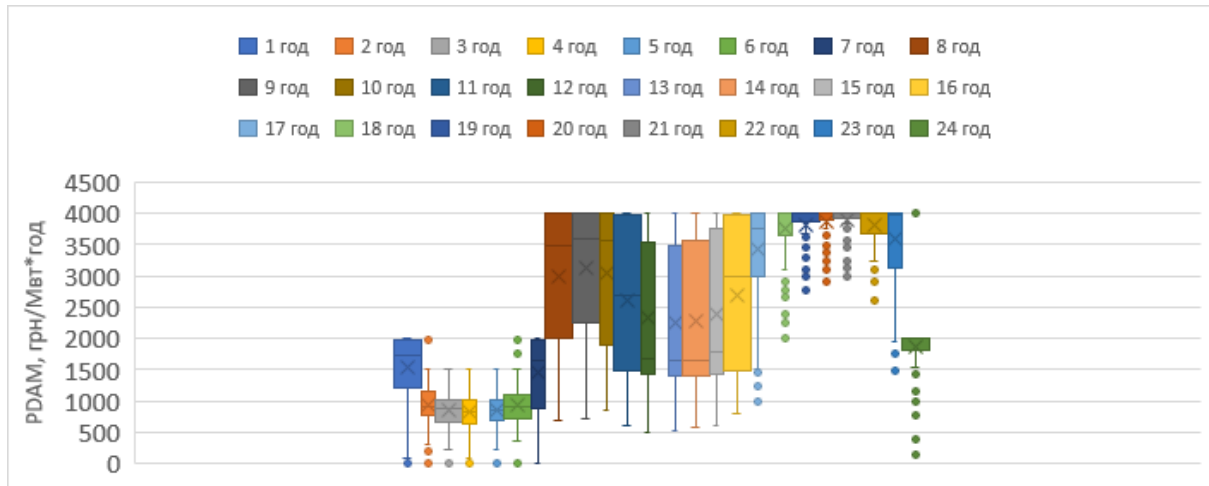


Рисунок 5 - Діапазон цін РДН по періодах доби за серпень-грудень 2021 року

Для цього було зроблено ряд допущень та спрощень, а саме:

- Вартість та технічні параметри накопичувачів взяті із комерційних пропозицій, європейських та українських постачальників обладнання, актуальних на квітень 2021 року.
- Так як означені системи поставляються комплектно, капіталовкладення на будівельні, монтажні та пусконаладжувальні роботи неспіврозмірно малі із вартістю самих системи, та були прийняті у розмірі 5% від них.
- Дані Ринку на добу наперед взяті за серпень-грудень 2021, у зв'язку з тим, що до цього періоду та після нього працювали суворі обмеження верхньої та нижньої ціни, які спочатку були пов'язанні із поступовим введенням ринку електричної енергії, а потім із форс-мажорними обставинами.
- Не враховуються дисконтування грошових потоків за термін окупності, умова залучення кредитних коштів та інші можливі фінансові інструменти.
- Прийнято, що накопичувач працюватиме у MicroGrid системі достатнього обсягу, для споживання усієї накопленої електричної енергії – це дозволить не включати у розрахунок плату за розподіл електричної енергії.

Інтеграція системи накопичувача розглядається як частина розбудови MicroGrid системи з генеруючою одиницею та навантаженням. Однак, в даному випадку, розрахунок проведено для накопичувача, як незалежної системи з метою оцінки його комерційної доцільності, а його обсяг оптимізується в залежності від наявних ринкових умов. З комерційної точки зору рівнозначно, що накопичена електроенергія буде віддаватись навантаженню всередині MicroGrid системи чи в зовнішню мережу, тому даний розрахунок може підійти для будь якої MicroGrid системи. Однак, в реалізації такої системи, підключення до зовнішніх мереж викликатиме ряд додаткових затрат на приєднання.

Враховуючи обмежений ресурс циклів роботи системи накопичення на основі Lithium-ion battery, доцільно виходити на ринок, коли різниця протягом доби перевищує вартість капіталовкладень на один цикл, з урахуванням втрат на перетворення енергії та амортизацію основних фондів.

Мінімальну різницю цін, при якій для доцільно здійснювати стратегію цінового арбітражу на основі систем накопичення у MicroGrid системах визначено за формулою:

$$P_{Amin} = \frac{CAPEX}{n_{warranty} \cdot E_{BA} \cdot (1 - DoD_A) \cdot (1 - k_d)} \cdot \eta_{BESS}$$

де $CAPEX$ – капіталовкладення необхідні для системи накопичення; $n_{warranty}$ – гарантована виробником кількість циклів зарядки/розрядки; E_{BA} – встановлений обсяг накопичувача; k_d – коефіцієнт деградації накопичувача; η_{BESS} – ефективність накопичувача.

З урахуванням зазначених спрощень та допущень було розраховано відповідну мінімальну рентабельну різницю цін:

$$P_{Amin} = \frac{29\,795\,566.5}{5000 \cdot 3024 \cdot (1 - 0.2) \cdot (1 - 0.125)} \cdot 0.96 = 2702.54 \text{ грн/МВт} \cdot \text{год}$$

Використавши її, для моделювання торгової стратегії на основі даних РДН за період серпень-грудень 2021 року, визначено прибуток, який може отримати MicroGrid система з накопичувачами застосовуючи стратегію цінового арбітражу (результати моделювання наведено у таблиці 2).

Таблиця 2 - моделювання торгової стратегії цінового арбітражу для роботи систем накопичення електричної енергії в умовах лібералізованого ринку електричної енергії

Індикатор	Без урахування мінімальної доцільної різниці цін	З урахуванням мінімальної доцільної різниці цін
Кількість циклів заряду/розряду за період серпень-грудень 2021	153	130
Загальна вартість усіх циклів зарядження, грн	-759 754	-589 517
Загальна вартість усіх циклів розрядження, грн	2 882 002	2 526 578
Потенційний прибуток, грн	2 122 248	1 937 061
Прибуток із одного циклу	13 871	14 900
Ефективність стратегії	грн	1 030
	%	7%
Орієнтовний термін окупності	5.89	6.45
	різниця, років	- 0.56
	різниця, %	-10%

Висновки.

Згідно проведеного аналізу можна зробити висновок, що зростання частки ВДЕ у загальному енергетичному балансі України створює необхідність забезпечення їх керованості, в основному шляхом побудови та використання сучасних систем накопичення електричної енергії. Такі системи найбільш доцільно використовувати у складі локальних електроенергетичних систем Microgrid.

Запропоновано модель торгової стратегії цінового арбітражу для роботи систем накопичення електричної енергії в умовах лібералізованого ринку електричної енергії. Результати моделювання показують що за ґрунтуючись на вихідних даних за умови роботи ринку електроенергії у такому режимі є вкрай рентабельним. А з огляду на те, що такі системи значно підвищують керованість ВДЕ їх впровадження у енергетичну систему України на основі архітектури Microgrid є вкрай доцільним на сьогодні.

Список використаної літератури

- <https://uare.com.ua/novyny/711-u-vidnovlyuvanu->
- Price trend of solar panels and solar systems. https://www.researchgate.net/figure/Price-trend-of-solar-panels-and-solar-systems-Source-69_fig3_351857177
- ЗАКОН УКРАЇНИ Про альтернативні джерела енергії <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>
- <https://www.mev.gov.ua/storinka/istoriya-enerhetyky>

5. ЕНЕРГЕТИКА УКРАЇНИ виклики та ініціативи. Центр Разумкова, 2020, Видавництво «Заповіт», 2020
6. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Трач І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. Технічна електродинаміка. 2021. No 4. С 44-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
7. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchansky V., Shkarupylo V., "Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System," 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2021. Pp. 262-265. DOI: <https://10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>
8. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-10/final_report_levelised_costs_0.pdf

D. Derevinko^{1,2}, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4877-5601

V. Vorobel¹, student, ORCID 0009-0008-3693-8494

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

²Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

PERFORMANCE EFFICIENCY INCREASE OF THE MICROGRIDS WITH ENERGY STORAGE SYSTEMS

In this paper, an analysis of the potential of using RES for the heat supply needs of public and residential buildings in Ukraine and the world is carried out. It was determined that Ukraine has one of the largest potentials in Europe for the use of RES. An analysis of the "Energy Strategy of Ukraine for the period until 2035 "Security, energy efficiency, competitiveness" was carried out and it was concluded that there is a trend towards decentralization of energy supply and an increase in the use of RES technologies for thermal energy generation. The total primary energy supply was analyzed by types of sources and volumes of generation. On the basis of a comparative analysis of actual and projected data on RES energy generation, it was concluded that there is a trend towards a gradual decrease in thermal energy generation by coal, gas, and oil-fired boilers, and an increase in generation using biomass boilers, solar collectors, and heat pumps. Based on the analysis of the Net Zero strategy, it was concluded that Ukraine and the world will gradually reduce the use of traditional generation and introduce modern technologies not only for the needs of electricity supply, but also for the needs of heat supply.

Keywords: Heat supply of buildings, renewable energy sources, thermal energy, solar energy, biofuel, biogas.

References

1. International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/>
2. Price trend of solar panels and solar systems. https://www.researchgate.net/figure/Price-trend-of-solar-panels-and-solar-systems-Source-69_fig3_351857177
3. ZAKON UKRAINY Pro alternatyvni dzherela enerhii <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>
4. <https://www.mev.gov.ua/storinka/istoriya-enerhetyky>
5. ЕНЕРГЕТИКА УКРАЇНИ виклики та ініціативи. Тсентр Разумкова, 2020, Вydavnytstvo «Zapovit», 2020
6. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus Ye.V., Trach I.V. Otsinka efektyvnosti vykorystannia system nakopychennia elektroenerhii v elektrychnykh meshzhakh. Tekhnichna elektrodynamika. 2021. No 4. S 44-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
7. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchansky V., Shkarupylo V., "Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System," 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2021. Pp. 262-265. DOI: <https://10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>
8. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-10/final_report_levelised_costs_0.pdf

Надійшла: 06.10.2023

Received: 06.10.2023