

О. А. ДАНИЛОВА, Д. О. ЗОЛОТАРЬОВ, Л. І. ЛИСЕНКО

АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ «АКТИВНИЙ БУДИНОК» В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ПІВНІЧНО-СХІДНОЇ УКРАЇНИ

«Активний будинок» це будинок з позитивним енергобалансом, важливою особливістю якого є власне виробництво електроенергії за рахунок відновлюваних джерел, при цьому кількість виробленої енергії перевищує власні потреби, що дозволяє поставити надлишок у локальну мережу. В роботі досліджено можливість і доцільність впровадження цієї технології на прикладі об'єднання 10 «активних» будинків в Харківській області. Розглянуто три групи мешканців, що відрізняються характером електроспоживання, можливість покриття усередненого добового навантаження об'єднання «активних» будинків за рахунок 315 ФЕМ PV-260М-260 Вт, 4 ВЕУ СВ-6.7/2000-7 кВт і 16 акумуляторних батарей Tesla Powerwall 2 АС. Проаналізовано заходи що до покриття споживання об'єднання «активних» будинків у випадку несприятливих погодних умов. Оцінено економічну ефективність інвестицій в такий проект.

Ключові слова: «активний» будинок, електроспоживання, відновлювані джерела енергії

Е. А. ДАНИЛОВА, Д. О. ЗОЛОТАЕВ, Л. И. ЛЫСЕНКО

АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ «АКТИВНЫЙ ДОМ» В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ УКРАИНЫ

«Активный дом» это дом с положительным энергобалансом, важной особенностью которого является собственное производство электроэнергии за счет возобновляемых источников, при этом вырабатывается электроэнергии больше, чем необходимо для покрытия собственных нужд, что позволяет поставлять излишки в местную сеть. В работе исследована возможность и целесообразность внедрения рассматриваемой технологии на примере массива из десяти «активных» домов в Харьковской области. Рассмотрены три группы домов, различающихся характером электропотребления, возможность покрытия усредненной суточной нагрузки объединения «активных» домов за счет 315 ФЭМ PV-260М 100 Вт, 4 ВЭУ СВ-6.7/2000-7 кВт и 16 аккумуляторных батарей Tesla Powerwall 2 АС. Проанализированы мероприятия по покрытию нагрузки массива «активных» домов в случае неблагоприятных погодных условий. Оценена экономическая эффективность инвестиций в такой проект.

Ключевые слова: «активный» дом, электропотребление, возобновляемые источники энергии

О. А. DANILOVA, D. O. ZOLOTAREV, L. I. LYSENKO

ANALYSIS OF «ACTIVE HOUSE» TECHNOLOGY IMPLEMENTATION EXPEDIENCY UNDER CLIMATOLOGIC CONDITIONS IN NORTHEASTERN UKRAINE

“Active house” is a house with positive energy balance (“energy-plus house”) the important feature of which consists in self-contained electricity production via renewable energy sources, the amount of electricity generated exceeding the demand. It allows supplying the electricity surplus to local grids. The paper considers a feasibility and expediency of implementing the considered technology in Northeastern Ukraine by an example of a ten-“active”-house estate in Kharkiv region. The houses are grouped in three types according to the electricity consumption charts depending on the house dwellers behavior. The average electricity demand versus electricity produced by 21 PV 260 W modules and a 4 kW wind mill has been analyzed for various meteorological conditions to show the necessity of uniting the individual power supply systems into a common grid, which results in smoothing the load curve, with an additional common solar and wind farm and an accumulator bank to cover the load in case of unfavorable weather. The operation of the renewable energy sources and the battery system is controlled by a smart grid to rationally employ the available capacity and distribute electricity generated among the consumers. The payback period is assessed to approach 12 years with allowance for electricity bill rise with time and electricity surplus selling to the grids by feed-in tariffs.

Keywords: «active house», electricity consumption, renewable energy sources

Вступ. У 2016 р. Україна підписала і ратифікувала Паризьку угоду [1], відповідно до якої була розроблена Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року [2]. Згідно з цим планом країна планує скоротити викиди парникових газів до 70 % в 2050 році порівняно з показниками 1990 р. Реалізація цього плану буде здійснюватися за рахунок масштабного впровадження сучасних енергоефективних технологій, до яких відноситься і технологія «активних будинків», до яких відносять і технологія «активних будинків»: будинків, які використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ) для забезпечення власних потреб в електроенергії, поставляють її надлишки у мережу [3,4]. Згідно з «Енергетичною стратегією України до 2035 року» [5], в 2035 році частка ВДЕ має становити не менше 25 % від загальної первинної поставки енергії. Розповсюдження

житлових масивів з «активних» будинків може значно збільшити частку відновлюваних джерел у загальному енергетичному балансі.

Мета статті. Оцінити ефективність застосування технології «активний будинок» в кліматичних умовах Харківської області.

Результати дослідження. Було проаналізовано електроспоживання для трьох груп «активних» будинків із різними режимами споживання. Всі три групи поєднані в спільний житловий масив з метою зниження пікового навантаження. Електроспоживання будинків розділено на 6 режимів: робочий і вихідний дні влітку та взимку, а також дні обмеженого електроспоживання (аварійні дні) для зимового та літнього періоду. Було прийнято, що обмеження

©, О.А. Данилова, Д.О. Золотарьов, Л.І.Лисенко, 2019

споживання електроенергії не може тривати більш, ніж 24 години, в іншому випадку це негативно впливає на рівень комфорту мешканців. Рівень споживання електроенергії у робочі та вихідні дні влітку та взимку, а також у дні аварійного електропостачання для зимового та літнього періоду споживачів, а також результуючі графіки електроспоживання для масиву «активних» будинків в залежності від дня тижня та пори року наведено на рис 1-3. Перша група електроспоживачів, до складу якої входить 3 будинки, характеризується яскраво вираженими піками в ранковий та вечірній період, що зумовлено відсутністю дорослих мешканців протягом робочого дня. Для вихідних днів характерне високе електроспоживання внаслідок підвищеного використання таких електроприймачів, як: пилосос, посудомийка, праска, пральна машинка і т.п. Друга група електроспоживачів, до складу якої входить 4 будинки, характеризується

більш пологими піками в ранковий та вечірній період, відносно першої групи. Це зумовлено тим, що тільки один дорослий мешканець будинку відсутній протягом робочого дня. Для вихідного дня рівень електроспоживання відрізняється від першої групи за рахунок більш раціонального використання електроприймачів. Третя група електроспоживачів, до якої входить 3 будинки, різко відрізняється від попередніх двох, за рахунок того, що у даній групі дорослі мешканці працюють дистанційно від своїх місць роботи, що зніщує ранковий та вечірній піки. Окрім того, поняття «робочий» та «вихідний» день для цієї групи відрізняються тільки збільшеним використанням побутових електроприймачів. Рівень електронавантаження, характерний для вихідних днів у других групах, зніщується на робочі дні, а в суботу та неділю електроспоживання буде на рівні звичайного робочого дня. .

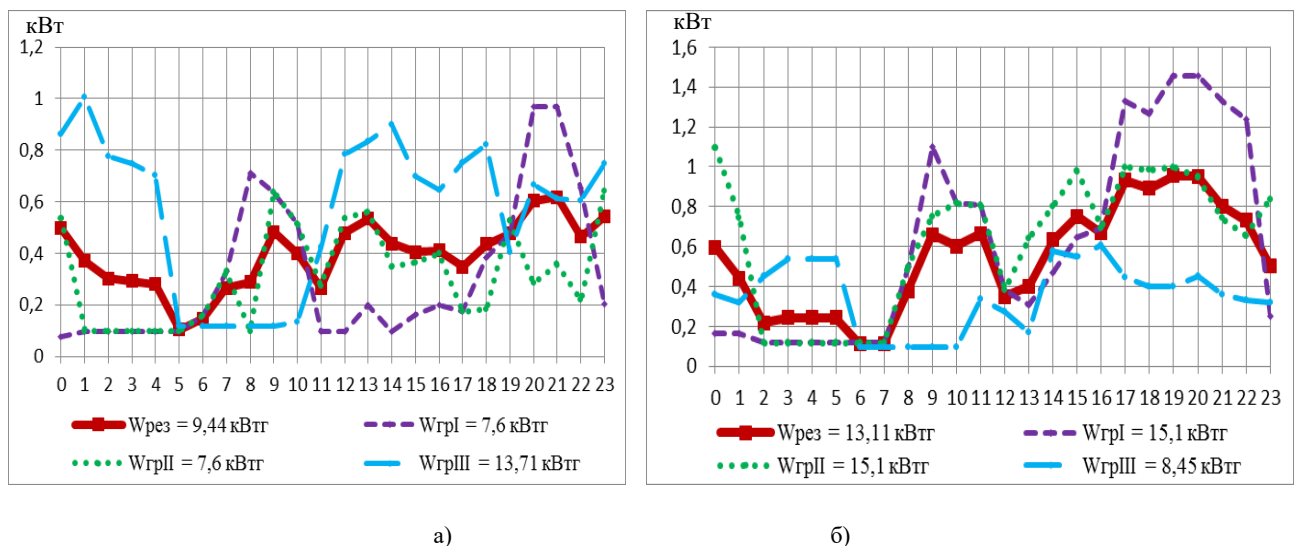


Рисунок 1 – Електроспоживання об'єднання «активних» будинків влітку а) робочий день; б) вихідний день

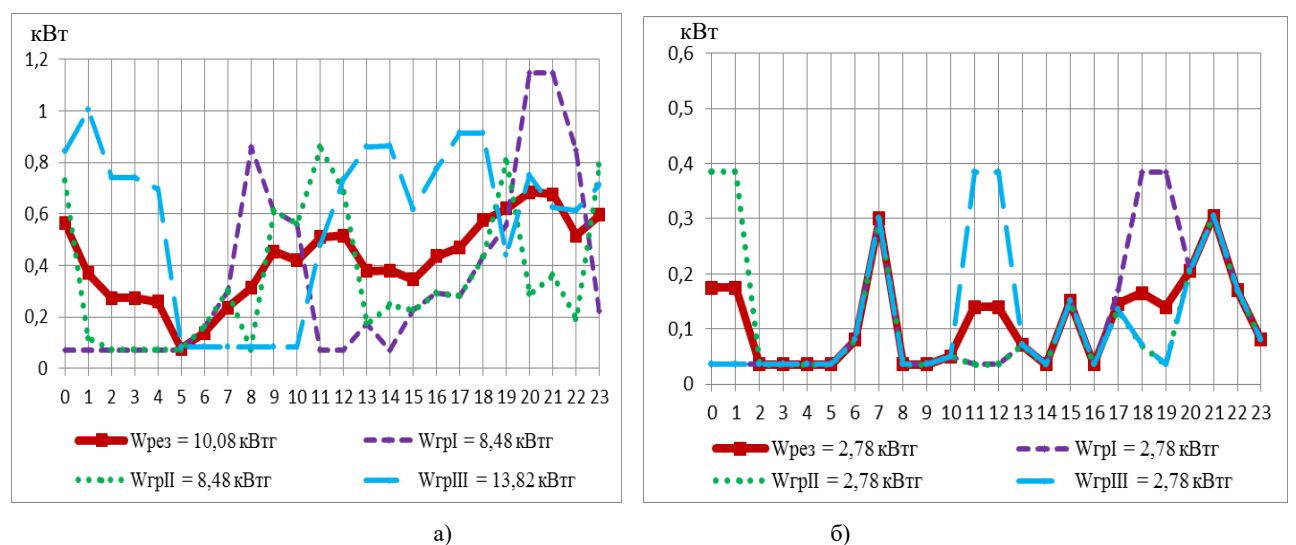


Рисунок 2 – Електроспоживання об'єднання «активних» будинків взимку а) робочий день; б) вихідний день

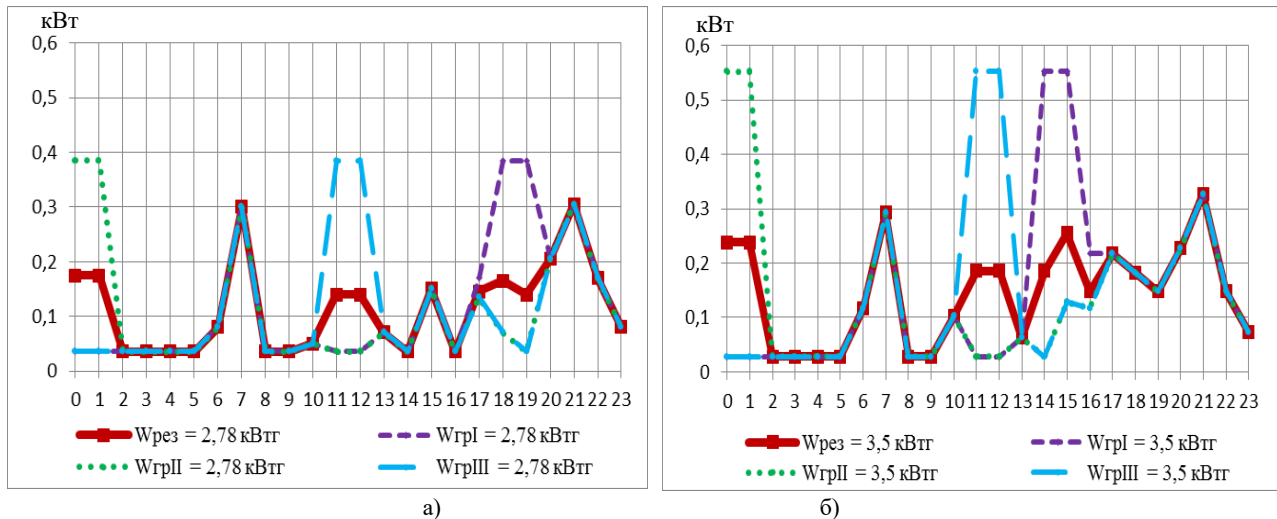


Рисунок 3 – Електроспоживання об'єднання «активних» будинків в день аварійного електропостачання а) влітку; б) взимку

Як видно з рисунків, усереднене по всім споживачам навантаження має істотно знижені максимуми, в кількох випадках більш ніж на 50 %, що підтверджує рішення об'єднати дома в один масив.

Було проаналізовано покриття середнього добового навантаження «активного» будинку за рахунок 21 ФЕМ PV-260М-260 Вт і одній ВЕУ СВ-6.7/1000-4 кВт в залежності від погодних умов для

кількох днів у різні сезони (рис. 4). Метеорологічні дані в місцевості, що розглядається як місце розташування житлового масиву з десяти «активних» будинків, були взяті на сайті POWER Data Access Viewer [6]. В розрахунках використовувалися добові значення швидкості вітру та сонячної радіації за 2015-2016 роки.

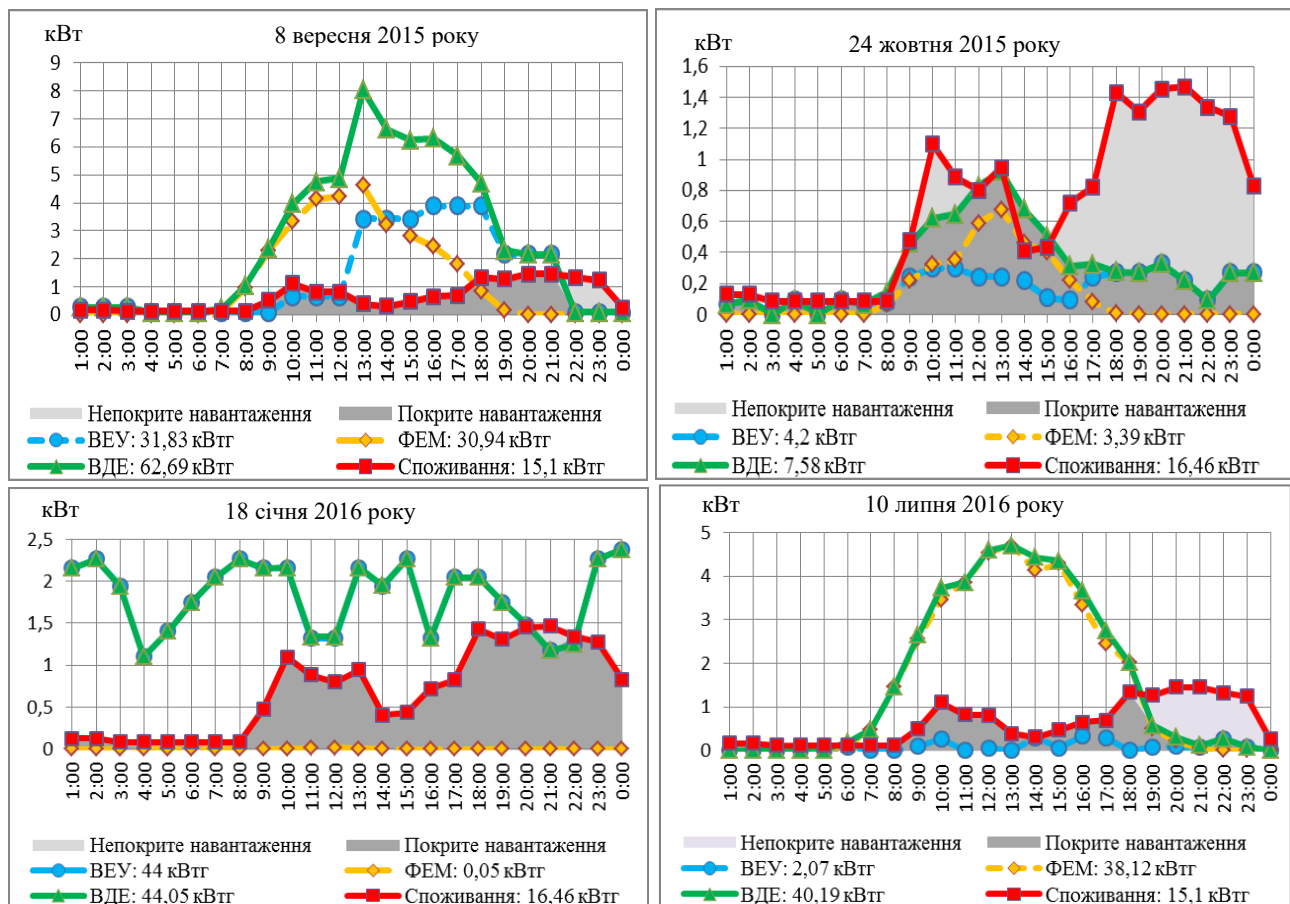


Рисунок 4 – Покриття середнього добового навантаження «активного» будинку в залежності від погодних умов

Як видно з рисунку, максимуми споживання і генерації електроенергії не завжди збігаються. Крім того, при несприятливих погодних умовах потужності встановлених джерел недостатньо для покриття навантаження. Тому було розглянуто інші рішення щодо до потужності генерації: електропостачання в об'єднанні «активних» будинків здійснюється за рахунок індивідуально встановлених 21 ФЕМ PV-260М з інверторами Huawei SUN2000-5KTL та спільної електростанції, що включає в себе 115 ФЕМ PV-260М-260 Вт, 4 BEU CB-9/2000-7 кВт, акумуляторну батарею з 16 акумуляторів Tesla Powerwall 2 і два інвертора Huawei SUN2000-33KTL-A (табл. 1). Роботою всієї системи управляє інтелектуальна мережа, яка забезпечує обробку інформації про генерацію встановлених ВДЕ і електроспоживання кожного будинку та видає команди на розподіл електроенергії.

Таблиця 1 – Основне обладнання для електропостачання житлового масиву з десяти «активних» будинків

Тип обладнання	Назва	Потужність	Кількість
Фотоелектричний модуль	Pillar PV-260М	0,26 кВт	325
Вітроенергетична установка	CB-9/2000	7 кВт	4
Акумуляторна батарея	Tesla Powerwall 2	14 кВт·г	16
Інвертор	Huawei SUN2000-5KTL	5 кВт	10
	Huawei SUN2000-33KTL-A	30 кВт	2

Розрахунок інтенсивності сонячного випромінювання виконано за методикою, що представлена в [7]. Як випливає з розрахунків, фактично завжди загальна виробка електроенергії встановленими джерелами сумарною потужністю 112,5 кВт, $W_{\text{ВДЕ сум}}$, перевищує кількість споживаної електроенергії $W_{\text{спож}}$. Проте, можуть бути періоди з несприятливими погодними умовами, коли і вітер слабкий, і небо похмуре. Такі періоди можуть тривати від декількох годин до одного або декількох днів. У ці періоди рівень електроспоживання перевищує рівень генерації і тому покриття навантаження здійснюється за допомогою акумуляторної батареї (АКБ). На рис. 5 представлені графіки вироблення електроенергії запропонованою системою, електроспоживання, а також рівень заряду восьми використовуваних акумуляторів для випадку із сприятливими в цілому погодними умовами з короткотривалим падінням генерації. Як видно з рисунку, рівень заряду акумуляторів, які забезпечують відсутню потужність протягом декількох годин, значно не знижується і досить швидко відновлюється, як тільки генерація зростає. При цьому, мешканці будинків житлового масиву ніяк не обмежують своє електроспоживання.

В табл. 2 наведені оціночні розрахунки щодо річного загального електроспоживання масивом з десяти «активних» будинків та кількості

електроенергії, яка виробляється запропонованими джерелами.

Таблиця 2 – Кількість електричної енергії, що виробляє і споживає житловий масив з десяти «активних» будинків (погодні дані за 2015-2016 роки)

Міс	$W_{\text{ВЕС}}$, кВт·г	$W_{\text{ФЕС}}$, кВт·г	$W_{\text{ВДЕ сум}}$, кВт·г	$W_{\text{спож}}$, кВт·г	$N_{\text{обмеж дн}}$
Вер	4405	11746	15926	3132	-
Жовт	3678	8419	11928	3403	1
Лист	5160	2304	7360	3530	1
Груд	6544	1488	7920	3518	2
Січ	4992	1031	5938	3197	5
Лют	5314	4412	9590	3309	1
Бер	5432	5886	11159	3284	3
Квіт	6021	11128	16909	3339	-
Трав	3226	12902	15902	3392	-
Чер	2547	13315	15639	3229	-
Лип	2610	14145	16520	3451	-
Серп	3345,5	12065	15194	3334	-
Всього	53273	98844	149988	40118	13

Інша ситуація, коли несприятлива для роботи встановлених відновлюваних джерел енергії погода триває досить довго і, відповідно, електропостачання здійснюється в основному від акумуляторної батареї. В таких випадках поведінка споживачів виявляє значний вплив на безперебійність роботи системи електропостачання всього масиву «активних» будинків: мешканці можуть продовжувати споживати електроенергію як завжди, без урахування погодних умов, або перейти на режим зниженого або навіть аварійного електроспоживання. Як видно з табл. 2, протягом року кількість днів, коли потрібно скорегувати електроспоживання, $N_{\text{обмеж дн}}$, не дуже велика і в основному припадає на зимовий період. На рис. 6 показана глибина розряду акумуляторних батарей при різних режимах електроспоживання в період з 17:00 12 березня до 06:00 13 березня, коли спостерігається фактично нульовий рівень вироблення електричної енергії за рахунок ВДЕ. У випадку відмови від використання аварійного режиму (рис. 6а) рівень заряду АКБ за цей час встигає знизитись до 0%, що призводить до провалу в електропостачанні для усього житлового масиву, а також до скорочення терміну експлуатації встановлених акумуляторних батарей. За умови впровадження аварійного режиму електроспоживання (рис. 6б), рівень заряду АКБ дозволяє компенсувати фактичну відсутність вироблення електричної енергії в розглянутому інтервалі часу. При цьому режим зниженого споживання починається заздалегідь і діє протягом доби 12 березня. З 08:00 13 березня рівень вироблення стабілізується, за рахунок чого рівень заряду акумуляторних батарей швидко досягає свого максимуму.

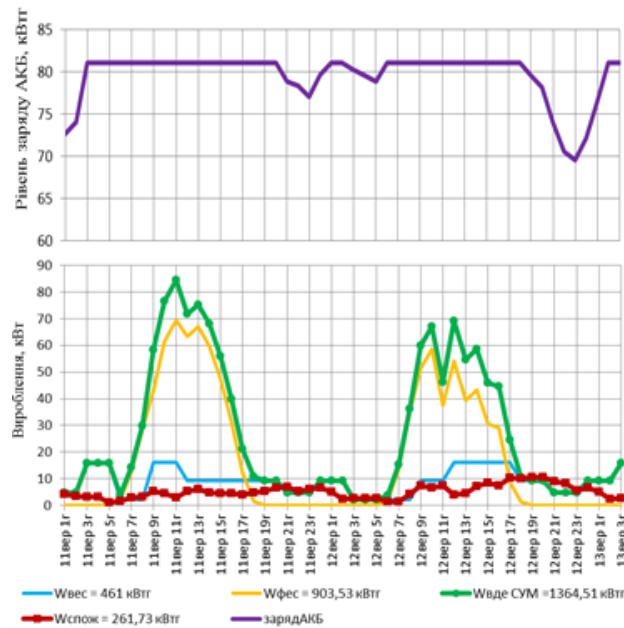


Рисунок 5 – Покриття споживання житлового масиву «активних» будинків у випадку короткострокових несприятливих погодних умов

На рис. 7 наведені графіки вироблення та споживання електричної енергії масивом «активних» будинків, а також рівень заряду АКБ для випадку довготривалих несприятливих погодних умов в період з 20:00 10 грудня до 08:00 12 грудня, тобто півтори доби. У цей

ситуації заряду акумуляторних батарей вистачає для покриття дефіциту вироблення за умови використання всіх встановлених акумуляторів та зниження електроспоживання до аварійного рівня протягом 12 грудня, завдяки чому рівень заряду АКБ стабілізуються.

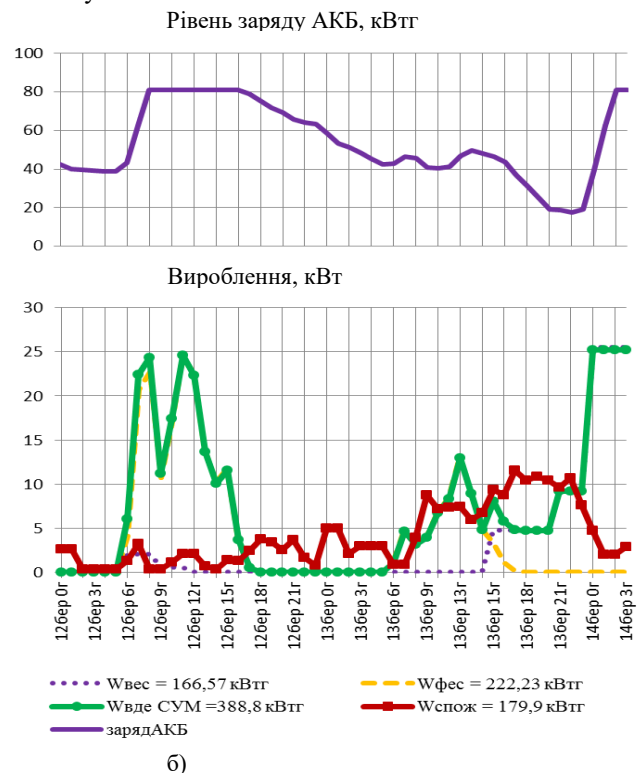
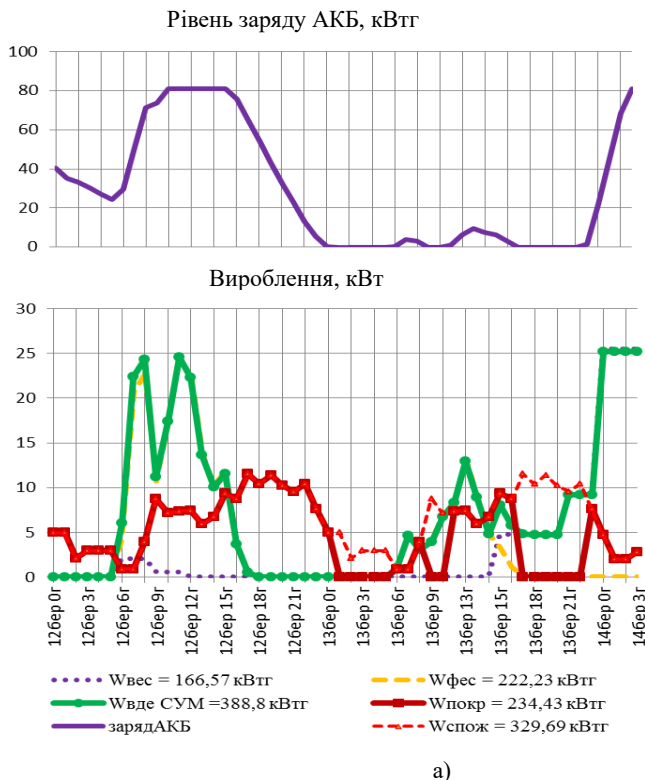


Рисунок 6 – Покриття споживання масиву «активних» будинків у випадку довготривалих несприятливих погодних умов а) без режиму обмеженого електроспоживання; б) з режимом обмеженого електроспоживання

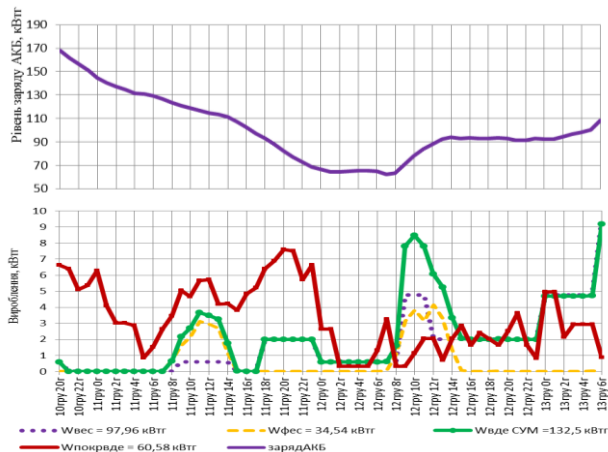


Рисунок 7 – Покриття споживання масиву «активних» будинків у випадку несприятливих погодних умов протягом півтори доби

В роботі були виконані оцінки економічної ефективності впровадження технології «активний будинок» в кліматичних умовах Харківської області і інвестицій в створення запропонованої спільної системи електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії з інтелектуальною мережею управління для об'єднання «активних» будинків. Простий термін окупності складає майже 12 років, але з урахуванням нарощення доходів, що надходять за рахунок економії енергоресурсів, термін окупності знижується на три роки. Індекс прибутковості інвестицій 0,76 при нормі дисконту 10 % свідчить про невелику економічну привабливість такого проекту, проте при його впровадженні викиди парникових газів в навколишнє середовище знизяться майже на 10 тисяч тон (у CO₂ еквіваленті).

Висновки. Проведене дослідження показало, що впровадження технології «активний» будинок у Південно-Східній Україні може бути доцільним за умовою об'єднання таких будинків в єдиний масив зі спільною системою електропостачання на базі відновлюваних джерел енергії і акумуляторних батарей, яка контролюється інтелектуальною мережею. Це дозволяє вирівнювати графіки споживання електроенергії та знижувати пікове навантаження. Безперервність постачання електроенергії у довготривалих несприятливих погодних умовах забезпечується за рахунок спільної роботи ВДЕ і певної кількості акумуляторних батарей,

а також обмеження електроспоживання, іноді до аварійного рівня. Однак, великий термін окупності таких систем (у розглянутому прикладі він досягає 12 років навіть з урахуванням продажу надлишків електроенергії в локальну електромережу за зеленим тарифом) і невеликий індекс прибутковості можуть відвернути інвесторів.

Список літератури

1. The Paris Agreement. [Електронний ресурс] – URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en
2. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050. [Електронний ресурс] – URL: http://menr.gov.ua/files/docs/Proekt/LEDS_ua_last.pdf
3. Net Zero Energy Solar Buildings. [Електронний ресурс] – URL: <http://task40.iea-shc.org/>
4. Milorad Bojić, Novak Nikolić, Danijela Nikolić, Jasmina Skerlić, Ivan Miletić. Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions / *Applied Energy Volume 88, Issue 7*, July 2011, Pages 2407-2419. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261911000146?via%3Dihub>
5. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. [Електронний ресурс] – URL: mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358
6. POWER Data Access Viewer. [Електронний ресурс] – URL: <https://power.larc.nasa.gov>
7. Д. М. Косатий, И. Н. Кудрявцев, К. В. Махотило. *Фотоэлектрические системы. Учебное пособие.*-Харьков.: HTMT, 2014. - 399 с.

References (transliterated)

1. The Paris Agreement. Available at: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en
2. Strategia nizkovugletseвого rozvytku Ukrainy do 2050 [Low emission development strategy of Ukraine till 2050]. Available at: http://menr.gov.ua/files/docs/Proekt/LEDS_ua_last.pdf
3. Net Zero Energy Solar Buildings. [Electronic resource] – Available at: <http://task40.iea-shc.org/>
4. Milorad Bojić, Novak Nikolić, Danijela Nikolić, Jasmina Skerlić, Ivan Miletić. Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions / *Applied Energy Volume 88, Issue 7*, July 2011, Pages 2407-2419. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261911000146?via%3Dihub>
5. Energetychna strategiya Ukrainy na period do 2035 roku [Energy strategy of Ukraine till 2035]. Available at mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358
6. POWER Data Access Viewer. Available at: <https://power.larc.nasa.gov>
7. D. M. Kosatiy, I. N. Kudriavtsev, K. V. Makhotilo. *Photovoltaic systems. Tutorial [Fotoelektricheskie sistemy. Uchebnoe posobie]*. Kharkiv: NTMT, 2014. – 399 p.

Надійшла (received) 17.12.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Золотарьов Денис Олегович (Золотарев Денис Олегов, Zolotarev Denis Olegovich) – студент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; e-mail: denz010295@gmail.com

Данилова Олена Анатоліївна (Данилова Елена Анатольевна, Danilova Olena Anatoliivna) – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ORCID iD: 0000-0003-0353-9848; e-mail: danipova.l@gmail.com

Лисенко Людмила Іванівна (Лысенко Людмила Ивановна, Lysenko Ludmila Ivanovna) – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ORCID iD: [0000-0002-1566-493X](https://orcid.org/0000-0002-1566-493X); e-mail: ludminalysenko@gmail.com