

ПРО ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНІЄЇ MICROGRID

Основна частина роботи зосереджена на аналізі діючої Microgrid, де традиційна резервна дизельна електрична станція (ДЕС) була поступово доповнена системою фотоелектричних панелей, накопичувачами енергії та гібридним інвертором. Проведені розрахунки економічної ефективності, вираженої через інтегральний ефект (NPV), дозволяють визначити терміни окупності різних варіантів організації Microgrid – від роботи лише з ДЕС до комбінованих схем із використанням накопичувачів. Виявлено, що оптимізація режимів роботи (в тому числі за допомогою модернізації накопичувачів) може скоротити термін окупності, що значно підвищує привабливість інвестицій у такі проєкти.

В статті увагу приділено аналізу впливу тарифоутворення та ринкових умов на економічні показники проєктів, адже реальні ціни на електроенергію та паливо суттєво впливають на фінансову доцільність впровадження Microgrid.

Стаття не лише демонструє актуальність застосування Microgrid для забезпечення стабільного та ефективного електропостачання в умовах сучасних викликів, але й пропонує конкретні методичні підходи до оптимізації їх роботи з економічної та енергетичної точки зору.

Це дослідження створює базу для подальших розробок у сфері інтеграції відновлюваних джерел енергії та оптимізації режимів роботи електроенергетичних систем в Україні.

Ключові слова: *Microgrid, відновлювані джерела енергії, режими роботи, термін окупності.*

Вступ

Прагнення до вуглецевої нейтральності, яке вважається запорукою стійкого розвитку, підвищує роль електричної енергії в силу її унікальних властивостей [1]. Наразі основними шляхами її досягнення вважають впровадження енергоощадних технологій і збільшення обсягів використання відновлюваних джерел енергії на засадах концепції Smart Grid [2,3]. Microgrid у цій статті розглядається як елемент Smart Grid, приєднаний до розподільної мережі відповідно до вимог [3 - 10]. Захист та динамічне керування Microgrid, призначені для забезпечення безпечної та стійкої її роботи в умовах збоїв та завад, як те передбачено [11 - 14], в цій роботі не розглядаються.

Загалом протягом 2022—2023 років в Україні введено понад 650 МВт нових потужностей відновлюваної енергетики, з яких: 371 МВт — фотоелектричні станції (у т.ч. 287 МВт приватними домогосподарствами); 227 МВт — вітрові електростанції; 50 МВт — об'єкти біоенергетики (біомаса та біогаз); 1 МВт — малі гідроелектростанції [15]. Фотоелектрична енергетика в Україні розвивається найшвидшими темпами — встановлена потужність таких електростанцій (з урахуванням генеруючих установок приватних домогосподарств) на початок 2024 року становить 7327 МВт, або майже 90 відсотків загальної встановленої потужності об'єктів відновлюваної енергетики (без урахування об'єктів, розташованих на тимчасово окупованих територіях). За період повномасштабного вторгнення РФ було втрачено близько 0,6 ГВт потужності фотоелектричних станцій [15]. Планується, що виробництво електричної енергії з енергії сонячного випромінювання може бути суттєво збільшено до 2030 року (загальна потужність ФЕС зросте до 12,2 ГВт, з яких 7,2 ГВт – у виробників та 5 ГВт – у активних споживачів [1]).

З 2014 року в Україні завдяки моделі “зеленого” тарифу здійснюється стрімке зростання генеруючих установок приватних домогосподарств, які виробляють електричну енергію з енергії сонячного випромінювання [15 - 17]. Так, за останні п'ять років сумарна потужність таких установок зросла майже у 10 разів і станом на початок 2024 року становила 1493 МВт (близько 54 тис. ФЕС), або 17,3 відсотка усієї потужності об'єктів відновлюваної електроенергетики, що працюють за моделлю “зеленого” тарифу (без урахування об'єктів, що розташовані на тимчасово окупованих територіях). Водночас інші види відновлюваних джерел енергії практично не використовуються споживачами (на початок 2024 року приватними домогосподарствами встановлено 31 кВт генеруючих установок з використанням енергії вітру та 245 кВт комбінованих вітро-сонячних установок). Модель “зеленого” тарифу для приватних домогосподарств [18 - 19] не стимулює власників таких електростанцій використовувати вироблену електричну енергію для власного споживання. Суттєва різниця між розміром “зеленого” тарифу та ринковою ціною спонукає власників електростанцій до максимізації відпуску дорогої електричної енергії в мережу з метою отримання прибутку. Подальше стале збільшення кількості сонячних електростанцій приватних домогосподарств за моделлю “зеленого” тарифу, визначеного Законом України “Про альтернативні джерела енергії”, складно реалізовувати через обмежені ресурси тарифу на послуги з передачі електричної енергії. Крім того, існуюча модель “зеленого” тарифу не дозволяє досягти ключової цілі

стимулювання розвитку відновлюваної генерації споживачами - покриття власного споживання. Оскільки відповідно до [20] група взаємопов'язаних навантажень і розподілених енергетичних ресурсів із визначеними електричними межами, що утворюють локальну електроенергетичну систему на рівнях розподільної напруги, яка діє як єдиний керований об'єкт і здатна працювати в острівному режимі, називається Microgrid, вважається за можливе шукати відповіді на виникаючі питання на засадах Microgrid. Дослідження, представлене у статті, присвячене аналізу та удосконаленню улаштування і роботи Microgrid як одного з недостатньо вивчених елементів ринку електричної енергії України в період війни, які мають певні відмінності від відомого досвіду [21 - 30].

Так, наприклад, в [21] викладено результати дослідження ефективності в середовищі HOMER Pro планованих до будівництва Microgrids з використанням в якості факторів інтенсивності опромінювання, цін на фотоелектричні панелі та акумулятори, розмірів акумуляторних батарей тощо. Досліджувався вплив факторів на інтегральний ефект, первинні інвестиції та собівартість енергії.

В [22 - 23] розглянуто Microgrid з відновлюваними джерелами енергії (вітрові турбіни і фотоелектричні панелі), яка використовує систему зберігання енергії (ESS) і кероване (гнучке) навантаження для балансування системи. Можливі втрати, обумовлені перервами електропостачання, в [21 - 23] не розглядаються.

В [24 - 25] увага приділяється електропостачанню критичних навантажень за допомогою Microgrids, що сприятливо впливає на показники надійності електропостачання територій, які потерпають від стихійних лих.

І хоча проникнення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в існуючі системи електропостачання і транспорту надає переваги у вигляді зменшення викидів парникових газів, воно породжує низку нових проблем, обумовлених стохастичним характером генерації вітрових (ВЕС) і фотоелектричних (ФЕС) станцій. Коливання швидкості вітру та інсоляції можуть порушувати баланс між попитом на електричну енергію та пропозицією. Як вихід у [19, 26 - 27] пропонуються до застосування ESS значної ємності та надлишковість генерації з використанням ВДЕ.

В [28 - 29, 40] суттєву увагу приділено як технологіям використання і вартості ESS у складі Microgrid, так і деградації характеристик ESS в процесі експлуатації. З метою продовження терміну служби накопичувачів у [30], наприклад, запропоновано використання суперконденсаторів.

Різноманітність підходів до улаштування та організації експлуатації Microgrid [4 - 30] свідчить про необхідність додаткових досліджень цих питань, а досягнення в галузях перетворення енергії ВДЕ в електричну енергію і зберігання енергії обумовлюють пошуки нових оптимальних рішень.

Метою роботи є опис режимів роботи Microgrid за результатами однорічного періоду її експлуатації, спрямованих на зменшення витрат за достатнього рівня надійності електропостачання користувачів.

Удосконалення характеристик існуючої Microgrid полягає у зменшенні витрат, пов'язаних з використанням дизельної електричної станції (ДЕС) і закупівлею електричної енергії в оператора системи розподілу, за достатнього рівня надійності електропостачання користувачів і без залучення додаткових інвестицій.

Матеріал і результати досліджень

Опис досліджуваної Microgrid

Microgrids в Україні впроваджуються за раніше не спостережуваних у світі умов, визначальними характеристиками яких є:

- трансформація розподільних мереж, часткою яких є Microgrids, відбувається в країні з високим рівнем електроспоживання як на одну людину, так і на одиницю ВВП [34];
- трансформація відбувається за умов систематичної, неперервної та непередбачуваної руйнації об'єктів електроенергетики зовнішнім ворогом [35, 37];
- трансформація відбувається відповідно до прийнятих зобов'язань України щодо зменшення викидів парникових газів [36];
- трансформація відбувається в умовах неперервного удосконалення характеристик фотоелектричних перетворювачів, засобів телекомунікацій, накопичувачів енергії та зменшення їх вартості;
- трансформація відбувається коштом користувачів електричних мереж із застосуванням державної підтримки на умовах конкурсу [16, 37].

Зазначене висуває на передній план перш за все забезпечення надійного електропостачання користувачів що, певною мірою впливає як на склад Microgrid, так і кількісні характеристики окремих її елементів і режими їх роботи.

Відомості про склад і вартість обладнання дослідженої Microgrid, схему якої зображено на рис. 1, наведено в табл. 1.

Таблиця 1 - Склад Microgrid

Обладнання	Марка	Кількість	Вартість, грн
ДЕС	MADEK (MD12P)	1	248000
Фотоелектричні модулі	TrinaSolar Vertex 5	42	262000
Гібридний інвертор	Deye SUN 12 кВт	1	133000
Накопичувач енергії	BVC Eco Battery, 6 кВт-год	4	400000
Щити автоматики	За замовленням	3	28000
Дахова система кріплення	комплект	1	33000
Кабельно-провідникова продукція	комплект	1	10000
Доставка і монтаж	комплект	1	57000
Лічильники комерційного обліку	GAMA 300 G3B/144	3	51000
Лічильники технічного обліку	НІК 2303ЛР6Т	3	12000

Наведена на рис. 1 Microgrid еволюційно розвивалася від резервної ДЕС до повноцінної Microgrid, збільшуючи в процесі еволюції як кількість фотоелектричних модулів, так і ємність накопичувача енергії. Досліджувана Microgrid набула наведених в табл. 1 характеристик в кінці 2023 року.

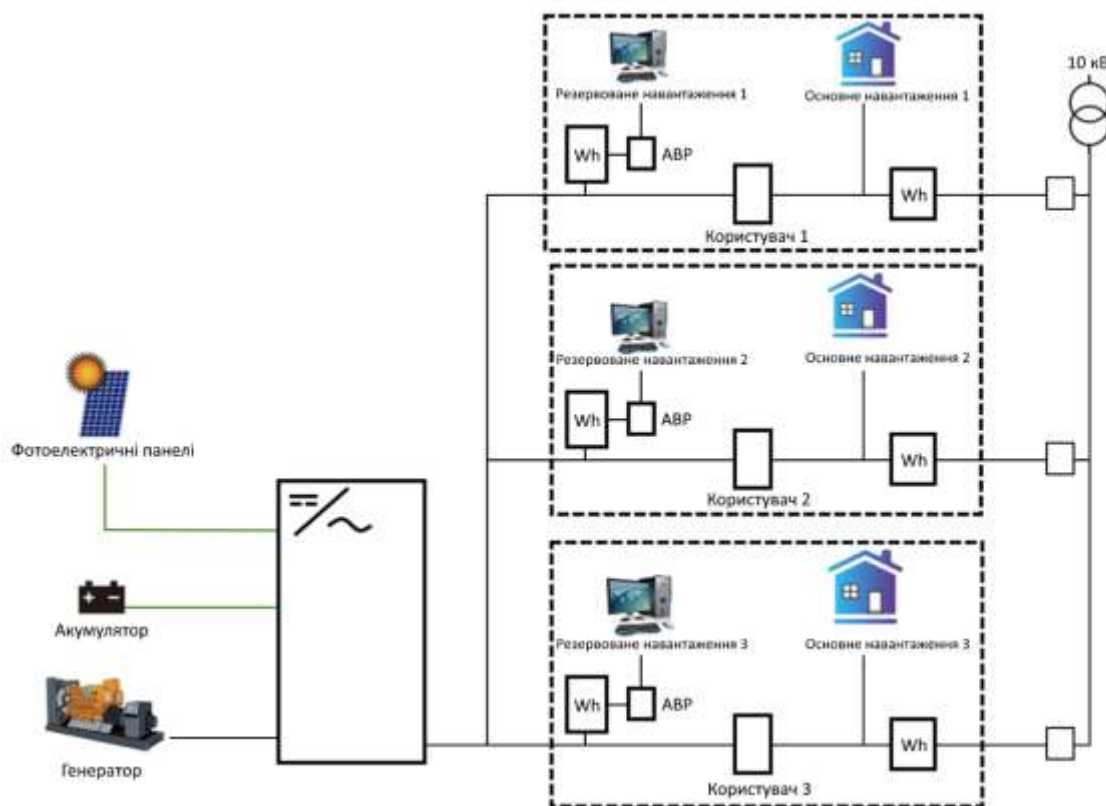


Рисунок 1 - схема Microgrid

Спостережувані режими роботи Microgrid

Ретроспективні дані. Приєднання Microgrid до мережі оператора системи розподілу (ОСР) виконано відповідно до рис.1. Дозволена до використання кожним із користувачів потужність становить 15 кВт. В навантаженнях користувачів виділено резервовані навантаження, що живляться від шини гарантованого живлення. Відомості про обмін енергією між Microgrid і мережею ОСР наведено в табл.2. Відомості щодо обмінів енергією між компонентами Microgrid наведено в табл. 3.

Наведені нижче розрахунки виконано виходячи з припущень про незмінність цін, технологій і спостережуваних протягом дослідної експлуатації описаної вище Microgrid графіків споживання та генерації електричної енергії. Відповідно до [31 - 33] у якості критерію ефективності інвестицій вибрано інтегральний ефект за тривалості розрахункового періоду у 20 років. Оскільки Microgrid створювалася в існуючій мережі, питання зовнішнього електропостачання (характеристик і вартості спорудження зовнішніх мереж, режимів їх роботи і втрат електричної енергії) у цій роботі детально не досліджувались.

Таблиця 2 – Зовнішній обмін електричною енергією суб'єктами Microgrid у 2024 році

Місяць	Споживання із зовнішньої мережі за адресами Microgrid, кВт·годин									Видача в зовнішню мережу 0,4 кВ від Microgrid, кВт·годин		
	Корисувач 2			Користувач 1			Користувач 3					
	день	ніч	разом	день	ніч	разом	день	ніч	разом	день	ніч	разом
1	263	132	395	1548	880	2428	0	803	804	2	0	2
2	180	107	287	1050	682	1732	0	508	508	183	0	183
3	190	142	332	646	550	1196	8	384	392	506	1	507
4	188	99	287	378	441	828	12	236	248	911	0	911
5	181	128	309	254	425	679	7	144	151	1920	0	1920
6	148	134	382	662	795	662	57	150	207	795	0	795
7	347	189	536	608	917	1525	962	872	1834	727	0	727
8	357	211	568	882	1166	2048	846	688	1534	785	0	785
9	387	201	588	1060	1034	2094	453	369	822	370	0	370
10	363	183	546	737	559	1296	440	358	698	266	0	266
11	381	205	586	927	550	1477	362	295	657	42	0	42
12	448	259	707	1115	572	1687	432	216	887	2	0	2
Разом	2241	1343	3684	7088	6890	13192	2345	4154	6500	6199	1	6200

Таблиця 3 – Внутрішній обмін електричною енергією в Microgrid у 2024 році

Місяць	Енергія з ВДЕ, кВт·годин			Енергія, кВт·годин		Отримано з мережі ОСР, %
	Вироблено фото-електричними панелями	використано на власні потреби користувача 1	подано до мережі Microgrid	спожито всього	отримано з мережі	
1	201	158	43	3626	3424	94,4
2	455	258	197	2527	2071	82,0
3	1035	489	546	1920	885	46,1
4	1736	593	1143	535	-1200	-224,3
5	2588	643	1975	460	-2157	-469,0
6	2143	641	1502	1095	-1048	-95,7
7	2145	645	1500	3168	1022	32,3
8	2228	705	1523	3365	1137	33,8
9	1505	582	923	3134	1629	52,
10	789	495	294	2374	1585	66,7
11	310	235	75	2678	2368	88,4
12	151	123	28	3935	3784	96,2
Разом	15310	5567	9743	28817	13501	

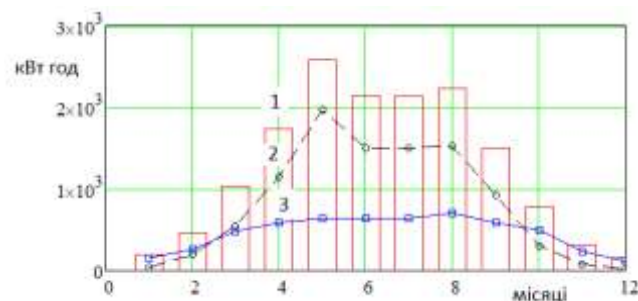


Рисунок 2 – Внутрішній обмін електричною енергією в Microgrid по місяцях 2024 року:
 1 - вироблено фотоелектричними панелями, кВт·годин; 2 - використано в Microgrid, кВт·годин;
 3 – надано до зовнішньої мережі, кВт·годин

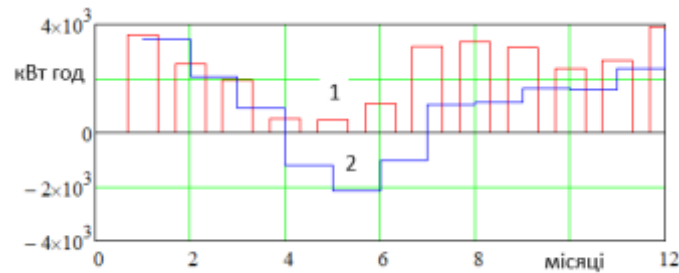


Рисунок 3 – Зовнішній обмін електричною енергією в Microgrid по місяцях 2024 року:
1 – спожито всього, кВт·годин; 2 – отримано із зовнішньої мережі, кВт·годин.

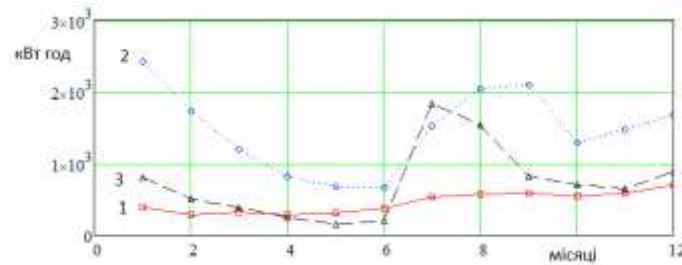


Рисунок 4 - Споживання електричної енергії користувачами Microgrid по місяцях 2024 року:
1 – користувач 1; 2 – користувач 2; 3 – користувач 3.

Наведені нижче розрахунки виконано виходячи з припущень про незмінність цін, технологій і спостережуваних протягом дослідної експлуатації описаної вище Microgrid графіків споживання та генерації електричної енергії. Відповідно до [31 – 33] у якості критерію ефективності інвестицій вибрано інтегральний ефект за тривалості розрахункового періоду у 20 років. Оскільки Microgrid створювалася в існуючій мережі, питання зовнішнього електропостачання (характеристик і вартості спорудження зовнішніх мереж, режимів їх роботи і втрат електричної енергії) у цій роботі детально не досліджувались.

Режим роботи з ДЕС. До 2023 року ДЕС використовувалася для резервування живлення електроприймачів першої категорії надійності електропостачання користувачів (водопостачання, водовідведення, автоматика і циркуляційні насоси систем опалення, резервоване освітлення тощо). Характеристики надійності електричної мережі оператора системи розподілу, до якої було приєднано користувачів, відповідали встановленим ПУЕ [42] вимогам і не обумовлювали регулярного використання ДЕС. З початком війни ситуація змінилася – через руйнування об'єктів електричних мереж перерви в електропостачанні стали частими, тривалими, непередбачуваними. Потреба використання резервного джерела електричної енергії зростає, зростає і потреба в первинному паливі. За навантаження у 100% ДЕС витрачає 4,5 л/годину, а за навантаження у 75% – 3,75 л/годину, що обумовлює собівартість виробленої електричної енергії в межах 23 – 25 грн/кВт·год (з урахуванням витрат на технічне обслуговування та поточний ремонт, не враховуючи інвестиційних витрат).

Інтегральний ефект (званий також NPV – net present value) від використання встановленої ДЕС можна визначити за формулою

$$NPV1 = -K_{DEC} + \sum_{t=1}^Z \frac{t \cdot z \cdot N_z \cdot P_{mean} - [T_n \cdot W_n + T_d \cdot W_d + T_{DEC} \cdot W_{DEC}]}{(1+d)^t}, \quad (1)$$

де K_{DEC} – вартість придбання та встановлення ДЕС, грн.;

$Z = 10,4$ \$/кВт·год – питомі збитки користувачів житлово-комунального господарства у разі їх повного знеструмлення [38];

t_z – середньорічна тривалість одного вимкнення, годин;

N_z – кількість випадків повного знеструмлення, одиниць;

P_{mean} – середньорічна потужність користувачів, кВт;

T_n – середньорічний нічний тариф, грн/кВт·год;

W_n – річне споживання по нічному тарифу, кВт·год;

T_d – середньорічний денний тариф, грн/кВт·год;

W_d – річне споживання по денному тарифу, кВт·год;

T_{DEC} – собівартість генерації ДЕС, грн/кВт·год;

W_{DEC} – річне споживання генерованої ДЕС електроенергії, кВт·год;

d – норма дисконту, в.о.

Примітка 1. Питомі збитки користувачів житлово-комунального господарства Z у разі їх повного знеструмлення у розмірі 10,4 \$/кВт·год прийнято відповідно до додатку 3 [38].

Примітка 2. Величини t_Z і N_Z , що входять до рівняння (1), визначено за результатами спостережень протягом 2024 року.

Результати розрахунку наведено на рис. 5.

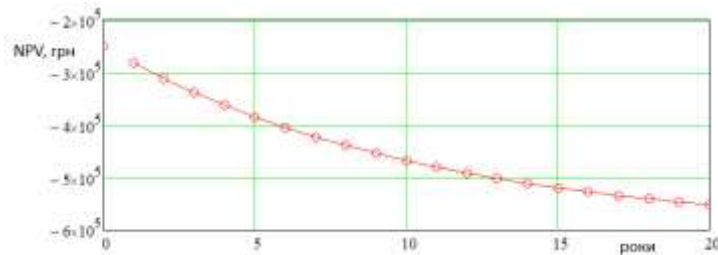


Рисунок 5 – Зміна інтегрального ефекту по роках експлуатації ДЕС

Інтегральний ефект, як видно на рисунку, у розглянутих умовах протягом розрахункового періоду у 20 років залишається від'ємним, що зумовлює удосконалення складу і режимів роботи Microgrid.

Режим роботи з ФЕС. Інтегральний ефект NPV у разі доповнення встановленої ДЕС ідеальною ФЕС з накопичувачем та гібридним інвертором відповідно до схеми рис. 1 можна визначити за формулою

$$NPV2 = -K_{DEC} - K_{CEC} + \sum_{t=1}^t \frac{Z \cdot t_Z \cdot N_Z \cdot P_{mean} + T_{CEC} \cdot W_{CEC} - [T_n \cdot W_n + T_d \cdot W_d]}{(1+d)^t}, \quad (2)$$

де K_{DEC} – вартість придбання та встановлення ДЕС, грн.;

K_{CEC} – вартість придбання та встановлення ФЕС, грн.;

$Z = 10,4$ \$/кВт·год – питомі збитки користувачів житлово-комунального господарства у разі їх повного знеструмлення;

t_Z – середньорічна тривалість одного вимкнення, годин;

N_Z – кількість випадків повного знеструмлення, одиниць;

P_{mean} – середньорічна потужність користувачів, кВт;

T_{CEC} – закупівельна ціна генерованої ФЕС електричної енергії, грн/кВт·год;

W_{CEC} – річна видача в мережу ОСР генерованої ФЕС електроенергії, кВт·год;

T_n – середньорічний нічний тариф, грн/кВт·год;

W_n – річне споживання по нічному тарифу, кВт·год;

T_d – середньорічний денний тариф, грн/кВт·год;

W_d – річне споживання по денному тарифу, кВт·год;

d – норма дисконту, в.о.

Примітка. Під ідеальною ФЕС тут і далі будемо розуміти таку систему, фотоелектричним перетворювачам і накопичувачам якої не притаманно явище деградації – суттєвої втрати робочих характеристик протягом терміну експлуатації.

Результати розрахунку наведено на рис. 6. Річна експлуатація такої системи свідчить про те, що у разі перерв в електропостачанні з боку ОСР потреби у використанні ДЕС не виникає (ємності накопичувача, яка чисельно дорівнює подвоєній потужності гібридного інвертора, протягом року було достатньо для задоволення потреб користувачів Microgrid). Це свідчить як про необхідність дослідження тривалості та кількості перерв в електропостачанні, так про можливість оптимізації співвідношення між потужністю гібридного інвертора та ємністю накопичувача і впливу цього співвідношення на термін окупності улаштування Microgrid.

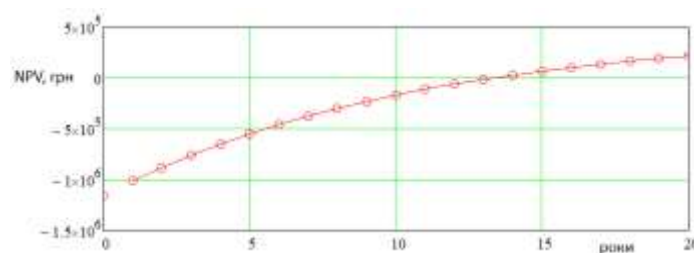


Рисунок 6 – Зміна інтегрального ефекту по роках експлуатації ФЕС і ДЕС

На рисунку видно, що термін окупності становить близько 13 років, що перевищує термін експлуатації без деградації фотоелектричних систем [39] і накопичувачів енергії [40]. На наш погляд

значною мірою це обумовлено невідповідністю тарифоутворення в електроенергетиці ринковим засадам. Щоб упевнитись у тому достатньо порівняти ціни на електричну енергію [41]:

- малі не побутові споживачі, приєднані до електричних мереж ОСР – 10,34 грн/кВт·год (з ПДВ);
- малі не побутові споживачі, приєднані до електричних в м. Києві – 9,26 грн/кВт·год (з ПДВ);
- малі не побутові споживачі, приєднані до електричних мереж АТ «УКРАЇНСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ» – 10,42 грн/кВт·год (з ПДВ);
- індивідуальні та колективні побутові споживачі - 4,32 грн/кВт·год (з ПДВ).

За наявності обліку споживання електроенергії за періодами часу [41] розрахунки індивідуальних та колективних побутових споживачів проводяться за відповідними тарифами та такими тарифними коефіцієнтами (за вибором споживача):

- 1) за двозонними тарифами, диференційованими за періодами часу:
0,5 тарифу в години нічного мінімального навантаження енергосистеми (з 23-ї години до 7-ї години);
повний тариф у інші години доби;
- 2) за тризонними тарифами, диференційованими за періодами часу:
1,5 тарифу в години максимального навантаження енергосистеми (з 8-ї години до 11-ї години і з 20-ї години до 22-ї години);
повний тариф у напівпіковий період (з 7-ї години до 8-ї години, з 11-ї години до 20-ї години, з 22-ї години до 23-ї години);
0,4 тарифу в години нічного мінімального навантаження енергосистеми (з 23-ї години до 7-ї години).

Останні обставини – двозонні та тризонні тарифи – відкривають нові можливості щодо удосконалення режимів роботи Microgrid і вимагають додаткового обґрунтування, про що буде повідомлено в наступній публікації.

Висновки

1. За результатами експлуатації доведено можливість і доцільність інтеграції ФЕС з накопичувачем енергії та гібридним інвертором у систему резервного живлення на базі ДЕС із задовільним терміном окупності інвестицій.

2. Подальше удосконалення утвореної в такий спосіб Microgrid досягається за рахунок оптимізації режимів її роботи, що зменшує експлуатаційні витрати (зокрема, витрати на первинне паливо) і покращує економічні показники, що підтверджується відповідними розрахунками.

Список використаної літератури

1. Енергетична стратегія України на період до 2050 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373
2. IEC/TR 63097:2017 Smart grid standardization roadmap
3. Закон України «Про альтернативні джерела енергії»
4. IEC TS 62898-1: 2017 Microgrids — Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification
5. IEC TS 62898-1: 2017/AMD 1: 2023 Microgrids — Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification
6. IEC TS 62898-2: 2018 Microgrids — Part 2: Guidelines for operation
7. IEC TS 62898-2: 2018 / AMD 1: 2023 Microgrids — Part 2: Guidelines for operation
8. ДСТУ HD 60364-8-2:2022 Низьковольтні електроустановки. Частина 8-2. Низьковольтні електроустановки Prosumer (HD 60364-82:2018, IDT; IEC 60364-8-2:2018)
9. IEC TS 62898-4: 2023 Microgrids — Part 4: Use cases
10. Ворушило А.О., Гай О.В. Microgrids в Україні: нагальні завдання створення й удосконалення нормативної бази побудови та експлуатації //Промислова електроенергетика та електротехніка. №1 (143) 2024 квітень. – С. 44 - 47
11. IEC TS 62898-3-1: 2020 Microgrids — Part 3-1: Technical requirements — Protection and dynamic control.
12. IEC TS 62898-3-1: 2020 / AMD 1: 2023 Microgrids — Part 3-1: Technical requirements — Protection and dynamic control
13. IEC TS 62898-3-3: 2023 Microgrids — Part 3-3: Technical requirements — Self-regulation of dispatchable loads
14. IEC TS 62898-3-4: 2023 Microgrids — Part 3-4: Technical requirements — Microgrid monitoring and control systems
15. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року, затверджений розпорядженням Кабінету Міністрів України від 13.08.2024 р. № 761-р
16. Закон України «Про ринок електричної енергії»

17. Кодекс систем розподілу, затверджений постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 310
18. Правила роздрібного ринку електричної енергії, затверджені постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 310
19. Позиційний документ ENTSO-E Гнучкість від ВДЕ. Остаточний проект від 31 січня 2025 р. : WG MDRES (підгрупа RES Flex)
20. IEC 60050 International Electrotechnical Vocabulary (all parts)/ - Міжнародний електротехнічний словник (усі частини)
21. Abenezer Bekele, Baseem Khan, Mohamed Ali Zdiri, Josep M.Guerrero, Sanjay Chaudhary, Juan C.Vasquez & Gibran David Agundis Tinajero/ Optimal planning and sizing of microgrid cluster for performance enhancement // <https://www.nature.com/articles/s41598-024-75906-z> (лютий 2025).
22. He, Y. et al. Economic optimization Scheduling based on load demand in Microgrids considering source network load storage. *Electronics*. 12 (12), 2721. <https://doi.org/10.3390/electronics12122721> (Jun. 2023).
23. Das, J. Optimal component sizing of an isolated PV-Wind-battery microgrid in India using Multi Objective Optimisation. 2020 IEEE 17th India Counc. Int. Conf. INDICON 2020. 1 <https://doi.org/10.1109/INDICON49873.2020.9342122> (2020).
24. Li, X. & Jones, G. Optimal sizing, location, and assignment of photovoltaic distributed generators with an Energy Storage System for Islanded Microgrids. *Energies*. 15 (18). <https://doi.org/10.3390/en15186630> (Sep. 2022).
25. Borghei, M. & Ghassemi, M. Optimal planning of microgrids for resilient distribution networks. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 128 <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106682> (Jun. 2021).
26. Barkouki, B. E. et al. Jun., An Economic Dispatch for a Shared Energy Storage System Using MILP Optimization: A Case Study of a Moroccan Microgrid, *Energies*, vol. 16, no. 12, p. 4601, doi: (2023). <https://doi.org/10.3390/en16124601>
27. Dinkhah, S., Salazar Cuellar, J. & Khanbaghi, M. Optimal Power and Frequency Control of Microgrid Cluster with mixed loads. *IEEE Open. Access. J. Power Energy*. 9, 143–150. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2022.3148375> (2022).
28. Edison Garcia Vera, Y., Dufo-Lopez, R., Daniel Diaz, O. & Castillo Oct., Optimization and feasibility of standalone hybrid diesel-pv-battery microgrid considering battery technologies, in 2020 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2020, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., doi: <https://doi.org/10.1109/ANDESCON50619.2020.9272144>. (2020).
29. Masaud, T. M. & El-Saadany, E. F. Correlating optimal size, cycle life estimation, and Technology Selection of batteries: a two-stage Approach for Microgrid Applications. *IEEE Trans. Sustain. Energy*. 11 (3), 1257–1267. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2921804> (2020).
30. León, L. M., Romero-Quete, D., Merchán, N. & Cortés, C. A. Optimal design of PV and hybrid storage based microgrids for healthcare and government facilities connected to highly intermittent utility grids. *Appl. Energy*. 335, 120709. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120709> (2023).
31. ГКД 340.000.002 - 97 Визначення економічної ефективності капітальних вкладень енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі
32. Примірна методика визначення вартості життєвого циклу, затверджена наказом Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України від 28.09.2020 № 1894
33. Ильин Н.М., Лукманова И.Г и др. Управление проектами. – СПб.: «Два-Три», 1996. – 610 с.
34. Енергоємність ВВП:[Електронний ресурс]. Режим доступу до сайту: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>
35. Атаки на енергетичну інфраструктуру України становлять загрозу ключовим аспектам життя напередодні зими – спостерігачі ООН з прав людини:[Електронний ресурс]. Режим доступу до сайту: <https://ukraine.un.org/uk/>
36. Закон України «Про ратифікацію Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони»
37. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та план заходів з його виконання, затверджений рішенням Кабінету міністрів України від 13.08.2024 № 761-р
38. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушения электроснабжения потребителей / В.А. Непомнящий – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. - 188с. ISBN 978-5-383-00505-7.
39. Investigation of Degradation of Solar Photovoltaics: A Review of Aging Factors, Impacts, and Future Directions toward Sustainable Energy Management. Tuhibur Rahman, Ahmed Al Mansur, Molla Shahadat Hossain Lipu *Energies* 2023, 16(9), 3706. URL: .: [Електронний ресурс]. Режим доступу до сайту: <https://doi.org/10.3390/en16093706>
40. СОУ НЕК 29.220.1-28:2023 Методичні вказівки щодо техніко-економічного обґрунтування вибору акумуляторних батарей для об'єктів НЕК «Укренерго» // Буйний Р.О., Ворушило А.О., Гажаман В.І., Джума Л.М., Квицинський А.О., Степенко С.В., Ходаківський А.М. - Київ: НЕК «Укренерго», 2023. – 27 с.

41. Постанова Кабінету Міністрів України від 05.06.2019 №483 «Про затвердження Положення про покладення спеціальних обов'язків на учасників ринку електричної енергії для забезпечення загальносуспільних інтересів у процесі функціонування ринку електричної енергії».

42. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. – Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.

A. Vorushylo¹, Ph. D. student

¹**General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine**

ONE MICROGRID CASE STUDY

The main part of the work focuses on the analysis of the existing Microgrid, where the traditional backup diesel power plant (DPS) was gradually supplemented by a system of photovoltaic panels, energy storage and a hybrid inverter. The calculations of economic efficiency, expressed in terms of the integral effect (NPV), allow us to determine the payback periods of various Microgrid organization options - from operation only with DPS to combined schemes using storage. It was found that optimization of operating modes (including through modernization of storage) can reduce the payback period, which significantly increases the attractiveness of investments in such projects.

The article focuses on the analysis of the impact of tariff formation and market conditions on the economic indicators of projects, since real prices for electricity and fuel significantly affect the financial feasibility of implementing a Microgrid.

The article not only demonstrates the relevance of the use of Microgrids to ensure stable and efficient electricity supply in the face of modern challenges, but also offers specific methodological approaches to optimizing their operation from an economic and energy point of view.

This study creates a basis for further developments in the field of integration of renewable energy sources and optimization of operating modes of power systems in Ukraine.

Keywords: Microgrid, renewable energy sources, operating modes, payback period.

Надійшла: 15.09.2025

Received: 15.09.2025