

## **ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ЄМНОСТІ АКУМУЛЯТОРА ДЛЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО СПОЖИВАЧА-ПРОСЬЮМЕРА**

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

*З поглибленням взаємодії «джерело відновлюваної енергії — побутове навантаження — системи зберігання енергії» та розвитком технології реагування на попит, поява просьюмерів призвела до потреби в оптимізації роботи мікромереж. У статті запропоновано нову техніку оптимізації з використанням методу нелінійного програмування для вирішення проблеми оптимального планування розподілених енергетичних ресурсів, включаючи фотоелектричні системи та системи накопичення енергії. Оптимізація роботи систем накопичення енергії є складною проблемою, оскільки вона має спеціальні обмеження, такі як вимоги до глибини розряду, обмеження стану заряду, швидкості заряду та розряду тощо. Відповідно до рівня генерації та навантаження, що видається мікромережею, витратами на системи накопичення енергії у споживача, встановлюється цільова функція для оптимізації ємності таких систем. В роботі головною метою оптимізації є пошук мінімального значення ємності систем накопичення енергії, що забезпечує всі потреби навантаження споживача для заданої потужності фотоелектричної системи. Розроблено стратегію споживання електроенергії, спрямовану на максимальну автономність просьюмера. Змодельовано та подано оптимальні значення ємності акумуляторів, визначених за допомогою методу прямого пошуку. Результати ємності акумуляторів подано для одного просьюмера з різними значеннями потужності дахової фотоелектричної системи. Проведено аналіз залежності ємності акумулятора від значення встановленої потужності дахової фотоелектричної системи просьюмера. Задачу оптимізації модельовано та розв'язано за допомогою оптимізаційного інструментарію Matlab.*

**Ключові слова:** просьюмер, система накопичення енергії, оптимізація, відновлювані джерела енергії.

### **Вступ**

Перехід до низьковуглецевої та децентралізованої енергетичної системи ставить перед енергетичними мережами надскладну задачу роботи в умовах мінливості відновлюваної генерації, раптових змін навантаження та зростаючої потреби потужності в пікові періоди [1]. З іншого боку, поширення розподілених енергетичних ресурсів (PER) у розподільчих мережах низької напруги разом з новими досягненнями в галузі автоматизації на стороні попиту дає можливість розумно координувати гнучкість споживачів, тобто їхню здатність змінювати власне споживання у відповідь на зміну ціни, потреби мережі чи інші сигнали [2]. Зокрема PER, такі як системи накопичення енергії (СНЕ), дозволяють змінювати споживання та зберігати енергію. Ця операційна гнучкість може бути використана для індивідуальних або загальносистемних потреб у наданні основних мережевих послуг [3].

Проте власниками більшості PER є індивідуальні просьюмери, і успішність розкриття їхньої гнучкості залежить від широти залучення просьюмерів до надання послуг мережі. У цьому контексті енергетичні ринки пропонуються як правова основа для заохочення надання просьюмерами послуг енергосистемі, тобто колективної участі громадянського суспільства в управлінні локальною енергетичною системою [4]. Зокрема, гнучкість може забезпечуватись за допомогою СНЕ просьюмерів, які об'єднані у віртуальні електростанції [5]. У цьому випадку отримання прибутку можливе і від надання послуг енергосистемі, і від підвищення безпеки енергосистеми [6]. Наприклад, сукупна гнучкість просьюмерів може забезпечити ефективніше резервування частоти [7] та управління навантаженням мережі, ніж традиційні заходи, такі як будівництво та технічне обслуговування централізованих електростанцій [8]. СНЕ також покращує активну взаємодію між просьюмером та мережею завдяки оптимізації його власної поведінки щодо споживання електроенер-

гії та зниження витрат на неї. Разом с тим, розширення рішень щодо оптимізації та координації розумних енергетичних мереж з просьюмерами стикається з взаємозалежними соціальними та технічними проблемами, пов'язаними з «додаванням у рівняння людини» та визначенням оптимальних параметрів СНЕ [9].

### Літературний огляд та постановка проблеми

Більшість попередніх досліджень у галузі оптимізації та координації гнучкості просьюмерів зосереджувалися на стійкості енергосистеми та загальній економічній вигоді. При цьому ємність СНЕ визначалася вже готовими комерційними рішеннями, присутніми на ринку. У роботі [10] сформульовано стратегію планування енергоспоживання для домогосподарств з метою зниження рахунків за електроенергію, з основним акцентом на соціальні вигоди. Зменшення загального пікового навантаження автори розглядали як додаткову, але не головну мету. Дослідження [11] продемонструвало можливість економії на енергії в енергетичному товаристві просьюмерів за допомогою спільного планування генерації на наступний день, порівняно з варіантом індивідуального управління. У роботі [12] розглянуто оптимальну стратегію енергетичного товариства з погляду прибутковості, зокрема через надання резервних послуг для енергосистеми, проте не розглядалися різні сценарії поведінки окремих просьюмерів в процесі управління їхніх РЕР [13].

З вищенаведеного огляду літератури можна зазначити, що задача оцінювання та використання потенціалу гнучкості просьюмерів ще недостатньо досліджена. Нехтування різноманітністю цілей просьюмерів може вплинути на їхню готовність до входження у товариство та підірвати потенціал гнучкості для переваг енергосистеми. Ця задача ускладнюється невизначеністю умов роботи РЕР та необхідністю виконання технічних обмежень енергомережі. Особливо це проявляється під час вибору необхідної ємності СНЕ, яка дозволить просьюмеру задовольняти власні потреби та надавати заплановані послуги енергосистемі. Тож *метою роботи* є розробка методу визначення оптимальної ємності СНЕ для конкретного типу просьюмера з урахуванням його стратегії взаємодії з енергосистемою.

### Модель мікромережі просьюмера

На рис. 1 показано модель мікромережі просьюмера, яка використовується для дослідження різних режимів її роботи. Вона містить власне навантаження просьюмера, дахову фотоелектричну систему (ФЕС), СНЕ та систему управління [14].

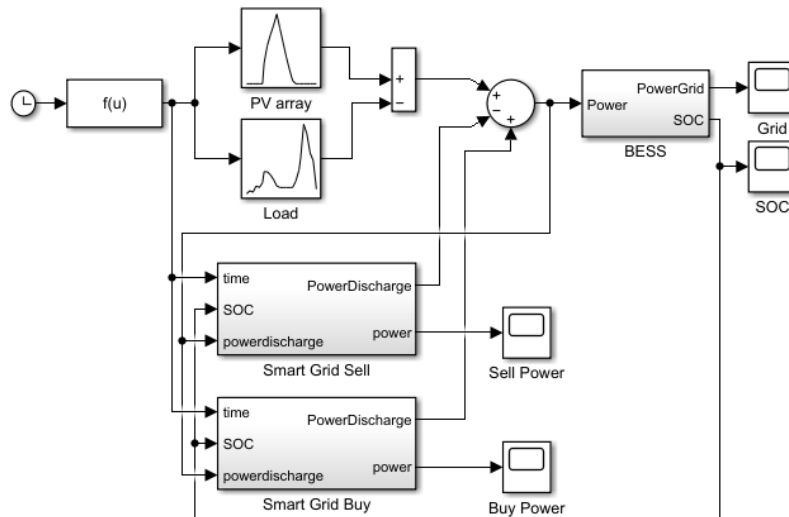


Рис. 1. Модель просьюмера: PVarray — профіль генерації; Load — профіль навантаження; BESS — система накопичення енергії; SOC — стан заряду акумулятора; SmartGridSell — блок продажу; SmartGridBuy — блок купівлі; SellPower — продана енергія; BuyPower — куплена енергія; Grid — енергосистема

Зараз найпопулярнішими та найефективнішими СНЕ є системи на основі різних типів літій-іонних акумуляторів, проте вони ж є й найдорожчими. Ключову роль серед параметрів СНЕ відіграє ємність акумуляторів, оскільки вона фактично визначає усі інші її параметри, такі як потужність заряду/розряду, тривалість роботи тощо.

Потрібна ємність СНЕ залежить від власного споживання просьюмера, генерації ФЕС, стратегії

керування роботою мікромережі та його реакції на попит і ціну ресурсів на енергоринку. Непостійність генерації ФЕС та нерівномірність навантаження викликають коливання потужності у мікромережі, які загрожують надійності її роботи. Вони можуть бути зменшені за допомогою СНЕ, при чому, чим більша ємність СНЕ, тим ефективніше ця проблема вирішується. Для того, щоб продавати до енергосистеми енергію, вироблену ФЕС чи куплену у часи низького тарифу, також потрібна достатня ємність СНЕ, як і для автономності просьюмера підчас аварій в мережі. Проте висока вартість встановлення кожної одиниці ємності СНЕ на практиці унеможливорює повне й одночасне розв'язання усіх цих задач і стає визначальним фактором для конфігурації усієї мікромережі просьюмера. Тому визначення ємності СНЕ є оптимізаційною задачею, яка має враховувати усю складність режимів роботи мікромережі просьюмера.

Важливим фактором, який впливає на розв'язання цієї оптимізаційної задачі є стратегія керування мікромережею просьюмера. Розглянуто найпоширенішу стратегію, спрямовану на мінімальну купівлю енергії з енергомережі, або інакше на максимальне використання енергії, генерованої ФЕС, та автономності просьюмера. Вона реалізується послідовною зміною протягом доби трьох режимів роботи мікромережі просьюмера:

*Режим 1.* Генерація ФЕС відсутня, акумулятор СНЕ повністю розряджений.

У цьому режимі все власне навантаження просьюмера покривається купівлею та споживанням електроенергії з мережі. Акумулятор не заряджається.

*Режим 2.* Частина доби до 16:00, вихідна потужність ФЕС більше нуля.

Можливі три варіанти цього режиму:

*Режим 2а.* Потужність навантаження перевищує вихідну потужність ФЕС.

Навантаження частково забезпечується генерацією ФЕС, її дефіцит компенсується купівлею електроенергії з мережі. Акумулятор не заряджається.

*Режим 2б.* Вихідна потужність ФЕС перевищує потужність навантаження, акумулятор не повністю заряджений.

Навантаження повністю забезпечується генерацією, надлишок потужності ФЕС використовується для заряджання акумулятора. В мікромережі може існувати профіцит потужності, тоді її надлишок продається у мережу.

*Режим 2с.* Вихідна потужність ФЕС перевищує потужність навантаження, акумулятор повністю заряджений.

Навантаження повністю забезпечується генерацією. Акумулятор не заряджається. В мікромережі наявний профіцит потужності, її надлишок продається у мережу.

*Режим 3.* Частина доби після 16:00, акумулятор СНЕ не повністю розряджений.

Навантаження забезпечується генерацією ФЕС, поки вона є, та розряджанням акумулятора СНЕ. Можливий дефіцит потужності компенсується купівлею електроенергії з мережі.

Кожний з цих режимів роботи мікромережі може й не виникати протягом доби залежно від пори року та споживання просьюмера. Від тих самих факторів залежить і виникнення дефіциту або профіциту потужності у відповідних режимах.

Слід зазначити, що хоча просьюмер прагне уникнути покупки енергії з мережі, забезпечити це протягом усього року в межах розумної ціни мікромережі, конкурентної з традиційними автономними джерелами енергії, на сьогодні неможливо. Тому описана стратегія керування націлена насамперед на забезпечення базової частини навантаження просьюмера і передбачає можливість перенесення її гнучкої частини в години профіциту в мікромережі або низьких цін в енергосистемі. До того ж, якщо на початку режиму 2 залишок енергії в СНЕ досягає свого мінімального значення, тобто акумулятор повністю віддає енергію навантаженню, то таку ємність СНЕ можна вважати достатньою для досягнення мети. В іншому випадку ємність надлишкова і, відповідно вартість СНЕ завищена.

### Цільова функція

Цільову функцію задачі оптимізації, що відповідає описаній постановці, можна подати математичним виразом

$$\min_C \left( k_p \Delta T \sum_{t=0}^N P_{pur}^2(t_i) + k_c C \right); \quad (1)$$

$$N = T / \Delta T, \quad (2)$$

де  $T$  — загальна тривалість тестового проміжку часу роботи системи, год;  $i$  — номер періоду часу, на які розбито тестовий проміжок;  $N$  — кількість періодів часу;  $t_i = i \cdot \Delta T$  — момент початку  $i$ -го періоду часу;  $P_{pur}(t)$  — потужність, яка купується з мережі в період часу, кВт;  $P_{chr}(t)$  — потужність заряду акумулятора в період часу, кВт;  $k_p$  — нормувальний коефіцієнт, кВт<sup>2</sup>·год<sup>-1</sup>;  $C$  — ємність СНЕ, кВт·год;  $k_c$  — штрафний коефіцієнт, (кВт·год)<sup>-1</sup>.

Потужність, яка купується з мережі,  $P_{pur}(t)$  визначається за виразом

$$P_{pur}(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } P_R(t) \geq 0; \\ |P_R(t)|, & \text{якщо } P_R(t) < 0 \text{ та } SOC(t) = SOC_{\min}; \\ |P_R(t)| - P_{dischr}(t), & \text{якщо } P_R(t) < 0 \text{ та } SOC(t) > SOC_{\min}; \end{cases} \quad (3)$$

$$P_R(t) = P_G(t) - P_L(t). \quad (4)$$

де  $P_R(t)$  — небаланс потужності мікромережі в період часу, кВт;  $P_G(t)$  — потужність генерації в період часу, кВт;  $P_L(t)$  — потужність навантаження в період часу, кВт;  $P_{dischr}(t)$  — потужність розряду акумулятора в період часу, кВт;  $SOC(t)$  — стан заряду акумулятора СНЕ у відносних одиницях;  $SOC_{\min}$  — мінімально допустимий рівень заряду акумулятора СНЕ.

При цьому мають враховуватися технічні обмеження на потужність розряду та граничним значенням стану заряду акумулятора [15]

$$0 \leq P_{dischr} \leq 1,2 \cdot P_{ESS}; \quad (5)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max}, \quad (6)$$

де  $P_{ESS}$  — потужність системи зберігання. В цьому дослідженні взято  $SOC_{\min} = 0,2$ ;  $SOC_{\max} = 1$ ;  $P_{ESS} = C \cdot 1 [\text{год}^{-1}]$ .

Штраф  $k_c C$ , введений у цільову функцію (1), має обмежити ємність (і відповідно вартість) акумулятора СНЕ під час розв'язання, що виключає купівлю енергії з мережі. Задано штрафний коефіцієнт  $k_c = 0,001$ .

Відповідно до описаної стратегії керування мікромережею просьюмера, профіцит потужності може продаватися у мережу. Це описується виразом

$$P_{vend}(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } P_R(t) \leq 0, \\ P_R(t) - P_{chr}(t), & \text{якщо } P_R(t) > 0 \text{ та } SOC(t) < SOC_{\max}, \\ P_R(t), & \text{якщо } P_R(t) > 0 \text{ та } SOC(t) = SOC_{\max}, \end{cases} \quad (7)$$

де  $P_{vend}(t)$  — потужність, що продається у мережу в період часу, кВт;  $P_{chr}(t)$  — потужність заряду акумулятора за період  $t_i$ , кВт.

У разі продажу додатково мають враховуватись технічні обмеження на потужність заряду акумулятора і той факт, що відпуск енергії у мережу здійснюється через інвертор СНЕ [13]

$$0 \leq P_{chr} \leq 1,2 \cdot P_{ESS}; \quad (8)$$

$$P_{vend}(t) \leq 1,2 \cdot P_{ESS}. \quad (9)$$

### Розв'язання оптимізаційної задачі та аналіз результатів

Для розв'язання оптимізаційної задачі (1)—(6) вибрано метод прямого пошуку Хука–Дживса. Дослідний пошук починається в точці  $x_0$ , яка називається старим базисом. Пошук здійснюється за координатними напрямками. У кожному напрямку за чергою з кроком  $+t_0$ ,  $-t_0$  перевіряється виконання умови визначення розв'язку локальної задачі, та за новий базис береться точка  $x_1$  з координатами, отриманими в результаті успішних кроків.

Напрямок від старого базису до нового задає напрямок прискорення пошуку, і як наступна точка мінімізувальної послідовності перевіряється точка  $y_1 = x_0 + \lambda (x_1 - x_0)$ . Тут  $\lambda$  — прискорювальний мно-

жник, який в пакеті Matlab вибирається автоматично. Якщо отримана точка  $u_1$  є вдалою, вона береться як подальша точка для дослідження. В іншому випадку дослідження проводиться з точки  $x_1$ . Умовою закінчення пошуку є досягнення величини уточнення координат на кроці, меншому ніж  $10^6$ .

У цьому дослідженні розглянуто один тип просьюмера та модель його графіків навантаження, описані в роботі [16]. Встановлена потужність навантаження просьюмера становить 10 кВт. Добове споживання протягом року змінюється від 13,5 до 25 кВт·год. Моделювання роботи мікромережі просьюмера здійснювалось за різних значень номінальної потужності дахової ФЕС, окремо для робочих та вихідних днів у зимовий та літній періоди року. Тривалість тестового проміжку часу роботи системи  $T$  в (1) вибрана у 48 годин, тобто дві доби. Чисельне моделювання та розв'язання оптимізаційної задачі здійснювалось за допомогою математичного пакета Matlab.

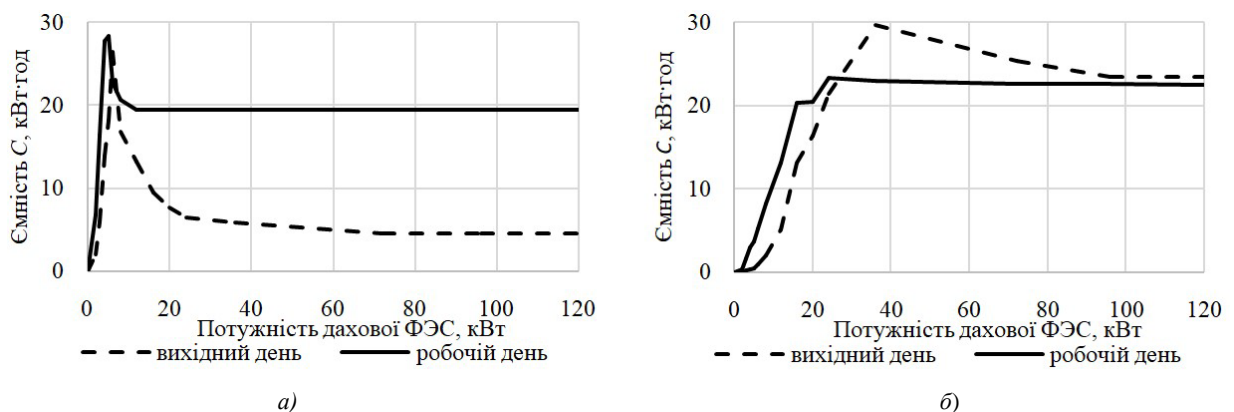
Враховуючи локальний характер вибраного методу оптимізації, складність функції (1) та зміну умов моделювання, вибір стартової точки  $x_0$  може мати вирішальний вплив на результати пошуку. Тому для перевірки алгоритм послідовно запускався з початкових точок  $x_0 = 0$ ,  $x_0 = 20$ ,  $x_0 = 40$ . Ці значення  $x_0$  відповідають краям та середині бажаного діапазону ємності акумулятора СНЕ. Як показали результати, запуск з усіх початкових точок давав такий самий результат, хоча й з різною кількістю ітерацій, але не більше 50.

У табл. 1 подано оптимальні значення ємності  $C$  акумулятора СНЕ, визначені для різних умов моделювання, а на рис. 2 — графіки зміни оптимальної ємності СНЕ від потужності ФЕС просьюмера.

Таблиця 1

Оптимальні значення ємності акумулятора

Потужність ФЕС, кВт	Літо		Зима	
	Робочий день. Ємність СНЕ, кВт·год	Вихідний день. Ємність СНЕ, кВт·год	Робочий день. Ємність СНЕ, кВт·год	Вихідний день. Ємність СНЕ, кВт·год
2	6,9	2,13	0,45	0,02
3	16,48	6,05	1,71	0,28
4	27,9	14,06	3,12	0,5
5	28,5	18,3	3,83	0,57
6	22,8	26,5	5,3	1,06
8	20,8	16,9	8,4	2,17
12	19,5	13,26	13,2	5,18
16	19,5	9,55	20,4	13,25
20	19,5	7,8	20,5	16,49
24	19,5	6,59	23,47	21,53
36	19,5	5,94	23,09	29,75
72	19,5	4,64	22,75	25,5
96	19,5	4,59	22,65	23,56
120	19,5	4,59	22,6	23,56

Рис. 2. Графіки залежності ємності СНЕ від потужності ФЕС: *a* — у літній період; *б* — у зимовий період

Як випливає з рис. 2а у літній період року максимальна розрахована ємність СНЕ для робочого та вихідного дня досягає приблизно 28,5 кВт·год за встановленої потужності ФЕС 5 кВт. Це пов'язано з тим що, хоча ФЕС вже може виробити кількість енергії, достатню для споживання

просьюмера, її потужності в певні години доби недостатньо для покриття навантаження. В цій ситуації СНЕ великої ємності дозволяє не лише забезпечити перенесення енергії ФЕС в інші години, а головним чином підвищити власну потужність мікромережі просьюмера. З подальшим збільшенням потужності ФЕС оптимальна ємність СНЕ знижується. За встановленої потужності ФЕС понад 12 кВт необхідна ємність СНЕ для робочого дня вже не змінюється і становить 19,5 кВт·год. Це підтверджує ефективність дії введеного у цільову функцію (1) штрафу за інвестиційні витрати на встановлення СНЕ. На відміну від робочого дня у вихідний день розрахована необхідна ємність СНЕ, для встановленої потужності ФЕС понад 20 кВт, майже не змінюється і в середньому становить 19,5 кВт·год. Головною причиною такої відмінності є різний характер споживання енергії в робочі та вихідні дні, тобто в вихідний день пікове навантаження припадає на часи пікової генерації з ФЕС.

На рис. 2б показано графіки зміни оптимальної ємності СНЕ для зимового періоду року. Тут максимальна ємність СНЕ досягає 23,47кВт·год за встановленої потужності ФЕС 24 кВт для робочого дня та 29,75кВт·год за встановленої потужності ФЕС 36 кВт для вихідного дня. Подальше збільшення ємності СНЕ порівняно з літнім періодом головним чином дозволяє перенести енергію згенеровану ФЕС на інші часи доби в умовах збільшення навантаження просьюмера та зменшення добової інсоляції. З подальшим збільшенням потужності ФЕС оптимальна ємність СНЕ зменшується і стає приблизно однаковою для робочого та вихідного дня на рівні 23 кВт·год.

Якщо, розглядати цей метод оптимізації на прикладі вихідного дня в літній сезон з навантаженням в 25кВт·год, встановленій потужності ФЕС 8 кВт та без СНЕ кількість проданої енергії у мережу буде становити 17,3 кВт·год, а кількість купленої — 25 кВт·год. Для цих параметрів оптимальна ємність СНЕ становить 9 кВт·год. За таких умов кількість проданої енергії у мережу буде становити близько 1 кВт·год, а кількість купленої — 7,8 кВт·год. Встановлення СНЕ більшої ємності дає змогу зменшити кількість купленої енергії з мережі але економічно це буде не вигідно.

В цілому, отримані значення ємності СНЕ відповідають рівню, очікуваному для таких характеристик навантаження просьюмера, що підтверджує їхню достовірність.

На ринку СНЕ одним з популярних рішень для приватного домоволодіння є TeslaPowerwall 2, загальна ємність якого дорівнює 13,5 кВт·год. Як показують дані, оптимальна розрахована ємність СНЕ для представленого просьюмера в середньому може бути заміщена двома TeslaPowerwall 2 для того, щоб задовольнити власні потреби в автономності.

Варто зазначити, що отримані значення ємності СНЕ відповідають меті максимальної автономності просьюмера, але у разі вибору іншої стратегії управління можуть суттєво відрізнятись.

## Висновок

Запропонований метод визначення ємності акумулятора СНЕ для індивідуального споживача-просьюмера оснований на методі прямого пошуку, враховує профілі генерації ФЕС, графіки навантаження та стратегію управління мікромережею. За його допомогою визначені оптимальні значення ємності СНЕ на прикладі просьюмера, орієнтованого на максимальну автономність, для широкого діапазону потужності ФЕС і різних умов роботи. Це підтверджує ефективність вибраного алгоритму розв'язання оптимізаційної задачі та можливість застосування запропонованого методу для інших типів просьюмерів. Подальший етап дослідження передбачає визначення впливу мети просьюмера та стратегії управління мікромережею на величину оптимальної ємності СНЕ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] L. Gruber, T. Klatzer, and S. Wogrin, *Developing a Framework for Multiple Participation in Energy Communities*. 2023. <https://doi.org/0.36227/techrxiv.23294795.v1> .
- [2] O. Kulapin, A. Ivakhnov, D. Danylchenko, S. Fedorchuk, V. Hrytsenko, and D. Stanislav, "Prospects of Using Prosumers to Analyze the Potential of Demand Management," in *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2022, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916321> .
- [3] M. Marzband, M. Javadi, S. A. Pourmousavi, and G. Lightbody, "An advanced retail electricity market for active distribution systems and home microgrid interoperability based on game theory," *Electr. Power Syst. Res.*, no. 157, pp. 187-199, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.12.024> .
- [4] C. D. Korkas, S. Baldi, and E. B. Kosmatopoulos, "Grid-Connected Microgrids: Demand Management via Distributed Control and Human-in-the-Loop Optimization," *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, Elsevier, 2018, pp. 315-344. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813185-5.00025-5> .
- [5] M. Guo et al., "Access Point And Capacity Optimization Planning Method Of Virtual Power Plant," in *2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2021, pp. 1877-1881. <https://doi.org/10.1109/EI252483.2021.9712891> .

- [6] M. Ruiz-Cortés et al., “Optimal Charge/Discharge Scheduling of Batteries in Microgrids of Prosumers,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 34, no.1, pp. 468-477, 2019. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2878351> .
- [7] B. Kumaran Nalini, Z. You, M. Zade, P. Tzscheutschler, and U. Wagner, “OpenTUMFlex: A flexibility quantification and pricing mechanism for prosumer participation in local flexibility markets,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, no. 143, pp. 108382, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108382> .
- [8] C. Korkas, S. Baldi, I. Michailidis, and E. Kosmatopoulos, “Occupancy-based demand response and thermal comfort optimization in microgrids with renewable energy sources and energy storage,” *Appl. Energy*, no. 163, pp. 93-104, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.140> .
- [9] M. Secchi, G. Barchi, D. Macii, D. Moser, and D. Petri, “Multi-objective battery sizing optimisation for renewable energy communities with distribution-level constraints: A prosumer-driven perspective,” *Appl. Energy*, no. 297, pp. 117-171, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117171> .
- [10] M. Fice, and K. Dębowski, “Energy management in a semi off-grid prosumer micro system,” *2016 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*, 2016, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/WZEE.2016.7800204> .
- [11] N. A. Shan, Y. Li, and H. Li, “Motivations behind P2P energy trading: a machine learning approach,” *Int. J. Chin. Cult. Manag.*, vol. 5, no. 3, c. 189, 2022. <https://doi.org/10.1504/IJCCM.2022.123645> .
- [12] A. Boumaiza, and A. Sanfilippo, “Energy Prosumer for Local Energy Marketplace,” в *2023 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, c. 1-5, 2023. <https://doi.org/10.1109/ICIT58465.2023.10143096> .
- [13] U. Cali and A. Fifield, “Towards the decentralized revolution in energy systems using blockchain technology,” *Int. J. Smart Grid Clean Energy*, pp. 245-256, 2019. <https://doi.org/10.12720/sgce.8.3.245-256> .
- [14] О. В. Кулапін і К. В. Махотіло, «Модельовання смарт-мережі споживачів-просьюмерів з фотоелектричними системами», 2019, [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/46363> . Дата звернення: 08, Червень 2024.
- [15] H. Chen, T. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, “Progress in electrical energy storage systems: a critical review. *Prog Nat Sci*,” *Prog. Nat. Sci.*, no. 19, pp. 291-312, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014> .
- [16] О. Кулапін і К. Махотіло, «Модельовання графіків навантаження просьюмера на базі поведінкового підходу», *POWER Eng. Econ. Tech. Ecol.*, no. 1, 2024. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297584> .

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 10.06.2024

**Кулапін Олександр Валентинович** — асистент кафедри електричних станцій, e-mail: [oleksandr.kulapin@ieee.khpi.edu.ua](mailto:oleksandr.kulapin@ieee.khpi.edu.ua) ;

**Махотіло Костянтин Володимирович** — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, професор кафедри електричних станцій, e-mail: [kostiantyn.makhotilo@khpi.edu.ua](mailto:kostiantyn.makhotilo@khpi.edu.ua) .

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

**O. V. Kulapin<sup>1</sup>**  
**K. V. Makhotilo<sup>1</sup>**

## Selection of Optimal Battery Capacity of the Household Prosumer

<sup>1</sup>National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

*With the deepening of the "renewable energy source-household load-energy storage system" interaction and the development of demand response technology, the emergence of prosumers has led to the need to optimize the microgrids operation. This paper proposes a new optimization technique using a linear programming method to solve the problem of optimal planning of distributed energy resources, including photovoltaic systems and energy storage systems. Optimization of the operation of energy storage systems is a complex problem as it has special limitations, such as requirements for depth of discharge, state of charge limitations, charge and discharge rates, etc. According to the level of generation and load, supplied by the microgrid, the costs of the energy storage system in the consumer, an objective function is established to optimize the capacity of the energy storage system. The purpose of the study is to find the balance of unused energy at the end of the simulated day. In this work, the main goal of optimization is to find the minimum value of the energy storage systems capacity, which provides all the needs of the consumer's load for the given power of the photovoltaic systems. The strategy of electricity consumption has been developed, aimed at maximization of the the autonomy of the prosumer. The optimal values of battery capacities determined, using the direct search method were simulated and presented. The results of battery capacities are given for the same prosumer with different power values of the rooftop solar power plant. The analysis of the dependence of the battery capacity on the value of the installed power of the photovoltaic systems of the prosumer was carried out. The optimization problem is modeled and solved using Matlab optimization toolkit.*

**Keywords:** energy storage systems, renewable energy sources, prosumer, optimization, modeling of energy consumption.

**Kulapin Oleksandr V.** — Assistant with the Chair of Electric Power Stations, e-mail: [oleksandr.kulapin@ieee.khpi.edu.ua](mailto:oleksandr.kulapin@ieee.khpi.edu.ua) ;

**Makhotilo Kostiantyn V.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Professor with the Chair of Electric Power Stations, e-mail: [kostiantyn.makhotilo@khpi.edu.ua](mailto:kostiantyn.makhotilo@khpi.edu.ua)