

# Електронні системи та сигнали

УДК 621.316

## Керування електроспоживанням MicroGrid за вартісним критерієм

Пікож А.В., ORCID [0000-0003-3350-3627](https://orcid.org/0000-0003-3350-3627)e-mail [pikozh13@gmail.com](mailto:pikozh13@gmail.com)Кафедра промислової електроніки [www.kaf-pe.kpi.ua](http://www.kaf-pe.kpi.ua)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [www.kpi.ua](http://www.kpi.ua)

Київ, Україна

**Реферат**—У статті розглянуто задачу керування електроспоживанням електротехнічної системи розподіленої генерації MicroGrid за критерієм мінімізації вартісних витрат. В основу керування покладено поєднання математичних положень задачі оптимізації у економічному та електротехнічному аспектах функціонування MicroGrid. Для опису системи розглянуто модель загальної рівноваги. На прикладі акумуляторної батареї побудовано об'єднану систему економічних та електротехнічних рівнянь. Описано аналіз можливих режимів роботи, схему шляхів передачі енергії від джерел до навантажень та реалізацію критерію максимального економічного прибутку від функціонування електротехнічного обладнання.

**Ключові слова** — MicroGrid; енергоефективність; керування електроспоживанням; економічна теорія; загальна рівновага.

### I. Вступ

Сучасний розвиток електротехніки та енергетики зумовлює потребу вирішення задачі енергоефективності, актуальність якої зберігається як для великих промислових підприємств, так і побутових об'єктів [1]. Разом з розгляданням переваг розподіленої генерації та збільшення частки складних електротехнічних комплексів побутового призначення все більш важливою стає задача узгодженого керування електроспоживанням об'єктів MicroGrid [7].

### II. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Впродовж останніх років питання керування електроспоживанням набуло особливої актуальності. На сьогоднішній день опубліковано велику кількість наукових статей з цієї тематики, проводяться спеціалізовані науково-технічні конференції, семінари, виставки [2].

Одним із сучасних підходів до розв'язання задачі керування електроспоживанням, є DSM (Demand-Side Management – керування за попитом), який передбачає реалізацію наступних чотирьох напрямів керування [2-6]:

- Load management – регулювання навантаження, яке включає в себе застосування «тарифного меню» та впровадження технічних засобів енергозбереження з метою зниження пікових навантажень;

- Energy efficiency – енергоефективність, тобто врахування екологічних факторів, здійснення адміністративних реформ, мотивуючі заходи та економічне заохочення споживачів, що використовують нетрадиційні та відновлювані джерела енергії;

- Energy conservation – енергозбереження, тобто заходи, що впроваджуються на промислових підприємствах щодо скорочення годин роботи, регулювання електричної потужності, збільшення продуктивності виробництва;

- Fuel substitution – заміна палива або використання інших видів палива, формування політики щодо заміни генеруючих об'єктів на більш ефективні та менш шкідливі з точки зору екології. При цьому розглядаються програми добровільної участі кінцевого споживача у керуванні електроспоживанням. Основними причинами використання в європейських країнах та США такої політики щодо керування енергетичними потоками стали енергетична криза, подорожчання енергетичних ресурсів, необхідність зменшення негативного впливу підприємств енергетичної галузі на довкілля. Важливою мотивацією залучення кінцевих споживачів електричної енергії стало усвідомлення необхідності проведення такої політики, висока ступінь підготовленості до можливих варіантів розвитку подій та можливість отримання економічного ефекту від впровадження методів DSM.

У рамках розглядання електротехнічної системи генерації та споживання MicroGrid найбільш



перспективним напрямом є Load Management. Задачею загальної системи керування MicroGrid є постійна оцінка і розподіл пріоритетів навантажень для забезпечення узгодженого керування режимами роботи та балансу енергетичних потоків. Для сучасних MicroGrid з високим ступенем насиченості різнорідним електротехнічним обладнанням важливим є забезпечення швидкодіючої обробки даних та вироблення керуючих впливів, а також реалізація керування з урахуванням вартісних факторів [7].

III. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Існуючі підходи до створення систем керування електроспоживанням забезпечують ефективність роботи окремих пристроїв і систем, проте не в змозі забезпечити узгоджене комплексне керування за єдиним критерієм - мінімізацією ресурсів чи вартісних витрат користувача. Необхідною умовою реалізації узгодженого керування є наявність інформаційних зв'язків між всіма елементами загальної системи MicroGrid.

Тому розробка алгоритмів ефективного використання електроенергії в локальних об'єктах типу MicroGrid із забезпеченням зменшення витрат і ресурсів є актуальною задачею [1].

IV. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Під час розробки системи керування електроживленням розглядаються централізований, децентралізований або змішаний способи керування [8,9]. В будь-якому способі важливим є визначення критерію ефективності, який був би спільним для різних задач керування і дозволяв проводити комплексну оцінку стану системи електроспоживання MicroGrid. Достатньо універсальним в якості такого критерію є інтегральний вартісний параметр, який дає змогу оцінити витрати, необхідні для вироблення та споживання електричної енергії, а в подальшому – мінімізувати ці витрати.

Результатом розв'язання задачі оптимізації, де в якості критерію використовується вартість, є оптимальна функція керування системою в цілому (при використанні теорії загальної рівноваги) [10]. Формування цієї функції здійснюється шляхом поєднання математичних рівнянь, які описують технічні аспекти функціонування електротехнічних пристроїв, із рівняннями економічної теорії (зокрема, теорії загальної рівноваги на спільному ринку, де в якості товару розглядається вироблена та спожита електрична енергія).

У загальному випадку MicroGrid містить різні типи навантажень та генераторів електричної енергії, які разом із акумуляторними батареями та перетворювальними пристроями різних типів утворюють спільний локальний «ринок» електричної енергії.

Якщо в якості критерію оптимального керування обрано інтегральний вартісний показник, то для кожного електротехнічного пристрою вирішується задача мінімізації витрат без зниження ефективності функціонування та порушення режимів роботи [10]. Інакше кажучи, керування має забезпечувати виконання належної корисної роботи виконавчих

пристроїв у заданих межах, при цьому не повинна погіршуватись комфортність споживача.

На рис.1 наведено модель загальної рівноваги, де продукцією виступає електрична енергія.

Окремим випадком електротехнічного пристрою, що входить до складу MicroGrid, а його модель – відповідно до складу моделі загальної рівноваги на локальному ринку електричної енергії, є акумуляторна батарея (АБ). Зазначимо, що під час заряду АБ виступає як споживач електричної енергії, а під час розряду – як альтернативне джерело енергії, що має відобразитися у двох відповідних моделях, які є складовими моделі загальної рівноваги.

Під час заряду АБ, очевидно, не генерує енергію, отже, прибуток від її функціонування відсутній:  $\Delta S = 0$ . В режимі заряду комбінована електро-вартісна модель АБ має вигляд:

$$\begin{cases} U_{AB}(t, \Delta S) = U_0 e^{\frac{i_3 t_3}{Q}} \\ I_S(t) = -(U_3 i_3 t_3 c_1 + z \cdot c_2) \end{cases}, \quad (1)$$

де  $U_0$  - мінімальна напруга на розрядженій АБ;  $U_3$  - напруга заряду;  $i_3$  - струм заряду;  $t_3$  - час заряду;  $c_1$  - діючий тариф на електроенергію під час заряду;  $z c_2$  - вартісні витрати на інші ресурси (наприклад, обслуговування). На рис.2 наведено графік часової залежності вартісних витрат при заряді акумуляторної батареї

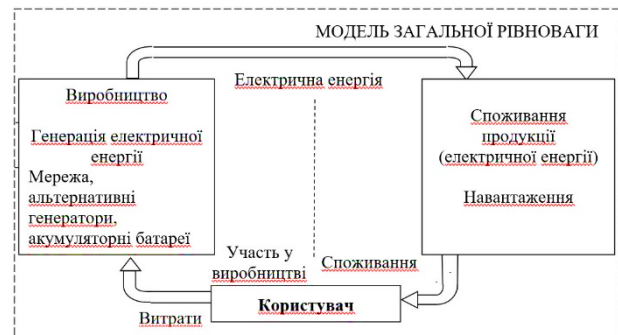


Рис.1 Модель загальної рівноваги виробництва та споживання електроенергії

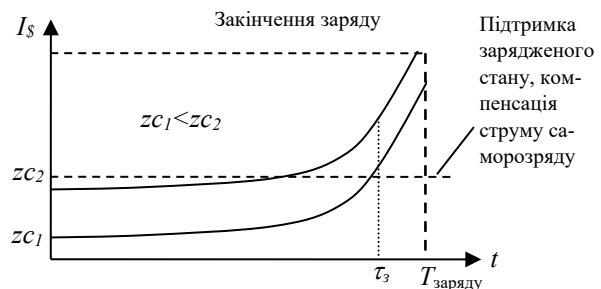


Рис.2 Часова залежність вартісних витрат при заряді акумуляторної батареї

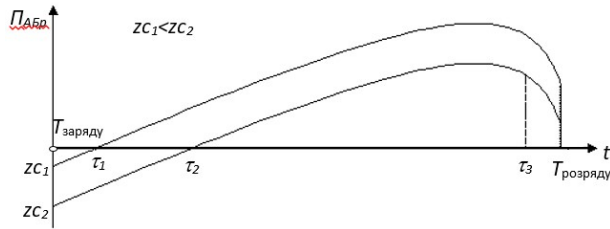


Рис.3 Графік часової залежності вартісного прибутку при розряді акумуляторної батареї

В режимі розряду АБ являє собою джерело енергії, а отже, з економічної точки зору створює потенційний прибуток від реалізації «товару». При цьому електро-вартісна модель має вигляд:

$$\begin{cases} U_{AB}(t, \Delta\$) = U_{ном} \cdot \frac{i_p}{Q} \sqrt{\left(\frac{Q}{i_p}\right)^2 - t_p^2} \\ \Pi_{ABp} = U_{AB}(t) \cdot i_p \cdot t_p \cdot c_{AB} - z \cdot c_2 \end{cases} \quad (2)$$

де  $U_{ном}$  - номінальна напруга АБ;  $i_p$  - струм розряду;  $t_p$  - час розряду. Графік часової залежності вартісного прибутку при використанні АБ наведено на рис. 3.

Рис.3 свідчить про те, що вартісний прибуток можна отримати, коли час роботи АБ перевищує деяке мінімальне значення  $\tau$ , що залежить від витрат на обслуговування  $zc$  і визначається наступним чином:

$$\tau_{1,2} = \frac{zc_{1,2}}{U_{AB}(t, \Delta\$) i_p c_{AB}} \quad (3)$$

Час отримання прибутку від АБ обмежений, оскільки необхідно обирати такий робочий режим, щоб час заряду не перевищував деяке задане значення, а час розряду наближався до  $\tau_3$ .

Для всіх інших пристроїв у складі MicroGrid також будуються електро-вартісні моделі: для джерел енергії – моделі «виробництва товару», для навантажень – моделі «споживання» [1].

При розробці загального алгоритму керування MicroGrid необхідно проаналізувати та оцінити всі можливі режими роботи. За допомогою методів комбінаторики формується таблиця режимів MicroGrid, в якій вказуються стани всіх пристроїв. З таблиці режимів згодом виключаються варіанти, що не можуть бути фізично реалізовані. Таблиця станів формується з використанням наступних логічних функцій:

- функція стану джерела енергії:

$$M_i = \begin{cases} "1", i - \text{те джерело ввімкнено} \\ "0", i - \text{те джерело вимкнено,} \end{cases} \quad (4)$$

- функція стану навантаження:

$$C_j = \begin{cases} "1", j - \text{те навантаження ввімкнено} \\ "0", j - \text{те навантаження вимкнено.} \end{cases} \quad (5)$$

Для згаданого прикладу в якості  $i$ -го джерела розглядається акумуляторна батарея в режимі розряду (АБр), а в якості  $j$ -го навантаження – АБ в режимі заряду (АБз).

Сформулюємо логічні умови виключення деяких неможливих режимів:

а) не ввімкнено жодного джерела і жодного навантаження:

$$M_i = 0, C_j = 0 \rightarrow \overline{M_i + C_j} = 1 \quad (6)$$

б) одночасний заряд і розряд акумуляторної батареї, або акумуляторна батарея не розряджається і не заряджається:

$$\begin{cases} M_{ABp} = 0, C_{ABz} = 0 \\ M_{ABp} = 1, C_{ABz} = 1 \end{cases} \rightarrow \overline{M_{ABp} \oplus C_{ABz}} = 1 \quad (7)$$

Розглянемо таблицю режимів для MicroGrid, до складу якого входять центральна електрична мережа, фотобатарея (ФБ), АБ (в режимі заряду АБз або розряду АБр) та одне навантаження. Отже, кількість можливих режимів становить  $N_{ст} = 2^5 = 32$ . Після виключення неможливих отримаємо 15 режимів, наведені у табл.1, де „0” означає, що пристрій ввімкнено, „1” – вимкнено. Під неможливими розуміються стани, коли жоден пристрій не працює; навантаження не ввімкнено і АБ розряджається; АБ заряджається, але жодне джерело енергії не підключене; АБ включена одночасно на заряд і розряд.

Основна задача алгоритму керування – вибір режиму з мінімальними вартісними витратами.

При виборі режиму беруться до уваги характер навантаження (RL, RC або RL+RC), а також види під'єднаних генераторів (мережа, фотобатарея і акумуляторна батарея в двох режимах роботи). Сформуємо шляхи передачі енергії з наявних генераторів та навантажень в залежності від балансу потужностей генерації та споживання ( $W_H \leq W_{\Sigma r_2 - r_F}$ ). На рис. 4. показано схему шляхів передачі енергії.

ТАБЛИЦЯ 1. Можливі режими локального об'єкту

№	Мережа	ФБ	АБз	АБр	Навантаження
1	0	0	0	1	1
2	0	1	0	0	1
3	0	1	0	1	1
4	0	1	1	0	0
5	0	1	1	0	1
6	1	0	0	0	1
7	1	0	0	1	0
8	1	0	0	1	1
9	1	0	1	0	0
10	1	0	1	0	1
11	1	1	0	0	1
12	1	1	0	1	0
13	1	1	0	1	1
14	1	1	1	0	0
15	1	1	1	0	1

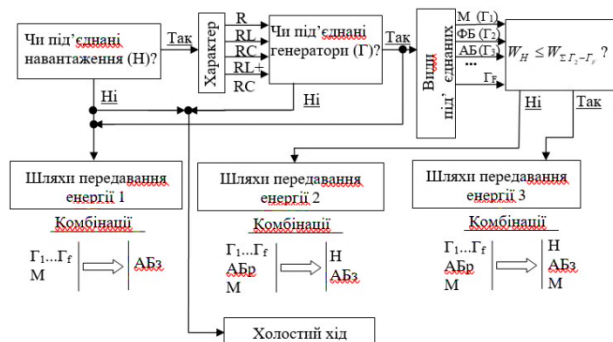


Рис.4 Схема шляхів передавання енергії MicroGrid

На базі схеми шляхів передавання система керування отримує необхідну інформацію щодо вибору режиму роботи, який відповідає балансу потужностей джерел енергії та навантажень, а також стану акумуляторної батареї.

Приклад. Система керування може увімкнути акумуляторну батарею (в режимі розряду) і RC-навантаження ( $ABp \rightarrow RC$ , режим №4) або мережу і RC-навантаження ( $M \rightarrow RC$ , режим №18). Отримуємо наступні системи рівнянь:

- для режиму  $ABp \rightarrow RC$ :

$$\begin{cases} U_{AB}(t, \Delta S) = U_{ном} \cdot \frac{i_p}{Q} \sqrt{\left(\frac{Q}{i_p}\right)^2 - t_p^2} \\ P_{ABp} = U_{AB}(t) \cdot i_p \cdot t_p \cdot c_{AB} - z \cdot c_2 \end{cases} \quad (8)$$

- для режиму Мережа  $\rightarrow RC$ :

$$\begin{cases} \begin{cases} U(t, \Delta S) = R(t, \Delta S) \cdot C(t, \Delta S) \frac{dU(t, \Delta S)}{dt} + U_c(t, \Delta S) \\ \Delta S = I_S(t) - Y(t, \Delta S) P(t) \rightarrow 0 \end{cases} \\ P = -I_S(t) = -\frac{[U(t, \Delta S)]^2}{R(t, \Delta S)} - e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot p_j \cdot t + z c_{RC} \end{cases} \quad (9)$$

де  $p_j$  - поточний тариф електромережі.

Вибір режиму реалізується за критерієм максимізації прибутку  $max \Pi$ .

Алгоритм вибору оптимального режиму роботи має наступні етапи:

- 1) Визначення інтервалів з максимальним тарифом  $p_j$  на електроенергію в мережі та інтервалів з максимальним споживанням електроенергії РН.
- 2) Визначення інтервалів розряду акумуляторної батареї за наступними умовами:
  - а) максимальний тариф на енергію мережі;
  - б) максимальне споживання енергії;

Визначення інтервалів заряду АБ (всі інші інтервали).

- 3) Визначення варіантів режимів системи на кожному інтервалі з урахуванням графів балансу потужностей, таблиці можливих

станів і режимів роботи акумуляторної батареї.

- 4) Визначення прибутку  $\Pi$  для кожного варіанту роботи.
- 5) Вибір режиму роботи на кожному інтервалі, що відповідає умові  $max \Pi$ .
- 6) Перехід до наступного інтервалу.

#### ВИСНОВКИ

Запропонований підхід до побудови системи керування електроспоживанням розглядає MicroGrid як локальний "ринок" виробництва і споживання енергії. Він дозволяє керувати режимами роботи з урахуванням балансу потужностей і витрат на генерацію і споживання, а також характеру під'єднаних навантажень і генераторів. Поєднання математичних рівнянь, що описують електротехнічні режими роботи пристроїв, із рівняннями теорії оптимізації дозволяють побудувати електровартісні моделі окремих джерел та навантажень, а також спільну модель загальної рівноваги.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Y. S. Petergerya, V. Y. Zhujkov, and T. O. Tereshhenko, *Intelektualni systemy zabezpechennya energoberezhennya zhytlovyh budynkiv* [Intelligent energy saving systems for residential buildings], Kiev: Media-PRESS, 2008.
- [2] Z. Hu, D. Moskovitz, and J. Zhao, *Demand-Side Management in China's Restructured Power Industry*, no. December. 2005.
- [3] "Model demand side management regulations," 2010. [Online]. Available: <http://www.forumofregulators.gov.in/Data/study/Model DSM Regulations.pdf>.
- [4] D. L. Ha, S. Ploix, E. Zamai, and M. Jacomino, "Realtime dynamic optimization for demand-side load management," *Int. J. Manag. Sci. Eng. Manag.*, vol. 3, no. 4, pp. 243–252, 2008, DOI: [10.1080/17509653.2008.10671051](https://doi.org/10.1080/17509653.2008.10671051)
- [5] V. O. Barannik and M. H. Zemlyanyy, "Strategiya ta praktyka upravlinnya palyvno-energetychnym kompleksom. Dosvid Ukrainy," 2002. [Online]. Available: <http://www.db.niss.gov.ua/docs/energy/58.htm>.
- [6] S. F. Yermilov, "Derzhavna polityka energoefektyvnosti v ukrayinskomu ta yevropejskomu konteksti," 2013. [Online]. Available: [http://www.esco-eco-sys.narod.ru/2011\\_2/art044.pdf](http://www.esco-eco-sys.narod.ru/2011_2/art044.pdf).
- [7] B. Moran, "Microgrid load management and control strategies," in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 2016, vol. 2016–July, DOI: [10.1109/TDC.2016.7520025](https://doi.org/10.1109/TDC.2016.7520025)
- [8] Yu. B. Germeyer, *Igry s neprotivopolozhnyimi interesami* [Games with nonconflicting interests]. Moscow: Nauka, 1976.
- [9] V. E. Khodakov, V. G. Sherstok, K. G. Stepanskiy, A. A. Didak, and A. M. Martynov, "Metody otsenki stepeni protivorechivosti znaniy s pomoshchyu otnosheniya dissonansa [Methods for assessing the degree of inconsistency of knowledge using the dissonance relationship]," *Radioelektronika i Inform.*, no. 1, pp. 129–132, 1998.
- [10] M. D. Intriligator, *Mathematical Optimization and Economic Theory*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1971, DOI: [10.2307/1238740](https://doi.org/10.2307/1238740)



УДК 621.316

# Управление электропотреблением MicroGrid по стоимостному критерию

Пікож А. В., ORCID [0000-0003-3350-3627](https://orcid.org/0000-0003-3350-3627)

e-mail [pikozh13@gmail.com](mailto:pikozh13@gmail.com)

Кафедра промышленной электроники [www.kaf-pe.kpi.ua](http://www.kaf-pe.kpi.ua)

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» [www.kpi.ua](http://www.kpi.ua)

Киев, Украина

*Реферат*—В статье рассмотрена задача управления электропотреблением электротехнической системы распределённой генерации MicroGrid по критерию минимизации стоимостных затрат. В основе управления лежит объединение математических положений задачи оптимизации в экономическом и электротехническом аспектах функционирования MicroGrid. Для описания системы была рассмотрена модель общего равновесия. На примере аккумуляторной батареи построена объединённая система экономических и электротехнических уравнений. Описан анализ возможных режимов работы, схема путей передачи энергии от источников к нагрузкам и реализация критерия максимальной прибыли от функционирования электротехнического оборудования.

*Ключевые слова* – MicroGrid; энергоэффективность; управление электропотреблением; экономическая теория; общее равновесие.



UDC 621.316

# Power management in MicroGrid by cost criterion

A. V. Pikozh, ORCID [0000-0003-3350-3627](https://orcid.org/0000-0003-3350-3627)e-mail [pikozh13@gmail.com](mailto:pikozh13@gmail.com)Department of Industrial Electronics [www.kaf-pe.kpi.ua](http://www.kaf-pe.kpi.ua)

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» [www.kpi.ua](http://www.kpi.ua)

Kyiv, Ukraine

**Abstract**— This paper presents the task of power consumption control system in electrotechnical system MicroGrid with distributed generation. The control is organized by the criterion of cost minimization. One of the modern approaches to energy consumption control is DSM (Demand-Side Management) that includes for control means: Load management, Energy efficiency, Energy conservation, and Fuel substitution. For MicroGrid the most perspective and achievable mean is the Load Management. The task of the overall MicroGrid control system is to continuously evaluate and prioritize loads to provide consistent and accorded management of working regimes and balance of power flows. The basis of management is the combination of the mathematical basis of optimization task in economics and electrotechnical aspects of MicroGrid functioning. The result of solving an optimization task, in which cost is used as a criterion, is the optimal control function of the system as a whole. The model of general equilibrium is considered for the description of the system. As an example of alternative energy source in MicroGrid, accumulator battery was considered and a combined system of economic and electrical equations was built. Electrical-cost models was also being built for all other MicroGrid devices: for energy sources – like models of "production of good", for loads – the "consumption" model. All possible modes of operation need to be analyzed and evaluated, while developing a general MicroGrid control algorithm. Using combinatorics methods, a table of MicroGrid modes was created, in which the states of all devices are specified. After that, an analysis of all modes occurs, resulting in a table of possible modes. Then there the mode with minimal cost function should be chosen. The nature of the load, as well as the types of connected generators (central power grid, PV cells and accumulator battery in two modes) are taken into account. By generating the transmission paths from available generators and loads depending on the balance of generating and consumption capacities, the control system receives the necessary information on selecting a mode of operation that corresponds to the balance of power sources and loads, as well as the state of the battery. Finally, there is a selection of mode for the criterion of maximizing profit. Also, an algorithm for selecting the optimal mode of operation describing the stages was considered. The proposed approach to construction of power management system considers MicroGrid as a local "market" for production and energy consumption. It allows to manage the modes of work, taking into account the balance of power and costs of generation and consumption, as well as the nature of the connected loads and generators.

**Keywords** – MicroGrid; energy efficiency; energy consumption control; economic theory; general equilibrium theory.

