

## ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ЕКОНОМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІЗОЛЬОВАНИХ MICROGRID

**Ю.С. Ямненко\***, докт.техн.наук, **Т.О. Терещенко\*\***, докт.техн.наук, **І.С. Федін\*\*\***, **Л.Є. Клепач\*\*\*\***  
НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,  
e-mail: [tereshchenko50.t.a@gmail.com](mailto:tereshchenko50.t.a@gmail.com)

*Досліджено вплив параметрів якості електроенергії на економічні характеристики систем розподіленої генерації, зокрема, на дохід від використання відновлювальних джерел живлення в ізольованих MicroGrid типу айленд. Для цього методом Лагранжа вирішено задачу максимізації доходу з урахуванням обмежень конкретної системи живлення за різних значень коефіцієнтів корисної дії та нелінійних спотворень напруги, що живить навантаження змінного струму. Вихідними даними, крім кількості генераторів, навантажень та характеристик їхніх режимів, є прогноз споживання/генерації та локальні «умовні» тарифи на електроенергію відновлювальних джерел у складі MicroGrid. Результатом рішення є визначення коефіцієнтів використання генераторів та навантажень на кожному інтервалі добової діаграми. Отримані коефіцієнти визначають або включений/відключений стан, або частку енергії, на яку працює елемент системи живлення на інтервалі та слугують основою алгоритму керування системою MicroGrid за вартісним критерієм.*

Бібл. 7, рис. 1.

**Ключові слова:** MicroGrid типу айленд, системи розподіленої генерації, відновлювані джерела енергії, коефіцієнти корисної дії та нелінійних спотворень

MicroGrid типу айленд [1] – це автономні системи електроживлення, не пов'язані між собою традиційною комунальною мережею. Згідно з результатами досліджень за програмою Microgrid Deployment Tracker 2Q19, проведеними компанією Navigant Research, в цю категорію потрапляє близько 41% всього світового ринку Microgrid [1]. Системи типу айленд широко розповсюджені в промислово розвинених країнах, які часто зазнають впливу стихійного лиха, мають пересічений ландшафт або острівне розташування, що ускладнює застосування традиційних рішень з енергопостачання. Для таких систем MicroGrid з альтернативними та відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) актуальним є пошук шляхів підвищення вартісної та економічної ефективності використання енергоресурсів із одночасним збереженням необхідних параметрів якості електроенергії.

Метою роботи є аналіз впливу параметрів якості (коефіцієнтів корисної дії (ККД) та коефіцієнтів гармонічних спотворень напруги (*THD* – Total Harmonic Distortion) на дохід від використання ВДЕ та розробка способу керування навантаженнями і генераторами MicroGrid із максимізацією доходної цільової функції.

Дохід визначається як різниця між доходами від ВДЕ та витратами в навантаженнях MicroGrid. Доходна частина визначається як умовний тариф електроенергії, помножений на відповідний обсяг електроенергії від ВДЕ. Витрати визначаються як сума добутоків потужностей навантажень та ціни на електроенергію для кожного інтервалу часової діаграми.

Керування складовими елементами MicroGrid має здійснюватися відповідно до поставленої екстремальної задачі із заданим вартісним критерієм ефективності з урахуванням обмежень. Для цього попередньо необхідно вирішити задачі прогнозування споживання і генерації енергії та визначити локальні «умовні» тарифи на електроенергію від ВДЕ задля забезпечення внутрішнього балансу вартісних показників айленд-систем [2]. Вихідними даними для алгоритмів керування MicroGrid, крім кількості генераторів, навантажень та характеристик їхніх режимів, є прогноз споживання/генерації на певний період (наприклад, добу) та вартість електроенергії [3]. Прогнозні дані постійно коригуються у відповідності з вимірними у реальному часі значеннями.

Під час побудови алгоритмів керування режимами навантажень та генераторів, які забезпечують максимізацію однієї з заданих величин (наприклад, потужності чи прибутку) або мінімізацію (наприклад, витрат) з урахуванням обмежень, використовуються математичні методи знаходження

---

© Ямненко Ю.С., Терещенко Т.О., Федін І.С., Клепач Л.Є., 2020  
ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0002-9796-6420>;\*\*<https://orcid.org/0000-0003-4009-2854>;  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0003-0264-5067>\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-3026-3755>

умовного локального екстремуму, зокрема метод золотого перерізу, метод Ньютона (надалі розвинутий у метод хорд), симплекс-метод, метод невизначених коефіцієнтів Лагранжа [4]. Для вирішення задачі максимізації оберемо останній, який дає точний розв'язок та працює з виразами будь-якого порядку. Він дає змогу звести задачу на відшукування умовного екстремуму (екстремуму за заданих умов) до задачі на знаходження безумовного екстремуму.

Запишемо екстремальну задачу для  $M$  первинних відновлюваних джерел енергії (сонячних панелей та вітрогенераторів),  $W$  вторинних джерел (акумуляторів в режимі розряду),  $L$  регульованих навантажень та  $N$  нерегульованих навантажень у наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^s \left( \sum_{w=0}^W \eta_{\partial w,i} P_{\partial w,i} g_{w,i} + \sum_{j=0}^M G_{j,i} P_{\text{пд}j,i} - \sum_{k=0}^L U_{k,i} P_{\text{нк},i} - \sum_{p=0}^N V_{p,i} P_{\text{ck},i} \right) \Delta t C_{\partial w,i} \rightarrow \max \\ \sum_{k=0}^L \frac{U_{k,i} P_{\text{нк},i}}{\eta_{\text{нк},i}} + \sum_{p=0}^N V_{p,i} P_{\text{ck},i} = \sum_{w=0}^W \eta_{\partial w,i} P_{\partial w,i} g_{w,i} + \sum_{j=0}^M G_{j,i} P_{\text{пд}j,i} \Big|_{i=1}^s \\ \sum_{k=0}^L \eta_{\text{нк},i} U_{k,i} P_{\text{нк},i} = \text{const} \Big|_{i=1}^s \end{array} \right. .$$

Перше рівняння системи описує умову максимального прибутку від використання генераторів, друге відображає баланс потужностей, третє – обмеження на задану роботу на інтервалах (залежить від призначення системи електроживлення та її елементів). У цій системі прийнято наступні позначення:  $C_{\partial w,i}$  – ціна на електроенергію (визначається тарифами – заданими або локальними «умовними» для MicroGrid типу айленд);  $\Delta t$  – тривалість інтервалу (наприклад, 1 година);  $s$  – кількість інтервалів за замовчанням (наприклад, 24 для однієї доби);  $P_{\text{ck},i}$  та  $P_{\text{нк},i}$  – потужність регульованих і нерегульованих навантажень відповідно;  $P_{\partial w,i}$  та  $P_{\text{пд}j,i}$  – потужність вторинних та первинних джерел відповідно;  $\eta_{\text{нк},i}$  та  $\eta_{\partial w,i}$  – ККД навантажень та генераторів;  $i=1 \dots s$ .

Розв'язком системи є значення чотирьох типів коефіцієнтів на  $i$ -му інтервалі добової діаграми, за яких досягається максимальний дохід від використання ВДЕ: коефіцієнтів  $G_{j,i}$  ( $j=1, \dots, M$ ) використання  $j$ -го первинного джерела ВДЕ (1 – якщо підключено та 0 – якщо ні); коефіцієнтів,  $g_{w,i}$  ( $w=1, \dots, W$ ) використання вторинного джерела у діапазоні  $[0;1]$ ; коефіцієнтів  $V_{p,i}$  ( $p=1, \dots, N$ ) для нерегульованих навантажень (1 – якщо підключено та 0 – якщо ні); коефіцієнтів  $U_{k,i}$  ( $k=1, \dots, L$ ) для регульованих навантажень у діапазоні  $[0;1]$ ; ці значення відображають, на яку частку від максимальної потужності працює споживач на даному інтервалі.

Для кожного коефіцієнту визначаються добові діаграми. Розраховані значення є основою алгоритмів керування джерелами і навантаженнями на базі прогнозу електроспоживання та генерації електроенергії від ВДЕ, причому прогнозні значення постійно коригуються. Таким чином, рішення екстремальної задачі зводиться до рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь традиційними методами.

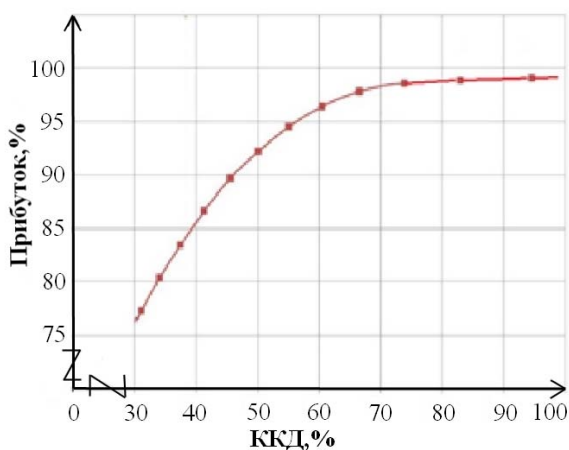


Рис. 1

Вплив ККД на дохід. Зазначимо, що згідно (1) в оптимізаційну задачу входять ККД джерел та генераторів, тому вплив ККД на дохід можна знайти, вирішивши рівняння (1) для різних значень ККД.

Для спрощення оцінки розглянемо рішення рівняння (1) на одному інтервалі для одного навантаження. На рис. 1 показано залежність відносного доходу від ВДЕ для систем з різними ККД. За 100% прийнято систему з ККД, близьким до 1. Характеристики навантажень взято з таблиці 3.4 роботи [5].

З рис. 1 видно, що при високих значеннях ККД (0,7-0,9) відносний дохід майже не змінюється. Чим нижче ККД вихідного каскаду системи живлення, тим

меншим є дохід. За ККД=60% дохід зменшується на 7%; за 30% – на 25% в порівнянні з системою з ККД, близьким до 1.

**Вплив THD.** У MicroGrid типу айленд для узгодження мереж DC/AC використовуються трифазні багаторівневі інвертори. Значення THD відомих схем лежить в межах 30-22% (для 5-рівневого інвертора). Авторами розроблено спосіб формування напруги багаторівневого інвертора, який забезпечує зменшення рівня гармонічного спотворення вихідної напруги схемами до 14,73% (без врахування вихідних фільтрів) [6]. Вплив THD перетворювачів на дохід від ВДЕ в автономних системах оцінимо наступним чином: обчислимо втрати потужності  $\Delta P$  від вищих гармонік [7] та відповідне зменшення ККД як  $\Delta \eta_{0k,i} = \Delta P / P_{in}$ ; вирішимо оптимізаційну задачу з новими значеннями ККД  $\Delta \eta_{nk,i} = \eta_{0k,i} - \Delta \eta_{0k,i}$ . В результаті обчислень визначено, що зменшення THD для вихідного інвертора системи живлення з 30,06% (аналог) до 14,73% (винахід [6]) призводить до збільшення доходу від використання ВДЕ в межах від 1 до 5% в залежності від початкових втрат потужності, не пов'язаних з вищими гармоніками.

**Висновки.** Розроблено спосіб керування об'єктами MicroGrid типу айленд за вартісним критерієм на базі прогнозу електроспоживання та генерації електроенергії від ВДЕ, який полягає у вирішенні оптимізаційної задачі для визначення коефіцієнтів використання генераторів і навантажень та керування ними. Досліджено вплив ККД та THD на дохід від використання ВДЕ. Продемонстровано характер зменшення рівня доходу від застосування ВДЕ у разі зменшення ККД: за значення ККД=60% дохід зменшується на 7%; за 30% – на 25% у порівнянні з системою з ККД, близьким до 1. Визначено збільшення доходу від використання ВДЕ зі зменшеним рівнем THD, що лежить в межах 1-5% в залежності від початкових втрат потужності, не пов'язаних з вищими гармоніками.

1. Taking Stock of Leading Innovators in Global Remote Microgrid Markets. MGP Newsletter. 2019.  
URL: <https://minigrids.org/taking-stock-of-leading-innovators-in-global-remote-microgrid-markets/>
2. Zhuikov V., Yamnenko J., Tereshchenko T., Klepach L., Voiko I. Static and Dynamic Tariffing Electric Power Autonomous Microgrid. *Journal of Present Problems of Power System Control, Scientific Papers of the Department of Electrical Power Engineering of Wrocław University of Technology*. 2016. No 7. Pp. 29-41.  
URL: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-74a78806-232d-49fa-a1f0-e91d6662ea0d>
3. Клепач Л.С. Керування електроспоживанням за техніко-економічними показниками. VIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених *Електроніка-2015*. Київ. 2015. С. 227–231.  
URL: <http://elconf.kpi.ua/wp-content/uploads/2016/03/ELCONF-2015.pdf>
4. Акулич И. Л. Математическое программирование в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 1986. 319 с.
5. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення.  
URL: <http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/92.1>
6. Терещенко Т.О., Ямненко Ю.С., Лайкова Л.Г., Федін І.С. Спосіб формування трифазної напруги. Патент України. № 136713. 2019.
7. Півняк Г.Г., Жежеленко І.В., Папаїка Ю.А. Енергетична ефективність систем електропостачання. Дніпро: НТУ «ДП», 2018. 148 с.

УДК 621.314:657

## **ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОЛИРОВАННЫХ MICROGRID**

**Ямненко Ю.С.,** докт. техн. наук, **Терещенко Т.А.,** докт. техн. наук, **Федин И.С.,** Клепач Л.Е.  
НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,  
e-mail: [tereshchenko50.t.a@gmail.com](mailto:tereshchenko50.t.a@gmail.com)

*Исследовано влияние параметров качества электроэнергии на экономические характеристики систем распределенной генерации, в частности, на доход от использования возобновляемых источников питания в изолированных MicroGrid типа айленд. Для этого методом Лагранжа решена задача максимизации дохода с учетом ограничений конкретной системы питания при различных значениях коэффициентов полезного действия и нелинейных искажений напряжения, питающего нагрузку переменного тока. Исходными данными, кроме количества генераторов, нагрузок и характеристик их режимов, является прогноз потребления/генерации и локальный «условный» тариф на электроэнергию возобновляемых источников. Результатом решения является определение коэффициентов использования генераторов и нагрузок на каждом интервале*

суточной диаграммы. Полученные коэффициенты определяют состояние «включе-но/отключено» или долю энергии, на которую работает элемент системы питания на данном интервале, и служат основой алгоритмов управления системой MicroGrid по стоимостному критерию. Библ. 7, рис. 1.

**Ключевые слова:** MicroGrid типа айленд, системы распределенной генерации, возобновляемые источники энергии, коэффициенты полезного действия и нелинейных искажений

УДК 621.314:657

## THE INFLUENCE OF ELECTRICAL ENERGY QUALITY TO ECONOMIC CHARACTERISTICS OF ISOLATED MICROGRID

Yamnenko Y.S., Tereshchenko T.O., Fedin I.S., Klepach L.E.

National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

37, Peremohy ave., Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: [tereshchenko50.t.a@gmail.com](mailto:tereshchenko50.t.a@gmail.com)

*The impact of quality parameters of electrical energy to the economic characteristics of distributed generation systems, in particular on the profits from renewable power sources in isolated islanded MicroGrid, has been investigated. For this purpose, the Lagrange method was used to solve the task of profit maximization taking into account the limitations of the power supply system at different values of efficiency factors and nonlinear distortions of the AC supply load. The initial data for this task includes, in addition to the number of generators, loads and characteristics of their modes, also the forecasted values of consumption/generation and the local “conditional” cost of renewable energy sources. The result of the solution is the determination of generator coefficients and loads at each interval of the daily chart. The obtained coefficients determine on/off state or share of energy on which the power supply system element is working in the interval. These resulting values are used as the basis of the algorithm to control MicroGrid system by cost criterion. References 7, figures 1.*

**Keywords:** islanded MicroGrid, distributed generation systems, renewable energy sources, efficiency factors and nonlinear distortions

1. Taking Stock of Leading Innovators in Global Remote Microgrid Markets. MGP Newsletter. 2019.  
URL: <https://minigrids.org/taking-stock-of-leading-innovators-in-global-remote-microgrid-markets/>
2. Zhuikov V., Yamnenko J., Tereshchenko T., Klepach L., Boiko I. Static and Dynamic Tariffing Electric Power Autonomous Microgrid. *Journal of Present Problems of Power System Control, Scientific Papers of the Department of Electrical Power Engineering of Wroclaw University of Technology*. 2016. No 7. Pp. 29-41.  
URL: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-74a78806-232d-49fa-a1f0-e91d6662ea0d>
3. Klepach L. Power consumption management according to technical and economic indicators. VIII International Scientific and Technical Conference of Young Scientists *Electronics-2015*. Kyiv. 2015. Pp. 227–231 (Ukr)  
URL: <http://elconf.kpi.ua/wp-content/uploads/2016/03/ELCONF-2015.pdf>
4. Akulich I.L. *Mathematical programming in examples and tasks*. Moskva: Vysshaya shkola, 1986. 319 p. (Rus)
5. DBN V.2.5-23:2010. Design of electrical equipment for civil purposes. (Rus)  
URL: <http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/92.1>
6. Tereshchenko T.O., Yamnenko Yu.S., Laikova L.H., Fedin I.S. Method of forming three-phase voltage. Patent of Ukraine. No 136713. 2019 (Ukr) URL: <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1374162/>
7. Pivniak H.H., Zhezhelenko I.V., Papaika Yu.A. Energy efficiency of power supply systems. Dnipro: NTU DP, 2018. 148 p. (Ukr)

Надійшла 28.02.2020

Остаточний варіант 06.05.2020