

## ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТ ПЕРВИННОГО ПАЛИВА В ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

### Сергій Денисюк

доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, [spdens@ukr.net](mailto:spdens@ukr.net)

ORCID: 0000-0002-6299-3680

### Галина Белоха

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, [pointage13@gmail.com](mailto:pointage13@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-4277-367X

Локальні системи електроживлення (Microgrid) є системами з розосередженою генерацією з відновлювальними джерелами та є незалежними виробниками електроенергії, які постачають її за угодами про закупівлю електроенергії. Microgrid є багатоцільовою системою, яка займається технічними, економічними та екологічними питаннями. Дизель-генератори використовуються в локальних системах завдяки компактній конструкції, високій питомій потужності та низькій початковій вартості. Вартість електроенергії в локальних системах з дизель-генераторами у складі, залежить насамперед від питомих витрат первинного палива дизель-генераторів. Для вирішення оптимізаційної задачі розроблено алгоритм, який на кожному інтервалі часу з урахуванням попередніх значень потужностей генераторів для забезпечення поточного значення потужності навантаження встановлює необхідні величини потужностей дизель-генераторів. Розглядається локальна система на основі трьох дизель-генераторів з'єднаних паралельно на різну максимальну потужність з різними кривими витрат первинного палива. Паралельна робота декількох генераторів необхідна для підвищення потужності, забезпечення підвищеної надійності живлення, безперебійного живлення на період проведення технічного обслуговування основного джерела електроживлення, компенсувати зростання споживаної потужності підключеним навантаженням. На основі розробленого алгоритму побудовано програму на мові програмування Matlab. При оптимальному розподілі витрати первинного палива для розглянутої локальної системи електроживлення становила 5,8% в порівнянні з рівномірним розподілом потужності. Економічний ефект від оптимізації досягається за рахунок зменшення поточних витрат для збільшення прибутку учасників локальних енергосистем. З соціальної точки зору використання оптимізаційних алгоритмів сприяє розвитку локальних енергетичних систем, що дає змогу встановити часткову або повну незалежність від енергопостачальників. З екологічної точки зору використання алгоритмів оптимізації зменшує споживання палива та призводить до скорочення шкідливих викидів.

**Ключові слова:** локальна система, Microgrid, дизель-генератор, витрати палива.

**Вступ.** Локальні системи електроживлення є системами з розосередженою генерацією та є незалежними виробниками електроенергії, які постачають її за угодами про закупівлю електроенергії. Такі системи стали невід'ємною частиною електричної інфраструктури в усьому світі. До локальних систем можна віднести Microgrid – це система з джерелами розосередженої генерації та електричних навантажень, яка може працювати як єдине ціле паралельно з мережею, або незалежно від неї.

Microgrid є багатоцільовою системою, яка займається технічними, економічними та екологічними питаннями. Основними цілями систем керування Microgrid є оптимізація роботи, плану-

вання енергопостачання та надійність системи як у мережевому, так і в автономному режимах [1-4].

Локальні енергетичні системи використовуються для: введення додаткових потужностей у періодично перевантажених мережах; основного електропостачання споживачів в зоні, де немає підключення до мережі [5]; забезпечення аварійного резервного живлення під час перебоїв у мережі [6]; забезпечення електропостачання електроенергією під час, наприклад, музичних фестивалів чи спортивних заходів [7].

У зростанні економічної ефективності Microgrid ключову роль відіграє той факт, що вартість електроенергії, отримана за рахунок власної генерації, виявляється в багатьох

випадках нижчою, ніж ціна електроенергії, купленої на роздрібному ринку та отриманої електричними мережами.

Останнім часом відновлювальні джерела, такі як фотоелектричні та вітряні генератори, широко використовуються для зниження споживання палива для виробництва електроенергії. З практичної погляду як фотоелектрична система, так і вітрова система неспроможні забезпечити безперебійну подачу електроенергії через нестабільність їхнього енергетичного потенціалу, що призводить до відхилень частоти та напруги і, як наслідок, до додаткових відключень, що впливають на надійність електроенергетичних систем [9, 10]. Дизель-генератори (ДГ) широко використовуються як джерело гарантованого живлення, забезпечуючи необхідну загальну потужність установки через паралельне з'єднання декількох генераторів.

Дизель-генератори є одним із підходящих варіантів для локальних систем завдяки компактній конструкції, високій питомій потужності та низькій початковій вартості. Оскільки ціна на викопне паливо в останнє десятиліття зростала, вартість виробництва та обслуговування також збільшилась. Крім того, на вартість експлуатації та технічного обслуговування дизельних генераторів суттєво впливають профілі навантаження, де максимальна ефективність досягається тільки тоді, коли дизельний генератор працює на рівні близькому до його номінальної потужності. Працюючи на режимах, відмінних від номінальних, його ККД знижується.

Підвищення енергоефективності Microgrid з дизель-генераторами вимагає вирішення проблеми оптимізації режимів роботи Microgrid з використанням в якості оптимізаційного критерія зниження витрат первинного палива дизель-генераторів [11].

Необхідність у паралельній роботі декількох генераторів необхідно для підвищення потужності, забезпечення підвищеної надійності живлення, безперебійного живлення на період проведення технічного обслуговування основного джерела електроживлення, компенсувати зростання споживаної потужності підключеним навантаженням.

Структурна схема одного із варіантів локальної системи, яка складається з ДГ1-ДГ3 та вітрогенератора ВГ з перетворювачем частоти ПЧ, які паралельно підключені до навантаження через розподільним пристроєм РП і загальним навантаженням Н (рис. 1).

При живленні навантаження від декількох джерел живлення з різною характеристикою витрат палива від потужності  $B(P)$  стає питання в оптимальному перерозподілу генерування енергії від джерел для зменшення витрат палива, і в наслідок чого вартості.

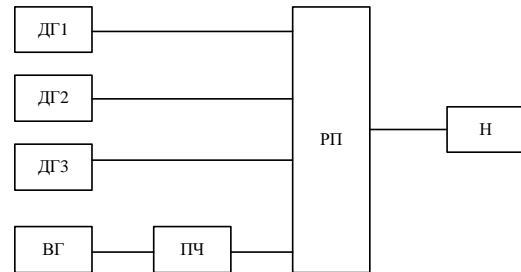


Рис. 1. Гібридна локальна система

**Мета роботи:** аналіз та оптимізація витрат первинного палива при розподіленні потужності між дизель-генераторами в локальній системі Microgrid для покращення техніко-економічних показників.

**Матеріал досліджень.** Алгоритми керування роботою дизель-генераторів базуються на рівнянні збереження енергетичного балансу системи, та мають відмінності в залежності від типів джерел генерації та цілей оптимізації. Загальні алгоритми та методи, що використовуються для управління енергією систем Microgrid та для вирішення завдань однокритеріальної або багатокритеріальної оптимізації, можна класифікувати на дві основні категорії: класичні методи (методи лінійного та нелінійного програмування) та методи штучного інтелекту (методи нечіткої логіки, нейронних мереж). Крім того, алгоритми керування може бути комбінованою формою цих методів [3, 5].

Моделювання питомої витрати палива зазвичай проводиться з використанням поліномів  $B(P) = aP^2 + bP + c$  або третього  $B(P) = aP^3 + bP^2 + cP + d$  порядку наближених до реальних [11]. В [4] пропонується використання кубічної сплайн інтерполяції, що дозволяє точно моделювати криву з мінімальною похибкою.

Для вирішення оптимізаційної задачі розроблено алгоритм, який на кожному інтервалі часу з урахуванням попередніх значень потужностей генераторів для забезпечення поточного значення  $P_n$  встановлює необхідні величини потужностей ДГ.

Розглянемо структуру Microgrid, яка складається з множин генераторів  $\{\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n\}$  та мно-

жин навантажень  $\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$  з однією точкою підключення.

При аналізі та оптимізації прийняті наступні припущення:

1. Втрати в лініях та елементах систем відсутні.

2. Розглядається тільки споживання активної потужності (реактивна потужність та вищі гармоніки відсутні).

3. Враховується, що при  $P_T(t) < P_{n\max}(t)$  відбувається відключення навантаження, а при  $P_{T\max}(t) > P_n(t)$  відключення генераторів.

Рівняння енергетичного балансу системи з урахуванням припущень:

$$\sum_{j=1}^n P_{ДГj}(t) = \sum_{i=1}^m P_{Hi}(t). \quad (1)$$

При нелінійних функціях та при змінній навантаженні стрибкоподібно задача оптимізації витрат палива є більш складною і потребує використання нелінійного програмування для пошуку оптимального розподілення потужностей по генераторам для забезпечення мінімальних витрат первинного палива дизель генераторів.

Для отримання оптимального розподілу графіки залежностей витрат палива від потужності представлені поліномами другого порядку.

Дизель-генератори обрані на різну потужність  $P_1=65$  кВт,  $P_2=85$  кВт,  $P_3=100$  кВт, які мають індивідуальні графіки (рис. 2).

Для добового графіка навантаження представленого у вигляді ступінчатого графіка на 48 інтервалах  $T$  (кожні півгодини) (рис. 3) було проведено розрахунки витрат первинного палива.

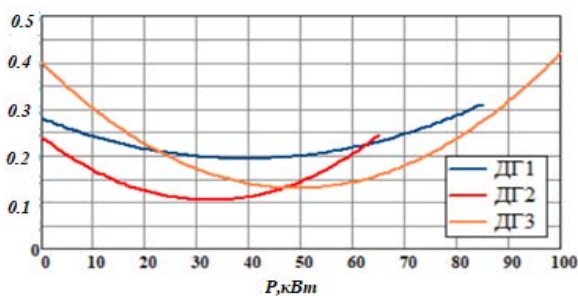


Рис. 2. Витрати первинного палива

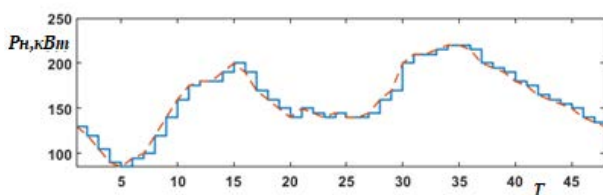


Рис. 3. Добовий графік навантаження

При змінній навантаженні на кожному інтервалі часу  $i$  функція знаходження мінімуму представляє собою суму витрат первинного палива:

$$B_{i\min} = B_1(P_{1(i-1)} + \Delta p_{1i}) + B_2(P_{2(i-1)} + \Delta p_{2i}) + \dots + B_n(P_{n(i-1)} + \Delta p_{ni}) \quad (2)$$

де  $\Delta p_{1i}, \Delta p_{2i}, \Delta p_{ni}$  – величини потужностей на які треба змінити (збільшити або зменшити) потужність кожного генератора.

При цьому функція розраховується при наступних обмеженнях:

$$\begin{cases} \Delta p_{1i} + \Delta p_{2i} + \dots + \Delta p_{ni} = \Delta P_{Hi} \\ -\Delta P_{Hi} \leq \Delta p_{Gi} \leq \Delta P_{Hi} \\ (\Delta p_{Gi} + P_{T(i-1)}) \leq P_{T\max} \end{cases} \quad (3)$$

де  $\Delta P_{Hi} = P_{H(i-1)} - P_{Hi}$  – змінення потужності навантаження,  $\Delta p_{Gi}$  – приріст потужності окремого генератора.

Для оцінки оптимізації побудована крива на рис.4, яка відповідає витратам первинного палива при рівномірному розподілу потужностей за виразом:

$$B_{\text{pien}} = \sum_i^n B_i \left( \frac{P_{Hi}}{n} \right) \quad (4)$$

Графіки розподілення потужностей по кожному генератору представлені на рисунку 5.

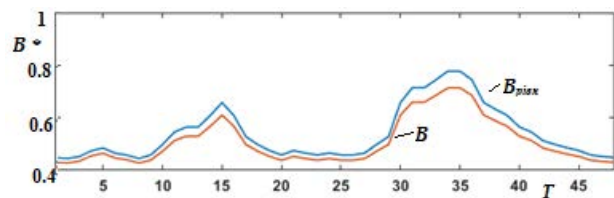


Рис. 4. Витрати первинного палива

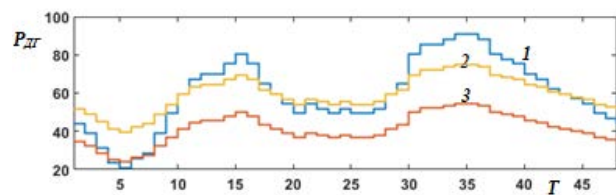


Рис. 5. Розподіл потужностей по генераторам

Аналізуючи криві, бачимо що добовий графік має два піки на 15 та 35 інтервали часу. Витрати первинного палива мають ще один пік на інтервалі 5, при цьому потужність має мінімальне значення  $P_{\min}$ . Зростання витрат первинного палива обумовлено роботою генераторів з потужністю менше номінальної. Найбільші витрати палива від 31го до 38го інтервалу, що відповідають  $P_{\max}$ .

Такий графік є не оптимальним з точки зору генерації і витрат палива. Використовуючі отримані криві, після проведеного аналізу може запропонувати споживачу оптимізувати графік навантаження.

Ще один варіант перерозподілу потужності з піку базового графіку на інтервали з мінімальним споживанням, оскільки на тих ділянках було підвищене значення витрат. Витрати зменшились в середньому на 3% відносно базового варіанта.

Якщо споживач, з власних причин, не може збільшити значення потужностей на ділянках з мінімальним споживанням, то на цих ділянках енергія відправляється в накопичувачі, або постачальник відключає деякі генератори.

При використанні оптимального алгоритму середнє значення  $B^*(P)$  складає 5,7% відносно рівномірного розподілу потужності.

**Висновки.** Представлено алгоритм та його основні програму для аналізу та оптимізація витрат первинного палива при розподіленні потужності між дизель-генераторів. Економічний ефект впровадження оптимізації досягається зниженням поточних витрат зі збільшення прибутку учасників локальних систем електроживлення. З соціальної точки зору використання оптимізаційних алгоритмів сприяє розвитку локальних енергетичних систем, що дає змогу встановити часткову або повну незалежність від енергопостачальників. А з екологічної точки зору використання алгоритмів оптимізації зменшує споживання палива та призводить до скорочення шкідливих викидів.

Застосування алгоритму і програми на його основі дозволить:

- знизити собівартість електроенергії зменшуючи витрати на закупівлю та доставку палива;
- провести попередній розрахунок витрат палива дизель-генераторів у складі локальних систем Microgrid для заданих графіків потужностей навантажень
- оптимізувати графіки навантажень для отримання найменших витрат.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. O.V. Kyrylenko, V.Ya. Zhuikov, S.P. Denysiuk. (2022) Use of dynamic tariffication for optimization Microgrid technical and economic indicators in local electricity markets. *Tekhnichna Elektrodynamika* 2022:3, pp. 37-48
2. Rakopoulos, C.D., Michos, C.N. and Giakoumis, E.G. (2007) 'A computational study of compressor surge during transient operation of turbocharged diesel engines', *Int. J. Alternative Propulsion*, Vol. 1, No. 2/3, pp. 250–274.

3. Yutaka Sasaki, Toshiya Tsurumi, Naoto Yorino, Yoshifumi Zoka & Adelhard Beni Rehiara (2019) Real-time dynamic economic load dispatch integrated with renewable energy curtailment, *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 9:1, 85-92, <https://doi.org/10.1080/22348972.2019.1686861>

4. Jabari, Farkhondeh & Arasteh, Hamidreza & Sheikhi, Alireza & Mohammadi-ivatloo, Behnam. (2021). Optimization of a tidal-battery-diesel driven energy-efficient standalone microgrid considering the load-curve flattening program. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31,1-15 <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12993>

5. Rehman S., Natrajan N., Mohandes M., Alhems L., Y. Himri and A. Allouhi, Feasibility Study of Hybrid Power Systems for Remote Dwellings in Tamil Nadu, *IEEE Access*, India, 2022. Vol. 8. Pp. 143881-143890, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014164>.

6. Rehman, Shafiqur. Hybrid Power Systems – Sizes, Efficiencies, and Economics. *Energy Exploration & Exploitation*, Jan. 2021. Vol. 39. № 1. Pp. 3–43. DOI: <https://doi.org/10.1177/0144598720965022>

7. Knudsen, J., Bendtsen, J.D., Andersen, P. et al. Fuel Optimization in Multiple Diesel Driven Generator Power Plants. In: 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). *2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications*. 2017, Kohala Coast, Hawai'i. Institute of Electrical and Electronics Engineers .

8. O.H. Mohammed, Yassine Amirat, M.E.H. Benbouzid, G. Feld. Optimal Design and Energy Management of a Hybrid Power Generation System Based on Wind/Tidal/PV Sources: Case Study for the Ouessant French Island. *Smart Energy Grid Design for Island Countries, Challenges and Opportunities. Green Energy and Technology book series*, pp.381-413, 2017.

9. Rangnekar, Saroj & Khare, Anula & Mittal, Arvind & suhane, payal. (2016). Sizing and Performance Analysis of Standalone Wind-PV based Hybrid Energy System using Ant Colony Optimization. *IET Renewable Power Generation*. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0394>

10. Chaturvedi, Nitin. (2021). Cost-optimal Pinch Analysis for sizing of hybrid power systems. *Cleaner Engineering and Technology*. 3. 100094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100094>

11. S. Denysiuk, H. Bielokha and M. Kolomiuchyk, "Optimization of Consumption of Primary Fuel in Local Electricity Systems Using Diesel Generators," *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 112-115, doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969271.



## OPTIMIZATION OF PRIMARY FUEL COSTS IN LOCAL ENERGY SYSTEMS

**Serhii Denysiuk**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Educational and Scientific Institute of Energy Management

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, spdens@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6299-3680

**Halyna Bielokha**

Ph.D., Associate Professor of Department Power Supply

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, pointage13@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4277-367X

The increase in the use of renewable sources leads to the spread of local energy systems. These systems are an integral part of the electrical infrastructure around the world. The cost of electricity in local energy systems (Microgrid) with diesel generators in the composition depends primarily on the cost of primary fuel of diesel generators. Microgrid is a system with sources of distributed generation and electrical loads that can work as a whole in parallel with the grid or independently of it. The criteria for optimization are mainly divided into two categories: economic and reliability. When feeding the load from several power sources with different characteristics, arises an issue of the optimal redistribution of energy generation from the sources to reduce fuel consumption, and as a result, the cost. An algorithm for optimizing fuel consumption that determines the optimal redistribution of power between generators operating in parallel with different rated power and different curves of primary fuel consumption from power, has been developed. A Matlab programming language-based program was developed on its basis. When using the optimal distribution algorithm, the primary fuel consumption for the considered local energy systems was 5.8% relative to a uniform power distribution. The developed algorithm can be used for the following purposes: evaluation and research of optimal energy generation local energy systems; in control systems for power distribution between generators; carrying out preliminary calculations of fuel consumption of diesel generators for load power daily graphs. The economic effect of optimization is achieved by reducing current costs to increase the profits of participants in local power systems. From a social point of view, the use of optimization algorithms contributes to the development and strengthening of local energy systems, which makes it possible to establish partial or complete independence from energy suppliers. And from an environmental point of view, the use of optimization algorithms reduces fuel consumption and leads to a reduction in harmful emissions.

**Key words:** local system, Microgrid, diesel generator, fuel consumption.

## REFERENCES

1. O.V. Kyrylenko, V.Ya. Zhuikov, S.P. Denysiuk. (2022) Use of dynamic tariffication for optimization Microgrid technical and economic indicators in local electricity markets. *Tekhnichna Elektrodynamika* 2022:3, pp 37-48
2. Rakopoulos, C.D., Michos, C.N. and Giakoumis, E.G. (2007) 'A computational study of compressor surge during transient operation of turbocharged diesel engines', *Int. J. Alternative Propulsion*, Vol. 1, No. 2/3, pp.250-274.
3. Yutaka Sasaki, Toshiya Tsurumi, Naoto Yorino, Yoshifumi Zoka & Adelhard Beni Rehiara (2019) Real-time dynamic economic load dispatch integrated with renewable energy curtailment, *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 9:1, 85-92, <https://doi.org/10.1080/2348972.2019.1686861>
4. Jabari, Farkhondeh & Arasteh, Hamidreza & Sheikhi, Alireza & Mohammadi-ivatloo, Behnam. (2021). Optimization of a tidal-battery-diesel driven energy-efficient standalone microgrid considering the load-curve flattening program. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31,1-15 <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12993>
5. Rehman S., Natrajan N., Mohandes M., Alhems L., Y. Himri and A. Allouhi, Feasibility Study of Hybrid Power Systems for Remote Dwellings in Tamil Nadu, *IEEE Access*, India, 2022. Vol. 8. Pp. 143881-143890, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014164>.
6. Rehman, Shafiqur. Hybrid Power Systems – Sizes, Efficiencies, and Economics. *Energy Exploration & Exploitation*, Jan. 2021. Vol. 39. № 1. Pp. 3-43. DOI: <https://doi.org/10.1177/0144598720965022>
7. Knudsen, J., Bendtsen, J.D., Andersen, P. et al. Fuel Optimization in Multiple Diesel Driven Generator Power Plants. In: 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). *2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications*. 2017, Kohala Coast, Hawai'i. Institute of Electrical and Electronics Engineers .
8. O.H. Mohammed, Yassine Amirat, M.E.H. Benbouzid, G. Feld. Optimal Design and Energy Management of a Hybrid Power Generation System Based on Wind/Tidal/PV Sources: Case Study for the Ouessant French Island. *Smart Energy Grid Design for Island Countries, Challenges and*

*Opportunities. Green Energy and Technology book series*, pp. 381-413, 2017.

9. Rangnekar, Saroj & Khare, Anula & Mittal, Arvind & suhane, payal. (2016). Sizing and Performance Analysis of Standalone Wind-PV based Hybrid Energy System using Ant Colony Optimization. *IET Renewable Power Generation*. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0394>

10. Chaturvedi, Nitin. (2021). Cost-optimal Pinch Analysis for sizing of hybrid power systems. *Cleaner*

*Engineering and Technology*. 3. 100094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100094>

11. S. Denysiuk, H. Bielokha and M. Kolomiuchyk, "Optimization of Consumption of Primary Fuel in Local Electricity Systems Using Diesel Generators," *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 112-115, doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969271.

*Стаття надійшла 15.02.2023*