

П. Г. Плешков, проф., канд. техн. наук, В. П. Солдатенко, доц., канд. техн. наук,
В. В. Зінзура, доц., канд. техн. наук, О. І. Сіріков, доц., канд. техн. наук,
С. П. Плешков, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: vasilyzinzura@gmail.com

Оптимальне керування рівнем генерації активної потужності установками з відновлюваними джерелами енергії

Метою даного дослідження є забезпечення найвищого можливого обсягу виробництва активної потужності від відновлюваних джерел енергії при одночасному забезпеченні нормативно встановлених значень відхилення напруги у місці підключення електричних споживачів до розподільчої електромережі. Показано, що задачу автоматичного керування установками з відновлюваними джерелами доцільно формалізувати у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації. Запропоновано розрахункову процедуру для знаходження кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. Розроблена комп'ютерна імітаційна модель системи автоматичного керування параметрами режиму електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії, що базується на знайдених в роботі розв'язках задачі багатокритеріальної оптимізації. Результати проведеного комп'ютерного імітаційного моделювання, отримані з допомогою зазначеної моделі, підтвердили значно більшу ефективність розробленої системи автоматичного керування в порівнянні з існуючими.

відновлювані джерела електроенергії, багатокритеріальна оптимізація, розподільна електрична мережа

Постановка проблеми. Теперішній період розвитку як світової так і вітчизняної енергетичної галузі характеризується невідомим зростанням рівня впровадження систем виробництва електроенергії на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Під час використання систем з альтернативними джерелами енергії на виробничих об'єктах місце їх підключення до розподільчої електромережі зазвичай збігається з точкою приєднання електричних споживачів. Відомо, що в процесі виробництва електроенергії відбувається зростання напруги в місці з'єднання генеруючої установки з мережею. Відтак в режимі зворотного руху потужності в розподільчих електромережах можуть виникати надмірно високі значення відхилення напруги.

Проведений аналіз відомих систем автоматичного керування (САК) генеруючих установок на базі ВДЕ показав, що усі вони втілюють концепцію автоматичного регулювання, при якій відбувається обмеження обсягу виробництва активної потужності у мережу в разі появи понаднормового перевищення значення напруги.

Недоліком такого підходу є скорочення економічних надходжень від реалізації електроенергії у мережу за «зеленим» тарифом, що обумовлено зменшенням обсягу генерації активної потужності у мережу.

Зважаючи на це завдання покращення САК генеруючими системами на основі ВДЕ з метою досягнення оптимального обсягу виробництва активної потужності цими системами при дотриманні нормативно встановлених меж усталеного відхилення напруги у місці підключення електроспоживачів до розподільчої електромережі є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] представлено результати дослідження впливу активної потужності, що генерується сонячними електростанціями, на рівень відхилення напруги на шинах споживачів у мережах 0,4 кВ. Показано, що в умовах функціонування локальних електричних мереж можуть виникати режими, за яких напруга на шинах 0,4 кВ виходить за межі нормативно допустимого діапазону. Зазначено також, що у таких системах спостерігаються різкі коливання напруги на шинах підстанцій споживачів, а величина усталеного відхилення напруги може перевищувати номінальне значення більш ніж на 10 %.

У роботі [2] зазначено, що в розподільчих електричних мережах, де активно впроваджуються та експлуатуються установки на основі відновлюваних джерел енергії, спостерігається погіршення показників якості електроенергії. Зокрема, фіксуються понаднормові відхилення напруги на шинах трансформаторних підстанцій 10/0,4 кВ та спотворення синусоїдальної форми напруги.

В роботах [3, 4] зазначено, що інтеграція відновлюваних джерел у сучасні енергетичні системи спричиняє серйозні проблеми з коливанням частоти та напруги.

Для вирішення цієї проблеми автори роботи [3] пропонують застосувати оптимальний дворежимний ПІ-контролер з диференціальним керуванням, налаштований за синусоїдно-косинусним алгоритмом.

В роботі [4] для вирішення цієї проблеми автори пропонують використовувати оптимальне каскадне пропорційне інтегральне керування з двома ступенями свободи. Для забезпечення стабільної роботи цей контролер використовується для керування частотою навантаження та автоматичного регулювання напруги.

В роботі [5] пропонується застосування нечіткого ПД-регулятора для автоматичного керування параметрами режиму мережі з ВДЕ. Цей контролер регулює відхилення частоти енергосистеми та керує зміною навантаження мережі гібридної енергетичної системи, що складається з джерел енергії вітру, біомаси та фотоелектричних джерел.

Загальним недоліком підходів, описаних в роботах [3, 4, 5] є неврахування можливого зниження рівня генерації електроенергії від установок з ВДЕ за рахунок жорсткого обмеження верхньої межі усталеного відхилення напруги.

Постановка завдання. Метою дослідження є забезпечення найвищого можливого обсягу виробництва активної потужності від ВДЕ при одночасному забезпеченні нормативно встановлених значень відхилення напруги у місці підключення електричних споживачів до розподільчої електромережі.

Виклад основного матеріалу. Одним із шляхів підвищення рівня вироблення електроенергії з ВДЕ без значного впливу на якість електроенергії є удосконалення їх систем автоматичного керування.

На рис. 1 зображена типова схема електричної мережі промислового підприємства до якої приєднані установки з ВДЕ.

Досягнення максимальної ефективності використання потужності установок з ВДЕ при одночасній мінімізації рівня відхилення напруги на шинах споживачів можливе лише за умова застосування індивідуальних САК рівнем потужності кожної з установок.

Зважаючи на це, процес автоматичного керування установками з ВДЕ доцільно формалізувати у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації [6, 7]:

$$\begin{cases} -PR(P_{\text{gen}}) \rightarrow \min; \\ LS_{\Delta U}(P_{\text{gen}}) \rightarrow \min; \\ P_{\text{gen}} \in [P_{\text{min}} \dots P_{\text{max}}], \end{cases} \quad (1)$$

де P_{gen} – величина потужності генерації від ВДЕ;
 $[P_{\text{min}} \dots P_{\text{max}}]$ – область допустимих значень P_{gen} ;
 $PR(P_{\text{gen}})$ – значення прибутку від продажу генерованої ВДЕ електроенергії;
 $LS_{\Delta U}(P_{\text{gen}})$ – величина економічних збитків від понаднормових значень відхилення напруги у вузлах електромережі.

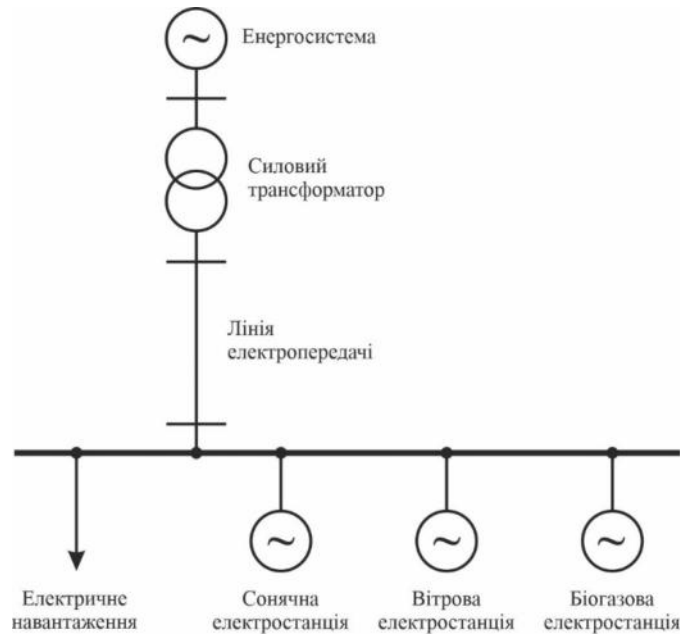


Рисунок 1 – Типова схема електричної мережі підприємства з установками ВДЕ.

Джерело: розроблено авторами

Як зазначено в роботі [8], для розв'язання задач подібних до (1) найбільш доцільно застосовувати метод наближення до утопічної точки. Даний метод реалізується в 2 кроки:

1. Визначаються мінімальні значення кожного з критеріїв задачі (1) (знаходяться координати утопічної точки $Q_{\text{ut}} = (PR_{\text{ut}}, LS_{\text{ut}})$ в просторі критеріїв).

2. В результаті вирішення задачі мінімізації відстані від утопічної точки до парето-оптимальної множини визначається кінцевий розв'язок задачі багатокритеріальної оптимізації в просторі керування (оптимальне значення потужності $P_{\text{gen}}^{\text{opt}}$)

Для варіанту чебишевської відстані вираз для знаходження кінцевого розв'язку задачі (1) має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \left\{ \frac{-PR(P_{\text{gen}}) - PR_{\text{ut}}}{\zeta_1}, \frac{LS_{\Delta U}(P_{\text{gen}}) - LS_{\text{ut}}}{\zeta_2} \right\} \rightarrow \min; \\ P_{\text{gen}} \in [P_{\text{min}} \dots P_{\text{max}}], \end{array} \right. \quad (2)$$

де ζ_1, ζ_2 – це вагові коефіцієнти кожного з критеріїв оптимізації.

Таким чином згідно описаного методу вирішення багатокритеріальної задачі (1) зводиться до знаходження розв'язків декількох задач скалярної оптимізації.

Відома досить велика кількість методів скалярної оптимізації. Їх умовно можна поділити на дві групи: аналітичні та чисельні методи.

Для знаходження розв'язків більшості практичних оптимізаційних задач застосовують чисельні методи [9, 10]. При чому вибір конкретного методу скалярної оптимізації обумовлюється специфікою оптимізаційної задачі.

Сучасні САК рівнем генерації потужності установок ВДЕ можуть забезпечити точність регулювання на рівні 1 %. Зважаючи на це, а також на невелику розмірність задачі (1), її розв'язок найбільш доцільно шукати в дискретному вигляді.

За такого підходу алгоритм знаходження розв'язку задачі (1) полягає в наступному:

1. Здійснюється дискретизація області допустимих значень потужності в межах інтервалу $[P_{\min} \dots P_{\max}]$ із заданим кроком dP_{gen} .

2. Для кожного дискретного значення $P_{\text{gen}i}$ виконується розрахунок відповідних значень критеріїв $-PR, LS_{\Delta U}$. В результаті цих розрахунків отримується множина D :

$$D = \left\{ d_1 \left[-PR(P_{\text{gen}1}), LS_{\Delta U}(P_{\text{gen}1}) \right], \dots, d_i \left[-PR(P_{\text{gen}i}), LS_{\Delta U}(P_{\text{gen}i}) \right] \right\} \quad (3)$$

Для випадку задачі (1) зважаючи на її розмірність елементи множини D будуть належати парето-оптимальній множині розв'язків цієї задачі.

3. Визначаються координати утопічної точки $Q_{\text{ut}} = (PR_{\text{ut}}, LS_{\text{ut}})$ як найменше та найбільше значення елементів дискретної множини D . Для цього можливо використати метод повного перебору або інший метод дискретної оптимізації.

4. Для кожного d_i елементу множини D знаходяться значення евклідової відстані l_i від цього елементу до променя m (рис. 2) згідно виразу:

$$l_i = \left(\left(\frac{-PR_i + \frac{\zeta_2}{\zeta_1} LS_{\Delta U i} - \frac{\zeta_2}{\zeta_1} LS_u}{\left(\frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right)^2 + 1} - (-PR_i) \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{\frac{\zeta_2}{\zeta_1} \frac{-PR_i + \frac{\zeta_2}{\zeta_1} LS_{\Delta U i} - \frac{\zeta_2}{\zeta_1} LS_u}{\left(\frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right)^2 + 1} + LS_u - LS_{\Delta U i}}{\left(\frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right)^2 + 1} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

В результаті розрахунків отримується скінченна множина відстаней $L = \{l_1 \dots l_i\}$

5. Одним із методів дискретної оптимізації (наприклад, методом повного перебору) знаходиться найменший елемент $l_{\min}$ множини L . Розв'язком задачі (1) буде значення $P_{\text{gen}}^{\text{opt}}$ елементу множини D $d^{\text{opt}} \left[-PR(P_{\text{gen}}^{\text{opt}}), LS_{\Delta U}(P_{\text{gen}}^{\text{opt}}) \right]$, який відповідає елементу $l_{\min}$ множини L .

Геометрична інтерпретація алгоритму визначення розв'язку задачі (1) показана на рис. 2.

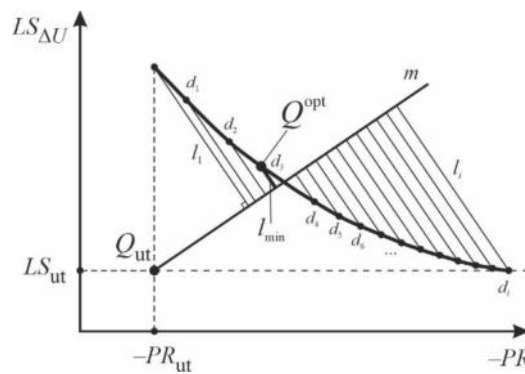


Рисунок 2 – Геометрична інтерпретація знаходження розв’язку задачі багатокритеріальної оптимізації (1)

Джерело: розроблено авторами

Для перевірки працездатності запропонованого підходу та визначення ефекту від застосування розв'язків задачі (1) згідно розробленого алгоритму було використано метод комп'ютерного імітаційного моделювання.

Комп'ютерна імітаційна модель САК рівнем генерації потужності установками з ВДЕ, в основу якої покладено запропонований алгоритм вирішення задачі (1), наведена на рис. 3.

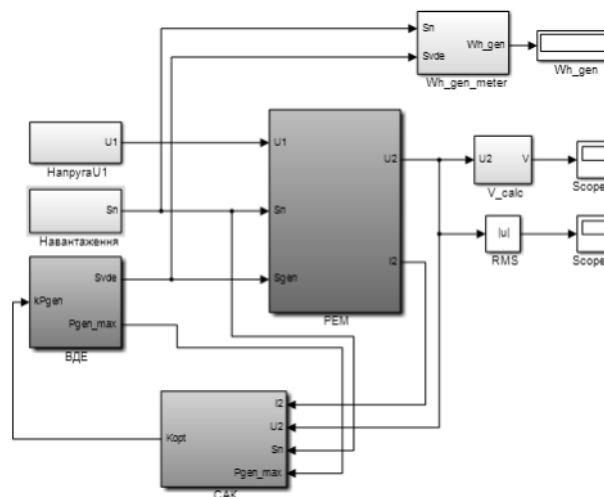


Рисунок 3 – Комп'ютерна модель САК рівнем генерації потужності установками з ВДЕ

Джерело: розроблено авторами

У якості еталонної моделі для порівняльного аналізу було обрано систему автоматичного керування, що здійснює керування рівнем генерації активної потужності ВДЕ таким чином, щоб відхилення напруги на шинах споживача не перевищувало рівня у 5%.

Результати комп'ютерного моделювання наведені на рис. 4 – 7: 1 – автоматичне керування відсутнє, 2 – еталонна САК, 3 – розроблена САК.

Як демонструють графіки, представлені на рисунках 4–5, запропонована модель системи автоматичного керування забезпечує підвищення рівня генерації активної потужності установками з відновлюваних джерел енергії в електричну мережу.

У випадку відсутності керування генерацією активної потужності з боку установок ВДЕ спостерігається максимальний добовий обсяг виробленої електроенергії – 219 кВт·год. Водночас напруга на шинах споживача виходить за межі нормативно допустимого діапазону $\pm 5\%$ з інтегральною ймовірністю 89 %, що є порушенням нормативних вимог до якості електроенергії.

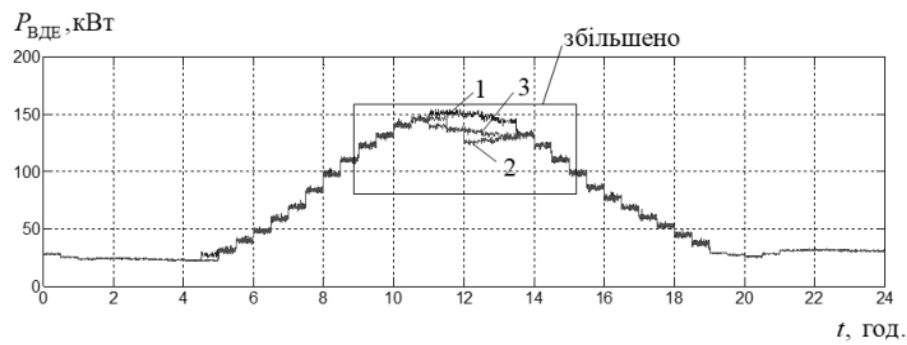


Рисунок 4 – Графіки зміни генерації активної потужності установками з відновлюваних джерел енергії
Джерело: розроблено авторами

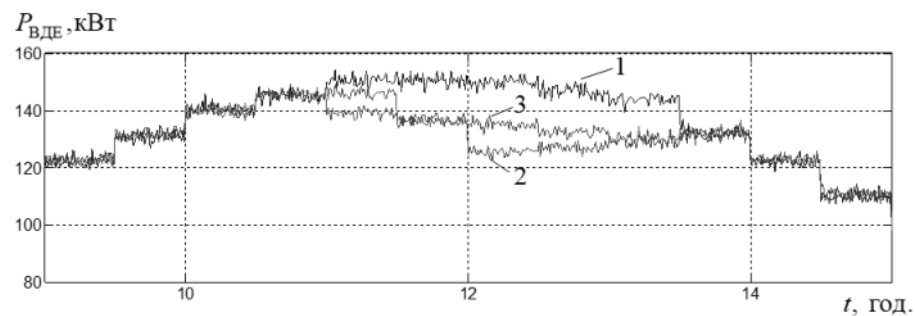


Рисунок 5 – Графіки зміни генерації активної потужності установками з відновлюваних джерел енергії
(збільшено)

Джерело: розроблено авторами

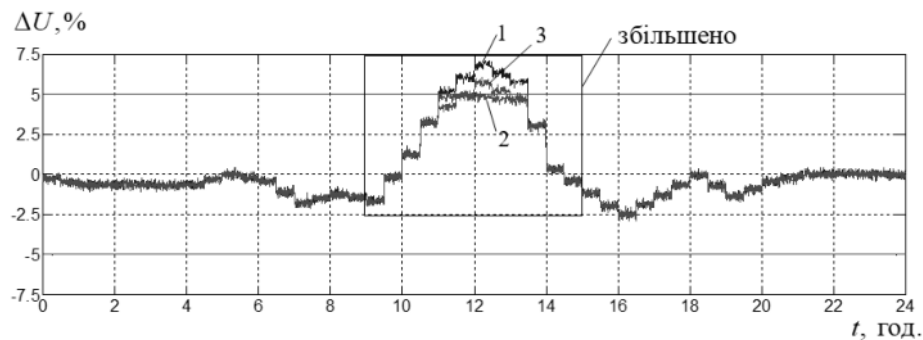


Рисунок 6 – Графіки зміни відхилення напруги в точці приєднання ВДЕ та навантаження
Джерело: розроблено авторами

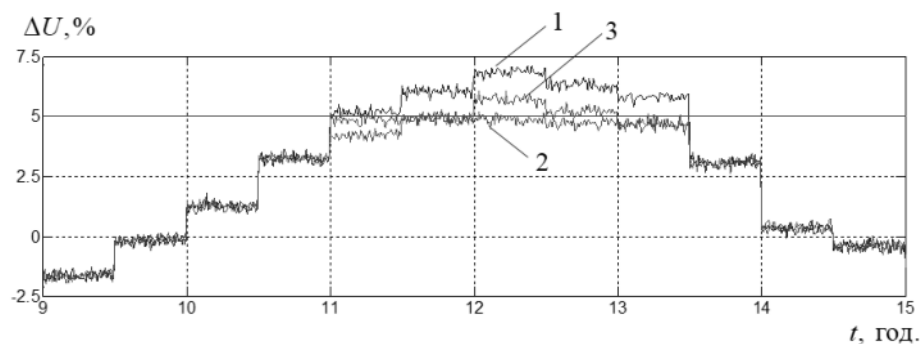


Рисунок 7 – Графіки зміни відхилення напруги в точці приєднання ВДЕ та навантаження (збільшено)
Джерело: розроблено авторами

У разі використання базової моделі керування генерацією активної потужності ВДЕ, яка передбачає обмеження відхилення напруги в межах нормативного діапазону $\pm 5\%$, забезпечується стовідсоткове потрапляння усталеного значення напруги в допустимі межі. Проте це супроводжується зниженням обсягу переданої до розподільчої електричної мережі електроенергії, що призводить до втрати 24% потенційного енергогенеруючого та економічного ефекту.

Використання розробленої оптимальної системи автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ забезпечує збільшення обсягів постачання електроенергії в мережу на 8,1 % порівняно з базовою моделлю керування. При цьому інтегральна ймовірність потрапляння усталеного значення відхилення напруги в межі допустимого діапазону становить 95 %, що відповідає вимогам чинних нормативів щодо якості електроенергії.

Отже, реалізація запропонованого алгоритму оптимального керування генерацією активної потужності відновлюваними джерелами енергії в умовах, розглянутих у дослідженні, забезпечує зростання обсягу подачі електроенергії в мережу на 8,1 %, при цьому гарантуючи відповідність усталеного відхилення напруги встановленим нормативним вимогам.

Висновки. В результаті проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Проведений аналіз засвідчив, що для розв'язання задачі автоматизованого керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії доцільно застосовувати підхід, заснований на наближенні до утопічної точки в просторі критеріїв. При цьому оптимальне рішення досягається шляхом мінімізації чебишевської відстані між утопічною точкою та парето-оптимальною множиною розв'язків.

2. З урахуванням дискретної природи регулювання активної потужності генерації, доцільним підходом до розв'язання задачі автоматичного керування є використання запропонованої в роботі розрахункової процедури, заснованої на методі повного перебору.

3. Результати комп'ютерного моделювання функціонування розробленої системи автоматичного керування, побудованої на основі розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації, засвідчили її перевагу порівняно з еталонною САК. Зокрема, обсяг генерації активної потужності у випадку застосування запропонованої в роботі САК виявився на 8,1 % вищим. При цьому рівень усталеного відхилення напруги відповідає вимогам нормативних документів щодо якості електроенергії.

Список літератури

1. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ. *Енергетика: економіка, технології, екологія: наук. журн.* 2015. № 3 (41). С. 7–13.
2. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2015. № 2. С. 134–145.
3. Irfan R., Gulzar M. M., Shakoор A., Habib S., Ahmad H., Hasib S. A., Tehreem H. Robust operating strategy for voltage and frequency control in a non-linear hybrid renewable energy-based power system using communication time delay. *Computers and Electrical Engineering.* 2025. Vol. 123. P. 110119.
4. Irfan R., Gulzar M. M., Habib S., Shakoор A., Ahmad H., Murtaza A. F. Multistage control for frequency and voltage stability in a multi-area power network with nonlinear dynamics. *Results in Engineering.* 2025. Vol. 26. P. 104724.
5. Ali G., Aly H., Little T. Automatic generation control of a multi-area hybrid renewable energy system using a proposed novel GA-fuzzy logic self-tuning PID controller. *Energies.* 2024. Vol. 17 (9). P. 2000.
6. Солдатенко В. П. Автоматичне керування режимами роботи розподільної електричної мережі при наявності джерел розосередженої генерації. *Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті: матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф.* (Кропивницький, 16–17 листоп. 2017 р.). Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 88–90.
7. Плєшков П. Г., Солдатенко В. П. Керування режимами роботи розподільної електричної мережі при наявності джерел розосередженої генерації. *Прикладні науково-технічні дослідження: матер. II міжнар. наук.-практ. конф.* (Івано-Франківськ, 3–5 квіт. 2018 р.). Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2018. С. 71.
8. Зінзура В. В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах. *Зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2012. Вип. 25, ч. 1. С. 350–360.

9. Martins J. R., Ning A. *Engineering design optimization*. Cambridge : Cambridge University Press, 2021.
10. Gill P. E., Murray W., Wright M. H. *Numerical linear algebra and optimization*. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2021.

References

1. Lezhniuk, P. D., Rubanenko, O. Ye., & Hunko, I. O. (2015). *Influence of solar power plants on the voltage of 0.4 kV consumers*. *Energy: Economics, Technology, Ecology: Scientific Journal*, 3(41), 7–13 [in Ukrainian].
2. Lezhniuk, P. D., Rubanenko, O. Ye., & Hunko, I. O. (2015). *Influence of solar power plant inverters on power quality indicators in local electrical systems*. *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, (2), 134–145 [in Ukrainian].
3. Irfan, R., Gulzar, M. M., Shakoor, A., Habib, S., Ahmad, H., Hasib, S. A., & Tehreem, H. (2025). Robust operating strategy for voltage and frequency control in a non-linear hybrid renewable energy-based power system using communication time delay. *Computers and Electrical Engineering*, 123, 110119.
4. Irfan, R., Gulzar, M. M., Habib, S., Shakoor, A., Ahmad, H., & Murtaza, A. F. (2025). Multistage control for frequency and voltage stability in a multi-area power network with nonlinear dynamics. *Results in Engineering*, 26, 104724.
5. Ali, G., Aly, H., & Little, T. (2024). Automatic generation control of a multi-area hybrid renewable energy system using a proposed novel GA-fuzzy logic self-tuning PID controller. *Energies*, 17(9), 2000.
6. Soldatenko, V. P. (2017). Automatic control of the operation modes of the distribution electrical network in the presence of distributed generation sources. In *Automation and Computer-Integrated Technologies in Industry, Telecommunications, Energy, and Transport: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Online Conference (Kropyvnytskyi, November 16–17, 2017)* (pp. 88–90). Kropyvnytskyi: CNTU [in Ukrainian].
7. Plieshkov, P. H., & Soldatenko, V. P. (2018). *Control of operating modes of the distribution electrical network in the presence of distributed generation sources*. In *Applied Scientific and Technical Research: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference (Ivano-Frankivsk, April 3–5, 2018)* (p. 71). Ivano-Frankivsk: Symfonia forte [in Ukrainian].
8. Zinzura, V. V. (2012). *Methods for solving the problem of multicriteria optimization of voltage regulation in electrical networks*. *Collection of Scientific Works of Kirovohrad National Technical University. Engineering in Agricultural Production, Mechanical Engineering, Automation*, 25(1), 350–360 [in Ukrainian].
9. Martins, J. R., & Ning, A. (2021). *Engineering design optimization*. Cambridge: Cambridge University Press.
10. Gill, P. E., Murray, W., & Wright, M. H. (2021). *Numerical linear algebra and optimization*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.

Petro Plieshkov, Prof., PhD tech. sci., **Valentyn Soldatenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Vasyl Zinzura, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Sirikov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Serhii Plieshkov, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Optimal Control of Active Power Generation Levels by Renewable Energy Plants

The purpose of this article is to develop an effective approach to automated control of the level of active power generation in systems based on renewable energy sources in order to ensure maximum electricity generation while complying with the regulatory permissible voltage deviation limits at the points of connection of electricity consumers to the distribution grid.

The article analyzes the problems that arise when generating electricity from renewable sources in the conditions of distribution grids - in particular, exceeding the permissible voltage level at the points of connection and reducing the economic efficiency of generation when using typical automatic control systems. It is proposed to improve the system for automatic control of the level of active power generation by installations with renewable energy sources by formalizing the control process as a multi-criteria optimization problem. The main criteria are profit from the sale of electricity and economic losses from voltage quality disturbances.

The problem is solved by the method of approximation to the utopian point using the Chebyshev metric and numerical methods of discrete optimization. For this purpose, a step-by-step algorithm was developed, which involves discretization of the area of permissible generation values, calculation of the Pareto-optimal set, determination of the utopian point and minimization of the distance to it. In order to assess the effectiveness of the proposed approach, a computer model of the automatic control system was built, which is based on the specified algorithm. The model was tested in a simulation environment, where it was compared with a traditional control system that provides a strict limitation of the voltage deviation. The simulation results showed that the proposed approach provides an increase in the volume of electricity supply to the network by 8.1% compared to the base model. At the same time, the level of the steady-state voltage deviation at the connection point meets the regulatory requirements for the quality of electricity (integral probability - 95%). Thus, the improved automatic control system allows achieving both technical and economic optimality of the functioning of renewable energy sources in the power system

renewable energy sources, multi-criteria optimization, distribution grid

Одержано (Received) 26.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.06.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025