

УДК 621.316.13

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ В МІКРОМЕРЕЖІ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЗА УМОВ НЕСТАБІЛЬНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

ОЛІЙНИЧЕНКО М.Ю. аспірант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6651-0175>, e-mail: oliynichenko@kdu.edu.ua;

БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1669-4580>, e-mail: bialobrzzeski@ukr.net;

ПОСТІЛ А.О. аспірант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9411-7047>, e-mail: artur_postil@kdu.edu.ua;

Мета роботи. Розробка процедури оптимального керування мікромережею з альтернативними джерелами, зовнішнім електропостачанням та дизель-генераторною установкою.

Методи дослідження. Під час проведення дослідження використано методи постановки лінійних оптимізаційних задач та відповідно методи лінійного програмування, методи імітаційного моделювання у середовищі візуального програмування.

Отримані результати. У роботі проведено дослідження процесів керування режимами гібридної мікромережі, що включає сонячну електростанцію, вітроенергетичну установку, блок акумуляторної батареї, дизель-генератор та зовнішню електромережу. На основі розробленої моделі в середовищі MATLAB/Simulink проаналізовано енергетичні потоки та роботу підсистем мікромережі у чотирьох режимах її функціонування з варіацією потоків електричної енергії. Для оптимізації енергетичного балансу застосовано методи лінійного програмування, що дозволило мінімізувати витрати на електроенергію при дотриманні балансу потужності та забезпеченні стабільності напруги у встановлених стандартних межах. Отримані результати демонструють ефективність поєднання відновлюваних джерел, акумуляторної батареї та дизельної генерації в оптимальному керуванні мікромережею за рахунок балансування зарядом блоку акумуляторної батареї та підтверджують доцільність застосування оптимізаційних алгоритмів для керування енергетичними режимами.

Наукова новизна. Запропоновано цільову функцію для вирішення оптимізаційної задачі мінімізації фінансових витрат на електричну енергію в електроенергетичному комплексі мікромережі. Цільова функція враховує змінну вартість електроенергії під час обміну з зовнішньою мережею, обмеження на рівень заряду та розряду акумуляторної батареї, пріоритетність використання відновлюваних джерел енергії, а також доцільність залучення дизель-генераторної установки залежно від поточного енергетичного балансу та економічних умов.

Практична цінність. Отримані результати з використанням алгоритму оптимізації енергетичного балансу можуть бути використані для проектування систем енергоменеджменту та оптимального керування мікромережами з комбінованими джерелами енергії малої та середньої потужності.

Ключові слова: відхилення напруги, акумуляторна батарея, електрична енергія, оптимізація, витрати.

I. ВСТУП

У сучасному енергетичному середовищі мікромережі поступово набувають більшого значення як засіб інтеграції розподілених джерел енергії та акумуляторної батареї, забезпечуючи підвищену надійність, гнучкість і стійкість енергосистем. Для ефективного функціонування таких систем необхідно застосовувати комплексні системи управління та керування, які охоплюють стратегічні, оперативні та

функціональні аспекти мікромереж [1]. Існує велика кількість методів оптимізації потоку енергії та розподілу оперативних ресурсів у мікромережах та їх кластерах. Зазначається [2] що необхідна оптимізація керування мікромережею, тобто мінімізація витрат, максимізація використання альтернативних джерел енергії, збереження ресурсу акумуляторної батареї і забезпечення якості електроенергії є ключовою задачею сучасного енергоменеджменту. Зважаючи на велику кількість змінних в мікромережі, наприклад,

роботи елементів системи. Модель побудована у середовищі Simulink. Енергмережа моделюється в режимі Phasor із частотою 50 Гц для спрощеного та зручного представлення і аналізу сигналів у сталому режимі. Зовнішня мережа (External Grid) приєднана до мікромережі через трансформатор (Transformer) та комутується блоком (Breaker), який забезпечує передачу потужності між зовнішньою мережею та мікромережею залежно від команди блоку IslandTime, що визначає режим роботи — автономний або підключений до мережі. До вузла приєднані основні генеруючі підсистеми: сонячна електростанція (Photovoltaic system), вітроенергетична установка (Wind Turbine), дизельний генератор (Diesel Generator) та акумуляторна батарея (Battery). Сонячна установка представлена блоком Solar Array, генерація якої задається відповідними умовами в блоці (Irradiance Profiles). Вітрова установка моделюється блоком Wind Turbine, де генерація задається відповідними умовами у блоці time clearWind. Дизельний генератор представлено блоком DieselGenerator, який формує потужність відповідно до заданих умов з блоку time DieselPower і використовується для покриття дефіциту енергії або роботи в режимі ізольованої мікромережі. Акумуляторна батарея (Battery) працює під керуванням системи енергоменеджменту (Energy Management System), яка визначає режими заряду та розряду акумуляторної батареї відповідно до сигналів Pref, Qref та Mode, враховуючи баланс потужності в мережі. Кожен генеруючий елемент має виходи для контролю генерованої активної потужності (pvM,

battM, WindM, DieselM). У правій частині моделі розташоване навантаження, представлене блоками Variable Load та Load. Змінне навантаження моделює реальні коливання споживання енергії до 200 кВт з використанням сигналу time loadFluc, тоді як постійне навантаження задається потужністю $P = 5$ кВт.

Для вирішення задачі оптимізації необхідно розробити алгоритм керування мікромережею і на його основі буде відбуватися реалізація застосування оптимізації енергетичного балансу гібридної мікромережі. Алгоритм оптимізації енергетичного балансу гібридної мікромережі спрямований на мінімізацію витрат на електроенергію при одночасному забезпеченні стабільної роботи системи з допомогою дизельного генератора та раціональному використанні акумуляторної батареї наведено на рис.3.

На початковому етапі здійснюється ініціалізація вхідних параметрів, серед яких стан заряду акумуляторної батареї (SOC), її повна енергоемність, часовий крок моделювання, прогнозовані значення потужності сонячної станції, навантаження та вартості електроенергії. Крім того, задаються параметри елементів мікромережі – площа сонячних панелей, їхня ефективність, базове навантаження споживачів, ємність акумулятора та граничні значення потужності для режимів заряду і розряду.

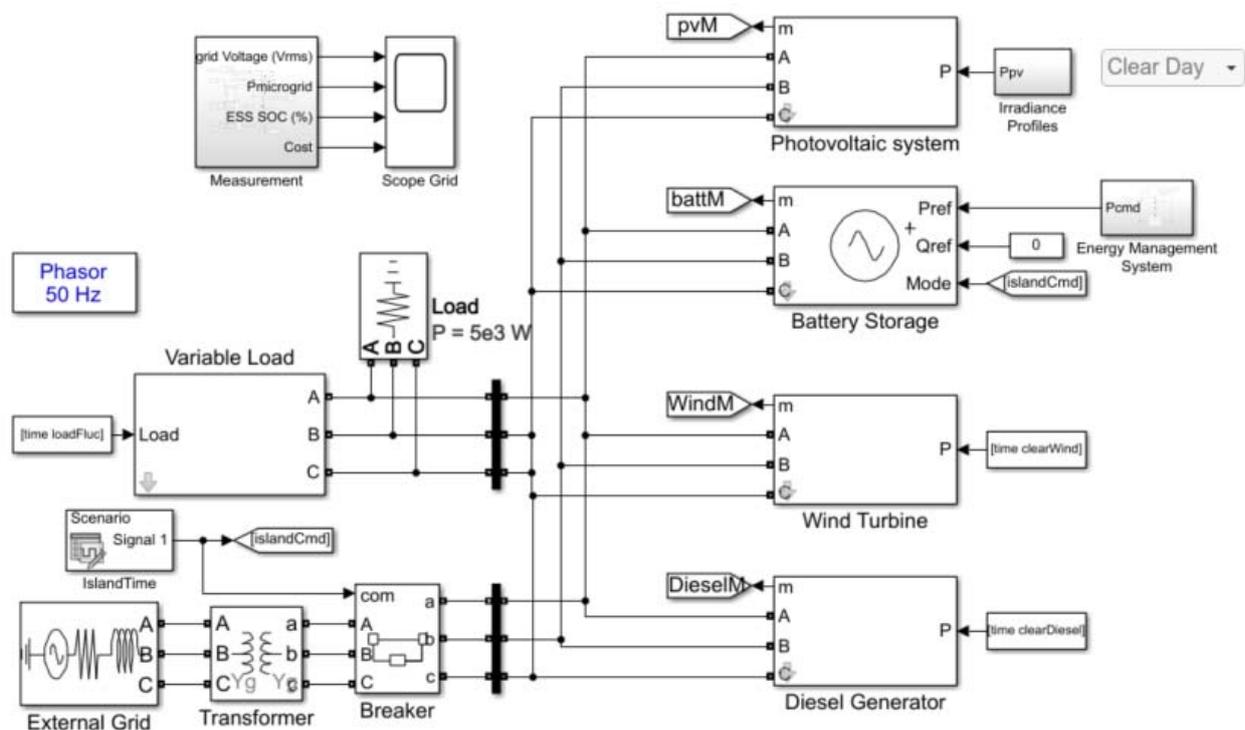


Рисунок 2. Гібридна мікромережа з паралельним під'єднанням до зовнішньої мережі

Після задання початкових даних формуються змінні оптимізації, які описують керовані параметри системи: потужність, споживану з електромережі, потужність акумуляторної батареї, запас енергії в ній та поточну вартість електроенергії. Для цих змінних встановлюються обмеження, що відображають фізичні межі роботи акумулятора. Зокрема, енергія батареї може змінюватися в межах від 20% до 80% від її номінальної ємності, що запобігає глибокому розряду та перенавантаженню. Потужність заряду та розряду обмежується значенням ± 200 кВт, де негативне значення відповідає розряду, а позитивне – заряду. Далі формується цільова функція, яка визначає критерій оптимізації. Її метою є мінімізація загальних витрат на електроенергію, спожиту з мережі, з урахуванням кінцевого стану заряду батареї. Це виражається як мінімізація функціоналу, що включає добуток прогнозованої ціни на електроенергію на потужність із мережі за часового кроку, а також враховує залишкову енергію в батареї через ваговий коефіцієнт.

$$J = C_{el} P_{gr} dt - E_{bat} SOC \cdot FW \rightarrow \min .$$

де C_{el} – вартість електроенергії; P_{gr} – потужність мікромережі; dt – часовий крок; E_{bat} – енергія батареї; SOC – стан заряду батареї; FW – кінцевий стан батареї.

Таким чином, алгоритм спрямований на пошук компромісу між зменшенням витрат і підтриманням певного рівня заряду акумулятора наприкінці прогнозного періоду.

Після визначення цільової функції здійснюється контроль балансу генерації та споживання в системі. Для кожного кроку оптимізації забезпечується рівність між сумарною генерацією і споживанням, тобто потужність навантаження покривається сумою потужності від фотоелектричної установки вітроенергетичної установки, дизельного генератора, мережі та акумулятора. Якщо енергії від генеруючих установок недостатньо, дефіцит компенсується за рахунок дизельного генератора, батареї або електромережі. У разі надлишку генерованої потужності вона використовується для заряджання батареї та для передачі в зовнішню мережу. Паралельно розраховується баланс енергії батареї, який описує зміну її стану заряду в часі. Поточна енергія визначається:

$$E_B(n+1) = E_B(n) - P_B(n)dt .$$

$E_B(n)$ – енергія акумулятора на кроці n , $P_B(n)$ – потужність генерована батареєю на кроці n , dt – тривалість кроку моделювання.

Це дозволяє точно моделювати процеси заряду та розряду. Далі формується баланс потужності всієї

системи, який враховує суму всіх елементів мікромережі.

$$P_{PV} + P_{WT} + P_{DG} + P_G + P_{Bat} = P_{gr} .$$

де P_{PV} – потужність генерована сонячною електростанцією; P_{WT} – потужність генеровано вітроенергетичною установкою; P_{DG} – потужність генерована дизельним генератором; P_G – потужність генерована зовнішньою мережею; P_B – потужність генерована батареєю.

Згідно з алгоритмом переходимо до етапу розв'язання задачі лінійного програмування. Всі змінні, обмеження та рівняння формуються у вигляді математичної моделі оптимізації (1-6), яка вирішується стандартними методами, наприклад засобами MATLAB Optimization Toolbox. У процесі розв'язання знаходяться оптимальні значення потужності, енергії та споживання, які забезпечують мінімальні витрати при дотриманні всіх обмежень системи. Після отримання результатів проводиться їх аналіз. Перевіряється коректність розв'язку та виконання всіх умов моделі, зокрема позитивність знайдених значень потужності та енергії, а також дотримання енергетичного балансу. Якщо рішення не відповідає вимогам або виходить за допустимі межі, алгоритм повторює обчислення з оновленими параметрами. У разі успішного знаходження оптимального рішення виконується передача результатів – визначаються оптимальні значення потужності батареї та її енергетичного стану для поточного моменту часу.

На завершальному етапі результати передаються до системи керування мікромережею, де використовуються для прийняття рішень щодо заряду, розряду акумуляторної батареї та споживання або генерації в зовнішню мережу з електромережею. Отримані дані також можуть слугувати початковими умовами для наступного прогнозного періоду. Після цього алгоритм завершує роботу або переходить до нового циклу оптимізації. Таким чином, розроблена схема забезпечує економічно обґрунтоване керування енергетичними потоками в гібридній мікромережі.

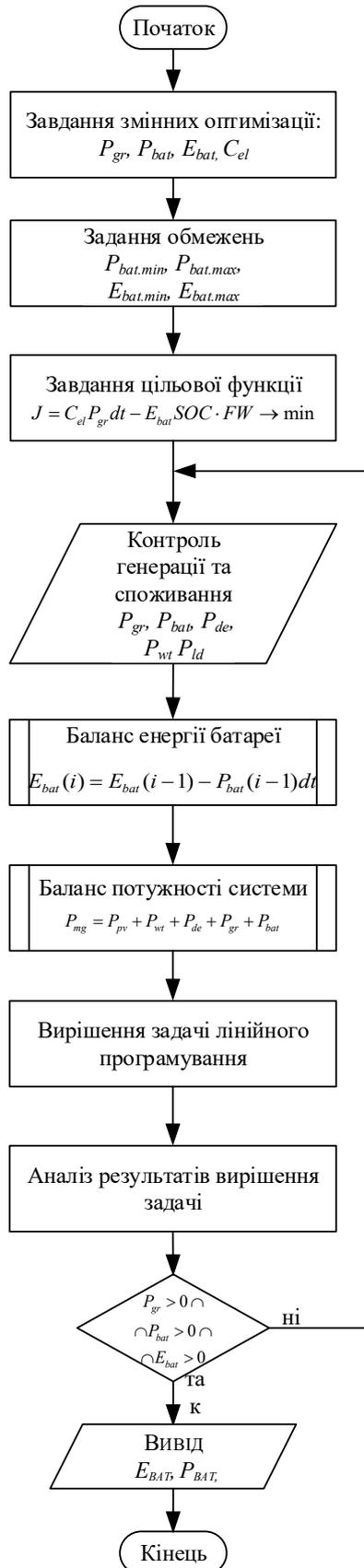


Рисунок 3. Алгоритм оптимізації енергетичного балансу гібридної мікромережі

Для забезпечення економічно обгрунтованого керування енергетичними потоками в подальніших дослідженнях спираємось на вартість за електроенергію, що змінюється протягом дня. Графік зміни вартості електроенергії протягом дня прийнемо для даної задачі таким як наведено на рис. 4.

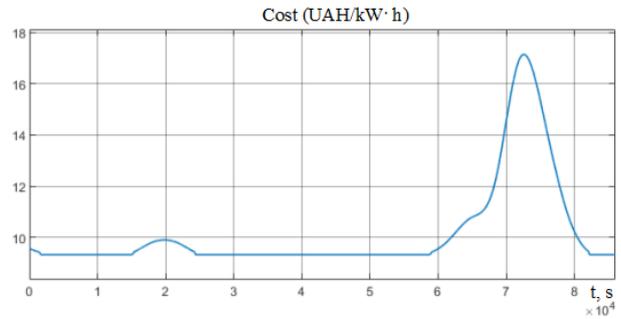


Рисунок 4. Графік вартості електроенергії

У режимі №1 (рис. 5) зовнішня електрична мережа (External Grid) залишається під'єднаною протягом усього періоду моделювання, а всі генеруючі установки працюють, окрім дизель-генератора (Diesel Generator). Напряга мікромережі (Microgrid Voltage (Urms)) зберігає стабільний характер, хоча у моменти перемикання між режимами помітні незначні коливання, що є типовою реакцією системи на зміну потоків потужності. Основне покриття навантаження забезпечують сонячна електростанція (Photovoltaic system), вітроенергетична установка (Wind Turbine) та зовнішня мережа (External Grid), тоді як акумуляторна батарея (Battery Storage) бере участь у балансуванні енергетичних потоків: її рівень заряду поступово зростає на ділянках надлишку генерації, а в періоди збільшеного навантаження частково зменшується.

Графік фінансових витрат на електроенергію (Cost) демонструє загальне зниження фінансових витрат у цьому режимі, що пов'язано з активним використанням відновлюваних джерел енергії та доступністю зовнішньої мережі. Оскільки дизель-генератор не вводиться в роботу, а акумуляторна батарея працює в межах помірних циклів зарядження та розрядження, система досягає економічно вигідного режиму, забезпечуючи стабільне електропостачання без додаткових витрат на паливо.

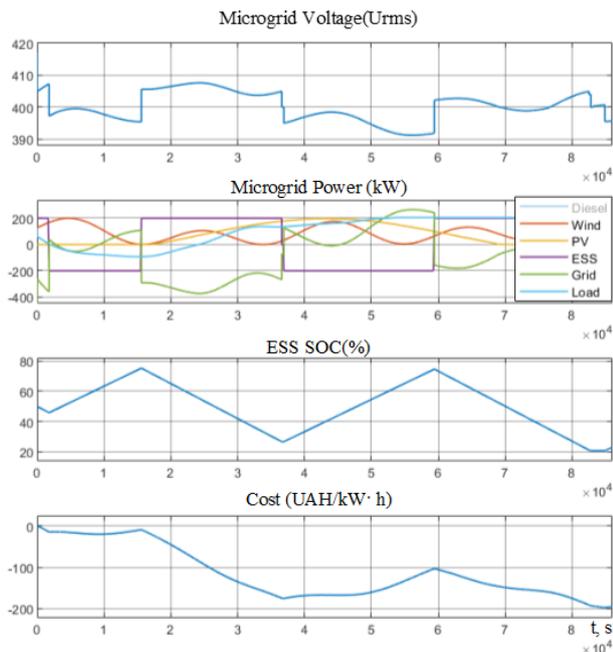


Рисунок 5. Часові діаграми режиму роботи мікромережі, режим № 1

У режимі №2 (рис. 6) живлення мікромережі забезпечується переважно сонячною електростанцією (Photovoltaic system) та акумуляторною батареєю (Battery Storage), оскільки дизель-генератор (Diesel Generator) та вітроенергетична установка (Wind Turbine) залишаються вимкненими. Напруга мікромережі (Microgrid Voltage (Urms)) зберігає стабільність протягом усього періоду моделювання, хоча у моменти включення та виключення зовнішньої мережі (External Grid) спостерігаються короткочасні провали, які оперативним чином компенсуються акумуляторною батареєю.

Рівень заряду акумуляторної батареї (ESS SOC) протягом більшої частини часу зростає, досягаючи максимального значення та перевищуючи допустиму межу в 80 %, що вказує на надлишок енергії від сонячної генерації та некоректність заданих обмежень у цьому режимі роботи. Сонячна електростанція генерує достатній рівень потужності для повного покриття навантаження і додаткового заряджання акумуляторної батареї.

Графік фінансових витрат на електроенергію (Cost) демонструє поступове збільшення фінансових витрат у кінці інтервалу моделювання, що зумовлено відключенням зовнішньої електричної мережі та необхідністю покриття дефіциту за рахунок розряджання акумуляторної батареї. У цей період акумуляторна батарея переходить у режим віддачі потужності, забезпечуючи живлення мікромережі в умовах повної відсутності генерації з боку дизель-генератора та вітроенергетичної установки.

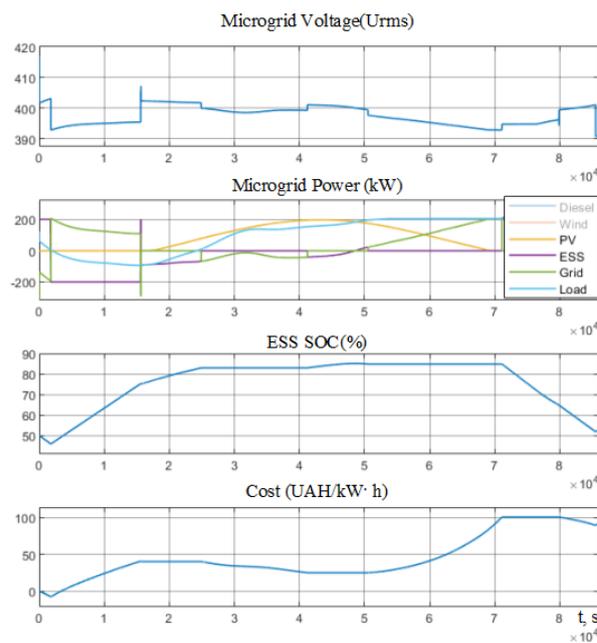


Рисунок 6. Часові діаграми режиму роботи мікромережі, режим №2

У режимі №3 (рис. 7) всі генеруючі установки — дизель-генератор (Diesel Generator), сонячна електростанція (Photovoltaic system) та вітроенергетична установка (Wind Turbine) — вимкнені, тому єдиним активним джерелом живлення мікромережі виступає акумуляторна батарея (Battery Storage). Напруга мікромережі (Microgrid Voltage (Urms)) залишається відносно стабільною завдяки роботі акумуляторної батареї, хоча на початку моделювання та в момент відключення зовнішньої мережі (External Grid) спостерігаються незначні коливання, характерні для переходу в автономний режим.

Рівень заряду акумуляторної батареї (ESS SOC) поступово зменшується протягом усього інтервалу, що відображає її безперервний розряд у відповідь на відсутність будь-якої генерації зі сторони сонячної електростанції, вітрової установки та дизель-генератора. Після остаточного вимкнення зовнішньої електричної мережі навантаження повністю забезпечується енергією, яка надходить від акумуляторної батареї що прискорює процес зниження її заряду.

Графік фінансових витрат на електроенергію (Cost) демонструє поступове зростання фінансових витрат у міру того, як зовнішня мережа частково або повністю відключається, і мікромережа змушена працювати виключно за рахунок акумуляторної батареї. Оскільки інші джерела генерації недоступні, акумуляторна батарея бере на себе повне покриття навантаження, що є малоефективним з економічної точки зору та призводить до максимізації вартості

через відсутність дешевих відновлюваних або мережевих ресурсів..

дизель-генератора та переходом у повністю автономний режим.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

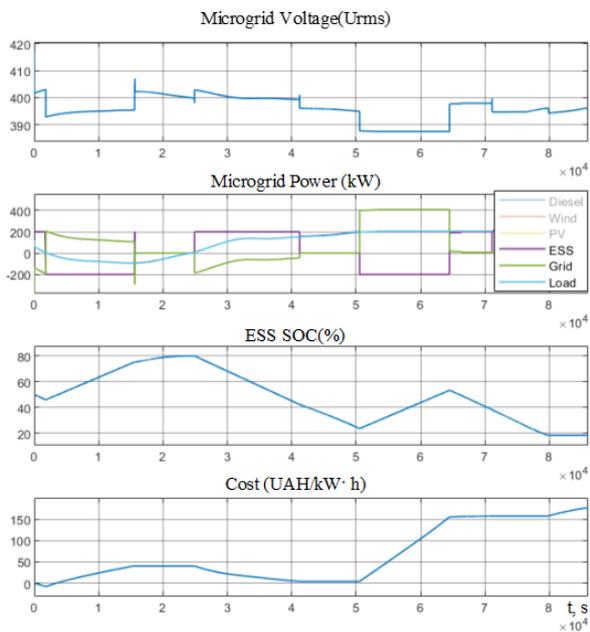


Рисунок 7. Часові діаграми режиму роботи мікромережі, режим №3

У режимі №4 (рис. 8) під час відключення зовнішньої електричної мережі (External Grid) мікромережа переходить у автономний режим, що супроводжується короткочасними провалами напруги, які видно на графіку напруги мікромережі (Microgrid Voltage (Urms)). Після цього стабілізація режиму здійснюється дизель-генератором (Diesel Generator), який бере на себе основне навантаження та забезпечує підтримання енергетичного балансу в умовах обмеженої або відсутньої генерації від інших джерел.

Графік потоків потужності (Microgrid Power (kW)) показує, що дизель-генератор забезпечує більшу частину виробітку. Акумуляторна батарея (Battery Storage) активно підлаштовується під динаміку роботи мікромережі: у моменти втрати зовнішньої мережі вона переходить у режим розряджання для підтримання живлення, а після встановлення стабільності та появи резервної генерації частково заряджається, що відображено на графіку рівня заряду акумулятора (ESS SOC).

Наприкінці інтервалу акумуляторна батарея знову починає розряджатися, компенсуючи зміни навантаження та підтримуючи енергопостачання в умовах підвищеної вартості електроенергії (Cost) та обмеженої генерації. Графік фінансових витрат на електроенергію демонструє різке зростання фінансових витрат у другій половині періоду, що пов'язано із залежністю мікромережі від роботи

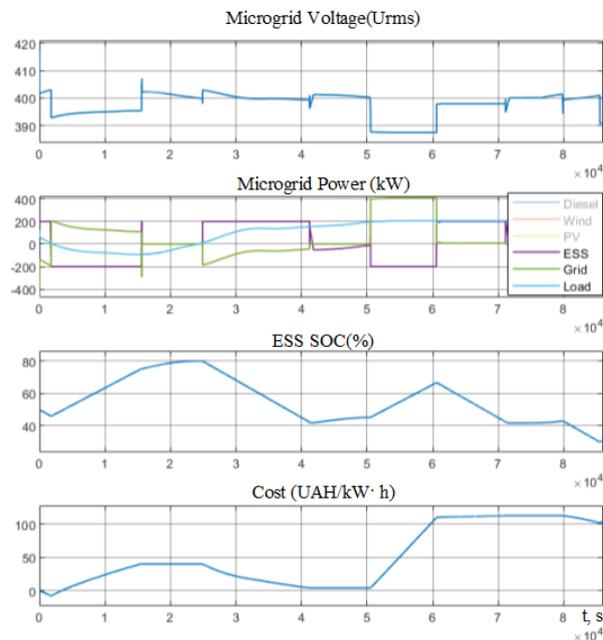


Рисунок 8. Часові діаграми режиму роботи мікромережі, режим №4

V. ВИСНОВКИ

У ході роботи сформульовано оптимізаційну задачу з мінімізації фінансових витрат на електричну енергію в електроенергетичному комплексі, який включає в себе електричну мережу, змінне та незмінне навантаження, системи акумулювання на базі електролітичної акумуляторної батареї, вітрогенеруючу, сонячну та дизельну електростанції. В якості балансуєного за потужністю елемента обрано систему акумулювання на базі електролітичного акумулятора.

Запропонований алгоритм реалізації задачі оптимізації, який враховує поточну вартість електричної енергії, яка циркулює між мікромережею та зовнішньою мережею, з урахуванням обмежень на рівень заряду/разряду акумуляторної батареї та доцільністю використання дизель-генератора.

Аналіз режимів підтвердив, що найбільш ефективним є режим з роботою мікромережі при активному використанні відновлюваних джерел і оптимізований підтримці з боку акумуляторної батареї, тоді як дизель-генератор доцільно вводити лише у випадках критичного дефіциту енергії та/або вимкнення зовнішньої мережі.

Отримані результати можуть бути використані для проектування систем енергоменеджменту та

оптимального керування мікромережами з комбінованими джерелами енергії малої та середньої потужності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Athafa A., Saghafi H. Microgrid power management and control fundamentals: A technical review // *Proceedings of the 7th National Conference on New Ideas in Electrical Engineering*. – Isfahan : Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, 2023.
- [2] Xing X., Jia L. Energy management in microgrid and multi-microgrid // *IET Renewable Power Generation*. – 2024. – Vol. 18. – P. 3480–3508. – DOI: 10.1049/rpg2.12816
- [3] Vemuri E., Kumar A., Tonmoy I., Panda K. P., Prince S., Babu N. P., Panda G. Power management and control in microgrid system // *Proceedings*. – 2022. – Chapter 50. – DOI: 10.1007/978-981-16-9033-4_50.
- [4] Toure I., Payman A., Camara M.-B., Dakyo B. Energy management in a renewable-based microgrid using a model predictive control method for electrical energy storage devices // *Electronics*. – 2024. – Vol. 13, No. 23.
- [5] Maruf A., Solomon K. A review of control strategies for microgrids // *Advances in Research*. – 2016. – Vol. 7. – P. 1–9. – DOI: 10.9734/AIR/2016/25722./10.9734/AIR/2016/25722
- [6] Hu X., Liu T., He C., Ma Y., Su Y., Yin H., Wang F., Tolbert L., Wang S., Liu Y. A real-time power management technique for microgrid with flexible boundaries // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2020. – Vol. 14. – DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.1576.
- [7] Osama A., Allam D., Fathy A., Abdelaziz A. Y., Kim W.-W., Hong J., Geem Z. W. Optimal energy managing and power scheduling of a microgrid in grid-connected mode using a modified multi-objective manta ray technique // *Energy Reports*. – 2025. – Vol. 13. – P. 4781–4799. – DOI: 10.1016/j.egyr.2025.03.036.
- [8] Oliynichenko M., Bialobrzheskyi O., Postil A. Research on power distribution in a microgrid with distributed electricity sources // *Electrical Engineering and Power Engineering*. – 2025. – No. 1. – P. 42–52. – DOI: 10.15588/1607-6761-2025-1-5.
- [9] Олійніченко М. Ю., Бялобржеський О. В., Постіл А. О., Шокар'єв Д. А. Мікромережа з альтернативними джерелами енергії для потреб сільськогосподарських підприємств // *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. – 2025. – № 8 (211). – DOI: 10.20998/2313-8890.2025.08.02.
- [10] Ладієва Л. Р. Методи оптимізації та пошуку оптимальних рішень : навч. посіб. [Електронне мережне видання]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.

Надійшла (Received) 01.12.2025;

Прийнята (Accepted) 22.12.2025;

Опублікована (Published) 30.03.2026;

INVESTIGATION OF ELECTRICITY COSTS DURING ENERGY FLOW OPTIMIZATION IN A MICROGRID WITH DISTRIBUTED ENERGY SOURCES UNDER CONDITIONS OF UNSTABLE GENERATION

- OLIYNICHENKO M.Y. PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6651-0175>, e-mail: oliynichenko@kdu.edu.ua;
- BIALOBRZHESKYI O.V. D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1669-4580>, e-mail: bialobrzheski@ukr.net;
- POSTIL A.O. PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9411-7047>, e-mail: artur_postil@kdu.edu.ua;

Purpose. Development of an optimal control procedure for a microgrid with alternative energy sources, external power supply, and a diesel generator unit

Methodology. In the course of the study, methods of formulating linear optimization problems and corresponding linear programming techniques were used, as well as simulation modeling methods within a visual programming environment.

Findings. The study investigates the control processes of a hybrid microgrid that includes a solar power plant, a wind energy installation, a battery storage unit, a diesel generator, and an external power grid. Using a developed model in the MATLAB/Simulink environment, the energy flows and the operation of the microgrid subsystems were analyzed under four operating modes with varying electrical power flows. Linear programming methods were applied

to optimize the energy balance, enabling the minimization of electricity costs while maintaining power balance and ensuring voltage stability within standard limits. The obtained results demonstrate the effectiveness of combining renewable energy sources, battery storage, and diesel generation for optimal microgrid control by balancing the battery storage unit's state of charge and confirm the feasibility of applying optimization algorithms for managing energy operating modes.

Originality. An objective function is proposed for solving the optimization problem of minimizing financial costs for electrical energy in a microgrid power system. The objective function accounts for the variable cost of electricity during power exchange with the external grid, constraints on the state of charge and discharge of the battery energy storage system, prioritization of renewable energy sources, as well as the economic feasibility of engaging a diesel generator unit depending on the current energy balance and economic conditions.

Practical value. The obtained results using the energy balance optimization algorithm can be applied to the design of energy management systems and optimal control of microgrids with combined low- and medium-power energy sources.

Keywords: harmonics; voltage deviation, battery storage, electrical energy, optimization, costs.

REFERENCE

- [1] Athafa A., Saghafi H. Microgrid power management and control fundamentals: A technical review // *Proceedings of the 7th National Conference on New Ideas in Electrical Engineering*. – Isfahan : Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, 2023.
- [2] Xing X., Jia L. Energy management in microgrid and multi-microgrid // *IET Renewable Power Generation*. – 2024. – Vol. 18. – P. 3480–3508. – DOI: 10.1049/rpg2.12816
- [3] Vemuri E., Kumar A., Tonmoy I., Panda K. P., Prince S., Babu N. P., Panda G. Power management and control in microgrid system // *Proceedings*. – 2022. – Chapter 50. – DOI: 10.1007/978-981-16-9033-4_50.
- [4] Toure I., Payman A., Camara M.-B., Dakyo B. Energy management in a renewable-based microgrid using a model predictive control method for electrical energy storage devices // *Electronics*. – 2024. – Vol. 13, No. 23.
- [5] Maruf A., Solomon K. A review of control strategies for microgrids // *Advances in Research*. – 2016. – Vol. 7. – P. 1–9. – DOI: 10.9734/AIR/2016/25722./10.9734/AIR/2016/25722
- [6] Hu X., Liu T., He C., Ma Y., Su Y., Yin H., Wang F., Tolbert L., Wang S., Liu Y. A real-time power management technique for microgrid with flexible boundaries // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2020. – Vol. 14. – DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.1576.
- [7] Osama A., Allam D., Fathy A., Abdelaziz A. Y., Kim W.-W., Hong J., Geem Z. W. Optimal energy managing and power scheduling of a microgrid in grid-connected mode using a modified multi-objective manta ray technique // *Energy Reports*. – 2025. – Vol. 13. – P. 4781–4799. – DOI: 10.1016/j.egyr.2025.03.036.
- [8] Oliynichenko M., Bialobrzheskyi O., Postil A. Research on power distribution in a microgrid with distributed electricity sources // *Electrical Engineering and Power Engineering*. – 2025. – No. 1. – P. 42–52. – DOI: 10.15588/1607-6761-2025-1-5.
- [9] Oliynichenko M., Bialobrzheskyi O., Postil A., Shokariov D. Microgrid with alternative energy sources for the needs of agricultural enterprises // *Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit*. – 2025. – No. 8 (211). – DOI: 10.20998/2313-8890.2025.08.02.
- [10] Ladiieva L. R. Methods of Optimization and Search for Optimal Solutions : textbook [Electronic network edition]. – Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023.