

АНАЛІЗ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ УСТАНОВКИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Т.Л. Кацадзе^{1,2 *}, канд. техн. наук, Д.І. Борсук^{1 **}, асп.

1 – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Берестейський пр., 37, Київ, 03056, Україна

2 – Інститут електродинаміки НАН України, Берестейський пр., 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: borsuk.denis@iil.kpi.ua

Досліджено задачу багатокритеріальної оптимізації роботи розподільної електричної мережі за допомогою установок зберігання енергії (УЗЕ). Для тестової моделі мережі виконано оптимізацію розміщення та потужності УЗЕ за критеріями мінімізації втрат електроенергії, а також показників надійності SAIDI, SAIFI та eENS. Розрахунки проводилися із застосуванням квазидинамічного моделювання та методу перебору станів, а в якості оптимізаційних методів використано алгоритми NSGA-II, NSGA-III, CMOPSO та SMSEMOA.

Виконано порівняльний аналіз збіжності та результативності метаевристичних алгоритмів. Показано, що генетичні алгоритми забезпечують більш повне дослідження простору пошуку та формують ширшу множину недомінантних рішень, проте потребують більшого обчислювального ресурсу. Встановлено статистично значущий вплив відстані до точок секціонування мережі, відстані до живлячих підстанцій та топологічної центральності вузлів на ефективність встановлення УЗЕ. Показано, що найбільший позитивний ефект від використання УЗЕ досягається у віддалених та топологічно периферійних ділянках мережі з обмеженими можливостями резервування. Отримані результати дозволяють сформулювати підхід до попереднього вибору вузлів-кандидатів перед застосуванням обчислювано складних метаевристичних алгоритмів, що дає можливість суттєво скоротити простір пошуку та прискорити процес оптимізації роботи мережі шляхом встановлення УЗЕ. Бібл. 8, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: установка зберігання енергії, оптимізація надійності, топологічний аналіз, генетичний алгоритм, алгоритм рою часток, багатокритеріальна задача.

Вступ. В останні роки спостерігається стійка тенденція розвитку технологій зберігання електроенергії. Разом з тим, існуючі дослідження показують суттєвий вплив установок зберігання енергії (УЗЕ) на підвищення надійності електропостачання [1, 2]. Наразі існує велика кількість досліджень щодо оптимізації роботи електричних мереж за допомогою УЗЕ [3, 4]. Підходи до вирішення даної задачі поділяються на два типи: аналітичні методи та метаевристичні [3]. Аналітичні методи передбачають розрахунки метрик чутливості вузлів мережі за рівнями напруги, втратами потужності, економічними метриками з подальшим ранжуванням та відбором вузлів-кандидатів до приєднання УЗЕ [3]. Метаевристичні підходи передбачають застосування методів стохастичної оптимізації, таких як генетичний алгоритм з його модифікаціями, алгоритм рою часток та ін. Перевагою цих методів є необов'язковість строгої формалізації задачі, а недоліком – значна тривалість обчислення [3]. Задачі моделювання роботи електричних мереж є складними та нелінійними, а задачі, що стосуються оптимізації роботи мереж часто є багатокритеріальними. Існуючі метрики попереднього відбору точок приєднання УЗЕ не враховують топологічні особливості мереж та часто засновані на аналізі чутливості техніко-економічних показників, а метаевристичні підходи можуть виявитись занадто важкими або тривалими для розрахунку.

Метою даної роботи є порівняння найбільш відомих метаевристичних підходів оптимізації роботи мережі із застосуванням УЗЕ, а також аналіз топологічних та режимних залежностей оптимальних рішень для виявлення нових метрик попереднього відбору точок приєднання.

Виклад основного матеріалу. У цій роботі було використано демонстраційну модель розподільчої мережі 20 кВ міста Тюбінген, Німеччина, що є частиною програмного комплексу DigSILENT PowerFactory [5]. Дана модель складається з чотирьох підстанцій та 862 односекційних трансформаторних підстанцій. Оптимізація роботи мережі шляхом приєднання УЗЕ виконувалася за критеріями річних втрат електроенергії та показниками надійності:

SAIDI, SAIFI, eENS (expected Energy Not Supplied). В якості змінних для пошуку оптимуму використовувалися індекс вузла для приєднання та номінальна потужність УЗЕ. Оскільки це моделювання є тестовим, то були застосовані наступні спрощення [6]:

- передбачається, що УЗЕ облаштовано grid-forming інвертором, який у разі аварії має змогу підтримувати роботу частини мережі в острівному режимі;
- у випадках відмов нова УЗЕ враховується як ідеальний компонент з погляду надійності;
- передбачається, що УЗЕ працює в режимі згладжування піків навантаження, а не в режимі арбітражу.

Для розрахунку втрат електричної енергії використовувалися квазідинамічне імітаційне моделювання в діапазоні одного року з дискретністю в 5 годин. Для розрахунку показників надійності було застосовано метод перебору станів з врахуванням відмови ЛЕП відповідно до їхньої частоти відмов та часу ремонту. Оптимізація виконувалася за постановками задачі та методів, наведених в табл. 1.

Таблиця 1

№ задачі	Критерії оптимізації	Метод(и) оптимізації
1	Втрати електроенергії, eENS	NSGA-II, CMOPSO
2	Втрати електроенергії, SAIDI	NSGA-II, CMOPSO
3	Втрати електроенергії, SAIFI	NSGA-II, CMOPSO
4	Втрати електроенергії, eENS, SAIDI, SAIFI	NSGA-III, SMSEMOA

Для досягнення кращого покриття простору пошуку запуск оптимізаційних розрахунків проводився до 3 разів для кожної задачі. Аналіз збіжності процесів багатокритеріальної оптимізації зручно проводити за характеристикою гіперобсягу (див. рис. 1).

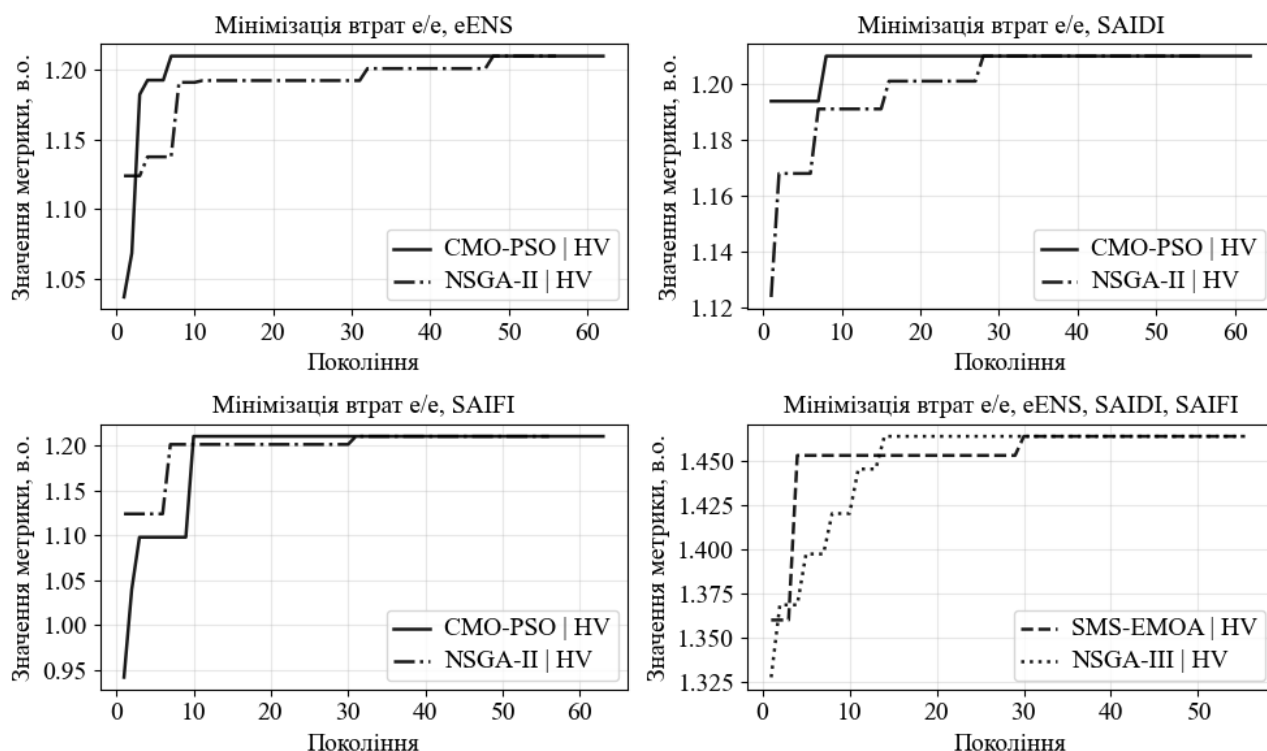


Рис. 1. Розрахункові метрики гіперобсягу оптимізаційних задач

З рис. 1 видно, що в задачах № 1, 2 та 4 використання алгоритмів NSGA-II та NSGA-III дає більш повне дослідження простору пошуку, це видно з динамічної зміни характеристики та пізнішого виходу на плато, ніж використання алгоритмів CMOPSO та SMSEMOA. Проте в задачі № 3 динаміка зміни гіперобсягу для обох алгоритмів ідентична, але характеристика для NSGA-II виходить на плато пізніше. Таким чином, при виборі алгоритму потріб-

но обирати компроміс між тривалістю роботи алгоритму та його результативністю. Для цього проаналізуємо простір результатів оптимізації [7]. З метою аналізу побудовано діаграми з результатами оптимізації в просторі критеріїв оптимізації, представлені на рис. 2.

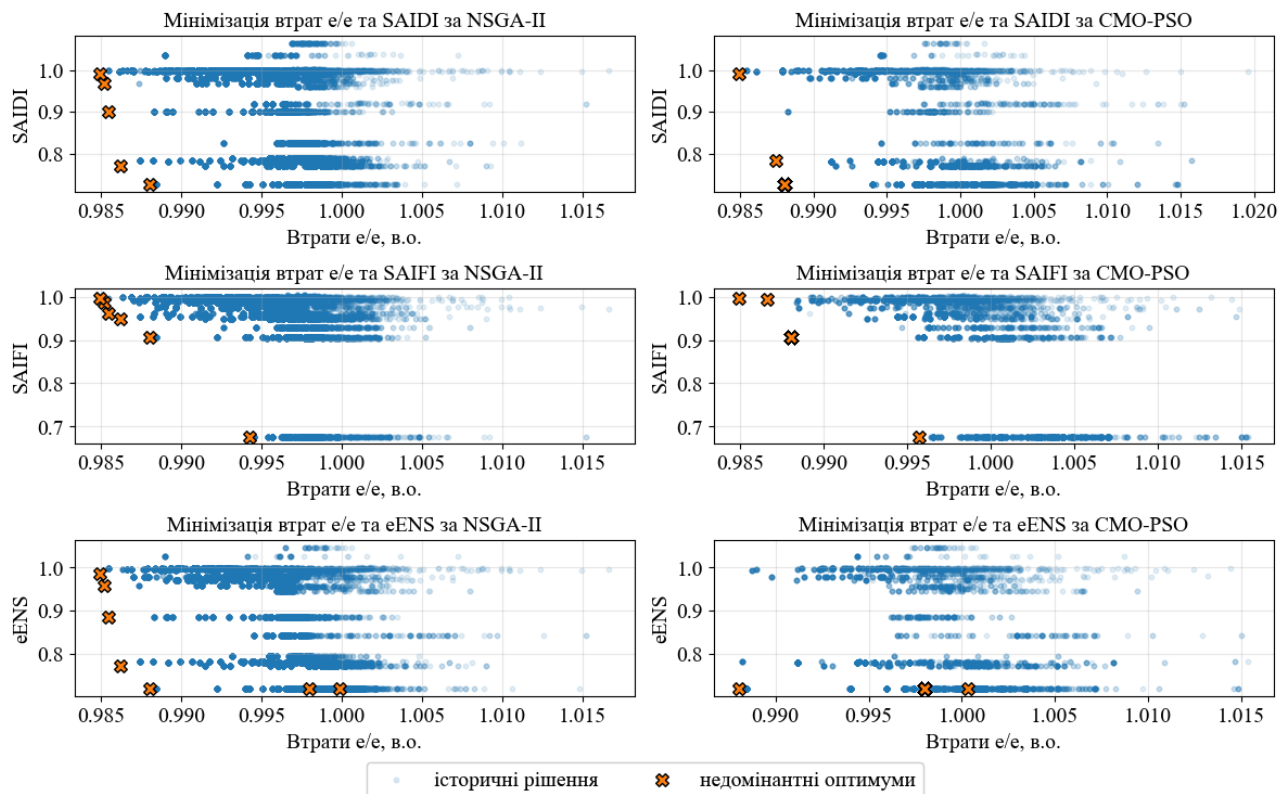


Рис. 2. Отримані рішення оптимізації в просторі критеріїв оптимізації

З рис. 2 видно, що множина недомінантних рішень при застосуванні NSGA-II більша, ніж при застосуванні CMOPSO. Проте рішення, знайдені за CMOPSO, також були знайдені за NSGA-II. Таким чином, NSGA-II характеризується більшою складністю та тривалістю пошуку, проте його застосування виправдано. Крім того, на рис. 2 видно, що обидва алгоритми мають точки-атрактори, що відповідають локальним домінантним оптимумам [7].

З метою забезпечення в подібних задачах можливості попереднього відбору вузлів-кандидатів проаналізуємо наявність топологічних залежностей знайдених оптимумів. Для критеріїв втрат та надійності з погляду топології важливими є відстань до найближчої точки секціонування мережі та найближчої живлячої підстанції. Для рішень недомінантних оптимумів побудовано залежності критеріїв оптимізації від відстані до найближчої точки секціонування мережі, що представлені на рис. 3.

З метою виявлення як самої залежності, так і її характеру аналіз доповнено середніми значеннями з їхніми стандартними відхиленнями, локальною поліноміальною та лінійною регресіями. Для кожної з залежностей розраховано та нанесено на діаграму коефіцієнти кореляції Пірсона та Спірмена. Варто відмітити, що відстань до найближчої точки секціонування розраховувалася в тому числі й через шини живлячої підстанції, у випадках приєднання УЗЕ до вузла нерезервованого фідеру.

На всіх діаграмах на рис. 3 спостерігаються залежності, які можна апроксимувати прямою. Втрати електроенергії характеризуються коефіцієнтами кореляції Пірсона та Спірмена 0,403 в.о. та 0,388 в.о. відповідно, що свідчить про зростання втрат електроенергії при віддаленні від точок секціонування. Для критерію eENS ті ж коефіцієнти кореляції складають -0,24 в.о. та -0,358 в.о., що вказує на зниження (покращення) метрики при віддаленні від точок секціонування. У випадку індексу SAIFI спостерігається майже аналогічна залежність. Водночас SAIDI, на відміну від eENS та SAIFI, має найкращу кореляцію, знижуючись при віддаленні точки приєднання УЗЕ від точки нормального розрізу.

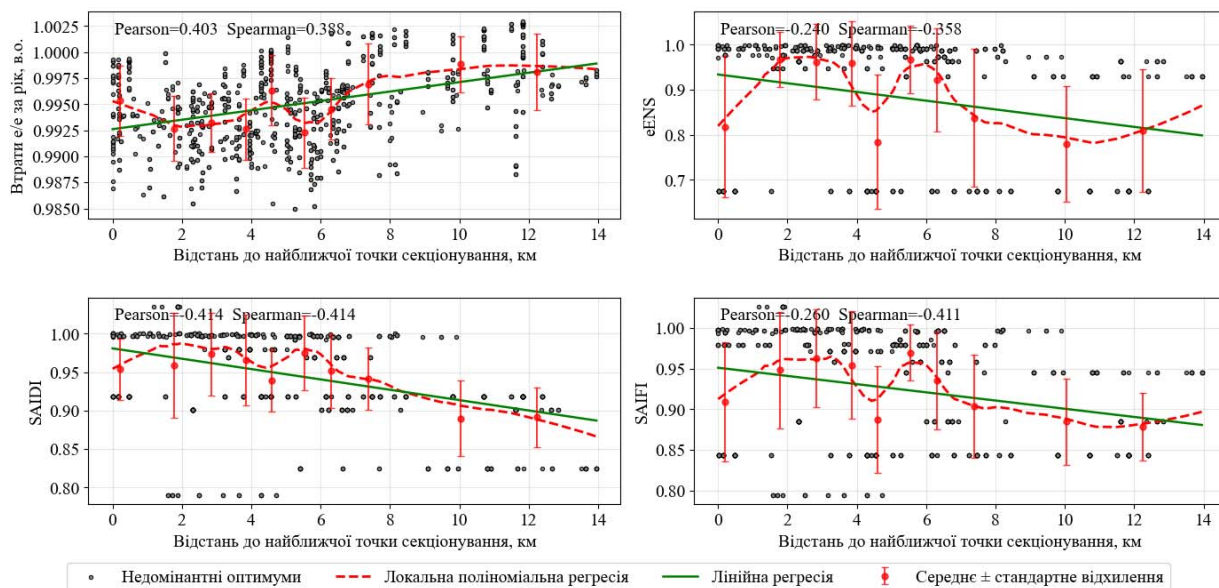


Рис. 3. Залежність недомінантних оптимумів від відстані між точкою приєднання УЗЕ та найближчою точкою секціонування мережі

Залежність втрат електроенергії від відстані до точки секціонування не перевищує 1% від втрат до приєднання УЗЕ, тобто дана залежність не має суттєвого впливу на оптимізацію. Проте показники надійності залежать від віддаленості УЗЕ значно сильніше і матимуть вплив на попередній відбір вузлів-кандидатів.

Загалом, отримані залежності можна пояснити наступним чином. У розподільчій радіальній мережі у випадку аварії на ділянці фідера від живлячої підстанції до точки секціонування споживачі отримують живлення завдяки переключенню навантаження фідера на резервуючий фідер. У такому випадку приєднання УЗЕ в зазначену частину фідера має низький вплив на надійність. У випадку аварії в нерезерованій ділянці фідера приєднання УЗЕ на початку цієї ділянки сприяє підвищенню показників надійності та зменшенню втрат. У цьому разі втрати електроенергії знижуються і в нормальному режимі роботи мережі.

Аналогічно для перевірки залежності критеріїв оптимізації від відстані до найближчої живлячої підстанції побудовано діаграми (див. рис. 4).

На всіх діаграмах на рис. 4 також спостерігаються залежності, що апроксимовані лінійною регресією. Втрати електроенергії характеризуються коефіцієнтами кореляції 0,23 в.о. та 0,137 в.о., це свідчить про незначне зростання втрат електроенергії при віддаленні від живлячої підстанції (в межах 1%). Для критерію eENS ті ж коефіцієнти кореляції складають -0,592 в.о. та -0,343 в.о., що вказує на суттєве зниження метрики при віддаленні від живлячої підстанції. Для SAIDI та SAIFI коефіцієнти кореляції є низькими (не більше 0,15 в.о.), що свідчить про слабку або відсутню залежність.

Отже, при попередньому відборі вузлів-кандидатів потрібно виходити з того, за яким показником проводиться оптимізація. Функція втрат електроенергії має слабку залежність від точки приєднання УЗЕ та змінюється в межах 1%. Показник eENS зменшується при збільшенні відстані як від точки секціонування, так і від живлячої підстанції. SAIDI, хоча й слабо, корелює з відстанню до живлячої підстанції, може зростати, тому потрібно обирати вузли-кандидати зважено, узгоджено як з відстанню до живлячої підстанції, так і з відстанню до точки секціонування. Виконуючи оптимізацію за SAIFI можна не брати до уваги відстань від живлячої підстанції, адже така залежність є незначною.

Разом з врахуванням особливостей топології мережі, необхідно зважати на величину потоку потужності, що виходить з вузла-кандидата. В отриманому результаті спостерігається слабка залежність функції втрат електроенергії від величини потоку потужності (коефіцієнт кореляції 0,146 в.о.). Функція eENS відповідно до кореляції Спірмена -0,06 в.о. також слабо корелює з потоком потужності через вузол. Проте функції SAIDI та SAIFI суттєво корелю-

ють з коефіцієнтами Спірмена 0,356 в.о. та 0,333 в.о. відповідно. Таким чином, при оптимізації за SAIDI та SAIFI на етапі попереднього відбору точок приєднання додатково можна врахувати величину потужності, що перетікає через вузол.

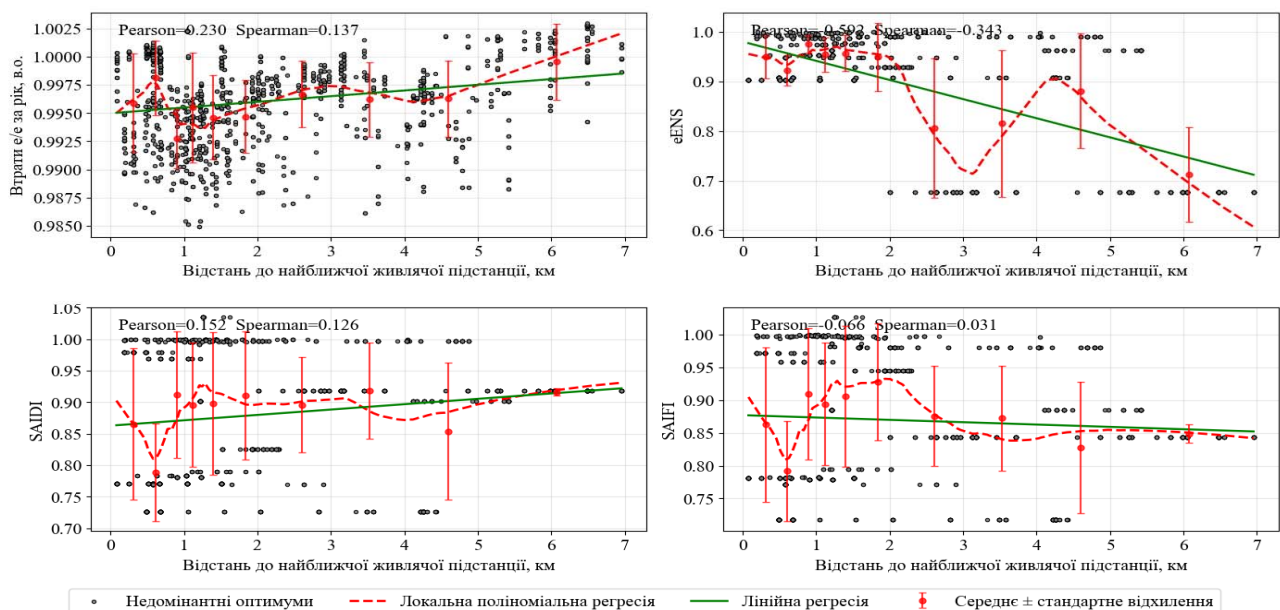


Рис. 4. Залежність недомінантних оптимумів від відстані між точкою приєднання УЗЕ та найближчою живлячою підстанцією

Для розуміння того, які вузли можуть бути виключені з процесу оптимізації, окрім кореляційних залежностей Парето-оптимальних рішень необхідно дослідити їхні структурні відмінності від неоптимальних рішень. З цією метою за допомогою U-критерію Манна-Уїтні [8] було складено характеристику структурної відмінності Парето-оптимальних вузлів від неоптимальних (табл. 2).

Таблиця 2

Метрика	Середня вихідна потужність, кВт	Відстань до живлячої підстанції, км	Відстань до точки секціонування, км	Ступінь центральності, в.о.
Різниця медіан груп Парето-оптимальних та неоптимальних рішень	4,10	0,26	1,30	-0,000172
U-критерій Манна-Уїтні	112000,00	122081,00	106511,00	94939,00
Рівень статистичної значущості	0,68	0,01	0,0000005	0,0007168
Напрямок ефекту	Оптимальні > Неоптимальні	Оптимальні > Неоптимальні	Оптимальні > Неоптимальні	Оптимальні < Неоптимальні

За даними табл. 2 видно статистично значущу різницю між множиною вузлів з Парето-оптимальними рішеннями та загальною множиною вузлів мережі за ознаками відстані до живлячої підстанції, відстані до точки секціонування мережі та топологічною центральністю. Зокрема, Парето-оптимальні рішення характеризуються більшою віддаленістю від точок нормального розрізу та джерел живлення, а також нижчими значеннями топологічної центральності, тобто тупикові вузли, кінці фідерів або відгалужень ліній. Це свідчить про те, що найбільший ефект від встановлення УЗЕ досягається у віддалених та топологічно периферійних ділянках мережі, які мають обмежені можливості резервування за рахунок оперативних перемикачів. Водночас статистично значущого зв'язку між оптимальністю вузла та величиною середньої вихідної потужності виявлено не було. Це свідчить про те, що ефективність розміщення УЗЕ в розглянутій задачі визначається переважно топологічними особливостями мережі та доступністю резервування, а не лише рівнем локального навантаження та потоку потужності.

Висновки. Оптимізація режимів роботи мережі за допомогою метаевристичних методів може бути тривалою та обтяжливою за обчислювальними ресурсами. При оптимізації надійності роботи мережі для збереження точності метаевристичних алгоритмів та суттєвого прискорення їхньої роботи слід виконувати попередній зважений відбір вузлів відповідно до їхньої віддаленості від живлячої підстанції, до точок секціонування та їхньої топологічної центральності.

Проведене дослідження показало вагому структурну закономірність впливу топології мережі на результати багатокритеріальної оптимізації, що дозволяє змогу в подальшому використовувати це в аналітичних підходах як обмеження для метаевристичних алгоритмів та в комплексних оптимізаційних задачах та задачах планування розвитку мережі.

1. Dratsas P. A., Psarros G. N., Papathanassiou S. A. Battery energy storage contribution to system adequacy. *Energies*. 2021. Vol. 14, No 16. Art. 5146. DOI: <https://doi.org/10.3390/en1416514>
2. Islam M. M., et al. Improving reliability and stability of the power systems: A comprehensive review on the role of energy storage systems to enhance flexibility. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 152738–152765. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3476959>
3. Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network / L. A. Wong та ін. *Journal of energy storage*. 2019. Т. 21. Pp. 489–504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.12.015>
4. Jaradat T., Khatib T. Optimal sizing of battery energy storage system in electrical power distribution network. *Energy exploration & exploitation*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1177/01445987241300183>
5. DIgSILENT GmbH – Power System Solutions. PowerFactory - MV distribution network - reliability assessment, 2024. *YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=RTiCEVJL62Y> (дата звернення: 11.05.2026)
6. F. Calero et al. A review of modeling and applications of energy storage systems in power grids *Proceedings of the IEEE*. 2022. Pp. 1–26. URL: <https://doi.org/10.1109/jproc.2022.3158607>
7. Blank J., Deb K. Pymoo: multi-objective optimization in python. *IEEE access*. 2020. Т. 8. Pp. 89497–89509. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2990567>
8. MacFarland T. W., Yates J. M. Introduction to nonparametric statistics for the biological sciences using R. Cham : Springer International Publishing, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30634-6>

ANALYSIS OF MULTI-OBJECTIVE DISTRIBUTION NETWORK OPERATION OPTIMIZATION USING BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS

T. Katsadze^{1,2}, D. Borsuk¹

1 – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, Beresteyskyi ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

2 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: borsuk.denis@iit.kpi.ua

This paper investigates the problem of multi-objective optimization of a distribution network using BESS. For a test network model, the placement and capacity of BESS were optimized based on criteria such as energy losses, as well as the reliability metrics SAIDI, SAIFI and eENS. Calculations were carried out using quasi-dynamic simulation and Monte Carlo simulation, whilst the NSGA-II, NSGA-III, CMOPSO and SMSEMOA algorithms were used as optimization methods. The paper presents a comparative analysis of the convergence and performance of meta-heuristic algorithms. It is shown that genetic algorithms ensure a more thorough exploration of the design space and generate a broader set of non-dominant solutions, but require greater computational resources. A statistically significant influence of the distance to network tie open points, the distance to power supply centers, and the topological centrality of nodes on the effectiveness of BESS deployment has been established. It is shown that the greatest positive effect from the use of BESS is achieved in remote and topologically peripheral network parts with limited restoration capabilities. The results obtained allow for the development of an approach to the preliminary selection of candidate nodes prior to running computationally complex meta-heuristic algorithms, which makes it possible to significantly reduce the design space and accelerate network optimization through the deployment of BESSs. Ref. 8, fig. 4, tables 2.

Keywords: BESS, reliability optimization, topological analysis, genetic algorithm, particle swarm algorithm, multi-criteria problem.

Надійшла: 22.07.2026

Прийнята: 03.08.2026

Submitted: 22.07.2026

Accepted: 03.08.2026