

# ОПТИМІЗАЦІЯ ПРИЄДНАННЯ ПРОМИСЛОВИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДО РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ЕКОНОМІЧНОГО СТРУМОРОЗПОДІЛУ

Вінницький національний технічний університет (ВНТУ)

## **Анотація**

Запропоновано метод та алгоритм визначення оптимальних місць приєднання промислових накопичувачів енергії (ПНЕ) до розподільних електричних мереж на основі імітації економічного струморозподілу. Показано, що оптимізація встановлених потужностей та місць приєднання ПНЕ за комплексним критерієм оптимальності (наприклад, за рентабельністю капіталовкладень) може бути зведена до визначеної кількості розрахунків режиму електричної мережі, до заступної  $r$ -схеми якої додано фіктивні опори, що визначаються економічними чинниками.

**Ключові слова:** промислові накопичувачі енергії, розподільні електричні мережі, оптимізація встановленої потужності, вирівнювання навантажень, комплексний критерій оптимальності.

## **Abstract**

A method and algorithm for determining the optimal connection points of industrial energy storage devices (IESs) to electrical distribution networks based on the simulation of economic current distribution are proposed. It is shown that the optimization of installed capacities and IES connection points by a complex criterion of optimality (for example, by return on investment) can be reduced to a certain number of calculations of the electric network mode, to the substitute  $r$ -circuit of which fictitious resistors determined by economic factors are added.

**Keywords:** industrial energy storage devices, distribution electric networks, optimization of installed capacity, load balancing, complex optimality criterion.

## **Вступ**

Сучасні розподільні електричні мережі (РЕМ) повинні забезпечувати надійне та ефективне енергозабезпечення споживачів, а також транспортування електроенергії розосереджених джерел енергії. Крім реконструкції РЕМ та модернізації їх основного обладнання, набувають актуальності дослідження у напрямку вдосконалення структури та способів керування їх режимами [1].

Для вирішення зазначеної проблеми принципи побудови сучасних електроенергетичних систем мають відповідати загальному прогресу техніки та технологій. Цього можна досягти, впроваджуючи, разом з новими інформаційними технологіями, результати системних теоретичних досліджень ЕЕС, які базуються на фундаментальних фізичних принципах у поєднанні з сучасними підходами до математичного моделювання та оптимізації їх станів [2].

З розбудовою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у розподільних електричних мережах (РЕМ) актуальною проблемою забезпечення енергоефективності мереж стала оптимізація перетікань активної потужності [3]. Можливості зміни режимів роботи ВДЕ на вимогу диспетчерів РЕМ обмежені недопущенням аварійних режимів, або усуненням їх наслідків. Виходячи з цього, розглядається можливість застосування промислових накопичувачів енергії (ПНЕ) для компенсації нерівномірності добового завантаження мереж та вирівнювання профілю напруги у критичних вузлах [4]. Вирішення цієї задачі передбачає вибір параметрів та розміщення промислових накопичувачів, а також регулювання їх потужності в залежності від режимів РЕМ.

Проектна постановка задачі розміщення ПНЕ в електричних мережах потребує врахування широкого комплексу факторів, що впливають на ефективність роботи електроустановок та якість електроенергії, а також економічність технічного рішення. Для вирішення таких задач розроблено низку методів оптимізації. Однак у сучасних умовах актуальними і до кінця не вирішеними залишаються питання оптимізації перетікань активної потужності в РЕМ, що забезпечила б зниження втрат електроенергії та належну якість напруги завдяки новим засобам регулювання [5].

## Результати досліджень

**Постановка задачі.** Для розподільної електромережі, структура та параметри якої є заданими, необхідно визначити місця приєднання та потужності ПНЕ, що забезпечать максимальну рентабельність капіталовкладень з урахуванням технічних обмежень об'єкта дослідження.

Для розв'язання подібних задач високу ефективність показав метод економічного струморозподілу [2], що отриманий на основі принципу найменшої дії у формулюванні Гамільтона-Остроградського. Відомо, що задача оптимізації перетікань активної потужності в електричних мережах за критерієм мінімуму втрат електроенергії може бути зведена до розрахунку економічного струморозподілу з використанням заступної г-схеми електромереж [2]. Аналогічний підхід було застосовано для оптимізації розміщення та потужностей ПНЕ за рентабельністю капіталовкладень. Для цього до заступної г-схеми було введено додаткові економічні опори (рис. 1), що відтворюють вплив економічних чинників, зокрема витрати на встановлення та експлуатацію ПНЕ.

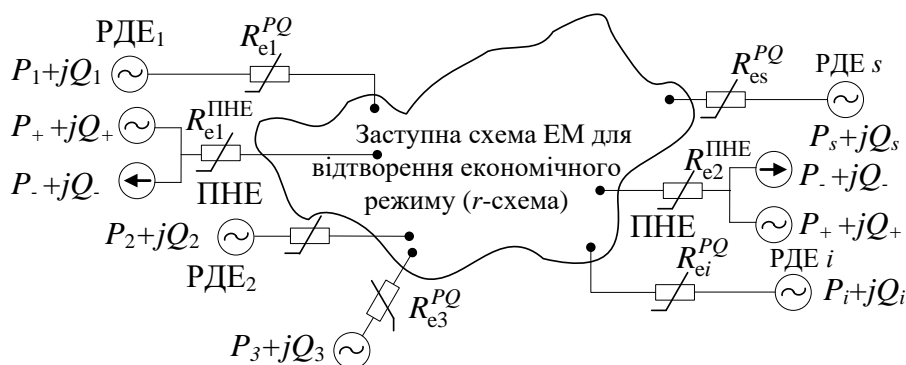


Рис. 1 – Заступна схема РЕМ для розрахунку економічного струморозподілу за комплексним економічним критерієм

Використовуючи математичні перетворення функції рентабельності з урахуванням джерел окупності капіталовкладень в ЕМ було отримано вираз для визначення економічного опору для окремого ПНЕ:

$$R_{ei}^{PNE} = \frac{U_i^2}{P_i} \left[ \alpha_{втр} + \frac{K_i (\alpha_c + \alpha_p)(1 - \alpha_n) + (\alpha_{кр} + \alpha_p)}{\tau c (1 - \alpha_n)} \right],$$

де  $U_i$ ,  $P_i$ ,  $K_i$  – середньозважена напруга у потенційному вузлі приєднання, встановлена потужність та капіталовкладення в ПНЕ;  $\alpha_{втр}$ ,  $\alpha_c$ ,  $\alpha_p$  – відносні втрати електроенергії в ПНЕ, відносні витрати на їх експлуатацію та додаткові річні амортизаційні відрахування;  $\alpha_n$ ,  $\alpha_{кр}$  – податок на прибуток та річні витрати на обслуговування кредиту;  $c$ ,  $\tau$  – вартість втрат електроенергії та час максимальних втрат.

Використання ПНЕ, як додаткових джерел енергії у електричних мережах, має певні особливості, зокрема, необхідність накопичення енергії перед її використанням, неможливість миттєвого накопичення енергії, обмеженість видачі потужності рівнем заряду акумуляторів. Виходячи з цього, алгоритм оптимізації вузлів приєднання ПНЕ до електромереж має відмінності, порівняно з оптимізацією приєднання традиційних джерел енергії. Так, імітація ідеального струморозподілу [2] виконується щонайменше для двох станів досліджуваної мережі: стану, що характеризується максимальним локальним генеруванням, та стану з максимальним споживанням та відсутністю генерування ВДЕ. Крім того, необхідно визначити тривалість проміжків часу, коли локальне навантаження перевищує середнє значення за графіком ( $T_{max}$ ), та виявляється меншим за нього ( $T_{min}$ ). Отримані дані дають змогу оцінити обсяги електроенергії, що необхідні для вирівнювання навантаження РЕМ, а також можливість їх накопичення та видачі протягом визначених періодів часу. Крім того, імітація ідеальних режимів сприяє розміщенню ПНЕ на підстанціях, де вони спричинятимуть мінімальне підвищення втрат в режимі споживання та максимальне їх зменшення в режимі видачі електроенергії.

Разом з тим, найкращі результати з оптимізації розміщення ПНЕ дає імітація ідеальних режимів на півгодинних інтервалах, використовуючи виміряні, або типові графіки навантаження та генерування. У цьому випадку крім оптимальних місць приєднання ПНЕ вдається визначити характерний графік їх заряду-розряду, що є вихідними даними для підбору необхідних технічних параметрів накопичувача під конкретні умови функціонування.

### Висновки

Введення встановлених потужностей додаткових ПНЕ до переліку залежних параметрів режиму ЕМ дає змогу розрахувати їх оптимальні значення за комплексним критерієм. Вони відповідають мінімуму втрат активної потужності в розрахунковій  $r$ -схемі з економічними опорами, тобто максимуму рентабельності капіталовкладень у додаткові ПНЕ.

Використання вимірних, або типових графіків навантаження/генерування РЕМ для імітації ідеальних режимів на півгодинних інтервалах сприяє оптимізації не лише місць приєднання, але й параметрів промислових накопичувачів для використання у конкретних мережах.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їх технологічне забезпечення // Технічна електродинаміка. – 2015. – №6. – С. 44–50.

[2] Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці [П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, В. В. Нетребський, В. В. Тепля]: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. – 212 с. – ISBN 978-966-641-576-2.

[3] V. Calderaro, V. Galdi, F. Lamberti and A. Piccolo, "Co-located storage systems with renewable energy sources for voltage support in distribution networks," 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2015.7286486.

[4] A. Ashoornezhad, H. Falaghi, M. Yousefi and A. Hajizadeh, "Bi-Level Distribution Network Planning Integrated with Energy Storage to PV-Connected Network," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2020, pp. 1325-1329, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152508.

[5] M. Stecca, L. R. Elizondo, T. B. Soeiro, P. Bauer and P. Palensky, "A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems Into Distribution Networks," in IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 1, pp. 46-65, 2020, doi: 10.1109/OJIES.2020.2981832.

**Володимир Кулик** – доктор технічних наук, професор кафедри Електричних станцій та систем ВНТУ, м. Вінниця, E-mail: volodymyrvkulyk@gmail.com

**Максим Затхей** – студент освітньої програми «Електричні системи і мережі» другого (магістерського) рівня вищої освіти Факультету електроенергетики та електромеханіки ВНТУ, м. Вінниця, E-mail: maxzatkhey@gmail.com