

# ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОМИСЛОВИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет

## **Анотація:**

*У даній роботі розглянуто переваги впровадження промислових накопичувачів енергії в розподільчі електричні мережі. Досліджено та проаналізовано вплив накопичувачів на підвищення енергоефективності та якості роботи мережі в цілому.*

**Ключові слова:** промислові накопичувачі, електроенергетична система, BESS

## **Abstract:**

*In this paper examines the advantages of introducing industrial energy storage in distribution networks. The impact of storage devices on improving energy efficiency and the quality of the network as a whole has been studied and analyzed.*

**Keywords:** industrial storage devices, electric power system, BESS

## **Вступ**

В сучасній енергетичній системі (ЕС) є актуальним питання акумулювання надлишку енергії, що генерують відновлювальні джерела енергії (ВДЕ). В силу своєї природи, процес накопичення електроенергії, на сьогоднішній день, є дорогостороннім та важкодоступним, тому актуальним є питання маневрених потужностей, за допомогою яких є можливість покриття раптових змін пов'язаних з провалами або, навпаки, зростанням навантаження, задля підтримки якості та надійності електропостачання споживачів. Наявні методи дають можливість впливати на енергетичну систему за такими параметрами як номінальна потужність, енергетична ємність та розташування в мережі. Напрямок на сьогодні є затребуваним, а тому широко відкритий для інвестування.

## **Основна частина**

Для розподільної електромережі, структура та параметри якої є відомими, необхідно визначити оптимальні місця приєднання, значення потужностей та енергоемностей BESS (Battery Energy Storage System), що призначені для групового внутрішньодобового коригування графіків навантаження та забезпечення максимальної рентабельності капіталовкладень. Необхідно врахувати обмеження на відхилення напруги на шинах підстанцій, струмові навантаження ліній електропередачі та силових трансформаторів районних електричних мереж (РЕМ) у режимах заряду та розряду.

Розміщення BESS слід визначати з урахуванням технічних можливостей їх приєднання на підстанціях розподільних мереж. Формально постановка наведеної задачі оптимізації розміщення накопичувача з урахуванням активних обмежень може бути подана так:

$$\left\{ \begin{array}{l}
R(\mathbf{X}) = \frac{\Pi_p(\mathbf{X}) + A_p(\mathbf{X})}{K(\mathbf{X})} \rightarrow \max, \mathbf{X} = \{P_i, E_i, L_i, i \in [1 \dots n_n]\}; \\
L_i \in \mathbf{L}; \\
E_{i(t)} = E_{i(0)} - \sum_{j=0}^t (\eta P_{Hi(j)}^+ - P_{Hi(j)}^-); \\
D_t = \sum_{i=1}^{n_n} P_{Hi(t)}^+ - \sum_{i=1}^{n_c} P_{Ci(t)} - \Delta P(\mathbf{X}_t); \\
C_t = \sum_{i=1}^{n_n} P_{Hi(t)}^- + \sum_{i=1}^{n_c} P_{Ci(t)} + \Delta P(\mathbf{X}_t); \\
D_t \leq D_{\max}, t \in \mathbf{T}_D; \quad C_t \leq C_{\max}, t \in \mathbf{T}_C; \\
\mathbf{T} = \mathbf{T}_C \cup \mathbf{T}_D; \\
E_{i(t)} \leq E_i, t \in \mathbf{T}, \\
E_{i(t+1)} - E_{i(t)} \leq \Delta E_{i_{\max}}(E_{i(t)}), t \in \mathbf{T}, \\
P_{Hi(t)}^+ \leq P_i, P_{Hi(t)}^- \leq P_i, i \in [1 \dots n_n], t \in \mathbf{T}; \\
U_{i_{\min}} \leq U_{i(t)} \leq U_{i_{\max}}, i \in [1 \dots n_n], t \in \mathbf{T}; \\
I_{i(t)} \leq I_{i_{\max}}, i \in [1 \dots n_n], t \in \mathbf{T},
\end{array} \right. \quad (1)$$

де  $\Pi_p(X)$  – поточний річний прибуток;  $A_p(X)$  – додаткові річні амортизаційні відрахування на реновацію обладнання РЕМ;  $K(X)$  – капіталовкладення, пов'язані з впровадженням BESS;  $X$  – множина оптимізованих змінних, що характеризують розміщення BESS, зокрема, встановлена потужність ( $P_i$ ), енергоемність ( $E_i$ ) та місце приєднання ( $L_i$ )  $i$ -го накопичувача;  $n_n, n_n, n_b$  – відповідно, кількість BESS, вузлів з контрольованою напругою та віток з контрольованим струмом;  $L$  – множина потенційних місць встановлення BESS;  $E_{i(0)}, E_{i(t)}$  – енергія накопичувача, що може бути вилучена станом на початок розрахункового періоду та в момент часу  $t$ ;  $\eta$  – показник ефективності циклу заряду/розряду BESS (встановлює частку накопиченої енергії, що може бути використана);  $P_{Hi(t)}^+, P_{Hi(t)}^-$  – середня потужність накопичувача, відповідно, під час розряду та заряду акумуляторів;  $T_D, T_C$  – множина періодів часу  $t$  заданої тривалості, що відповідають розряду та заряду акумуляторів накопичувача, відповідно;  $D_t, C_t$  – небаланси потужності, що виникають у РЕМ протягом періоду  $t$  розряду чи заряду акумуляторів накопичувача, відповідно;  $U_{i_{\min}}, U_{i_{\max}}, I_{i_{\max}}$  – гранично-допустимі значення напруг у контрольованих вузлах та струмів у контрольованих вітках заступної схеми РЕМ;  $C_{\max}, D_{\max}$  – граничні значення перетоків електроенергії на межі балансової належності РЕМ у прямому та зворотному напрямках, відповідно.

Відомо, що задача оптимізації перетікань активної потужності в електричних мережах за критерієм мінімуму втрат електроенергії може бути зведена до розрахунку економічного струморозподілу [1] з використанням заступної г-схеми електромереж. Для цього до заступної г-схеми було введено додаткові економічні опори (рис.1), що відтворюють вплив економічних чинників, зокрема витрати на встановлення та експлуатацію BESS.

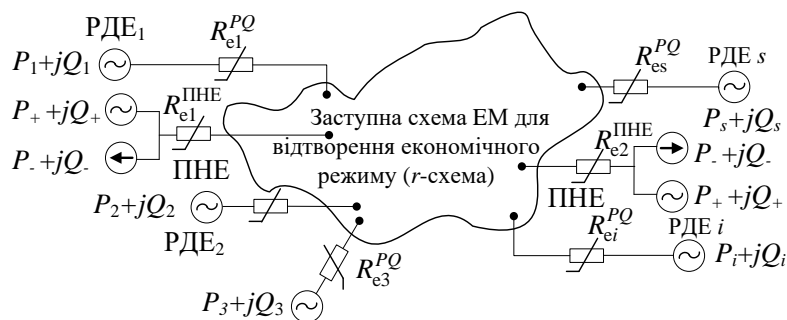


Рис.1 - Заступна схема РЕМ для розрахунку економічного струморозподілу за комплексним економічним критерієм

Використавши методику, що наведена в статті [2], визначаємо відповідні економічні опори виходячи з рентабельності капіталовкладень:

$$R_{ei}^P = \frac{U_i^2}{P_i} \left[ \alpha_{emp} + \frac{K_i (\alpha_e + \alpha_{emp})(1 + \alpha_n) + (\alpha_{kp} + \alpha_p)}{\tau_c (1 - \alpha_n)} \right], \quad (1)$$

Співвідношення для визначення економічних опорів  $R_{ei}^P$  містять незалежні ( $P_i$ ) та залежні ( $U_i$ ) параметри оптимізаційної задачі, а також економічні показники ( $K_i$ ), що будуть змінюватися в процесі пошуку розв'язку. Отже, ці вони не є постійними й потребують уточнення на кожній ітерації.

Враховуючи, що значення економічних опорів співмірні зі значеннями опорів ліній електропередачі та трансформаторів розподільних мереж, чутливість економічних опорів до відхилень напруги, які виникають в наслідок функціонування BESS, значно знижується за зростання встановленої потужності останніх  $P_i$ . Разом з тим зменшуються й значення  $R_{ei}^P$ . Це сприяє подальшому нарощуванню встановлених потужностей BESS, а у підсумку – зменшенню кількості встановлених пристроїв, а отже, скороченню капітальних витрат та експлуатаційних видатків. Таким чином, розв'язання задачі оптимізації розміщення BESS з використанням економічних опорів забезпечує досягнення максимальної рентабельності.

На рис. 2 наведено структурну схему програмного модулю оптимізації розміщення додаткових BESS в електричних мережах, призначеного для розв'язання таких задач: аналіз та введення режиму електричної мережі (ЕМ) у допустиму область; оцінювання доцільності встановлення BESS; оптимізація режиму за активною потужністю. Означені задачі є функціонально пов'язаними та містять низку спільних процедур та дозволяють ефективно вирішувати питання технікоекономічного обґрунтування компенсації активної потужності.

Вихідними даними для визначення оптимальних місць приєднання та потужностей BESS в електромережах є пасивні параметри ЕМ, що можуть бути використані для оптимізації перетікань активної потужності [3].

Інформація про пасивні параметри надходить з корпоративних баз даних енергопідприємства, архівів служби ліній, підстанцій, диспетчерської служби тощо, залежно від функціональної структури підприємства. Інформація про режимні параметри визначається розрахунковим шляхом, використовуючи інформацію технічного та комерційного моніторингу енергопідприємства. Розрахункам з оптимізації розміщення BESS мають передувати аналітичні розрахунки для оцінювання критичних режимів ЕМ з огляду на регулювання напруги та активної потужності, зокрема, режиму мінімальних та максимальних навантажень, а також післяаварійних режимів.

Одним із показників економічної ефективності застосування BESS в енергосистемі є аналіз його впливу на втрати електроенергії, зокрема, питання: чи завжди при роботі відбувається зниження втрат електроенергії, за яких умов зниження втрат дійсно відбувається, у яких випадках та коли воно буде максимальним.

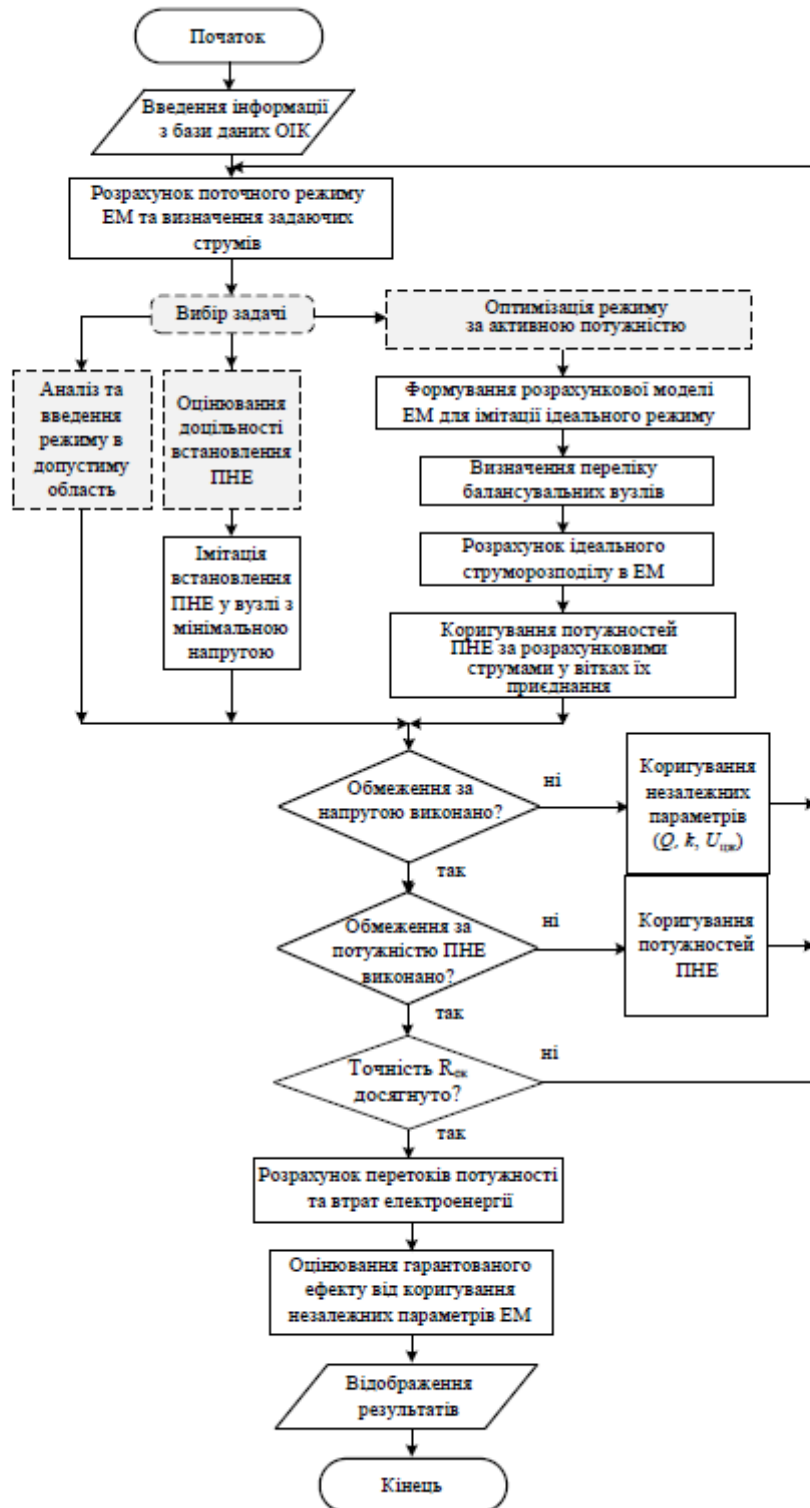


Рисунок 2 – Структура модулю оптимізації розміщення BESS в електричних мережах

Вплив на втрати електроенергії в даному випадку розглядається як вузол, до якого під'єднане навантаження із опором  $r$  та номінальною напругою  $U_{ном}$ , яке на протязі доби характеризується найбільшою  $P_{нб}$  та найменшою  $P_{нм}$  потужністю навантаження. До вузла підключений накопичувач із коефіцієнтом корисної дії  $\eta$ , який в режимі найменшого навантаження споживає активну потужність  $P_{заряду}$  за час  $t_{заряду}$ , а в режимі найбільшого навантаження віддає потужність  $P_{розряду}$  за час  $t_{розряду}$ , звідси отримає вираз:

$$P_{розряду} \cdot t_{розряду} = \eta \cdot P_{заряду} \cdot t_{заряду}; \quad (3)$$

Таблиця 1 – Оцінка впливу BESS на втрати електроенергії при  $P_{заряду} = P_{розряду}$

| $P_{нб}/P_{нм}=2$                  |                                 |       |       |       |       |                                  |       |       |       |       |       |
|------------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_{нб}/P_{нм}$                    | 0,60                            | 0,62  | 0,67  | 0,71  | 0,74  | 0,76                             | 0,79  | 0,83  | 0,88  | 0,90  |       |
| $\alpha_{граничне}=0,75$           | $P_{заряду}=P_{віддачі}-P_{нм}$ |       |       |       |       | $P_{розряду}=P_{нб}-P_{віддачі}$ |       |       |       |       |       |
| $\delta\Delta W^*$<br>при $\eta =$ | 0,7                             | 0,024 | 0,025 | 0,019 | 0,01  | 0                                | 0     | 0,01  | 0,02  | 0,025 | 0,024 |
|                                    | 0,8                             | 0,04  | 0,044 | 0,048 | 0,04  | 0,038                            | 0,038 | 0,04  | 0,048 | 0,044 | 0,04  |
|                                    | 0,9                             | 0,05  | 0,06  | 0,07  | 0,073 | 0,072                            | 0,072 | 0,073 | 0,071 | 0,06  | 0,05  |
| $P_{нб}/P_{нм}=2,5$                |                                 |       |       |       |       |                                  |       |       |       |       |       |
| $P_{нб}/P_{нм}$                    | 0,50                            | 0,58  | 0,60  | 0,62  | 0,66  | 0,74                             | 0,78  | 0,80  | 0,82  | 0,90  |       |
| $\alpha_{граничне}=0,7$            | $P_{заряду}=P_{віддачі}-P_{нм}$ |       |       |       |       | $P_{розряду}=P_{нб}-P_{віддачі}$ |       |       |       |       |       |
| $\delta\Delta W^*$<br>при $\eta =$ | 0,7                             | 0,05  | 0,062 | 0,06  | 0,058 | 0,048                            | 0,048 | 0,058 | 0,06  | 0,062 | 0,05  |
|                                    | 0,8                             | 0,06  | 0,09  | 0,092 | 0,093 | 0,09                             | 0,09  | 0,093 | 0,092 | 0,09  | 0,06  |
|                                    | 0,9                             | 0,076 | 0,11  | 0,117 | 0,12  | 0,124                            | 0,124 | 0,12  | 0,117 | 0,11  | 0,076 |
| $P_{нб}/P_{нм}=3$                  |                                 |       |       |       |       |                                  |       |       |       |       |       |
| $P_{нб}/P_{нм}$                    |                                 |       |       |       |       |                                  |       |       |       |       |       |
| $\alpha_{граничне}=0,67$           | $P_{заряду}=P_{віддачі}-P_{нм}$ |       |       |       |       | $P_{розряду}=P_{нб}-P_{віддачі}$ |       |       |       |       |       |
| $\delta\Delta W^*$<br>при $\eta =$ | 0,7                             | 0,09  | 0,098 | 0,094 | 0,092 | 0,08                             | 0,08  | 0,093 | 0,098 | 0,097 | 0,07  |
|                                    | 0,8                             | 0,116 | 0,129 | 0,133 | 0,132 | 0,013                            | 0,129 | 0,133 | 0,13  | 0,126 | 0,08  |
|                                    | 0,9                             | 0,135 | 0,15  | 0,16  | 0,165 | 0,167                            | 0,167 | 0,16  | 0,156 | 0,149 | 0,09  |
| $P_{нб}/P_{нм}=3,5$                |                                 |       |       |       |       |                                  |       |       |       |       |       |
| $P_{нб}/P_{нм}$                    |                                 |       |       |       |       |                                  |       |       |       |       |       |
| $\alpha_{граничне}=0,64$           | $P_{заряду}=P_{віддачі}-P_{нм}$ |       |       |       |       | $P_{розряду}=P_{нб}-P_{віддачі}$ |       |       |       |       |       |
| $\delta\Delta W^*$<br>при $\eta =$ | 0,7                             | 0,127 | 0,129 | 0,128 | 0,126 | 0,118                            | 0,117 | 0,125 | 0,129 | 0,125 | 0,08  |
|                                    | 0,8                             | 0,156 | 0,163 | 0,166 | 0,167 | 0,165                            | 0,164 | 0,167 | 0,162 | 0,152 | 0,096 |
|                                    | 0,9                             | 0,18  | 0,19  | 0,196 | 0,199 | 0,202                            | 0,202 | 0,2   | 0,189 | 0,173 | 0,11  |
| $P_{нб}/P_{нм}=4$                  |                                 |       |       |       |       |                                  |       |       |       |       |       |
| $P_{нб}/P_{нм}$                    |                                 |       |       |       |       |                                  |       |       |       |       |       |
| $\alpha_{граничне}=0,625$          | $P_{заряду}=P_{віддачі}-P_{нм}$ |       |       |       |       | $P_{розряду}=P_{нб}-P_{віддачі}$ |       |       |       |       |       |
| $\delta\Delta W^*$<br>при $\eta =$ | 0,7                             | 0,155 | 0,156 | 0,153 | 0,144 | 0,14                             | 0,144 | 0,152 | 0,156 | 0,147 | 0,096 |
|                                    | 0,8                             | 0,188 | 0,19  | 0,195 | 0,192 | 0,19                             | 0,172 | 0,194 | 0,192 | 0,172 | 0,11  |
|                                    | 0,9                             | 0,214 | 0,218 | 0,227 | 0,231 | 0,23                             | 0,231 | 0,229 | 0,22  | 0,19  | 0,12  |

Дані з таблиці 1, підтверджують тезис про зниження втрат в більшості випадків втрат електроенергії від використання BESS в мережі. Максимізація зниження втрат електроенергії не завжди досягається при повному використанні доступної потужності заряду пристрою. Зі збільшенням ККД BESS точка екстремуму при умові максимізації зниження втрат електроенергії зміщується в напрямку збільшення співвідношення  $P_{\text{заряду}} = P_{\text{розряду}}$ , що означає збільшення користі використання накопичувачів, номінальна потужність яких розрахована виходячи із повного поглинання надлишку/покриття недостачі електроенергії в системі.

### Висновок

Електричні мережі сьогодення були спроектовані відповідно до старих вимог, які передбачали, що більшу частину необхідної енергії забезпечували великі генеруючі станції, підключені до розподільчої мережі. Розподільні мережі, в свою чергу, були сплановані для розміщення точок споживання, а не розподілену генерацію. Дослідження в роботі показало, що промислові накопичувачі енергії можуть посилити надійність роботи мережі. Але їх переваги та економічна доцільність не до кінця зрозумілі та досліджені, а тому потребує додаткового аналізу.

Проаналізувавши отримані результати в ході роботи, можна зробити висновок, що інтеграція BESS в сучасну ЕС, позитивно впливає не тільки на підвищення рівня енергоефективності роботи ЕС, а й на зниження втрат.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці [П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, В. В. Нетребський, В. В. Тептя]: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. – 212 с. – ISBN 978-966-641-576-2
2. V. Kulyk., V. Teptya., S. Vishnevskiy, Yurii Hrytsiuk, Iryna Hrytsiuk, Maksym Zatkhei «Development of a method for optimizing industrial energy storage units placement in electric distribution networks on the basis of ideal current distribution».
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.

**Кулик Володимир Володимирович** - д. т. н., доц. каф. ЕСС, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [volodymyrvkulyk@gmail.com](mailto:volodymyrvkulyk@gmail.com)

**Затхей Максим Вікторович** - аспірант, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [maxzathey@gmail.com](mailto:maxzathey@gmail.com)

**Kulyk Volodymyr V.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [volodymyrvkulyk@gmail.com](mailto:volodymyrvkulyk@gmail.com)

**Zathey Maksym V.** - student, Department of Electricity, Electromechanics and Electrical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [maxzathey@gmail.com](mailto:maxzathey@gmail.com)