

6. ДСТУ ISO 9972:2018. Теплові характеристики будівель. Визначення повітропроникності будівель. Метод вимірювання надлишкового тиску за допомогою вентилятора. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 36 с.

7. ДСТУ EN 13187:2015. Теплові характеристики будівель. Якісне визначення теплових нерівномірностей в огорожувальних конструкціях. Інфрачервоний метод. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015.

References

1. Law of Ukraine “On Energy Efficiency of Buildings” dated 22.06.2017 No. 2118-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19>. (accessed 20.04.2026). (Ukr)

2. DBN V.2.6-31:2021. Thermal insulation of buildings. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2021. 44 p. (Ukr)

3. Feist W., Schnieders J., Dorer V., Haas A. Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and Buildings*, 2005. – Vol. 37, No. 11. – P. 1186–1203.

4. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (EPBD). *Official Journal of the European Union*, 2010. – L 153/13.

5. EN ISO 9972:2015. Thermal performance of buildings – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method. Geneva: ISO, 2015. – 36 p.

6. DSTU ISO 9972:2018. Thermal characteristics of buildings. Determination of air permeability of buildings. Method of measuring excess pressure using a fan. – Kyiv: DP “UkrNDNC”, 2018. – 36 p. (Ukr)

7. DSTU EN 13187:2015. Thermal characteristics of buildings. Qualitative determination of thermal irregularities in enclosing structures. Infrared method. – Kyiv: DP “UkrNDNC”, 2015. (Ukr)

УДК621.316.9

Наталич В. О., аспірант, ORCID 0000-0003-0242-626X,

наук. керівники:

д-р техн. наук, професор **В. А. Попов**, 0000-0003-3484-4597,

канд. техн. наук, доцентка **О. С. Ярмолук**, 0000-0001-8571-2573,

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КООРДИНОВАНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ SOFT OPEN POINT У ПОЄДНАННІ З УСТАНОВКАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

COORDINATED APPLICATION OF SOFT OPEN POINT TECHNOLOGY IN COMBINATION WITH ENERGY STORAGE SYSTEMS

Анотація. У роботі розглянуто принцип координованого використання soft open point (SOP) та установок зберігання електричної енергії (УЗЕ) для динамічного керування режимами розподільних мереж. Визначено основні функціональні можливості пристрою SOP, зокрема примусове забезпечення формування оптимального потокорозподілу з урахуванням поточних рівнів вузлових навантажень та вихідної потужності наявних локальних джерел енергії у РМ. Запропоновано алгоритм узгодженої роботи SOP та УЗЕ, який дозволяє залучати УЗЕ до згладжування піків перетікань потужності через пристрій SOP, балансувати обсяги енергії в режимах заряджання та розряджання і тим самим мінімізувати номінальну потужність, вартість та витрати на експлуатацію SOP. Підкреслюється

важливість застосування комплексного підходу у реалізації задачі динамічного керування режимами РМ. Бібл. 4, рис. 4.

Ключові слова: розподільні мережі, soft open point, установки зберігання енергії, координована робота, динамічне керування режимами, втрати електроенергії, оптимізація режимів, розподілені джерела енергії.

Abstract. The paper considers the principle of coordinated use of soft open point (SOP) and energy storage systems (ESS) for dynamic control of distribution network modes. The main functional capabilities of the SOP device are determined, in particular, the forced formation of optimal power flow distribution taking into account the levels of nodal loads and the output power of existing local energy sources in the distribution network. An algorithm for coordinated operation of SOP and ESS is proposed, which allows involving ESS in smoothing the peaks of power flows through the SOP device, balancing energy volumes in charging and discharging modes and thereby optimizing the nominal power, cost and operating losses of the SOP device. The importance of applying a comprehensive approach in implementing the task of dynamic control of distribution network modes is emphasized. Ref. 4, Fig. 4.

Keywords: distribution networks, soft open point, energy storage systems, coordinated operation, dynamic mode control, power losses, mode optimization, distributed energy sources.

Вступ. Динамічне керування режимами розподільних електричних мереж є одним із ключових напрямів підвищення ефективності їх функціонування в умовах зростаючої частки локальних відновлюваних джерел енергії. Його реалізація дозволяє адаптувати потокорозподіл у мережі до змінних режимів навантаження та генерації, забезпечуючи зниження втрат електроенергії та покращення рівнів напруги. Досягнення зазначених ефектів можливе за рахунок використання керованих технічних засобів, зокрема пристроїв силової електроніки та установок зберігання електричної енергії. Одним із перспективних технічних рішень для активних РМ є soft open point (SOP), які забезпечують динамічне керування потоками активної та реактивної потужності між ділянками РМ. Паралельно з цим широкого застосування набувають установки зберігання електричної енергії, що дозволяють компенсувати часову нерівномірність генерації та споживання.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених окремому використанню SOP та УЗЕ, питання їх узгодженого застосування та розподілу функцій між ними залишається недостатньо вивченими. У зв'язку з цим актуальним є дослідження їх координованого використання, що дозволяє забезпечити більш ефективний перерозподіл потоків потужності та досягти додаткового зниження втрат електроенергії.

Метою досліджень є формування підходу координованого використання пристрою SOP та установок зберігання електричної енергії з урахуванням розподілу функцій між ними з метою зменшення втрат електричної енергії в РМ та вартості засобів силової електроніки, а також оцінка ефективності їх узгодженої роботи в задачі динамічного керування режимами.

Матеріал і результати досліджень. Загальний принцип керування пристроєм SOP базується на безперервному моніторингу режимних параметрів ділянки РМ, що прилягає до місця його встановлення. У процесі керування здійснюється порівняння фактичного потоку активної потужності з тим, який

мав би місце за умов роботи мережі в замкненому режимі з урахуванням поточних вузлових навантажень, генерації локальних джерел енергії та УЗЕ. Виявлений дисбаланс компенсується шляхом регулювання величини та напрямку перетікань активної потужності через SOP, а також за рахунок генерації або споживання реактивної потужності (рис. 1).

Теоретично SOP може бути встановлений у будь-якій точці розподільної мережі та забезпечувати передачу потужності у довільному напрямку. Однак з практичної точки зору найбільш доцільним є його розміщення у вузлах, де зазвичай встановлюється нормально розімкнений комутаційний апарат, що забезпечує оптимальний потокорозподіл з мінімальними втратами потужності. Визначення такого місця може здійснюватися із застосуванням методів оптимізації, зокрема підходів багатокритеріальної оцінки альтернативних варіантів розміщення відповідного комутаційного апарату [1].

Враховуючи, що SOP є повністю керованим силовим електронним пристроєм, його впровадження супроводжується значними інвестиційними та експлуатаційними витратами. У зв'язку з цим задача оптимального розміщення SOP набуває особливого значення як з точки зору зниження капітальних витрат, так і забезпечення високої ефективності його роботи. У цьому контексті узгоджене використання SOP та УЗЕ розглядається як ефективний інструмент підвищення техніко-економічної ефективності керування режимами розподільних мереж, а також як засіб зменшення необхідної встановленої потужності SOP.

З урахуванням наведених положень доцільно перейти до формалізації задачі керування потокорозподілом у розподільній мережі з використанням SOP.

Припустимо, що пристрій встановлений на ділянці мережі між вузлами k та $k + 1$ (рис. 1). Для кожного моменту часу t на основі вирішення задачі оптимізації режиму мережі, критерієм якої є мінімізація втрат потужності, визначається бажаний (оптимальний) потокорозподіл.

Відповідно до цього, використання SOP повинно примусово забезпечувати передачу по контрольованій ділянці $k, k + 1$ потужність $P_{k,k+1,t,пр}$ у відповідному напрямку незалежно від того, яка в реальності потужність передається по даній ділянці в даному фактичному режимі (наприклад $P_{k,k+1,t,ф}$), рис. 1:

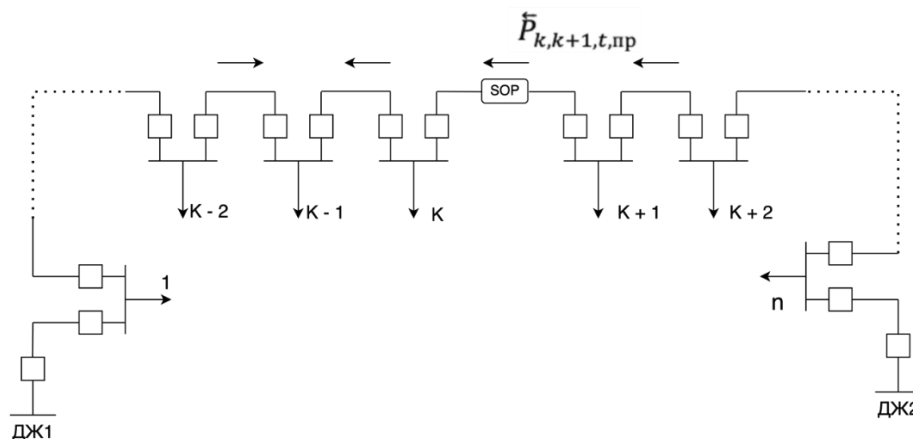


Рисунок 1. Приклад примусового забезпечення перерозподілу потужності пристроєм SOP в напрямку вузла $k-1$ у t -ому режимі

Тоді, при фіксованому розміщенні SOP, в різних режимах, через її компоненти будуть перетікати різні значення потужності, максимальне значення якої (з урахуванням всіх можливих варіантів комбінацій навантажень вузлів і фактичної потужності локальних джерел енергії) визначатиме номінальну потужність SOP, а відповідно і її вартість і рівень втрат енергії, які загальноприйнято вважати пропорційними сумарній переданій в обох напрямках енергії [2, 3].

На основі наведених послідовних розрахунків може бути сформований добовий графік перетікань потужності через SOP в кожному з напрямків, рис. 2:

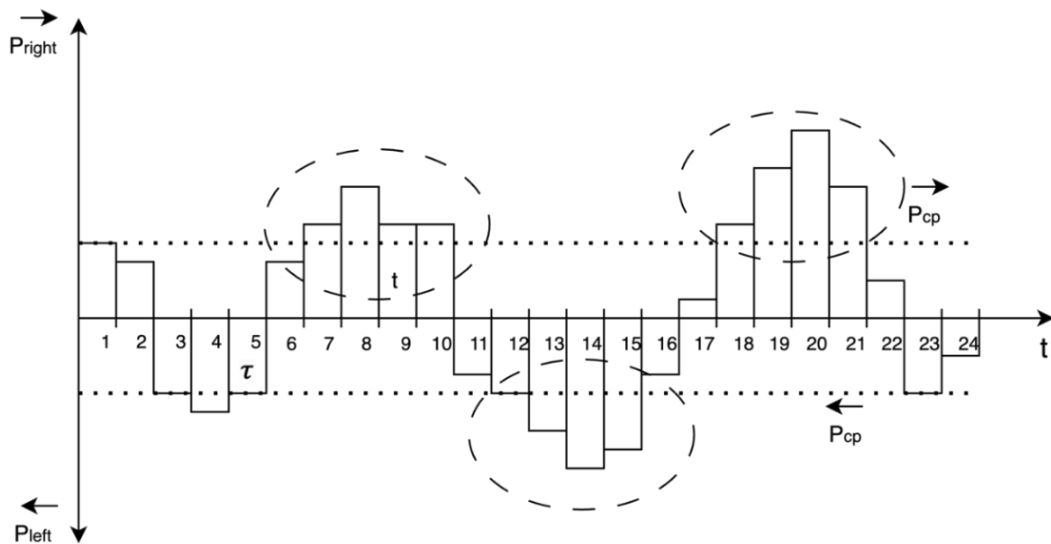


Рисунок 2. Графік перетікання потужності через SOP відповідно в праву (P_{right}) та в ліву (P_{left}) частини контуру розподільної лінії

Відповідно до отриманих даних можуть бути визначені необхідні параметри SOP, зокрема її номінальна потужність як максимальне значення потужності, що передається через пристрій протягом розрахункового періоду.

Таким чином, навіть короткочасно потреба в передачі через SOP достатньо великої потужності буде вимагати збільшення номінальних параметрів відповідного обладнання, не зважаючи на те, що решту часу його завантаження буде суттєво меншим. У зв'язку з цим виникає питання щодо можливих заходів, які дозволять мінімізувати параметри SOP і, таким чином, зменшити капітальні та експлуатаційні (вартість втрат електричної енергії) витрати на впровадження та подальше використання цієї технології [4].

Зокрема, отримані графіки перетікань потужності можуть бути цілеспрямовано змінені за рахунок відповідного застосування УЗЕ.

Для пояснення розглянемо випадок розміщення УЗЕ в одному з вузлів лівої частини контуру розподільної мережі (рис. 3). Тоді, для режиму представленого на рис. 3, за рахунок застосування УЗЕ необхідно сформулювати умови, які стимулювали б зміщення точки потокорозподілу (оптимальне місце розташування SOP) вліво. Це може бути досягнуто за рахунок «довантаження» лівої частини контуру. Логічним варіантом такого рішення буде застосування

УЗЕ в режимі заряджання – збільшення навантаження на певних ділянках лівої частини контуру (рис. 3).

В той же час, для режиму представленого на рис. 4, доцільно стимулювати зміщення точки поточкорозподілу (оптимального місця встановлення SOP) вправо. Це може бути реалізовано за рахунок «розвантаження» лівої частини контуру РМ, що досягається за рахунок роботи УЗЕ в режимі розряджання (рис. 4).

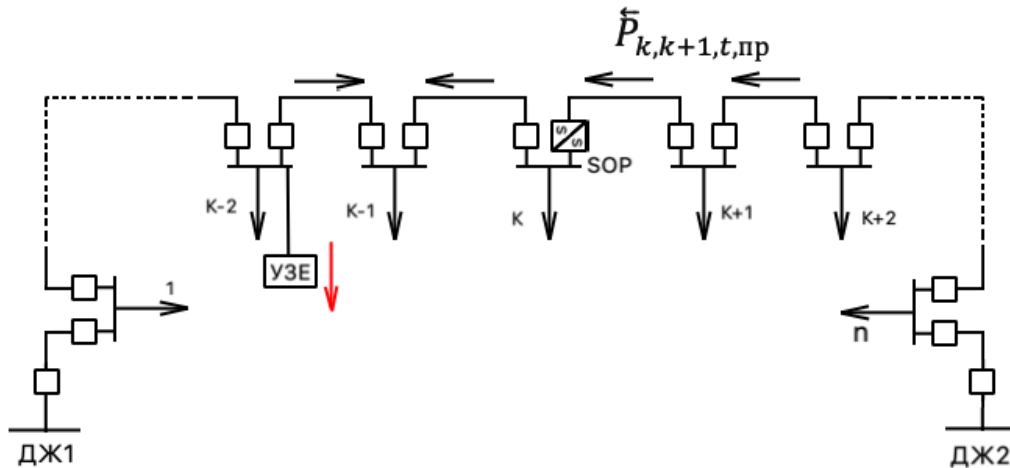


Рисунок 3. Варіант застосування УЗЕ (режим заряджання)

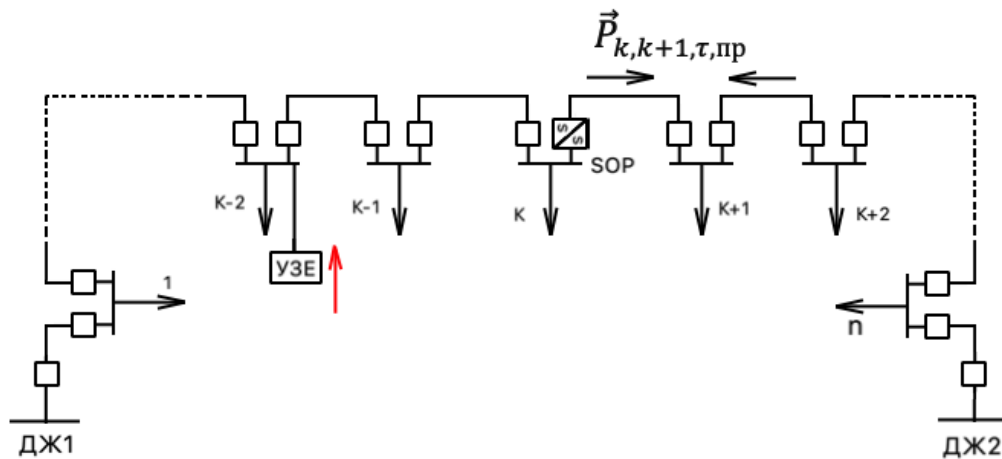


Рисунок 4. Варіант застосування УЗЕ (режим разряджання)

Розглянемо метод та відповідний алгоритм що дозволяє обґрунтованим чином скоротити величину перетоку потужності через SOP за рахунок раціонального використання УЗЕ.

Для певного варіанту розміщення SOP і сценарію, який визначає графіки навантаження та генерації з боку інтегрованих ВДЕ, на основі сформованого добового графіку перетоків потужності через SOP розраховуємо обсяги електричної енергії що передаються в кожному з частин контуру РМ: $\vec{A}$, $\bar{A}$. Розраховуємо середнє значення потужності окремо по графіках передачі потужності через SOP в кожному з напрямків $\vec{P}_{cp} = \frac{\vec{A}}{\vec{T}}$, $\bar{P}_{cp} = \frac{\bar{A}}{\bar{T}}$.

Знаходимо:

$$\begin{aligned} P_{cp} &= \overleftarrow{P}_{cp}, \text{ якщо } \overleftarrow{A} < \overrightarrow{A}, \\ P_{cp} &= \overrightarrow{P}_{cp}, \text{ якщо } \overleftarrow{A} \geq \overrightarrow{A}. \end{aligned} \quad (1)$$

Визначаємо:

$$\begin{aligned} \Delta \overleftarrow{A} &= \sum_t \left(\overleftarrow{P}_t - P_{cp} \right), \text{ якщо } \overleftarrow{A} < \overrightarrow{A}; \overleftarrow{P}_t > P_{cp}; t \in \overleftarrow{T}; \\ \Delta \overrightarrow{A} &= \sum_t \left(\overrightarrow{P}_t - P_{cp} \right), \text{ якщо } \overrightarrow{A} < \overleftarrow{A}; \overrightarrow{P}_t > P_{cp}; t \in \overrightarrow{T}. \end{aligned} \quad (2)$$

Подальші розрахунки полягають у наступному. З використанням графіків перетікань потужності через SOP можливо визначити напрямок, по якому передається менший обсяг електроенергії. Для даної складової графіку перетікань розраховується середнє значення потужності що передається (P_{cp}). Будемо вважати, що всі ординати даного графіку (величини потужності), що не перевищують значення P_{cp} будуть забезпечуватись за рахунок її передачі через SOP. Потужність, яка перевищує значення P_{cp} , може бути компенсована за рахунок використання УЗЕ.

Таким чином, здійснені розрахунки дозволяють визначити обсяг електричної енергії яку доцільно забезпечити за рахунок застосування УЗЕ. Наступним кроком приймаємо рішення, що з метою створення збалансованої роботи УЗЕ, необхідно дотримуватись вимоги, що обсяг електричної енергії що буде використана в режимі заряджання УЗЕ (споживання з мережі) повинен відповідати обсягу електричної енергії що буде задіяна в процесі розряджання УЗЕ (відпуску електричної енергії в мережу). Це дозволить визначити умови роботи SOP при передачі через нього потужності в зворотному напрямку.

Наведені нижче співвідношення (3) – (10) дозволяють визначити режими роботи УЗЕ та скориговані графіки перетікань потужності через SOP з урахуванням обмеження пікових значень.

Так, наприклад для графіку наведеного на рис. 2 матимемо наступні умови:

Якщо $\overleftarrow{A} < \overrightarrow{A}$ та, відповідно, $P_{cp} = \overleftarrow{P}_{cp}$. Тоді, графік роботи УЗЕ, коли через SOP здійснюється перетік потужності в ліву частину контуру РМ, визначається наступним чином:

$$\overleftarrow{P}_{УЗЕ,t} = \overleftarrow{P}_t - P_{cp}; \overleftarrow{P}_t > P_{cp}; t \in \overleftarrow{T}. \quad (3)$$

А відповідний даному режиму роботи добовий обсяг електричної енергії буде становити:

$$\overleftarrow{A}_{УЗЕ} = \sum_t \overleftarrow{P}_{УЗЕ,t}; t \in \overleftarrow{T}. \quad (4)$$

При цьому через SOP при зазначених умовах роботи за добу буде передана електрична енергія в обсязі:

$$\overleftarrow{A}_{SOP} = \overleftarrow{A} - \overleftarrow{A}_{UZE}. \quad (5)$$

На фінальному етапі можемо визначити графіки передачі потужності через SOP в зворотному напрямку, а також режим роботи УЗЕ в зазначених умовах.

Враховуючи, що обсяг електричної енергії що відноситься до роботи УЗЕ уже визначений ($\overleftarrow{A}_{UZE}$), через SOP в зазначених умовах повинна передаватись електрична енергія, яка без врахування втрат в SOP та УЗЕ буде становити:

$$\overrightarrow{A}_{SOP} = \overrightarrow{A} - \overleftarrow{A}_{UZE}. \quad (6)$$

Розраховуємо

$$\Delta \overrightarrow{A}_{SOP} = \overrightarrow{A}_{SOP} - \sum_t \overrightarrow{P}_t; \quad \overrightarrow{P}_t \leq \overrightarrow{P}_{cp}; \quad t \in \overrightarrow{T}. \quad (7)$$

Визначаємо тривалість інтервалу часу $\overrightarrow{T}_T$, протягом якого виконується умова $\overrightarrow{P}_t \leq \overrightarrow{P}_{cp}, \quad t \in \overrightarrow{T}$.

Розраховуємо

$$P_{kp} = \frac{\sum_t \overrightarrow{P}_t}{\overrightarrow{T}_T}; \quad \overrightarrow{P}_t > \overrightarrow{P}_{cp}; \quad t \in \overrightarrow{T}. \quad (8)$$

Режим роботи УЗЕ в такому випадку визначається наступним чином:

$$\overrightarrow{P}_{UZE,t} = \overrightarrow{P}_t - P_{kp}; \quad \overrightarrow{P}_t > P_{kp}; \quad t \in \overrightarrow{T}. \quad (9)$$

Режим роботи SOP матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{P}_{SOP,t} &= P_{kp}, \quad \text{якщо} \quad \overrightarrow{P}_t > P_{kp}, \\ \overrightarrow{P}_{SOP,t} &= \overrightarrow{P}_t, \quad \text{якщо} \quad \overrightarrow{P}_t \leq P_{kp}, \quad t \in \overrightarrow{T}. \end{aligned} \quad (10)$$

Який саме із розглянутих вище режимів буде режимом заряджання або розряджання УЗЕ визначатиметься точкою підключення (локалізації) УЗЕ в розподільній мережі (права або ліва частини контуру РМ).

Висновки. У роботі запропоновано підхід до координованого використання пристрою soft open point та установок зберігання енергії для задачі динамічного керування режимами розподільної мережі. Показано, що обмеження пікових значень потужності, що передається через SOP, за рахунок згладжування графіка перетікань із використанням УЗЕ дозволяє зменшити необхідну номінальну потужність пристрою, а відповідно і капітальні та експлуатаційні витрати. Розроблений метод базується на компенсації перевищень потужності відносно середнього рівня та забезпечує енергетичний баланс процесів заряджання і розряджання УЗЕ. Отримані результати підтверджують доцільність узгодженого використання SOP та УЗЕ як ефективного інструменту підвищення техніко-економічної ефективності функціонування розподільних мереж та створюють основу для подальших досліджень у напрямку їх спільного застосування.

Список використаних джерел

1. Наталич В. О. Обґрунтування місць розміщення дистанційно керованих комутаційних апаратів в умовах динамічного керування режимами розподільних мереж // *Аспірантські читання імені професора Артура Веніаміновича Праховника, до 85-річчя від дня народження: матеріали наукової конференції*, Київ, 25–26 березня 2025 р. – КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ, 2025. – С. 43–51. URL: https://iee.kpi.ua/wp-content/uploads/2021/04/Конфер_до_85_річ_Праховника_ННІЕЕ_2025_друк.pdf (дата звернення 25.03.2026).
2. Li Y., Wang Z., Huang Y., Sun H., Xia Y. Optimal configuration strategy of soft open point in flexible distribution network considering reactive power sources // *Energies*, 2023. – Vol. 16, No. 3. – P. 529. URL: <https://doi.org/10.3390/en16030529> (дата звернення 27.03.2026).
3. Alipour M., Abapour M., Bagheri A. Coordinated allocation of soft open point and converter-based energy storage systems in PV penetrated active distribution networks // *IET Renewable Power Generation*, 2022. – Vol. 16 – No. 8. – P. 1742–1755. URL: <https://doi.org/10.1049/rpg2.12607> (дата звернення 01.04.2026).
4. Pamshetti V. B., Singh S. P. Coordinated allocation of BESS and SOP in high PV penetrated distribution network incorporating DR and CVR schemes // *IEEE Systems Journal*, 2020. – P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.3041013> (дата звернення 03.04.2026).

References

1. Natalych V. O. (2025) Justification of placement of remotely controlled switching devices under dynamic control of distribution network operation modes // In: *Proceedings of the Graduate Student Readings named after Professor Artur Veniaminovich Prakhovnyk (85th anniversary)*, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine, March 25–26, 2025, P. 43–51. URL: (https://iee.kpi.ua/wp-content/uploads/2021/04/Конфер_до_85_річ_Праховника_ННІЕЕ_2025_друк.pdf) (accessed 25.03.2026).
2. Li Y., Wang Z., Huang Y., Sun H., Xia Y. (2023) Optimal configuration strategy of soft open point in flexible distribution network considering reactive power sources // *Energies* – Vol. 16, No. 3. – P. 529. URL: <https://doi.org/10.3390/en16030529> (accessed 27.03.2026).
3. Alipour M., Abapour M., Bagheri A. (2022) Coordinated allocation of soft open point and converter-based energy storage systems in PV penetrated active distribution networks // *IET Renewable Power Generation* – Vol. 16 – No. 8. – P. 1742–1755. URL: <https://doi.org/10.1049/rpg2.12607> (accessed 01.04.2026).
4. Pamshetti V. B., Singh S. P. (2020) Coordinated allocation of BESS and SOP in high PV penetrated distribution network incorporating DR and CVR schemes // *IEEE Systems Journal* – P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.3041013> (accessed 03.04.2026).