

ТЕХНОЛОГІЇ ТА МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ БАГАТОРІВНЕВИХ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Розглянуто сучасні методи оптимізації багаторівневих систем акумулювання електроенергії у розподілених енергосистемах з інтеграцією відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Визначено ключові виклики, зокрема, нестабільність генерації ВДЕ та необхідність впровадження ефективних рішень для забезпечення стабільності і надійності енергопостачання.

Розглянуто застосування методів оптимізації, таких як динамічне програмування, прогнозне керування, генетичні алгоритми, алгоритми рою часток, а також підходи змішаного цілочислового програмування для задач визначення оптимального розміру, розташування та графіків зарядки/розрядки акумуляторів. Особливу увагу приділено викликам інтеграції ВДЕ з урахуванням екологічних аспектів, таких як зменшення викидів парникових газів, а також зниженню деградації батарей.

Наведено рекомендації щодо впровадження інтелектуальних систем управління для адаптації до змін у генерації та споживанні. Показано, що інтеграція сучасних алгоритмів оптимізації сприяє підвищенню стабільності мереж, ефективності енергоспоживання та екологічності систем енергозабезпечення.

Ключові слова: багаторівневі системи акумулювання, відновлювані джерела енергії, оптимізація енергосистем, інтелектуальні алгоритми керування, гібридні системи накопичення, стабільність розподілених мереж.

Вступ.

На основі проведеного аналізу можна стверджувати, що зростання попиту на відновлювані джерела енергії та їх інтеграція у розподілені енергосистеми створюють значні виклики для забезпечення стабільності та надійності енергопостачання. Також непостійність генерації сонячної та вітрової енергії зумовлює необхідність впровадження ефективних систем акумулювання, які забезпечують баланс між виробництвом та споживанням енергії. В умовах сучасного розвитку, багаторівневі системи акумулювання, що комбінують різні типи акумуляторів, дозволяють підвищити енергетичну гнучкість та оптимізувати витрати. Однак для підвищення ефективності таких рішень необхідно враховувати не лише обсяг накопиченої енергії, але й технічні особливості різних типів акумуляторів і можливості їхнього взаємного доповнення.

Відомо, що енергетичний менеджмент є ключовим завданням для кожної країни чи організації, оскільки він сприяє раціональному використанню наявних енергетичних ресурсів і забезпечує стабільність та надійність енергопостачання. Акумуляторні технології набувають все більшого значення у системах управління енергією, оскільки вони дозволяють ефективно зберігати енергію, отриману з відновлюваних джерел (ВДЕ), і компенсувати нерівномірність попиту на електроенергію.

Сучасні системи накопичення енергії є універсальними рішеннями, що дають змогу їх одночасного застосування для різних завдань [1]:

– **Енергетичний арбітраж** – купівля електроенергії на ринку за низькими цінами та її подальший продаж за вищими тарифами.

– **Забезпечення достатності** – зберігання електроенергії, виробленої під час пікових періодів сонячного випромінювання, для використання в години найбільшого споживання, що знижує навантаження на маневрові потужності енергосистеми.

– **Регулювання частоти та активної потужності** – надання допоміжних послуг для стабілізації роботи енергосистеми та підтримки її ефективності на ринку електроенергії.

Однак слід зазначити, що гнучкість великих енергосистем також буде визначатися гнучкістю електроенергетичних систем меншого рівня, або підсистем. У свою чергу, керування енергоспоживанням окремих споживачів, управління попитом мікрорайонів чи промислових вузлів має значний вплив на гнучкість електроенергетичних систем на регіональному та локальному рівнях [2]. Зокрема, гнучкість локальних електроенергетичних систем залежить від керованості розподіленою генерацією (ВДЕ), механізмів управління попитом, використання акумуляторів, впровадження механізмів гнучкості при прогнозуванні навантаження та застосування методів економічного аналізу.

Метою роботи є аналіз сучасних підходів до оптимізації багаторівневих систем акумулювання електроенергії у розподілених енергосистемах з інтеграцією відновлюваних джерел енергії.

Матеріал і результати дослідження

У процесі дослідження встановлено, що технології систем акумулювання енергії (ESS) можна розділити на п'ять основних категорій: механічні (PHS і CAES), електрохімічні (Li-ion і VRB), електричні (суперконденсатори та супермагнітні накопичувачі енергії), хімічні (водень) та теплові (чутливе і приховане теплове зберігання). Вибір і встановлення ESS залежить від таких факторів, як ємність, тривалість служби, час відгуку, густина енергії, вартість і ефективність, що зазвичай оцінюються за допомогою SWOT-аналізу [3].

Водночас, кожен тип ESS має певні обмеження, які залежать від матеріалів, що використовуються, та інтерфейсів силової електроніки [3, 4]. Наприклад, матеріали, такі як нікель-металогідрид (NiMH), є токсичними та мають обмежену можливість для переробки, тоді як інші системи накопичення енергії також мають вплив на довкілля. Матеріали ESS та процеси їх переробки можуть виділяти парникові гази (GHG), такі як CO, CO₂, NO_x, SO_x, CH₄ і N₂O, які завдають шкоди довкіллю і можуть бути небезпечними для здоров'я людини через вдихання, ковтання або контакт. Контроль та зменшення викидів GHG із ESS залишаються значними викликами для енергетичної галузі. Незважаючи на ці виклики, системи акумулювання енергії на основі батарей набувають дедалі більшого поширення у світі завдяки прогресу у технологіях батарей і зростанню попиту в енергетичному секторі [3, 4].

Попри потенційні переваги гібридних систем акумулювання енергії (HESS), існує кілька ключових проблем, які необхідно вирішити для повного розкриття їхнього потенціалу [5]. Одним із головних викликів є оптимізація інтеграції різних технологій зберігання енергії для досягнення бажаної продуктивності та ефективності. Розробка складних алгоритмів і стратегій керування є необхідною умовою для забезпечення безперебійної роботи та узгодженої взаємодії між усіма компонентами системи. Ще одним викликом є висока вартість HESS, яка може перевищувати витрати на традиційні рішення з однією технологією зберігання. Тривають дослідження [6, 7], спрямовані на зниження витрат за рахунок вдосконалення матеріалів, виробничих процесів та дизайну систем. Крім того, необхідно ретельно враховувати питання безпеки, надійності та впливу на довкілля, щоб забезпечити широке впровадження HESS.

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що кожен із методів заряджання має свої сильні та слабкі сторони. Таким чином, заряджання за CC-CV є простим, але непридатним для швидкісного заряджання. Методи PC та NPC скорочують час заряджання, проте вирізняються високою вартістю та складністю. Підхід MSCC є досить простим у застосуванні, однак вимагає точного прогнозування SOC або напруги, що може ускладнити його реалізацію. На рисунку 1 наведено керування зарядом системи акумулювання за допомогою чотирьох критеріїв [8].

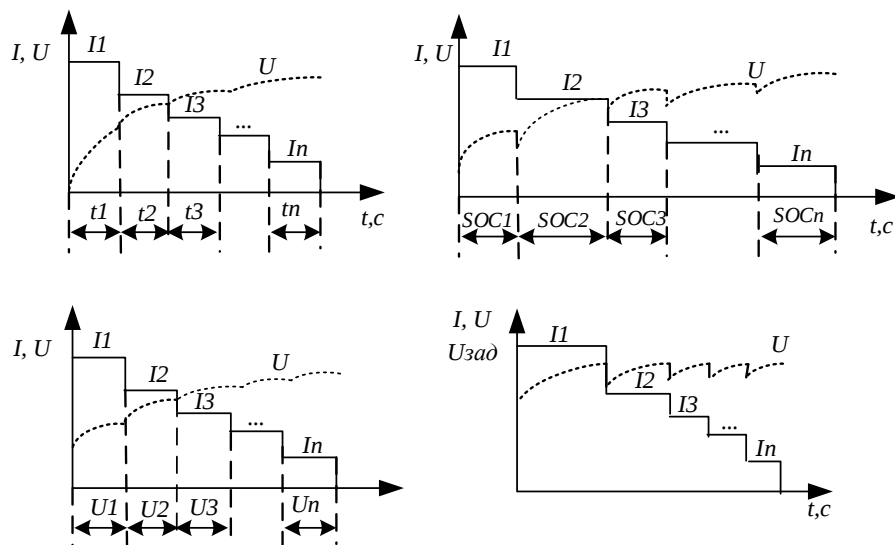


Рисунок 1 - Керування зарядом при переході з рівень на рівень на основі часу (а), SOC (б), порогової напруги (в), напруги відключення (г) [8].

Слід зауважити, що процес заряджання літій-іонного акумулятора необхідно здійснювати з особливою обережністю, оскільки вибір методики заряджання істотно впливає як на інтенсивність електрохімічних реакцій усередині батареї, так і на її загальний термін служби. Тому визначення

оптимальної стратегії зарядки, яка б забезпечувала мінімально можливий час із максимальною ефективністю, є актуальною задачею [9].

Коефіцієнт корисної дії виступає одним із ключових параметрів ефективності процесу заряджання. Він розраховується як відношення отриманої під час розряду ємності (після заряджання акумулятора) до зарядної ємності, вкладеної під час процесу зарядження:

$$\eta = \frac{I_d t_d}{\sum_{i=1}^n I_c t_c}$$

де t_d – час розряду, n – кількість ступенів (етапів), t_c – час заряду.

Припускаючи наявність трьох етапів заряджання, можна задати загальний час заряджання і, виконуючи диференціювання за певним параметром та прирівнюючи похідну до нуля, отримати умову, що визначає оптимальний зарядний струм для проміжного етапу:

$$T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$$

$$\frac{dT}{dI_2} = \frac{-I_1 R_1 C_1}{I_2^2} + \frac{R_1 C_1}{I_3} = 0$$

Як приклад, якщо задано струми початкового (I_1) та кінцевого (I_3) етапів, то, розглядаючи час заряджання як функцію проміжного струму I_2 і виконуючи диференціювання T за I_2 , а потім прирівнюючи похідну до нуля, можна отримати умову для визначення оптимального значення струму середнього етапу. Такий підхід дає змогу мінімізувати загальний час заряджання й визначити оптимальний зарядний струм I_2 залежно від попередньо заданих I_1 та I_3 .

Аналогічний підхід застосовують і для 5-ступінчастої схеми заряджання.

$$T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5$$

Задавши значення струму для початкового та фінального етапів, можна визначити струм заряджання другого етапу

$$I_2 = \sqrt{I_1 I_3}$$

Аналогічно і для 5-ступінчастої зарядки:

$$I_2 = \sqrt{I_1 I_3}$$

$$I_3 = \sqrt{I_1 I_5}$$

$$I_4 = \sqrt{I_3 I_5}$$

Загалом, такий підхід дає можливість звести задачу оптимізації часу заряджання до простої математичної залежності між струмами різних етапів. Проведені розрахунки демонструють, як, задавши сталий струм на початковому та кінцевому етапах багаступінчастого заряджання літій-іонного акумулятора, можна аналітично визначити оптимальний струм для проміжних етапів, що мінімізує загальний час заряджання.

Робота СЕП забезпечує заряджання АКБ до заданих рівнів ємності батареї. Оцінка ємності АКБ в режимі розряджання визначає обсяги енергії для тривалої роботи СЕП в автономному режимі та здійснюється згідно стандартної формули [10]:

$$Q = (P_H \cdot t) / (U \cdot S), \quad (1)$$

де Q – розрахункова ємність АКБ (А·год); P_H – потужність навантаження (Вт); t – час розряду (год); U – напруга батареї (В); S – коефіцієнт, що відображає, яка частина ємності АКБ використовується. Значення коефіцієнта S компенсує ситуацію неповного заряду батареї. Як приклад зазначимо, що для забезпечення потреб у 1550 Вт протягом 30 хв. з глибиною розряду 70 % згідно (1) необхідна ємність АКБ буде становити:

$$Q = (P_H \cdot t) / (U \cdot S) = (1550 \cdot 0,5) / (24 \cdot 0,7) = 46,13 \text{ А} \cdot \text{год}.$$

У випадку відключення від електромережі вихідна потужність сонячної генерації PV панелями може визначатися як максимальна потужність навантаження за формулою:

$$P_H = \max\{P_{H,j}\}, \quad \forall j \in 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

де m – кількість виділених інтервалів часу. Витрата енергоємності ΔQ акумуляторної батареї СЕП за час живлення навантаження Δt_H розраховується як:

$$\Delta Q = P_H \cdot t_H / U_H, \quad (3)$$

де P_H – номінальна потужність навантаження; U_H – номінальна напруга навантаження.

Ступінь розрядженості АКБ в СЕП з врахуванням співвідношення (3) визначається наступним чином:

$$S = ((Q_H - Q_{\min}) / Q_H) \cdot 100\% = (\Delta Q / Q_H) \cdot 100\%. \quad (4)$$

З використанням співвідношень (3) та (4) отримуємо вираз визначення необхідної ємності Q_H АКБ:

$$Q_H = 100 \cdot P_H \cdot t_H / (S \cdot U_H), \quad (5)$$

де t_H – час розряджання акумуляторів; U_H – номінальна напруга навантаження. Рівняння (5) дозволяє легко розрахувати необхідну ємність АКБ при постійному навантаженні.

Чим більша вихідна напруга АКБ, тим менша ємність та струм розряду акумуляторної батареї $I = P_H / U_H$. Енергія, накопичена в акумуляторній батареї СЕП, обчислюється як

$$W = Q_H \cdot U_H. \quad (6)$$

В СЕП з АКБ різнотипні навантаження можуть споживати електроенергію як на змінному, так і постійному струмі. Причому від АКБ струм може відбиратися по паралельних лініях, з різними значеннями вхідних напруги та струму для окремих груп навантажень. Для режиму розряду АКБ з врахуванням роботи змінного у часі навантаження розглянемо двоступінчастий графік зміни навантаження (рис. 2а) з інтервалами часу Δt_1 і Δt_2 та потужностями навантаження P_{H1} і P_{H2} при $U_H = \text{const}$. Інтервали часу розряду Δt_1 та Δt_2 визначено як суми виділених підінтервалів часу (які можуть бути незв'язаними) з двома рівнями навантаження. Тобто будемо розглядати два режими з різною інтенсивністю розряду АКБ, що обумовлено роботою змінного у часі навантаження. Фактично графік споживання електроенергії від АКБ, наприклад, протягом доби, апроксимується двоступінчастим графіком з «високою» та «низькою» інтенсивністю розряду АКБ. Графік зміни ємності акумуляторної батареї СЕП при двоступінчастому навантаженні представлений на рис. 2б.

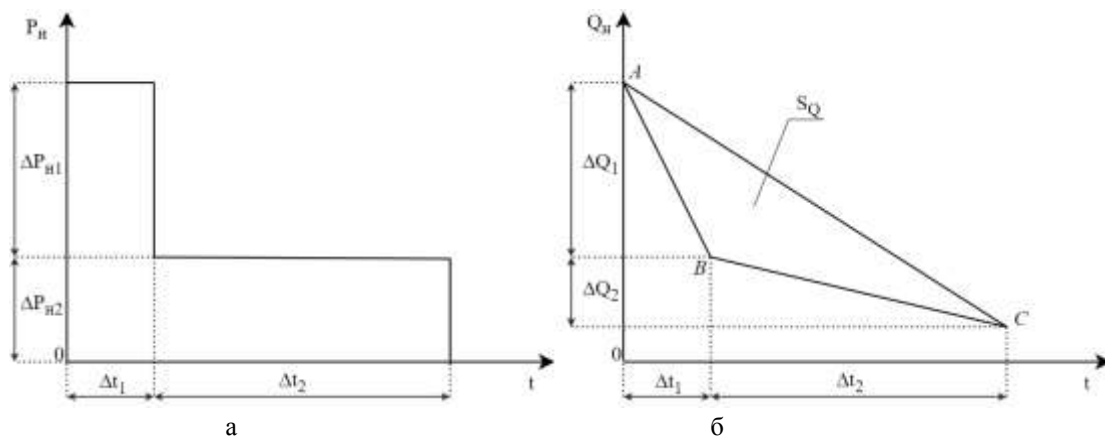


Рисунок 2 - Графік зміни ємності акумуляторної батареї

На першому інтервалі часу Δt_1 витрата ємності акумуляторної батареї визначається як

$$\Delta Q_1 = (P_{H1} \cdot \Delta t_1) / (S \cdot U_H); \quad (7)$$

а на другому:

$$\Delta Q_2 = (P_{H2} \cdot \Delta t_2) / (S \cdot U_H); \quad (8)$$

Із співвідношень (7) та (8) випливає, що $\Delta Q_1 / \Delta Q_2 = (P_{H1} \cdot \Delta t_1) / (P_{H2} \cdot \Delta t_2)$.

З огляду на те, що $\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2$, з рівнянь (4), (7) та (8) отримуємо вираз для визначення необхідної ємності АКБ у вигляді:

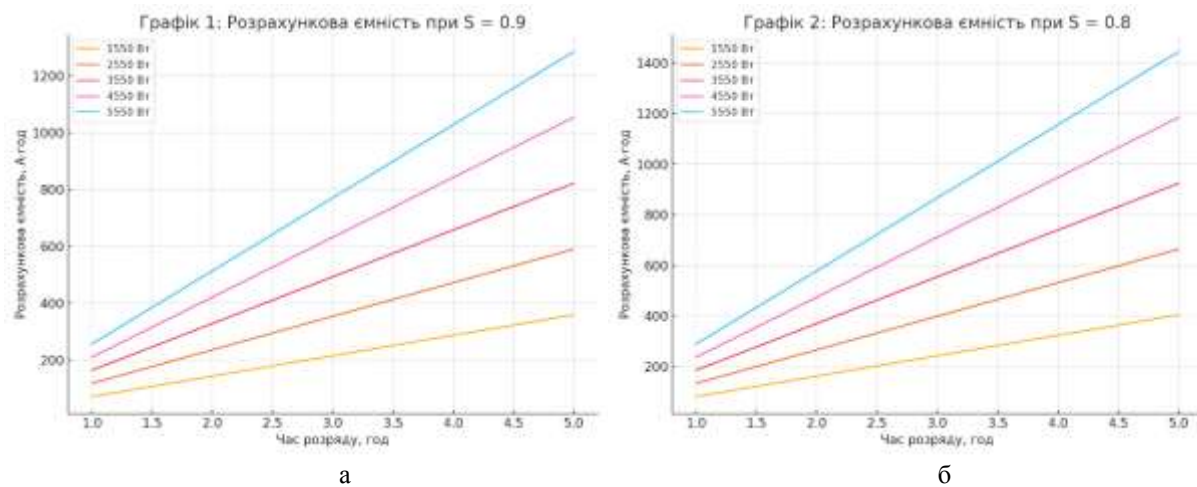
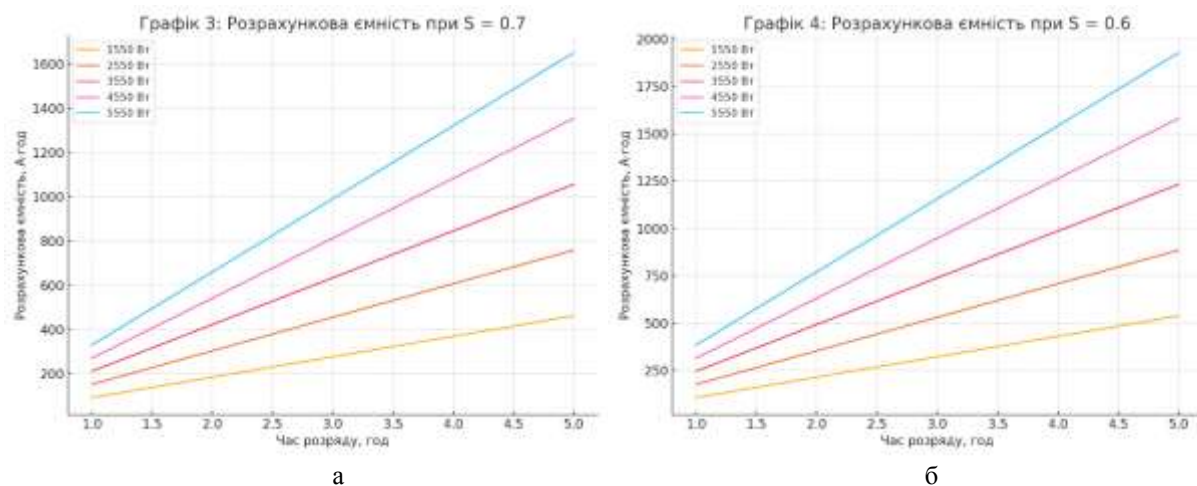
$$Q_H = 100 \cdot (P_{H1} \cdot \Delta t_1 + P_{H2} \cdot \Delta t_2) / (S \cdot U_H) \quad (9)$$

при мінімально допустимому значенні розряду АКБ

$$Q_{\min} = Q_H \cdot (1 - S / 100). \quad (10)$$

Графік залежності $Q(t)$ (1) при різних потужностях навантаження та глибині розряду ($S=0.9; 0.8; 0.7, 0.6$) зобразимо на рисунках 3 та 4

Як видно з побудованих графіків, із зменшенням коефіцієнта глибини розряду S (від 0,9 до 0,6) розрахункова ємність акумулятора Q суттєво зростає для всіх рівнів потужності навантаження. Це означає, що при меншій допустимій глибині розряду необхідно обирати батареї з більшою ємністю для забезпечення тієї ж тривалості роботи. Відповідно, під час проєктування системи слід обов'язково враховувати цей факт для запобігання передчасному виснаженню акумулятора та підвищення надійності системи.

Рисунок 3 - Графік залежності $Q(t)$ при $S = 0.9$ та 0.8 Рисунок 4 - Графік залежності $Q(t)$ при $S = 0.7$ та 0.6

За останні роки для звичайних та багаторівневих систем акумулювання енергії досліджувались різні методи оптимізації, серед яких актуальними і популярними є наступні:

Одноцільова оптимізація (Single-Objective Optimization): Основний фокус на мінімізації витрат (наприклад, капітальних або операційних). Також можливо визначити як задачу пошуку найкращого рішення для певного критерію або показника, наприклад, часу виконання, з урахуванням комбінації інших пов'язаних показників, таких як енергоспоживання або розсіювання потужності [11].

Багатоцільова оптимізація (Multi-Objective Optimization): Поєднання цілей, таких як підвищення надійності енергосистеми, мінімізація витрат, покращення стабільності напруги та частоти. це методологія оптимізації, яка використовується для розв'язання задач із кількома взаємно конфліктними цілями. У реальних задачах оптимізації часто неможливо досягти максимізації або мінімізації всіх цілей одночасно, тому цей підхід дозволяє знаходити компромісні рішення [12].

Динамічне програмування (Dynamic Programming, DP): Використовується для задач короткострокового планування (денного/тижневого), щоб знайти оптимальний баланс між витратами та ємністю ESS [13].

Прогнозне керування (Model Predictive Control, MPC): Враховує зміну характеристик батарей та інтеграцію в локальні енергосистеми, забезпечуючи оптимізацію у реальному часі. Прогнозне управління на основі моделі (MPC) – це сучасний метод керування, який використовує модель процесу для

прогнозування майбутньої поведінки системи. Під час роботи MPC вирішує задачу оптимізації, що дозволяє автоматично визначати закон керування. Основна складність при розробці контролера переміщується до етапу створення моделі системи [14].

Цей підхід зручний для багатьох інженерних сфер, де моделі систем вже доступні, знижуючи складність впровадження MPC. Крім того, його формулювання зберігає фізичну зрозумілість параметрів системи, що полегшує налаштування контролера. MPC здатний керувати навіть такими системами, які не піддаються керуванню звичайними зворотними контролерами [14].

Генетичні алгоритми (Genetic Algorithms, GA): Ефективно застосовуються для вирішення складних задач оптимізації розмірів і розміщення ESS. Генетичний алгоритм — це стохастичний метод пошуку та оптимізації, заснований на принципах природної генетики. GA є адаптивним евристичним пошуковим алгоритмом, який використовує ідеї еволюції, такі як природний відбір і генетичні механізми, для вирішення складних задач оптимізації [15].

Методи змішаного цілочислового програмування (MILP): Використовуються для задач оптимізації з урахуванням дискретних змінних, таких як розмір батарей та прогнозоване навантаження. Mixed-Integer Linear Programming (MILP) — це математичний метод оптимізації, який вирішує задачі, де частина змінних є цілими числами (integer), а частина — неперервними (real-valued). Цей підхід поєднує властивості лінійного програмування (LP) з додатковими обмеженнями на дискретність змінних, що робить його ефективним для розв'язання складних задач оптимізації в реальних умовах [16].

Розвиток майбутнього ШІ стисло ілюстровано на рис. 3 [17]. Зростаюча складність задач кластеризації, класифікації, регресії та інженерії ознак у реальному світі стимулюватиме інновації в техніках машинного навчання. Недоліки існуючих незрозумілих (непояснюваних) методів ШІ та розвиток великих даних сприятимуть подальшому напрямку в глибокому навчанні.



Рисунок 3 – Основні категорії майбутніх розробок у сфері ШІ [17]

Наведені методи та алгоритми спрямовані на досягнення основних цілей:

1) Мінімізація витрат. Алгоритми оптимізації спрямовані на скорочення витрат, пов'язаних із експлуатацією та обслуговуванням систем енергопостачання. Можливе використання дешевших джерел енергії та застосування акумуляторів у часи пікових годин. Згідно енергетичного арбітражу виконувати закупівлю енергії за низькими цінами та продавати у періоди високих тарифів. Використання алгоритмів допоможе враховувати деградацію батарей та інші фактори.

2) Забезпечення стабільності розподілених мереж. Алгоритми забезпечують рівновагу між виробництвом енергії від відновлюваних джерел і споживанням, компенсуючи нерівномірності. Алгоритми дозволяють ефективно інтегрувати ВДЕ, зменшуючи негативний вплив на стабільність мережі, що може виникнути через їхню нестабільну генерацію.

3) Покращення екологічності (зменшення викидів CO₂). Використання ВДЕ замість викопного палива для генерації енергії. Менше викидів інших шкідливих речовин (наприклад, SO_x, NO_x), завдяки оптимізації процесів генерації та зберігання енергії

4) Підвищення надійності та якості енергопостачання. Використання акумуляторів для збереження резервної енергії, що дозволяє забезпечити стабільне постачання навіть у разі аварій чи пікових навантажень. Використання інтелектуальних систем керування (Smart Grid), які можуть автоматично адаптуватися до змін у мережі або непередбачуваних ситуацій.

Зростання кількості обмежень, цільових функцій, змінних рішень та параметрів у практичних мультимодальних, нелінійних або недиференційованих задачах оптимізації мотивує вдосконалення

інтелектуальних методів оптимізації. Збільшення складності та труднощів задач, які неможливо вирішити індивідуальним агентом, сприятиме вдосконаленню існуючих багатоагентних систем. Як і традиційний ІІІ, системи, засновані на знаннях, все ще мають певні переваги у вирішенні реальних проблем і заслуговують на подальший розвиток у майбутньому [18]. Категорії не є незалежними одна від одної, і деякі з них можуть взаємодіяти або перетинатися.

Формування оптимізаційних задач у локальних енергосистемах (ЛЕС) повинно враховувати обмінні процеси, які залежать від ролі та функцій різних видів навантажень. Зокрема, слід зважати на вимоги до графіків генерації та споживання електроенергії, їх характеристики та показники, які є важливими елементами оптимізації [19].

Висновки.

Мікромережі (MG) із системами акумулювання енергії (ESS) є перспективними технологіями, які можуть підвищити надійність системи та економічну ефективність для сталого розвитку зі зниженими викидами парникових газів (GHG). Багато дослідників працюють над розвитком технологій MG, а також над їхнім контролем, стабільністю, надійністю, витратами та впливом на викиди GHG. Правильне узгодження механізмів управління ESS із MG є необхідним для забезпечення балансу енергії з меншими витратами та підвищеною надійністю.

Деякі дослідження пропонують зменшення витрат за рахунок оптимального розміру систем акумулювання. Проте багато питань, таких як нестабільність та типи ВДЕ, способи підключення ESS до мережі, контроль напруги і частоти, якість енергії, зменшення пікових навантажень, оптимальне заряджання-розряджання ESS та державна політика, залишаються викликами для досягнення бажаного результату. Необхідно розробити оптимальний алгоритм, який враховуватиме ці фактори та забезпечуватиме правильний розмір ESS. Також важливо оцінити вплив оптимального розміру ESS на процес декарбонізації, оскільки це є глобальним викликом для скорочення викидів GHG і створення безпечного середовища. Однак політики різних країн та їхнє небажання впроваджувати низьковуглецеві альтернативи залишаються основними перешкодами для покращення існуючих умов.

I. Bohoiko¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0002-6816-6352

¹**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

TECHNOLOGIES AND METHODS FOR OPTIMIZING MULTI-LEVEL ENERGY STORAGE SYSTEMS

The study explores advanced optimization methods for multi-level energy storage systems (ESS) within distributed energy systems integrating renewable energy sources (RES). It addresses critical challenges posed by the variability and intermittency of RES generation, highlighting the need for effective solutions to maintain energy supply stability and reliability. The research categorizes ESS technologies into mechanical, electrochemical, electrical, chemical, and thermal systems, evaluating their technical and economic features, including energy density, efficiency, cost, and environmental impact.

Key optimization approaches are analyzed, such as dynamic programming, model predictive control, genetic algorithms, particle swarm optimization, and mixed-integer linear programming. These methods focus on optimizing ESS parameters, including sizing, placement, and charge-discharge scheduling, to enhance performance and reduce operational costs. Particular attention is given to ecological aspects, such as minimizing greenhouse gas emissions and mitigating battery degradation to support sustainable energy systems.

Advanced management algorithms, including artificial intelligence-based techniques like neural networks, fuzzy logic, and heuristic optimization, are proposed to adaptively manage ESS under changing conditions of generation and consumption. These smart management systems can also balance energy supply and demand, support frequency regulation, and improve grid reliability.

Recommendations are made for integrating ESS into distributed energy systems to facilitate the effective use of renewable resources while addressing uncertainties in energy generation. The study highlights the importance of robust optimization methods to tackle the increasing complexity of energy systems. By incorporating ESS into smart grid frameworks and adopting innovative control strategies, it is possible to enhance network stability, increase energy efficiency, and contribute significantly to decarbonization efforts.

Key words: multi-level energy storage systems, renewable energy sources, energy system optimization, Intelligent control algorithms, hybrid storage systems, distributed grid stability.

References

1. Denysiuk S.P., Strzelecki R., Bohiko I.I., Strzelecki N. Analysis of the features of effective implementation of solar power plants in local energy supply systems // *Energy: Economics, Technology, Ecology*. 2023. № 2. С. 7-25.

2. Denysiuk S.P., Lysyi V.V. Analysis of energy exchange processes in balancing the modes of energy supply systems with dispersed generation // *Energy: Economics, Technology, Ecology*. 2023. № 3. С. 7-22
3. M. Faisal, M. A. Hannan, P. J. Ker, and M. N. Uddin, "Backtracking Search Algorithm Based Fuzzy Charging-Discharging Controller for Battery Storage System in Microgrid Applications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 159357–159368, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2951132>.
4. M. A. Hannan, M. Faisal, P. Jern Ker, R. A. Begum, Z. Y. Dong, and C. Zhang, "Review of optimal methods and algorithms for sizing energy storage systems to achieve decarbonization in microgrid applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 131, p. 110022, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110022>.
5. R. Nascimento *et al.*, "Case Study of Backup Application with Energy Storage in Microgrids," vol. 15, no. 24, pp. 9514–9514, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15249514>.
6. C. Schubert *et al.*, "Hybrid Energy Storage Systems Based on Redox-Flow Batteries: Recent Developments, Challenges, and Future Perspectives," *Batteries*, vol. 9, no. 4, p. 211, Mar. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/batteries9040211>.
7. I. E. Atawi, A. Q. Al-Shetwi, A. M. Magableh, and O. H. Albalawi, "Recent Advances in Hybrid Energy Storage System Integrated Renewable Power Generation: Configuration, Control, Applications, and Future Directions," *Batteries*, vol. 9, no. 1, p. 29, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/batteries9010029>.
8. M. Usman Tahir, A. Sangwongwanich, D.-I. Stroe, and F. Blaabjerg, "Overview of multi-stage charging strategies for Li-ion batteries," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 84, pp. 228–241, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.05.023>.
9. Denysiuk S., Bielokha H., Bohoiko I., Piskarov V. Perspectives on the Application of Multi-Stage Charging Methods for Lithium-Ion Batteries // Perspectives of contemporary science: theory and practice. Proceedings of the 11th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua". Lviv, Ukraine. 2024. Pp. 314-319. URL: <https://sci-conf.com.ua/xi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-perspectives-of-contemporary-science-theory-and-practice-9-11-12-2024-lviv-ukrayina-arhiv/>.
10. Denysiuk S., Derevianko, D., Bohoyko, I. "Assessment of Uneven Electricity Withdrawal in Distribution and Utilization Systems with Battery Energy Storage" *Technical Electrodynamics*, 2025, No. 1, pp. 70–81. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.01.070>.
11. Filip Logist, Fady Assassa, J. V. Impe, and W. Marquardt, "Exploiting grid adaptation and structure detection in multi-objective dynamic optimization problems," *Computer-aided chemical engineering/Computer aided chemical engineering*, pp. 782–786, Jan. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-59520-1.50015-4>.
12. K. Deb and K. Deb, "Multi-objective Optimization," *Search Methodologies*, pp. 403–449, Jul. 2013, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6940-7_15.
13. A. Behzadi, S. Holmberg, C. Duwig, F. Haghighat, R. Ooka, and S. Sadrizadeh, "Smart design and control of thermal energy storage in low-temperature heating and high-temperature cooling systems: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 166, p. 112625, Sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112625>.
14. M. Schwenzer, M. Ay, T. Bergs, and D. Abel, "Review on model predictive control: an engineering perspective," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 117, no. 5–6, pp. 1327–1349, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07682-3>.
15. V. Khare, S. Nema, and P. Baredar, "Solar–wind hybrid renewable energy system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 23–33, May 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.223>.
16. R. Fachrizal, M. Shepero, D. van der Meer, J. Munkhammar, and J. Widén, "Smart charging of electric vehicles considering photovoltaic power production and electricity consumption: A review," *eTransportation*, vol. 4, p. 100056, May 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100056>.
17. H. Song *et al.*, "Smart optimization in battery energy storage systems: An overview," *Energy and AI*, vol. 17, pp. 100378–100378, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100378>.
18. Hopgood AA. Intelligent systems for engineers and scientists: a practical guide to artificial intelligence. CRC Press; 2021, <http://dx.doi.org/10.1201/9781003226277>.
19. Denysiuk S., Bohoiko I., Piskarov V. Optimisation of electric vehicle charging stations using balancing technologies in local power systems // Scientific achievements of contemporary society. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2024. Pp. 217-225. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-achievements-of-contemporary-society-5-7-12-2024-london-velikobritaniya-arhiv/>

Надійшла: 28.04.2025
Received: 28.04.2025