

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

КОСТЕНКО ГАННА ПЕТРІВНА



УДК 621.311:621.352:519.876.5

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ІНТЕГРАЦІЄЮ
ВТОРИННИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ В
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ**

Спеціальність 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2026

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана в Інституті загальної енергетики НАН України, м. Київ

Науковий керівник: кандидат технічних наук

ДРЬОМІН Володимир Павлович

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, старший науковий співробітник
КУЗНЄЦОВ Микола Петрович,
Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ
заступник директора з наукової роботи, завідувач відділу
комплексних енергетичних систем

кандидат технічних наук, доцент
ЗАМУЛКО Анатолій Ігорович
Державна інспекція енергетичного нагляду України, м. Київ
Т.в.о. Голови

Захист дисертації відбудеться « 07 » липня 2026 року о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.223.01 в Інституті загальної енергетики НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Антоновича, буд.172, тел.294-67-01.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту загальної енергетики НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Антоновича, буд.172.

Автореферат надруковано « 04 » червня 2026 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.223.01



О.Л. Декуша

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний розвиток енергетики характеризується поєднанням кількох взаємопов'язаних тенденцій. З одного боку, відбувається активний енергетичний перехід, спрямований на декарбонізацію, скорочення використання викопних видів палива та масштабне впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). З іншого боку, зростає складність функціонування та управління енергосистемами, оскільки висока частка ВДЕ обумовлює варіабельність генерації, підвищує вимоги до гнучкості, резервування та балансування в реальному часі. У таких умовах забезпечення надійності та стійкості електроенергетичних систем (ЕЕС) потребує нових підходів до управління їх структурою та режимами роботи. Це формує зростаючий попит на установки зберігання енергії (УЗЕ), які відіграють ключову роль у забезпеченні балансу попиту і пропозиції, підвищенні гнучкості, а також інтеграції розподіленої генерації та електротранспорту.

Розвиток концепції сталого енергопостачання супроводжується необхідністю комплексного врахування технічних, економічних та екологічних факторів. Серед основних викликів – зниження вуглецевого сліду, підвищення ефективності використання ресурсів, забезпечення економічної доцільності впровадження нових технологій, а також інтеграція цифрових інструментів моніторингу та управління. Значна кількість досліджень присвячена окремим аспектам цієї проблематики, що відображено у працях зарубіжних і вітчизняних учених, зокрема В. А. Garcia, Ll. C. Casals, J. Neubauer, A. A. Pesaran, M. M. Кулика, В. П. Бабака, А. О. Запорожця, М.П. Кузнєцова, В.В. Каплуна, Т.П. Нечаєвої та ін.

Водночас важливою складовою сучасного енергетичного переходу є глобальна електрифікація транспорту, що призводить до поступового формування значних обсягів відпрацьованих тягових батарей, які зберігають залишковий ресурс та можуть бути використані повторно. Повторне використання батарей електротранспорту розглядається не лише як технологічне рішення, а як елемент реалізації принципів циркулярної економіки, спрямованої на підвищення ефективності використання ресурсів, зменшення екологічного навантаження та подовження життєвого циклу енергетичного обладнання.

Одним із ключових напрямів розвитку УЗЕ є використання літій-іонних акумуляторів, які характеризуються значними технічними перевагами та гнучкістю роботи, проте їх широке впровадження обмежується високою вартістю та екологічним навантаженням на етапах виробництва й утилізації. У цьому контексті особливого значення набуває повторне використання батарей електротранспорту, які після завершення транспортного циклу зберігають значну частину доступної ємності та можуть ефективно застосовуватись у стаціонарних УЗЕ з менш жорсткими режимами експлуатації. Вторинні батареї електротранспорту (ВБЕТ) поєднують технічну придатність із економічною доцільністю, забезпечуючи зниження капітальних витрат (до 50–70 дол. США/кВт·год порівняно з 110–120 дол. США/кВт·год для нових батарей), зменшення залежності від дизель-генераторів у системах резервного живлення та автономного енергозабезпечення, а також скорочення викидів CO₂ і негативного впливу на довкілля.

Разом з тим, масштабне впровадження ВБЕТ в електроенергетичні системи потребує вирішення ряду складних науково-технічних завдань. До них належать:

невизначеність процесів деградації батарей, обмежена достовірність оцінки їх технічного стану, складність прогнозування залишкового ресурсу, необхідність обґрунтованого просторового розміщення у структурі енергосистеми, а також вибір оптимальних режимів експлуатації з урахуванням багатокритеріальних вимог. Додатковою проблемою є розрив між задачами планування та експлуатації, які у більшості підходів розглядаються окремо, що призводить до зниження ефективності прийнятих рішень.

Таким чином, розроблення інтегрованих підходів до управління процесами використання ВБЕТ у енергосистемах, що забезпечують підвищення надійності, економічної ефективності та екологічної безпеки, а також зменшення невизначеності при прийнятті рішень щодо їх інтеграції та експлуатації, є актуальною **науково-практичною задачею**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до планів наукових досліджень Інституту загальної енергетики НАН України, а саме: «Дослідження і розробка методів та засобів енергоекономічного аналізу оптимізації структури та режимів сумісного виробництва, транспортування та споживання електричної і теплової енергії (2004 р., ДР №0102U000744), «Розроблення методологічних основ і засобів прогнозування розвитку теплової енергетики України та їх уніфікація з урахуванням європейської інтеграції». (2007 р., ДР №0105U001374), «Визначення доцільних напрямів та обсягів впровадження в Україні екологічно чистих систем децентралізованої енергетики на основі концепції інтелектуальних мереж» (2010 р., ДР №0108U000573), «Розвиток математичних моделей та засобів інформатики визначення перспективної структури та обсягів розвитку традиційної та відновлюваної електроенергетики за умов її декарбонізації та впровадження принципів кліматичної нейтральності в Україні» (2022 р., ДР №0122U001231), «Підвищення ефективності та безпеки функціонування об'єднаної енергетичної системи шляхом електрифікації теплотзабезпечення в Україні» (2024 р., ДР №0123U100983), «Розширення можливостей застосування вітрових і сонячних електростанцій у структурі об'єднаної енергосистеми України» (2025 р., ДР №0123U100243), «Розвиток моделей та засобів управління об'єднаними енергосистемами за участі потужних вітрових і сонячних електростанцій в нормальних та аварійних режимах» (2026 р., ДР №0122U000343), «Удосконалення ієрархічної системи математичних та програмно-інформаційних засобів для дослідження напрямів розвитку об'єднаних енергосистем в умовах переходу до низьковуглецевої економіки» (2026 р., ДР №0122U000236), «Розроблення структури та забезпечення функціонування самодостатньої розподіленої генерації» (2026 р., ДР №0125U001572), в яких автор приймала участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення нових і вдосконалення існуючих методів, моделей та програмних засобів для управління інтеграцією вторинних батарей електротранспорту в електроенергетичні системи в умовах невизначеності технічного стану батарей та необхідності прогнозування їх залишкового ресурсу.

Для досягнення цієї мети було сформульовано та вирішено такі завдання:

- досліджено світові тенденції використання ВБЕТ, виконано оцінювання потенціалу їх впровадження в електроенергетичні системи та визначено основні бар'єри, зокрема в умовах невизначеності їх технічного стану;

- удосконалено метод оцінки деградації ВБЕТ з урахуванням календарної, циклічної та стохастичної складових;
- удосконалено управління режимами роботи ВБЕТ з урахуванням змін технічного стану батарей, невизначеності їх параметрів та умов експлуатації в енергосистемі;
- розроблено метод кластерного розподілу ВБЕТ в ЕЕС з урахуванням характеристик накопичувачів та умов їх використання;
- проведено моделювання техніко-економічної ефективності використання ВБЕТ при різних сценаріях експлуатації;
- досліджено вплив стохастичного характеру відмов ВБЕТ на надійність їх використання та обґрунтувати підходи до формування резерву та планування заміни;
- сформовано рекомендації щодо впровадження запропонованих моделей у практику, а також напрями вдосконалення нормативно-правової бази з метою підтримки сталого вторинного використання батарей у межах концепції циркулярної економіки;
- розроблено програмно-інформаційні засоби підтримки прийняття рішень щодо використання ВБЕТ в електроенергетичних системах на основі запропонованих моделей.

Об'єктом дослідження є процеси управління інтеграцією вторинних батарей електротранспорту в електроенергетичні системи з урахуванням невизначеності їх технічного стану.

Предметом дослідження є параметри, математичні моделі оцінки стану, прогнозування ресурсу та управління режимами роботи вторинних батарей електротранспорту в процесі їх інтеграції в електроенергетичні системи.

Методи дослідження. Методичну основу дослідження склали: методи математичного моделювання – для формування моделей деградації ВБЕТ, прогнозування їх залишкового ресурсу та оцінювання впливу на технічні й економічні показники енергосистем; методи прогнозування та аналізу часових рядів – для визначення динаміки формування ресурсу ВБЕТ на основі розвитку парку електромобілів з урахуванням часових лагів, структури ринку та доступності батарей для повторного використання; методи математичної статистики – для врахування стохастичного характеру процесів деградації батарей та оцінки варіативності їх технічних параметрів; методи оптимізації – для визначення оптимальних режимів експлуатації та просторового розподілу ВБЕТ в енергетичних системах; методи системного аналізу – для формування ієрархічної структури моделей та встановлення взаємозв'язків між ними в межах ітеративного управління; методи економіко-екологічного аналізу – для обґрунтування доцільності застосування ВБЕТ у порівнянні з новими накопичувачами та традиційними технологіями резервування; методи сценарного моделювання – для оцінювання ефективності використання ВБЕТ у різних режимах функціонування енергосистем, зокрема для резервного живлення, балансування генерації ВДЕ та регулювання режимів роботи.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше розроблено систему взаємопов'язаних моделей управління інтеграцією вторинних батарей електротранспорту в електроенергетичні системи, яка базується на ітеративному принципі прийняття управлінських рішень та поєднує

моделі планування, моніторингу технічного стану, оцінювання ефективності й корекції режимів роботи, що забезпечує узгоджене врахування технічних, економічних та експлуатаційних факторів і адаптацію режимів функціонування вторинних батарей електротранспорту в умовах деградації та змін зовнішніх умов.

2. Вперше запропоновано модель прогнозування доступності ресурсу вторинних батарей електротранспорту, що базується на лаговому представленні процесу вибуття батарей з експлуатації та враховує структуру парку електромобілів, коефіцієнти доступності та ефективну залишкову ємність, що дозволяє визначати обсяги та часові параметри формування ресурсу ВБЕТ і враховувати відкладений характер його надходження в електроенергетичні системи.

3. Запропоновано інтегральний показник деградації з урахуванням сукупного впливу календарного старіння, циклічного навантаження та стохастичних факторів, що забезпечує узагальнену оцінку технічного стану та залишкового ресурсу вторинних батарей електротранспорту і може бути використаний як інформаційно-аналітичне підґрунтя для прийняття управлінських рішень.

4. Вперше запропоновано метод дворівневої кластеризації вторинних батарей електротранспорту з урахуванням рівня деградації, економічних показників та вимог до надійності електропостачання, що дозволяє групувати батареї за доцільними напрямками використання та забезпечує їх інтеграцію до різних режимів роботи енергосистеми.

5. Вперше розроблено метод адаптивного управління режимами використання вторинних батарей електротранспорту в електроенергетичних системах на основі порогових значень показників ефективності, режимів експлуатації залежно від технічного стану батарей, умов функціонування енергосистеми та економічних критеріїв, що забезпечує формалізований механізм вибору та корекції режимів експлуатації вторинних батарей електротранспорту у процесі їх функціонування.

Практичне значення одержаних результатів.

Запропонована система взаємопов'язаних моделей управління інтеграцією ВБЕТ забезпечує підтримку прийняття рішень щодо вибору сценаріїв використання, оцінювання технічної придатності, прогнозування залишкового ресурсу та оптимізації режимів експлуатації ВБЕТ у складі ЕЕС. Запропоновані підходи можуть бути використані при підготовці аналітичних матеріалів і рекомендацій для органів державного управління, операторів енергосистем та енергетичних компаній, зокрема у процесі планування розвитку систем накопичення енергії та підвищення гнучкості ЕЕС в умовах зростання частки ВДЕ. Практична цінність результатів полягає у можливості їх використання для формування стратегій розвитку енергетичного сектору та впровадження принципів циркулярної економіки в Україні.

Розроблений програмно-інформаційний комплекс (ПІК) для управління інтеграцією ВБЕТ в ЕЕС забезпечує числову реалізацію запропонованих моделей та параметрів і включає модулі оцінювання технічного стану ВБЕТ, розрахунку інтегрального показника деградації, моніторингу ключових показників ефективності, а також підтримки прийняття управлінських рішень щодо вибору режимів експлуатації та сценаріїв використання ВБЕТ. ПІК реалізує інтегровану обробку технічних, економічних та експлуатаційних параметрів та забезпечує адаптивне управління процесами використання ВБЕТ в ЕЕС.

Результати виконаних досліджень використано у діяльності ТОВ

«Укрекоконсалт» і ТОВ «ПаверЮ» та підтверджено актами впровадження (від 25.11.2024 р. та 20.04.2025 р. відповідно)

Особистий внесок здобувача. Усі основні положення та результати, що містяться в дисертації, отримані здобувачем самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – проведення SWOT-аналізу застосування ВБЕТ, оцінка ринкового потенціалу та формування висновків щодо їх впровадження в енергетичному секторі України; [2] – систематизація та аналіз методів діагностики літій-іонних батарей, формалізація підходів до оцінки їх технічного стану для застосувань у стаціонарних УЗЕ; [3] – розроблення структури та логіки ітеративного підходу для управління інтеграцією ВБЕТ в енергосистему; [4] – аналіз та узагальнення міжнародного досвіду нормативно-правового регулювання використання ВБЕТ; [7] – аналіз ролі мікромереж та розподіленої генерації з УЗЕ у підвищенні стійкості енергосистем; [10] – участь у розробленні підходу до врахування стохастичності у прогнозуванні при оптимізації режимів роботи енергосистем; [11] – формування узагальнених підходів до застосування ВБЕТ в УЗЕ та їх ролі у забезпеченні стійкості енергосистем; [12] – аналіз відкритих експериментальних даних літій-іонних батарей та їх використання для задач моделювання деградації і управління життєвим циклом; [13] – аналіз глобальних тенденцій розвитку УЗЕ та оцінка перспектив їх впровадження в Україні; [14] – узагальнення світових тенденцій, політик та технологій використання ВБЕТ в енергетиці; [17] – розроблення підходу управління інтеграцією УЗЕ на основі ітеративного циклу управління; [19] – формування концепції застосування цифрового двійника для управління роботою ВБЕТ в енергосистемах; [22] – оцінка ефективності використання ВБЕТ для забезпечення резервного живлення в умовах надзвичайних ситуацій; [23] – розроблення інтегрального показника деградації батарей з урахуванням календарного та циклічного старіння; [26] – участь у розробленні підходів до управління споживанням електричної енергії, аналіз ефективних методів регулювання навантаження та формування відповідних висновків; [27] – розроблення підходу до управління накопиченням ресурсів у задачах оптимізації функціонування електроенергетичних комплексів та формалізація відповідних моделей; [28] – участь у підготовці матеріалів та аналізі методів регулювання режимів електроспоживання регіональних енергосистем.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, представлені в дисертації, висвітлені на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема: Науково-практична конференція "Еколого-економічні аспекти інноваційного розвитку паливно-енергетичного комплексу" (Київ-Дрогобич-Трускавець, 2003), Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективність-2010» (Інститут газу НАН України, Київ, 19-21 жовтня 2010 р.), Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів та молодих вчених «*Сталий розвиток: виклики та реалії здійснення (Україна – Світ)*» (ІФНТУНГ, 22 травня 2024 р.); Науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (15 травня 2024 р.); Науково-практична конференція «*Кібербезпека енергетики*» (ІПМЕ НАН України, Київ, 29 травня 2024 р.); XXIV та XXV Міжнародні науково-практичні онлайн-конференції «*Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*» (Інститут відновлюваної енергетики НАН

України, 2024 та 2025 роки); 3rd International Workshop «*Information Technologies: Theoretical And Applied Problems (ITTAP-2023)*» (22–24 листопада 2023 р., Тернопіль – Ополе; Науково-технічні конференції *Резильєнтність динамічних систем*, ІПМЕ НАН України, 2024 і 2025 роки; X International Scientific-Technical Conference “*Theory and Practice of Rational Use of Traditional and Alternative Fuels and Lubricants*”, Kyiv, 1 July 2025. Науково-практична конференція «*Резильєнтність критичної інфраструктури – 2023*» (ІПМЕ НАН України, Київ, червень 2023 р.); XI Міжнародна науково-практична конференція «*Innovations and prospects of world science*» (Ванкувер, Канада, 22–24 червня 2022 р.); Науково-практичні конференції «*Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації*» (ІПМЕ НАН України, Київ, 2023-2025 роки); Міжнародні науково-технічні конференції «*Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS*» (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2022-2025 роки), XIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасна кібернетика. Глушковські читання» (Інститут кібернетики НАН України ім. В.М. Глушкова, Київ, 31 грудня 2025 р.)

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 28 друкованих наукових працях (10 одноосібних), з них: 3 статті у міжнародних виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus (Q1 і Q2) та WoS, 4 розділи у колективних монографіях з індексацією у Scopus, 10 статей у вітчизняних фахових наукових виданнях категорії Б (4 одноосібно), 11 тез доповідей на міжнародних конференціях, проведених в Україні (7 одноосібно).

Структура і обсяги дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 197 сторінок, у тому числі, 113 сторінок основного тексту, 24 рисунки, 37 таблиць, список використаних джерел зі 159 найменувань та 4 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та завдання роботи, визначено об’єкт і предмет дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Висвітлено зв’язок роботи з науковими програмами і темами, подано відомості про апробацію результатів, публікації та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** досліджено сучасні тенденції розвитку глобальної та національної енергетики, що формують передумови інтеграції УЗЕ на базі ВБЕТ у локальні енергосистеми.

Огляд реалізованих проєктів повторного використання батарей у країнах ЄС, США та Китаї підтверджує технічну надійність та економічну доцільність застосування ВБЕТ. На цій основі запропоновано їх класифікацію за масштабом (від об’єктів критичної інфраструктури до установок потужністю десятки МВт) та функціональним призначенням (резервування, балансування ВДЕ, участь у регулюванні режимів роботи енергосистеми). Визначено основні напрями застосування ВБЕТ, серед яких на початкових етапах найбільш доцільним є використання у системах резервного живлення, тоді як реалізація ринкових механізмів потребує розвитку нормативного та інституційного середовища. Встановлено, що міжнародне нормативно-правове забезпечення, зокрема вимоги ЄС

щодо циркулярної економіки, суттєво випереджає українську практику, де відсутня цілісна система регулювання життєвого циклу батарей, що обмежує можливості їх повторного використання.

Здійснено оцінку можливостей інтеграції ВБЕТ в енергосистему України. Визначено, що ключовими передумовами є зростаюча потреба у резервуванні та гнучкості енергосистеми, зумовлена високими ризиками аварійності та пошкодження інфраструктури, а також необхідність адаптації до європейських енергетичних стандартів. Серед основних обмежень визначено відсутність нормативної бази, інфраструктури ринку та практичного досвіду застосування ВБЕТ.

Узагальнення результатів аналізу сучасних досліджень свідчить про відсутність інтегрованих методів, що забезпечують узгоджене врахування технічного стану ВБЕТ, стохастичного характеру їх деградації, економічної ефективності та умов функціонування енергосистеми в межах єдиного контуру управління. Це зумовлює необхідність постановки завдання розроблення системи параметрів і математичних моделей управління інтеграцією ВБЕТ, яка передбачає: оцінювання технічного стану батарей, прогнозування залишкового ресурсу, формування економічних показників ефективності, кластерний розподіл за напрямками використання та оптимізацію режимів експлуатації з урахуванням невизначеності. Розв'язання цієї задачі спрямоване на забезпечення адаптивного вибору режимів роботи ВБЕТ та підвищення ефективності їх застосування в ЕЕС.

У **другому розділі** запропоновано систему управління інтеграцією вторинних батарей електротранспорту в енергетичні системи, реалізовану у вигляді системи взаємопов'язаних параметрів та математичних моделей (Рис. 1).

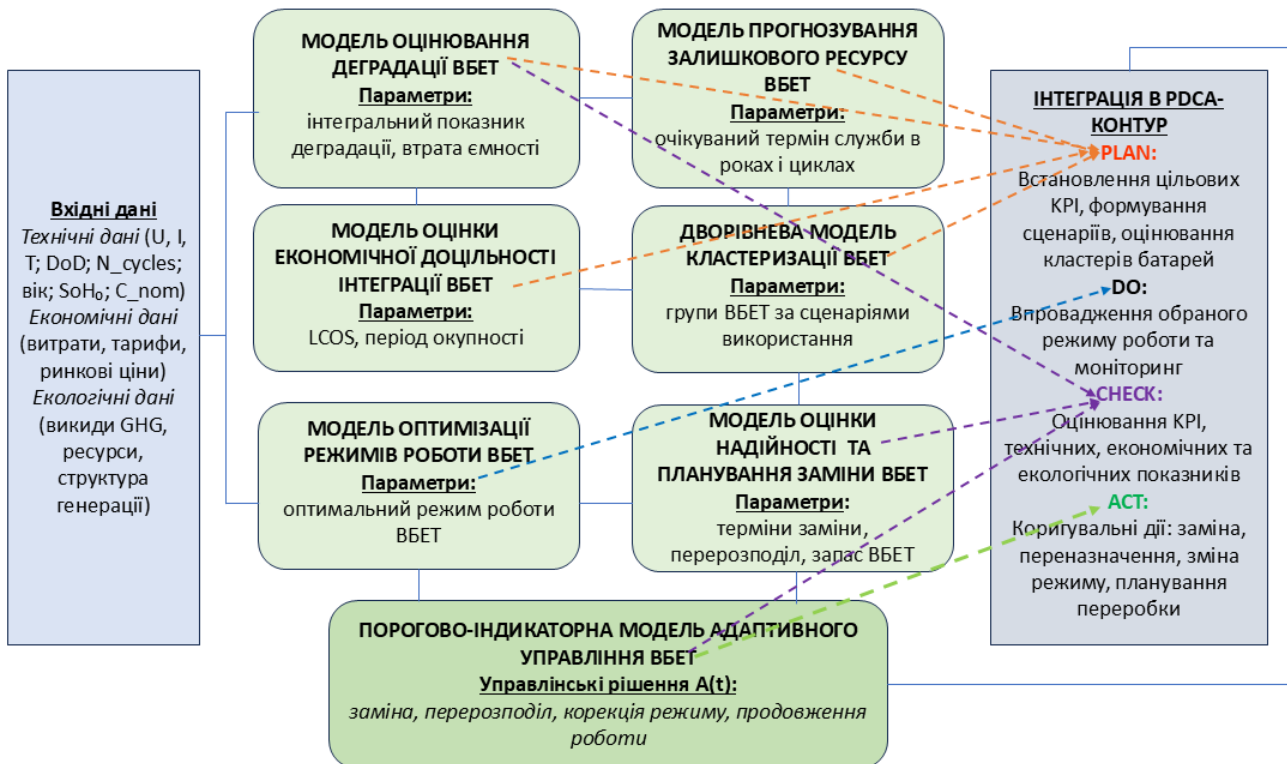


Рисунок 1 – Схема взаємодії моделей та параметрів управління ВБЕТ

Методологія управління реалізується у вигляді послідовності взаємопов'язаних моделей та параметрів, що формують єдиний контур прийняття рішень: прогнозування ресурсу → оцінювання технічного стану → економічна оцінка →

кластерний розподіл → оптимізація режимів → оцінка надійності → адаптивне управління .

З метою оцінювання обсягів та часових параметрів формування доступного ресурсу ВБЕТ окремо в роботі запропоновано модель прогнозування його доступності для використання в УЗЕ, що базується на аналізі структури парку електромобілів, часових лагів вибуття батарей з експлуатації та частки придатних до повторного використання батарей. На відміну від моделей, наведених на рис. 1, дана модель не входить безпосередньо до контуру адаптивного управління, а використовується як підготовчий аналітичний інструмент для формування вхідних сценарних параметрів. Встановлено, що доступний ресурс має відкладений характер формування та визначається не лише розвитком електротранспорту, а й структурою ринку (нові/вживані транспортні засоби), що істотно впливає на часові параметри появи вторинних батарей.

Формування ресурсу ВБЕТ описано модифікованою лаговою моделлю:

$$B(t) = C_{\text{eff}}[k_n w_n(t) \Delta N(t - \tau_n) + k_u w_u(t) \Delta N(t - \tau_u)], \quad (1)$$

де $\Delta N(t)$ – річний приріст електромобілів; $B(t)$ – річний ресурс ВБЕТ у періоді часу t , кВт·год; C_{eff} – ефективна залишкова ємність батареї, кВт·год; $w_n(t), w_u(t)$ – частки нових і вживаних електромобілів; k_n, k_u – коефіцієнти доступності батарей для повторного використання; τ_n, τ_u – лаги вибуття батарей з експлуатації.

За результатами розрахунків визначено, що річний обсяг доступного ресурсу ВБЕТ зростає з 0,17 ГВт·год у 2025 році до 2,5 ГВт·год у 2030 році, тоді як кумулятивний ресурс досягає 9,8 ГВт·год (Рис. 2). Встановлено, що динаміка формування ресурсу має нерівномірний характер, що зумовлено зміною структури ринку електромобілів та різними лагами вибуття батарей з експлуатації.

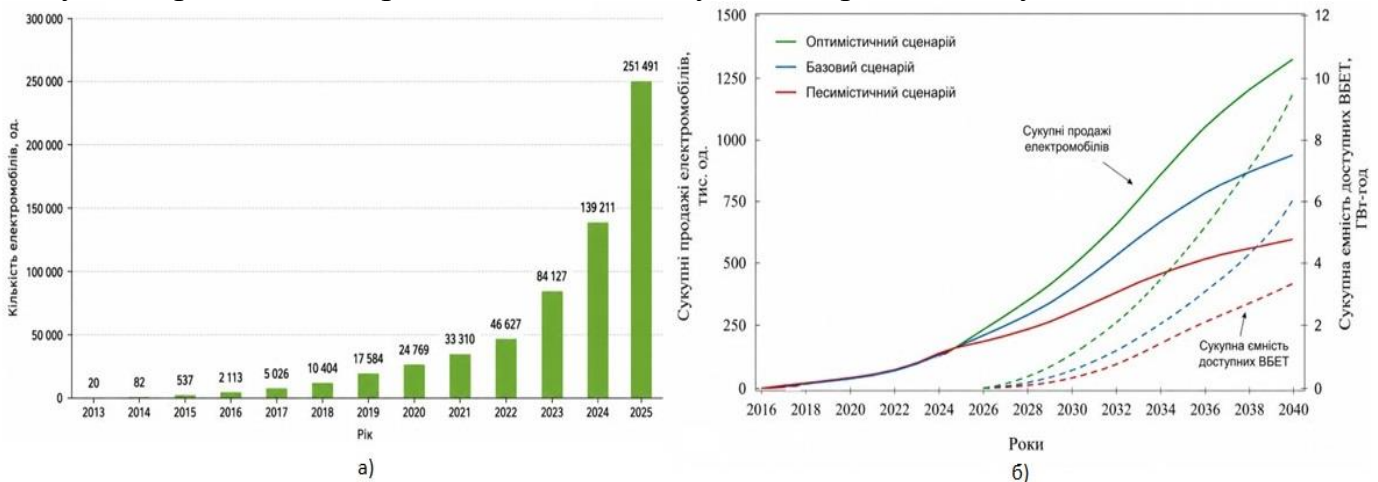


Рисунок 2 –Зростання парку електромобілів в Україні (а) та прогноз доступності вторинних батарей (б)

Для уточнення характеристик доступного ресурсу ВБЕТ з урахуванням їх фактичного стану запропоновано підхід до оцінювання технічного стану та ресурсу ВБЕТ, у межах якого введено інтегральний показник деградації (ІПД або ІДІ), що враховує календарне, циклічне та стохастичне старіння батарей і дозволяє отримати узагальнену оцінку їх функціональних характеристик.

$$IDI(t) = Q_{\text{calendar}}(t) + Q_{\text{cycle}}(t) \pm \Delta Q(t) \quad (2)$$

де $Q_{\text{calendar}}(t)$ – втрата ємності внаслідок календарного старіння; $Q_{\text{cycle}}(t)$ – втрата

ємності внаслідок циклічного старіння; $\Delta Q(t)$ – урахування невизначеності стану ВБЕТ в умовах експлуатації.

Календарна деградація визначається як функція часу та умов експлуатації:

$$Q_{calendar}(t) = f_1(t, T^\circ, SOC) \quad (3)$$

де t – час експлуатації, T° – температура, SOC – стан заряду ВБЕТ.

Циклічна деградація залежить від режимів роботи батареї:

$$Q_{cycle}(t) = f_2(N_{cycle}(t), DOD, C_{rate}) \quad (4)$$

де $N_{cycle}(t)$ – кількість циклів заряду/розряду; DOD – глибина розряду; C_{rate} – швидкість заряджання/розряджання.

Для врахування невизначеності експлуатаційних параметрів введено стохастичну складову, що базується на оцінці чутливості втрати ємності до зміни основних факторів:

$$\Delta Q(t) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial T^\circ} \Delta T^\circ\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial SOC} \Delta SOC\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial DOD} \Delta DOD\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial C_{rate}} \Delta C_{rate}\right)^2} \quad (5)$$

де $\Delta T, \Delta SOC, \Delta DOD, \Delta C_{rate}$ є випадковими величинами, відповідно температура, стан заряду, глибина розряду, швидкість заряду/розряду, похідні представляють чутливість ємності акумулятора до зміни кожного з цих параметрів. $\frac{\partial Q}{\partial T}, \frac{\partial Q}{\partial SOC}, \frac{\partial Q}{\partial DOD}, \frac{\partial Q}{\partial C_{rate}}$. Інтегральний показник деградації розглядається як узагальнений параметр стану батареї, що має комбіновану детерміновано-стохастичну природу та відображає сукупний вплив календарної, циклічної і випадкової складових деградації. Значення ІПД характеризує зниження функціональних можливостей батареї (ємності та потужності) у часі та використовується для прогнозування залишкового ресурсу у другому життєвому циклі та прийняття управлінських рішень щодо режимів її використання.

На основі інтегрального показника деградації розроблено модель прогнозування залишкового терміну служби батарей, яка дає змогу визначати часову тривалість їх подальшого використання в енергосистемі та враховувати ризики передчасного вибуття. Прогнозування залишкового строку служби (*Remaining Useful Life* – *RUL*) для акумуляторів другого життя ускладнене їхньою технологічною неоднорідністю та нелінійною динамікою деградації. Для подолання цих викликів у роботі запропоновано підхід, що ґрунтується на інтегральному індексі деградації *IDI*, який агрегує множину факторів старіння в єдиний кількісний показник. Ключовою перевагою методу є прогнозування *RUL* шляхом аналізу швидкості зміни цього індексу за формулою:

$$RUL(t) = \frac{IDI_{кр} - IDI(t)}{\left\langle \frac{dIDI}{dt} \right\rangle}, \quad (6)$$

де $IDI_{кр}$ – критичне значення індексу деградації; $IDI(t)$ – поточне значення індексу деградації; $\langle dIDI/dt \rangle$ – усереднена швидкість зміни інтегрального індексу деградації.

Запропонований підхід забезпечує узагальнене оцінювання технічного стану батарей та підвищує надійність прогнозування для прийняття управлінських рішень щодо їх технічної експлуатації та економічної оцінки.

Для оцінки економічної доцільності застосування ВБЕТ адаптовано модель

приведених витрат на зберігання енергії LCOS, яка враховує специфіку вторинних батарей, зокрема попередню деградацію, обмежений залишковий ресурс, а також витрати на діагностику, відбір і підготовку до повторного використання.

Показник LCOS використовується як цільова функція в оптимізаційній моделі для мінімізації витрат і визначення раціональних стратегій технічного обслуговування та заміни. У моделі, поряд із капітальними та операційними витратами, враховано витрати на заміну батарей та зміну обсягів відпущеної енергії у часі, що дозволяє враховувати вплив деградації батарей на динаміку енерговіддачі та економічну ефективність їх використання.

Формула LCOS з урахуванням деградації та заміни батарей має вигляд:

$$LCOS_{ВБЕТ} = \frac{CAPEX_{ВБЕТ} + \sum_{t=1}^T \frac{OPEX_t + C_{заряд,t}}{(1+r)^t} + \sum_{k=1}^K \frac{C_{заміни,k}}{(1+r)^{t_k}}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_{відпВБЕТ}(t)}{(1+r)^t}} \quad (7)$$

де $CAPEX_{ВБЕТ}$ – капітальні витрати на придбання та інсталяцію ВБЕТ; $OPEX_t$ – операційні витрати, включаючи витрати на обслуговування і страхування; $C_{заміни,k}$ – очікувані витрати на k -ту заміну батарей або модулів; t_k – рік здійснення k -ї заміни; K – кількість замін протягом розрахункового періоду; $C_{зарядж}(t)$ – вартість електроенергії для заряджання ВБЕТ у році t ; $E_{відпВБЕТ}(t)$ – кількість енергії, відпущеної ВБЕТ за рік t ; r – ставка дисконтування; T – розрахунковий термін служби ВБЕТ.

Вартість k -ї заміни визначається з урахуванням вартості нової батареї або модуля, залишкової вартості демонтованих елементів та інфляційного зростання вартості обладнання:

$$C_{заміни,k} = P_{нов} (1 - R_{залишков}) (1+i)^{t_k} \quad (8)$$

де $P_{нов}$ – вартість нової батареї або модуля, грн/кВт·год; $R_{залишков}$ – коефіцієнт залишкової вартості після демонтажу (0.1–0.3); i – річний рівень інфляції; t_k – рік здійснення k -ї заміни.

Таким чином, формула для $C_{заміни,k}$ визначає очікувану номінальну вартість заміни у відповідному році експлуатації, а її приведення до поточної вартості здійснюється у формулі LCOS шляхом дисконтування на множник $(1+r)^{t_k}$. Це дозволяє уникнути подвійного врахування часової вартості коштів і коректно відобразити витрати на відновлення ресурсу системи зберігання енергії на базі ВБЕТ.

Отримані оцінки технічного стану, залишкового ресурсу та економічної ефективності формують основу для визначення доцільних напрямів використання ВБЕТ. З цією метою запропоновано модель кластерного розподілу, яка забезпечує їх групування залежно від технічних, економічних та експлуатаційних характеристик.

Розподіл батарей здійснюється із використанням дворівневої кластерної моделі, що враховує функціональні вимоги сценаріїв використання та техніко-економічні характеристики батарей. На першому рівні визначаються доцільні напрями використання ВБЕТ (регулювання навантаження, балансування ВДЕ, резервне живлення), на другому – виконується їх групування за технічними та економічними параметрами. У моделі прийнято наступне:

$B = \{b_i\}$, $i = 1, 2, \dots, N$ – множина ВБЕТ, де b_i – i -та ВБЕТ, що характеризується набором технічних, економічних та експлуатаційних параметрів і розглядається як

окремий об'єкт кластеризації.

$S = \{s_j\}, j = 1, 2, \dots, M$ – множина сценаріїв використання;

x_i – вектор параметрів батареї, $x_i = \{IDI_i, RUL_i, P_i, E_i, C_i\}$;

R_j – вектор вимог сценарію, $R_j = \{P_j^{req}, E_j^{req}, \lambda_j, \rho_j\}$.

Перший рівень – *функціональна кластеризація*: кожній батареї $b_i \in B$ ставиться у відповідність сценарій $s_j \in S$:

$$f_1: B \rightarrow S \quad (9)$$

на основі мінімізації відхилення параметрів батареї від вимог сценарію:

$$D_{ij} = \sum w_k |x_i(k) - R_j(k)| \rightarrow \min \quad (10)$$

де w_k – ваговий коефіцієнт k -го параметра батареї, причому $\sum_k w_k = 1$; $x_i(k)$ – значення параметра батареї; $R_j(k)$ – цільове/необхідне значення цього параметра для сценарію.

Другий рівень – *кластеризація в межах сценарію*: для кожного сценарію формується підмножина батарей:

$$B_j = \{b_i \in B \mid f_1(b_i) = s_j\}. \quad (11)$$

У межах кожного сценарію формується L_j кластерів батарей із близькими характеристиками:

$$f_2: B_j \rightarrow C_{j,l}, l = 1, 2, \dots, L_j, \quad (12)$$

де $C_{j,l}$ – l -й кластер батарей з близькими характеристиками у межах сценарію s_j .

Критерій кластеризації – мінімізація внутрішньокластерного відхилення батарей від центру кластера:

$$\sum ||x_i - \bar{x}_{j,l}||^2 \rightarrow \min, \text{ для всіх } b_i \in C_{j,l}. \quad (13)$$

де $\bar{x}_{j,l}$ – середній вектор параметрів батарей l -го кластера у межах сценарію s_j .

У результаті формується дворівнева структура розподілу, яка забезпечує функціональний розподіл ВБЕТ за сценаріями використання, узгодження режимів експлуатації з технічним станом батарей та підвищення ефективності використання ресурсів.

Після кластерного розподілу ВБЕТ за напрямками використання здійснюється етап оптимізації режимів експлуатації ВБЕТ у відповідних сценаріях використання. Для кожного сформованого кластера застосовується узагальнена оптимізаційна модель, що враховує технічні обмеження, деградацію та економічні параметри. Управління активами ВБЕТ реалізується як послідовність етапів: на стратегічному рівні – розподіл батарей за сценаріями використання, на операційному – оптимізація режимів їх експлуатації.

Запропоновано узагальнену оптимізаційну модель управління активами ВБЕТ, яка формалізує задачу розподілу потужності та енергії між альтернативними сценаріями використання та забезпечує максимізацію економічної ефективності їх інтеграції в ЕЕС.

Для формалізації задачі оптимізації, а також цільової функції та системи обмежень введено такі позначення: $P_{s,i,t}$ – потужність ВБЕТ b_i , що використовується у сценарії s у період t ; $R_{s,t}$ – дохід від участі ВБЕТ у сценарії s у період t ; $C_{s,t} = C_{s,t}^{op} + C_{s,t}^{deg}$ – сумарні витрати у сценарії s у період t , що включають експлуатаційні витрати

$C_{s,t}^{op}$ та витрати, пов'язані з деградацією батареї $C_{s,t}^{deg}$; I_i – початкові інвестиції в об'єкт i (капітальні витрати); r – ставка дисконтування; T – горизонт планування.

Цільова функція моделі відповідає максимізації сумарного дисконтованого чистого доходу від інтеграції ВБЕТ на горизонті планування T та має вигляд:

$$\max \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} [\sum_{s \in S} (R_{(s,t)} - C_{(s,t)})], \quad (14)$$

Оптимізаційна модель формулюється у вигляді задачі з обмеженнями, які наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Обмеження моделі оптимізації

Тип обмеження	Формалізація	Зміст
Баланс потужності	$\sum_{s \in S} P_{s,i,t} \leq P_{max,i}$	Сумарна потужність, що використовується в усіх сценаріях, не перевищує доступну потужність батареї
Обмеження по деградації	$\sum_{s \in S} C_{деградації_{s,j,t}} \leq IDI_{max,j,t}$	Рівень деградації та залишковий ресурс не виходять за допустимі межі
Виконання комерційних контрактів	$P_{резерв_{j,t}} \geq P_{контракт_j}$	Забезпечується мінімальний рівень резервної потужності
Бюджетне обмеження	$\sum_j I_j C_{capex} \leq B_{max}$	Загальні витрати не перевищують доступний бюджет
Мінімальна рентабельність	$NPV \geq 0 \vee ROI \geq R_{min}$	Забезпечується мінімально допустимий рівень економічної ефективності

Специфіка окремих сценаріїв відображається через параметри цільової функції та систему обмежень без зміни загальної структури задачі.

З метою врахування відмов і забезпечення надійності запропоновано модель оцінки надійності та планування заміни ВБЕТ, яка дозволяє визначати моменти заміни, формувати необхідний резерв і оцінювати імовірність відмови ВБЕТ у різних режимах експлуатації.

Ймовірність безвідмовної роботи ВБЕТ протягом періоду часу T описується експоненціальним законом надійності:

$$R(T) = e^{-\lambda T} \quad (15)$$

де λ – інтенсивність відмов, що залежить від технічного стану батареї та умов експлуатації.

Відповідно, імовірність відмови батареї визначається як:

$$q(T) = 1 - R(T) \quad (16)$$

Для системи, що містить N ВБЕТ із резервуванням N_{res} , надійність функціонування визначено як імовірність того, що кількість відмов не перевищує допустимий рівень:

$$Rel(T) = P(X \leq N_{res}), \quad X \sim Bin(N, q) \quad (17)$$

де N – кількість ВБЕТ у системі.

Це дозволило врахувати стохастичний характер відмов і визначити необхідну кількість резервних батарей для забезпечення заданого рівня надійності системи.

Економічні наслідки відмов оцінюються через математичне сподівання втрат:

$$E[L_{fail}] = C_{fail} (1 - Rel(T)) \quad (18)$$

де C_{fail} – вартість відмови, що включає втрати від недопостачання енергії, штрафи та

додаткові витрати на відновлення.

Запропонована модель інтегрується з моделями деградації (IDI , RUL), що дозволяє пов'язати інтенсивність відмов λ із технічним станом батарей та прогнозувати зміну надійності у часі.

Для адаптивного коригування режимів роботи ВБЕТ сформовано систему ключових показників ефективності та розроблено адаптивну порогово-індикаторну модель управління, яка реалізує тригерну логіку прийняття рішень залежно від технічного стану батарей, економічної доцільності та умов функціонування енергосистеми. Система показників включає технічні (SOH , IDI , RUL , показники використання та надійності), економічні ($LCOS$, ROI) та екологічні індикатори. Для кожного з них встановлено порогові значення, що визначають допустимі межі функціонування ВБЕТ.

Показано, що у момент часу t стан ВБЕТ характеризується вектором ключових показників ефективності:

$$K(t) = \{K_T(t), K_E(t), K_{Ec}(t)\}, \quad (19)$$

де відповідні множини показників відображають технічні ($K_T(t)$), економічні ($K_E(t)$) та екологічні ($K_{Ec}(t)$) аспекти функціонування системи.

Технічні показники включають $SOH(t)$, $IDI(t)$, $RUL(t)$, показники надійності $R(t)$ та використання $U(t)$; економічні – $LCOS(t)$ і $ROI(t)$; екологічні – показники зниження викидів $CO_2^{sav}(t)$ та вуглецевого впливу $C_{carbon}(t)$. Для кожного показника $K_m(t)$, де m – індекс показника ефективності ($m = 1, \dots, M$), задаються критичні значення K_m^{cr} , що визначають допустимі режими експлуатації.

Управлінське рішення $A(t)$ належить до множини допустимих управлінських дій $A(t) \in \{A_1(t), A_2(t), A_3(t), A_4(t)\}$ та визначається на основі порогового аналізу показників і передбачає чотири стратегії: продовження поточного режиму експлуатації ($A_1(t)$), корекцію режиму ($A_2(t)$), перерозподіл між сценаріями використання ($A_3(t)$) або заміну батареї ($A_4(t)$).

$$A(t) = F(K(t), K_{cr}), \quad (20)$$

Узагальнене правило вибору керуючої дії має вигляд:

$$A(t) = \begin{cases} A_1(t), & K_m(t) \in K_{m_{allow}}, \\ A_2(t), & R(t) < R_{min} \vee LCOS(t) > LCOS_{cr}, \\ A_3(t), & U(t) < U_{min} \wedge SOH(t) \geq SOH_{cr}, \\ A_4(t), & SOH(t) < SOH_{cr} \vee IDI(t) > IDI_{cr} \vee RUL(t) < RUL_{cr} \end{cases} \quad (21)$$

Показано, що розроблена модель інтегрується з прогнозними, деградаційними, кластерними та оптимізаційними моделями, формуючи єдину систему управління. Реалізація системи базується на ітеративному контурі PDCA та включає моніторинг показників, індикаторно-пороговий аналіз, кластеризацію, оптимізацію режимів і корекцію управлінських рішень.

Сформовано індикаторно-пороговий механізм адаптивного управління, що забезпечує порівняння значень ключових показників із заданими порогоми та автоматичну корекцію режимів експлуатації, включаючи зміну сценаріїв використання, перерозподіл ресурсів і планування заміни. Запропонований підхід

реалізує механізм переходу між режимами експлуатації ВБЕТ залежно від їх фактичного стану та зовнішніх умов, забезпечує адаптивне управління інтеграцією ВБЕТ у часі та зменшує невизначеність функціонування енергосистеми.

В третьому розділі представлено опис розрахункового програмно-інформаційного комплексу (ПК) «Система управління ВБЕТ», що працює із завантаженням стандартизованого вхідного файлу. Архітектура комплексу побудована за модульним принципом і передбачає імпорт даних із Excel-файлу, їх перевірку та перетворення, подальшу обробку в аналітичному блоці, керування розрахунками та візуалізацію результатів. На відміну від систем із постійною базою даних, комплекс функціонує в режимі роботи із зовнішніми структурованими даними, що забезпечує гнучкість його застосування для різних наборів батарей і сценаріїв аналізу.

Визначено склад вхідних даних і сформовано процедури їх підготовки, що включають технічні характеристики батарей, профілі навантаження, параметри генерації ВДЕ, ринкові цінові індикатори та екологічні обмеження. Забезпечено уніфікацію експериментальних, статистичних і прогнозних даних для їх використання у математичних моделях.

Загальна структура програмно-інформаційного комплексу включає модулі введення та підготовки даних, аналітичної обробки, керування розрахунками, адаптивного управління та візуалізації результатів. Взаємодія між модулями забезпечує послідовне виконання розрахункових процедур і підтримку сценарного аналізу для різних режимів використання ВБЕТ. Структуру ПК наведено на рисунку 3.



Рисунок 3 – Структура ПК «Система управління ВБЕТ»

У комплексі поєднано модулі оцінювання деградації та прогнозування ресурсу, оптимізаційного планування, сценарного аналізу, індикаторно-порогового

управління та візуалізації результатів, що забезпечує реалізацію стратегічних і оперативних задач управління ВБЕТ.

Розроблене програмно-інформаційне забезпечення створює основу для інтеграції математичних моделей у процес прийняття управлінських рішень і підвищення ефективності використання ВБЕТ в умовах невизначеності.

В **четвертому розділі** наведено результати числових досліджень із використанням розроблених параметрів та математичних моделей управління інтеграцією вторинних батарей електротранспорту.

На основі інтегрального показника деградації виконано розрахунки зміни технічного стану батарей у часі залежно від режимів експлуатації (рис. 4).

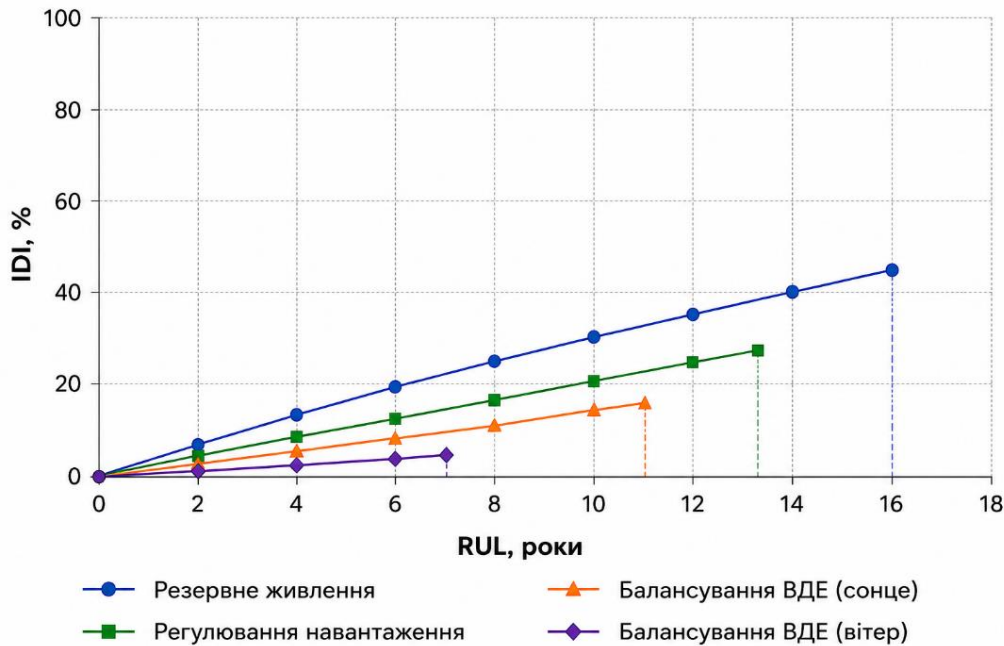


Рисунок 4 – Динаміка зміни інтегрального показника деградації ВБЕТ для різних сценаріїв використання

Встановлено, що швидкість деградації визначається поєднанням глибини розряду, кількості циклів та умов експлуатації. Найвищі темпи деградації спостерігаються для сценаріїв із високою циклічністю та значними коливаннями навантаження, тоді як у режимах резервного живлення домінує вплив календарного старіння. Отримані результати дозволили визначити прогностичний залишковий ресурс батарей для різних сценаріїв використання та оцінити вплив режимів роботи на доцільність подальшої експлуатації ВБЕТ.

Розраховано показник приведеної вартості накопичення енергії (LCOS) для різних сценаріїв (Рис. 5) та типів батарей (Таблиця 2) Показано, що найнижчі значення LCOS (150–180 дол. США/МВт·год) відповідають сценарію резервного живлення, що обумовлено низькою інтенсивністю циклів та повільною деградацією. Для сценарію регулювання навантаження характерні вищі значення (180–220 дол. США/МВт·год), проте забезпечується підвищення доходності за рахунок використання цінових коливань.

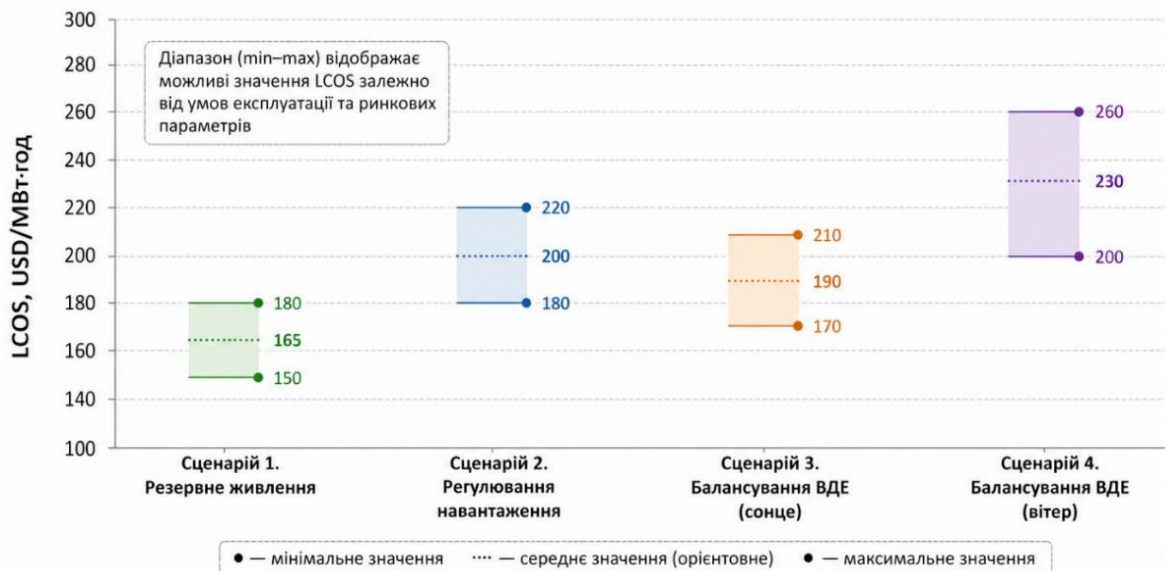


Рисунок 5 – Порівняльна оцінка рівня приведеної вартості зберігання енергії (LCOS) для різних сценаріїв використання вторинних батарей

Таблиця 2 – Порівняльні техніко-економічні параметри нових та вторинних батарей (LFP, NMC)

Показник	Нові LFP	ВБЕТ LFP	Нові NMC	ВБЕТ NMC
CAPEX, \$/кВт·год	155–245	100–190	135–215	100–205
OPEX (без ел.), \$/кВт·год·рік	10–19	16–28	10–19	19–34
Циклічний ресурс, циклів	4000–8000	1000–3000	2000–4000	500–1500
Термін служби, років	10–15	5–10	8–12	4–8
LCOS, \$/кВт·год циклу	0,08–0,12	0,06–0,10	0,10–0,15	0,09–0,14

Аналіз чутливості показав, що найбільший вплив на $LCOS_{ВБЕТ}$ мають капітальні витрати, швидкість деградації та ставка дисконтування.

На рисунку 6 наведено результати кластеризації вторинних батарей електротранспорту за технічними та економічними показниками. На першому рівні (рис. 6а) виконано розподіл батарей між чотирма основними сценаріями використання: резервне живлення, регулювання навантаження, балансування сонячної генерації та балансування вітрової генерації. На другому рівні (рис. 6б) у межах кожного сценарію проведено додаткову кластеризацію батарей за характерними параметрами експлуатації, що дозволило виділити групи з різним технічним станом, залишковим ресурсом та очікуваною ефективністю використання. Цей підхід забезпечує більш обґрунтований вибір режимів експлуатації ВБЕТ та підвищує ефективність їх інтеграції в енергетичні системи.

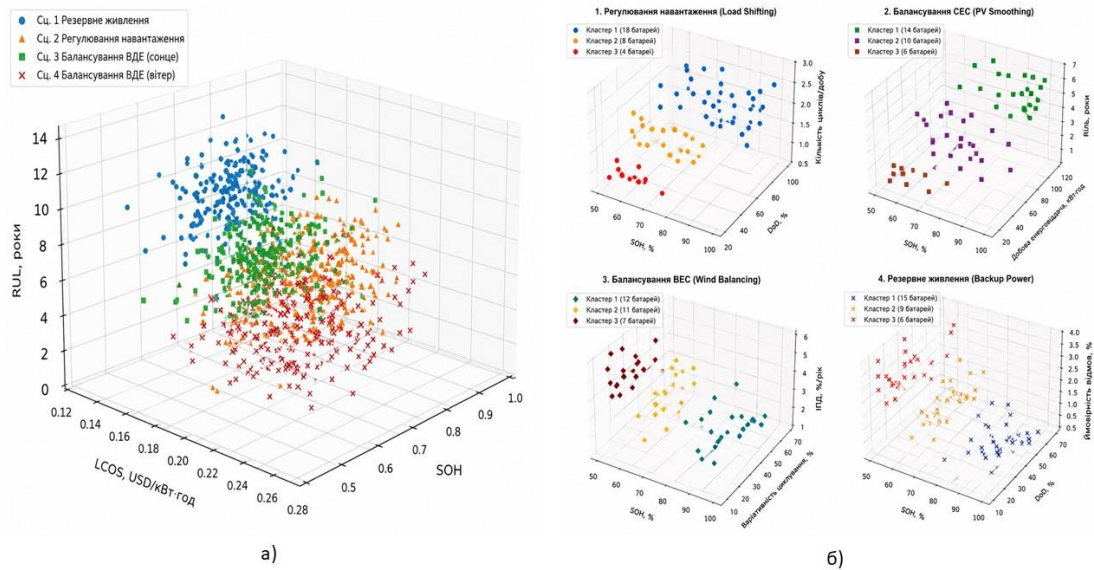


Рисунок 6 – Дворівнева кластеризація ВБЕТ: а – розподіл батарей за сценаріями використання; б – кластеризація в межах сценаріїв.

Розрахунки показали, що оптимізація режимів заряд-розряд забезпечує адаптацію системи до змін цінкових сигналів та умов генерації. Моделювання виконано для системи з 12 вторинних батарей електротранспорту сумарною ємністю близько 360 кВт·год, що відповідає типовому рівню залишкової ємності батарей після завершення їх первинного використання в електромобілях (рисунок 7, таблиця 3).

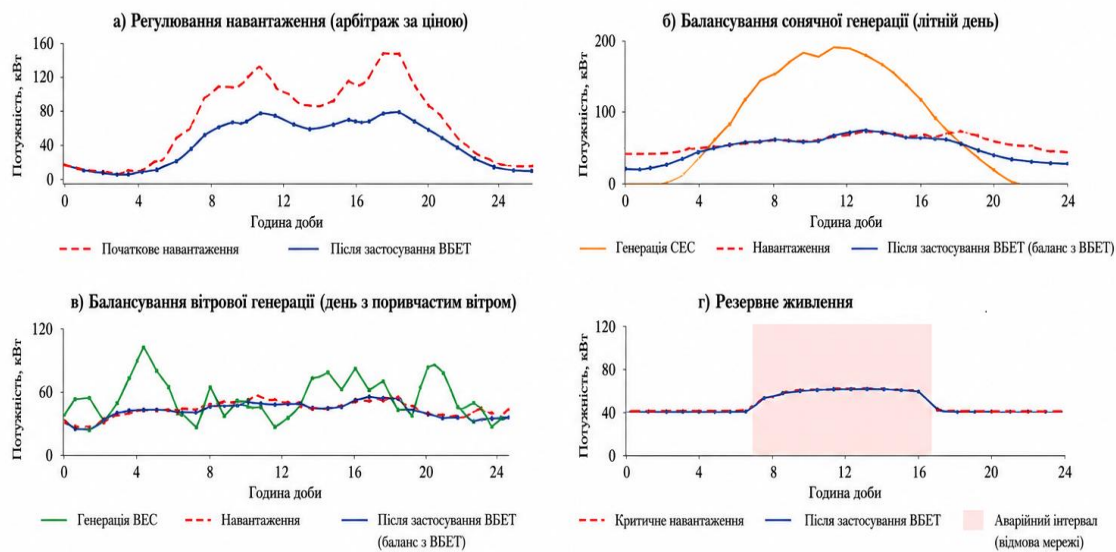


Рисунок 7 – Результати оптимізації режим роботи ВБЕТ за сценаріями

Таблиця 3 – Показники оптимізації режим роботи ВБЕТ за сценаріями

Сценарій	Енергія, кВт·год	Цикли/добу	Використання ємності, %	Ресурс, років
Регулювання навантаження	234	0.83	69.4	6.8
Балансування СЕС	191	0.68	68.0	7.2
Балансування ВЕС	208	0.74	74.0	6.8
Резервне живлення	247	-	-	9.8

У сценарії регулювання навантаження оптимізований режим дозволяє збільшити дохід за рахунок вибору ефективних інтервалів заряджання та розряджання. У сценарії балансування ВДЕ досягнуто зменшення коливань генерації приблизно на 60 %. У режимі резервного живлення забезпечується пріоритет надійності та покриття аварійного навантаження. Окрім того, оптимальне використання ВБЕТ дозволяє зменшити амплітуду відхилень частоти на 20–25 % при зростанні частки ВДЕ. У режимах резервного живлення забезпечується безперервність електропостачання критичних об'єктів протягом 2–6 годин залежно від ємності батарей.

Для забезпечення заданого рівня надійності функціонування ВБЕТ визначено мінімально необхідний резерв батарей на основі біноміальної моделі відмов. У розрахунках прийнято систему з 10 ВБЕТ номінальною потужністю 30 кВт та ємністю 60 кВт·год кожна із початковим рівнем SoH 80%. Результати розрахунку наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Параметри надійності та резервування ВБЕТ для різних сценаріїв використання (для системи з 10 ВБЕТ)

Сценарій	Характер режиму	Ймовірність відмови	Цільова надійність	Очікувана кількість відмов	Необхідний резерв ВБЕТ, од.
Регулювання навантаження	Інтенсивні цикли, часті зміни режиму	0,10	0,95	1,0	3
Балансування ВДЕ, сонячна генерація	Відносно прогнозований добовий профіль	0,05	0,95	0,5	2
Балансування ВДЕ, вітрова генерація	Стохастичний профіль, нерівномірні цикли	0,08	0,96-0,98	0,8	2 (при Rel=0,96), 3 (при Rel≥0,98)
Резервне живлення	Рідкісне використання, високі вимоги до готовності	0,02	0,99	0,2	2

Показано, що оптимізація резерву дозволяє мінімізувати очікувані втрати від відмов при забезпеченні заданого рівня надійності (Рис. 8).

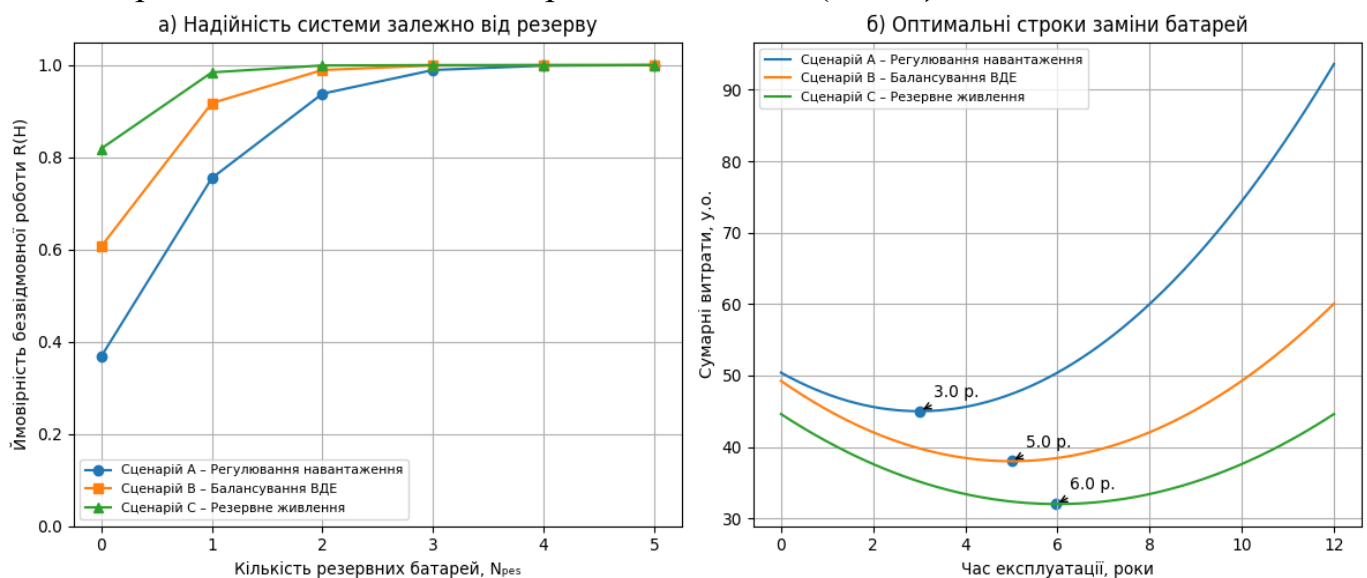


Рисунок 8 – Залежність надійності системи від рівня резервування ВБЕТ

Збільшення резерву ВБЕТ підвищує імовірність безвідмовної роботи системи, причому необхідний обсяг резервування залежить від сценарію використання. Оптимальні строки заміни відповідають мінімуму сумарних витрат і є коротшими для більш інтенсивних режимів.

Показано, що використання системи ключових показників ефективності та їх порогових значень забезпечує адаптивну зміну режимів експлуатації ВБЕТ (Рис.9).

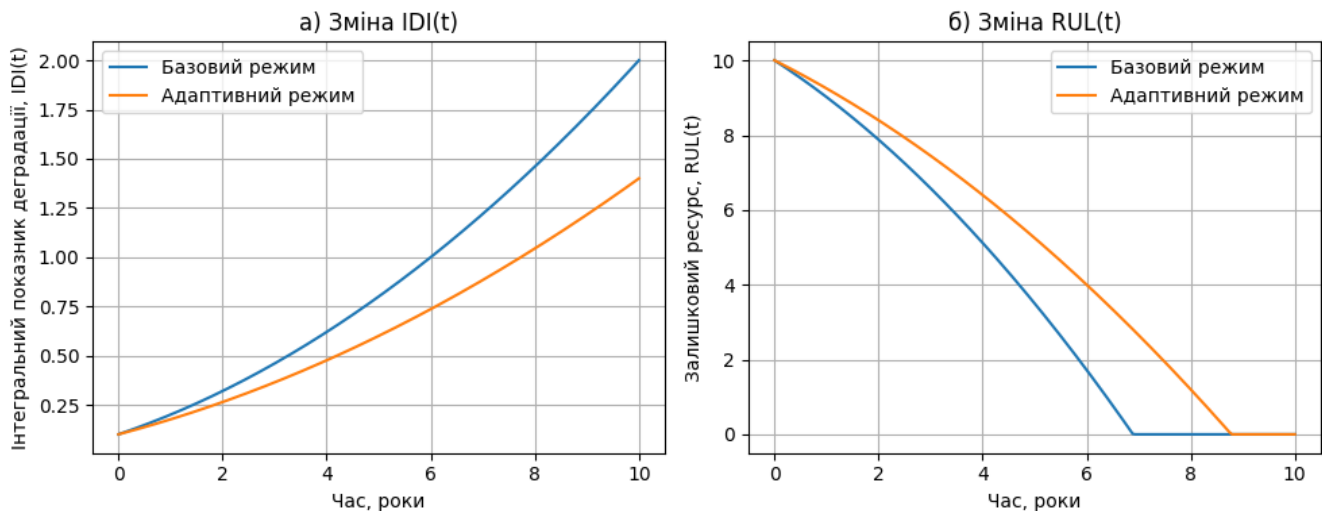


Рисунок 9 – Вплив індикаторно-порогового управління на деградацію та залишковий ресурс ВБЕТ: а – зміна інтегрального показника деградації; б – зміна залишкового ресурсу

Застосування цього підходу у поєднанні з інтегральним показником деградації дозволяє продовжити другий життєвий цикл батарей на 15-20 % у порівнянні з фіксованими режимами.

Отримані результати свідчать, що використання ВБЕТ дозволяє знизити приведену собівартість зберігання енергії у 2-3 рази порівняно з новими батареями, а в сценаріях резервного живлення – зменшити залежність від дизель-генераторів та пов'язані викиди CO₂ на 30–40%, а також підтверджують ефективність розроблених моделей та доцільність їх застосування для обґрунтування режимів використання ВБЕТ та їх інтеграції в енергетичні системи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу розроблення інтегрованих підходів до управління процесами використання вторинних батарей електротранспорту в електроенергетичних системах і отримано такі результати:

1. Встановлено, що в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії та розвитку електротранспорту відпрацьовані батареї електромобілів є перспективним ресурсом для підвищення гнучкості та стійкості енергосистем, однак їх використання супроводжується значною невизначеністю, пов'язаною з технічним станом, обсягами доступного ресурсу та умовами експлуатації. Встановлено закономірності формування доступного ресурсу ВБЕТ у часі та доведено його відкладений характер, що обумовлений лагами вибуття батарей з експлуатації та структурою парку електромобілів.

2. Доведено, що застосування інтегрального показника деградації, який враховує календарне, циклічне та стохастичне старіння, дозволяє підвищити достовірність прогнозування залишкового ресурсу батарей: середня похибка

прогнозу RUL не перевищує 10% для 80% випадків. Це забезпечує формування обґрунтованої інформаційної основи для прийняття управлінських рішень.

3. Показано, що економічна ефективність застосування ВБЕТ визначається режимами експлуатації та динамікою деградації. Встановлено, що значення показника LCOS змінюється в межах 150-180 USD/МВт·год для сценарію резервного живлення та 180-220 USD/МВт·год для сценарію регулювання навантаження. Аналіз чутливості показав, що найбільший вплив на економічну ефективність мають капітальні витрати, швидкість деградації та ставка дисконтування.

4. Встановлено, що застосування дворівневого підходу до розподілу ВБЕТ дозволяє узгодити технічний стан батарей із вимогами режимів їх використання та підвищити ефективність їх експлуатації: зменшити частку недовикористаної ємності на 15-20 % та підвищити ефективність використання ресурсів на 10-20 %.

5. Показано, що оптимізація режимів експлуатації ВБЕТ забезпечує адаптацію до змін цінових сигналів та режимів генерації. Зокрема, у сценарії балансування ВДЕ досягнуто зменшення коливань генерації відносно режиму без використання ВБЕТ приблизно на 55%, а у сценарії регулювання навантаження – підвищення економічної ефективності за рахунок оптимізації графіка заряджання та розряджання.

6. Доведено, що врахування стохастичного характеру відмов батарей дозволяє визначати необхідний обсяг резерву та оптимальні строки заміни, що забезпечує досягнення заданого рівня надійності (0,95-0,99) при мінімізації очікуваних втрат.

7. Показано, що використання індикаторно-порогового підходу до управління режимами експлуатації ВБЕТ забезпечує адаптивну зміну режимів їх роботи залежно від технічного стану та умов функціонування енергосистеми, що дозволяє знизити швидкість деградації та продовжити другий життєвий цикл батарей на 15-20 % порівняно з фіксованими режимами.

8. Сформовано рекомендації щодо впровадження ВБЕТ в електроенергетичні системи та визначено напрями вдосконалення нормативно-правового забезпечення їх використання.

9. Розроблені моделі та методи реалізовано у вигляді програмно-інформаційного комплексу, що забезпечує інтеграцію процесів оцінювання технічного стану, прогнозування ресурсу, економічного аналізу та оптимізації режимів роботи ВБЕТ і може бути використаний для підтримки прийняття рішень у задачах планування функціонування та розвитку енергетичних систем.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Zaporozhets, A., Kostenko, G. (2025). Second-Life Electric Vehicle Batteries in Ukraine's Energy Sector: SWOT Analysis and Market Evaluation. *Science and Innovation*, 21(6), 19-37. <https://doi.org/10.15407/scine21.06.01> (фахове видання категорії «А», включене до бази даних Scopus).

2. Kostenko, G.; Zaporozhets, A. Transition from electric vehicles to energy storage: Review on targeted lithium-ion battery diagnostics. *Energies* 2024, 17, 5132. <https://doi.org/10.3390/en17205132>. (Scopus, Q1)

3. Kostenko, G.; Zaporozhets, A. Trigger-Based PDCA Framework for Sustainable Grid Integration of Second-Life EV Batteries. *World Electric Vehicle Journal* 2025, 16, 584. <https://doi.org/10.3390/wevj16100584> (**Scopus, Q1**)
4. Kostenko, G.; Zaporozhets, A. World experience of legislative regulation for lithium-ion electric vehicle batteries considering their second-life application in power sector. *System Research in Energy*, 2024, 2, 97–114. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.097>. (**фахове видання категорії «Б»**)
5. Kostenko, G. Accounting calendar and cyclic ageing factors in diagnostic and prognostic models of second-life EV batteries application in energy storage systems. *System Research in Energy*, 2024, 3, 21–34. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.021>. (**фахове видання категорії «Б»**)
6. Kostenko, G. Cluster-based deployment of second-life EV batteries for reliable and sustainable backup power solution in power systems. *System Research in Energy*, 2025, 1, 40–60. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.040>. (**фахове видання категорії «Б»**)
7. Kostenko, G., & Zaporozhets, A. (2023). Enhancing of the Power System Resilience Through the Application of Micro Power Systems (microgrid) with Renewable Distributed Generation. *System Research in Energy*, (3 (74), 25-38. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.025> (**фахове видання категорії «Б»**)
8. Kostenko, G. Overview of European trends in electric vehicle implementation and the influence on the power system. *System Research in Energy*. 2022, 1, 62–71. <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.01.062>. (**фахове видання категорії «Б»**)
9. Kostenko, G.P. Situation analysis of electric transport development prospects and its integration into Ukrainian power system. *Power Eng. Econ. Tech. Ecol.* 2023, 1, 71. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2023.276185>. (**фахове видання категорії «Б»**)
10. Denysov, V., Kostenko, G., Babak, V., Shulzhenko, S., & Zaporozhets, A. (2023). Accounting the Forecasting Stochasticity at the Power System Modes Optimization. In A. Zaporozhets (Ed.), *Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control*, 481 (pp. 43–55). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_3 (наукове видання інших держав, які входять до ОЕСР та/або Європейського Союзу, включене до бази даних **Scopus**).
11. Kostenko, G.; Zaporozhets, A.; Babak, V.; Uruskyi, O.; Titko, V.; Denisov, V. Second-Life EV Batteries Application in Energy Storage Systems for Sustainable and Resilient Power Sector. In *Systems, Decision and Control in Energy VII*; Babak, V., Zaporozhets, A., Eds.; *Studies in Systems, Decision and Control*; Springer: Cham, Switzerland, 2025; Volume 595. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_1. (наукове видання інших держав, які входять до ОЕСР та/або Європейського Союзу, включене до бази даних **Scopus**).
12. Kostenko, G., Bosak, A., Sapsai, Y., & Zaporozhets, A. (2026). Analysis of Open Li-Ion Battery Testing Datasets for Degradation Modeling and Lifecycle Management. *System Research in Energy*, (1 (85), 65-84. <https://doi.org/10.15407/srenergy2026.01.065> (**фахове видання категорії «Б»**)
13. Zaporozhets, A.; Kostenko, G.; Zgurovets, O.; Deriy, V. Analysis of Global Trends in the Development of Energy Storage Systems and Prospects for Their Implementation in Ukraine. In *Power Systems Research and Operation*; Kyrylenko, O.,

Denysiuk, S., Strzelecki, R., Blinov, I., Zaitsev, I., Zaporozhets, A., Eds.; *Studies in Systems, Decision and Control*; Springer: Cham, Switzerland, 2024; Vol. 512. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_4. (наукове видання інших держав, які входять до ОЕСР та/або Європейського Союзу, включене до бази даних **Scopus**).

14. Kostenko, G., Babak, V., Zaporozhets, A. (2026). Second-Life EV Batteries Application for Energy Storage: Global Trends, Policies and Technologies. In: Zagorodny, A., Bogdanov, V., Zaporozhets, A., Ermolieva, T. (eds) *Nexus of Sustainability. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 627. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-03616-2_12 (наукове видання інших держав, які входять до ОЕСР та/або Європейського Союзу, включене до бази даних **Scopus**).

15. Kostenko G. Second-Life EV Batteries as a Sustainable Alternative to Diesel Generators for Backup Power in Critical Infrastructure. Book of abstracts, X International Scientific-Technical Conference “*Theory and Practice of Rational Use of Traditional and Alternative Fuels and Lubricants*”, Kyiv, 1 July 2025. https://aemk.kpi.ua/wp-content/uploads/2025/07/Book-of-Abstracts_Chemmotology_2025-5.pdf

16. Костенко Г. Вторинні батареї електротранспорту як об'єкт моделювання в системі формування політики циркулярної енергетики. Матеріали XLIII НТК молодих вчених та спеціалістів ІПМЕ НАН України, 14 травня 2025, с. 95–98. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/05/Materialy-KMV-2025.pdf>

17. Костенко Г., Запорожець А. Управління Інтеграцією Накопичувачів на Базі Вторинних Батарей Електротранспорту в Комплексних Системах з ВДЕ: Підхід на Основі Циклу Демінга (PDCA). Матеріали XXVI МНПК «*Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI ст.*», 21–23 травня 2025, с. 146–147. https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Tezy_2025.pdf

18. Костенко Г. Вторинні батареї електротранспорту як активи із динамічними ризиками: підхід до моделювання і управління у системах прийняття рішень. Матеріали конф. «*Кібербезпека енергетики*», ІПМЕ НАН України, 28 травня 2025, с. 16–18. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/05/Матеріали-КБЕ-2025-1.pdf>

19. Kostenko, G., & Zaporozhets, A. Digital Twin for Second-Life EV Battery Operation in Energy Systems . Матеріали конф. *Штучний інтелект і безпека*, ІПМЕ НАН України, 4 грудня 2025. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/12/Збірник-матеріалів-ШІБ-2025.pdf>

20. Костенко Г. Циркулярна модель управління батареями електротранспорту в умовах підвищення енергетичної резильєнтності. Матеріали науково-техн. конф. *Резильєнтність динамічних систем*, ІПМЕ НАН України, 12 червня 2025 <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/06/Матеріали-конференції-РДС-2025.pdf>

21. Kostenko G. System of Key Performance Indicators for Integrated Evaluation of Second-Life EV Battery Deployment in Energy Systems. Матеріали конф. “*Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS 2025*”, НТУУ КПІ ім. Сікорського, 18-20 листопада 2025 р. <http://pems.kpi.ua/proc/issue/view/20364>

22. Костенко Г., Запорожець А. Оцінка ефективності використання вторинних батарей електромобілів для забезпечення резервного живлення в умовах надзвичайних ситуацій. Матеріали конф. *Резильєнтність динамічних систем*, ІПМЕ

НАН України, 27 грудня 2024 р. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2024/12/Матеріали-конференції-РДС-2024.pdf>

23. Костенко, Г., & Запорожець, А. (2024). Інтегральний показник деградації вторинних батарей електромобілів в системах зберігання енергії: урахування календарного та циклічного старіння. *Системні дослідження в енергетиці*, (2а (78), 31-33. вилучено із <https://systemre.org/index.php/journal/article/view/848>

24. Костенко Г. Управління життєвим циклом батарей електротранспорту з урахуванням їх використання в енергетиці. Матеріали конф. "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS 2023", НТУУ КПІ ім. Сікорського, 22-24 листопада 2023 р. <http://pems.kpi.ua/proc/issue/view/17738>

25. Kostenko G. Uncertainty management in complex circular economy systems: the case study of EV battery reuse. Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конф. «Сучасна кібернетика. Глушковські читання», Інститут кібернетики НАН України ім. В.М. Глушкова, Київ, 31 грудня 2025 р.

26. Згуровець О. В., & Костенко Г. П. (2007). Ефективні методи управління споживанням електричної енергії. *Проблеми загальної енергетики*, (2 (16), 75-80. <https://systemre.org/index.php/journal/article/view/324> **(фахове видання категорії «Б»)**

27. Дрьомін В.П., Абрамов В.А., & Могилюк А.П. (2003). Управління накопиченням палива при оптимізації річного підготовчого циклу електроенергетичного комплексу. *Проблеми загальної енергетики*, (2 (9), 22-28. <https://systemre.org/index.php/journal/article/view/216> **(фахове видання категорії «Б»)**

28. Дрьомін В.П., Абрамов В.А., & Могилюк А.П. (2002). Регулювання режимів електроспоживання регіонів в дослідженнях та на практиці. *Проблеми загальної енергетики*, (1(6), 24-29. <https://systemre.org/index.php/journal/article/view/164>. **(фахове видання категорії «Б»)**

АНОТАЦІЯ

Костенко Г. П. Моделі та методи управління інтеграцією вторинних батарей електротранспорту в електроенергетичні системи – На правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси – Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, 2026.

Розроблено моделі та методи управління інтеграцією вторинних батарей електротранспорту (ВБЕТ) в електроенергетичні системи з урахуванням процесів деградації, економічної доцільності та екологічної ефективності. Запропоновано інтегровану систему моделей, що поєднує взаємопов'язані моделі оцінювання деградації, прогнозування залишкового ресурсу, економічної оцінки, просторового розміщення, оптимізації режимів роботи та планування заміни та забезпечує узгоджене врахування технічних, економічних та експлуатаційних факторів у процесі інтеграції ВБЕТ. Запроваджено інтегральний показник деградації, що дозволяє оцінювати технічний стан батарей та формувати адаптивні рішення. Розроблено ітеративний механізм підтримки прийняття рішень зі зворотним зв'язком між етапами

планування, реалізації, моніторингу та корекції режимів функціонування ВБЕТ в електроенергетичних системах. Сформульовано підхід до сценарного моделювання для оцінювання ефективності використання ВБЕТ у задачах забезпечення резервного живлення, балансування генерації відновлюваних джерел енергії та регулювання навантаження. Розроблено програмно-інформаційний засіб реалізації запропонованої системи взаємопов'язаних моделей та параметрів, що дозволяє визначати технічні, економічні та екологічні показники ефективності інтеграції ВБЕТ на системному рівні. Отримані результати дозволяють приймати обґрунтовані рішення щодо інтеграції вторинних батарей електротранспорту в електроенергетичні системи та підвищенню ефективності їх використання.

Ключові слова: вторинні батареї електротранспорту, установки зберігання енергії, системи з відновлюваними джерелами енергії, деградація батарей, інтегральний показник, прогнозування ресурсу, управління, надійність, стійкість, електроенергетична система.

ABSTRACT

Kostenko G.P. Models and methods for managing the integration of second-life electric vehicle batteries into electric power systems – Manuscript. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences on specialty 05.14.01 – Power Systems and Complexes – General Energy Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

Models and methods for managing the integration of second-life electric vehicle batteries (SLBs) into electric power systems are developed, taking into account degradation processes, economic feasibility, and environmental efficiency. An integrated system of interconnected models is proposed, combining interconnected models of degradation assessment, remaining useful life forecasting, economic evaluation, spatial deployment, operational optimization, and replacement planning. The framework ensures coordinated consideration of technical, economic, and operational factors in the process of SLB integration. An Integral Degradation Index is introduced, enabling the assessment of battery technical condition and the formulation of adaptive decision-making strategies. An iterative decision-support mechanism with feedback between planning, implementation, monitoring, and correction stages has been developed. A scenario-based modeling approach is formulated for evaluating the effectiveness of SLB deployment in backup power supply, renewable energy balancing, and load regulation tasks. A software and information tool for implementing the proposed system of interconnected models and parameters has been developed, enabling the evaluation of technical, economic, and environmental performance indicators of SLB integration at the system level. The obtained results enable informed decision-making regarding the integration of second-life electric vehicle batteries into power systems and contribute to improving the efficiency of their utilization.

Keywords: second-life electric vehicle batteries, energy storage systems, renewable energy systems, battery degradation, integral index, resource forecasting, management, reliability, resilience, electric power systems.