

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Костенко Ганни Петрівни

«Моделі та методи управління інтеграцією вторинних батарей електротранспорту в електроенергетичні системи», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 –
Енергетичні системи та комплекси

Актуальність теми дисертації

Формування в Україні ринку електричної енергії, його інтеграція з європейським енергетичним простором (ENTSO-E), а також зростання частки відновлюваних джерел енергії ставлять нові вимоги до гнучкості, надійності та економічної ефективності функціонування енергосистеми. Одним із ключових інструментів підвищення гнучкості є установки зберігання енергії (УЗЕ), зокрема на базі літій-іонних акумуляторів. Однак вартість нових батарейних систем залишається високою, що стримує їх широке впровадження.

Паралельно з цим відбувається стрімка електрифікація транспорту, що призводить до накопичення великої кількості відпрацьованих тягових батарей електромобілів. Після завершення транспортного циклу такі батареї зберігають 60–80 % початкової ємності та можуть бути використані повторно в стаціонарних УЗЕ – для резервного живлення, балансування ВДЕ, регулювання навантаження. Це створює передумови для формування нового сегменту ринку – вторинних батарей електротранспорту (ВБЕТ).

Однак ефективна інтеграція ВБЕТ в енергосистему потребує вирішення не лише технічних, але й економічних та нормативно-правових проблем. До них належать: відсутність стандартизованих методів оцінювання технічного стану та залишкового ресурсу; невизначеність економічної доцільності використання ВБЕТ у різних сценаріях; недостатня розвиненість нормативно-правової бази для участі ВБЕТ у ринках електроенергії; відсутність економічних стимулів для повторного використання батарей.

Дисертаційна робота Костенко Г.П., яка пропонує комплексну систему моделей управління інтеграцією ВБЕТ, включаючи економічну оцінку (адаптований LCOS) та рекомендації щодо нормативно-правового забезпечення, є актуальною і має важливе значення для розвитку енергетичного ринку України, підвищення його гнучкості та реалізації принципів циркулярної економіки.



Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано в межах планів наукових досліджень Інституту загальної енергетики НАН України за низкою держбюджетних тем, зокрема: «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» (ДР №0122U001231), «Розширення можливостей застосування вітрових і сонячних електростанцій у структурі об'єднаної енергосистеми України» (ДР №0123U100243), а також «Удосконалення ієрархічної системи математичних та програмно-інформаційних засобів для дослідження напрямів розвитку об'єднаних енергосистем в умовах переходу до низьковуглецевої економіки» (ДР №0122U000236). Автор брала участь у цих роботах як виконавець, що підтверджує зв'язок дисертаційного дослідження з пріоритетними напрямами державної науково-технічної політики.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розроблення нових і вдосконалення існуючих методів, моделей та програмних засобів для управління інтеграцією ВБЕТ в ЕЕС в умовах невизначеності. Для досягнення мети поставлено вісім завдань, серед яких особливе значення для економічного та нормативно-правового аспектів мають: дослідження світових тенденцій та нормативно-правових бар'єрів; удосконалення методу оцінки деградації (економічний вплив); проведення моделювання техніко-економічної ефективності; формування рекомендацій щодо впровадження та вдосконалення нормативно-правової бази. Зазначені завдання вирішені в дисертації.

Структура та зміст дисертації

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення роботи.

У першому розділі виконано аналіз глобальних тенденцій розвитку енергетики, світового досвіду використання ВБЕТ (табл. 1.3), типових сценаріїв та бізнес-моделей (табл. 1.5, 1.6). Особливу увагу приділено нормативно-правовому забезпеченню: проаналізовано європейську, азійську та американську моделі регулювання, ключові акти ЄС (Директива 2006/66/EC, Регламент 2023/1542, Battery Passport), а також стан нормативно-

правової бази в Україні (Закони №2046-IX, №2320-IX, стандарти ДСТУ). Виконано SWOT-аналіз інтеграції ВБЕТ в Україні (табл. 1.9). На основі цього сформульовано науково-прикладну задачу дослідження та запропоновано структуру системи управління (табл. 1.13).

У другому розділі розроблено методологію управління інтеграцією ВБЕТ. Запропоновано концептуальну схему системи (рис. 1). Розроблено модель прогнозування доступності ресурсу ВБЕТ (формула 1.1, рис. 2). Введено інтегральний показник деградації (ПІД) (формули 1.2–1.5) та модель прогнозування RUL (формула 6). Адаптовано економічну модель LCOS для ВБЕТ (формули 1.7–1.8), яка, на відміну від класичного підходу, враховує деградацію, зміну обсягів відпущеної енергії в часі, витрати на діагностику, сортування, технічне обслуговування та заміну батарей, а також резервування. Запропоновано дворівневий метод кластеризації (формули 1.9–1.13, рис. 4), який враховує не лише технічні, але й економічні показники (LCOS, ROI, CAPEX/OPEX). Побудовано оптимізаційну модель (формула 1.14, табл. 1), модель надійності (формули 1.15–1.18) та індикаторно-порогову модель адаптивного управління (формули 1.19–1.21).

У третьому розділі наведено опис програмно-інформаційного комплексу «Система управління ВБЕТ», його архітектуру (рис. 3), модульну структуру (табл. 2), формалізацію вхідних даних (рис. 3.1) та використання відкритих наборів даних (табл. 3.1) для параметризації та верифікації моделей.

У четвертому розділі представлено результати розрахункових досліджень. Виконано економічну оцінку LCOS для чотирьох сценаріїв (рис. 5, табл. 2). Показано, що найнижчі значення LCOS (150–180 USD/МВт·год) характерні для сценарію резервного живлення, а для регулювання навантаження вони становлять 180–220 USD/МВт·год. Наведено порівняльну таблицю техніко-економічних параметрів нових та вторинних батарей (табл. 2). Проведено аналіз чутливості LCOS до основних параметрів. Виконано кластеризацію 120 батарей за техніко-економічними характеристиками (рис. 6). Здійснено оптимізацію режимів роботи (рис. 7, табл. 4). Виконано оцінку надійності та резервування (табл. 5, рис. 8). Проведено екологічну оцінку (порівняння з дизель-генераторами: викиди CO₂ 0,02 проти 0,70 кг/кВт·год, енергоефективність 88–90 % проти 40–45 %). Сформовано рекомендації для державних органів, операторів енергосистем та наукових установ (п. 4.8), зокрема щодо гармонізації законодавства з EU Battery Regulation 2023/1542, розробки стандартів діагностики, впровадження цифрових паспортів батарей, створення економічних стимулів (податкові пільги, «зелений» тариф).

Наукова новизна одержаних результатів

Найбільш вагомими науковими результатами дисертаційної роботи з точки зору економічного та нормативно-правового спрямування є:

1. Вперше запропоновано систему взаємопов'язаних моделей управління інтеграцією ВБЕТ, яка об'єднує в єдиному контурі оцінювання деградації, прогнозування ресурсу, економічну оцінку, кластеризацію, оптимізацію режимів, оцінку надійності та адаптивне управління. Це забезпечує узгоджене врахування технічних, економічних та експлуатаційних факторів в умовах невизначеності.

2. Адаптовано економічну модель LCOS для ВБЕТ (формули 7–8), яка, на відміну від класичного підходу, враховує додаткові витрати на діагностику, сортування, заміну модулів та резервування, а також зміну обсягів відпущеної енергії в часі внаслідок деградації. Це дозволяє коректно оцінювати економічну доцільність різних сценаріїв використання ВБЕТ.

3. Розроблено дворівневий метод кластеризації ВБЕТ, який, поряд з технічними параметрами (SOH, IDI, RUL), враховує економічні показники (LCOS, ROI, CAPEX/OPEX), що забезпечує оптимальний розподіл батарей між сценаріями з максимальною економічною ефективністю.

4. Сформовано адресні рекомендації для державних органів (Міненерго, НКРЕКП) щодо гармонізації законодавства з EU Battery Regulation 2023/1542, розробки стандартів діагностики та класифікації ВБЕТ, впровадження цифрових паспортів батарей (battery passport), створення економічних стимулів (податкові пільги, співфінансування центрів тестування) для проєктів із використанням ВБЕТ.

Практичне значення одержаних результатів

Результати роботи мають безпосереднє практичне значення для розвитку ринку систем накопичення енергії в Україні. Розроблений програмно-інформаційний комплекс «Система управління ВБЕТ» впроваджено в діяльності ТОВ «Укрекоконсалт» та ТОВ «ПаверЮ» (акти впровадження наведено в додатках). Комплекс дозволяє:

- оцінювати економічну ефективність використання ВБЕТ у різних сценаріях (резервне живлення, балансування СЕС/ВЕС, регулювання навантаження) з урахуванням деградації, витрат на діагностику та заміну;
- визначати оптимальний рівень резервування батарей для досягнення заданої надійності (0,95–0,99) з мінімізацією очікуваних втрат;

– порівнювати доцільність участі ВБЕТ у різних сегментах енергоринку (балансуючий ринок, ринок допоміжних послуг, локальні мікромережі).

За результатами моделювання встановлено, що використання ВБЕТ дозволяє:

– знизити LCOS на 30–40 % порівняно з новими батареями (150–220 /МВт·годпроти350–450/МВт·годпроти350–450/МВт·год);

– скоротити витрати на резервне живлення у 4–5 разів порівняно з дизель-генераторами;

– зменшити питомі викиди CO₂ більш ніж на 90 % (0,02 кг/кВт·год проти 0,70 кг/кВт·год);

– подовжити другий життєвий цикл батарей на 15–20 % за рахунок адаптивного управління.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і результатів

Наукові положення та висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими. Достовірність результатів забезпечується:

– коректним застосуванням методів економіко-математичного моделювання, оптимізації, статистичного аналізу та сценарного моделювання;

– використанням для параметризації та верифікації моделей відкритих експериментальних даних (набори NASA, Sandia, HNEI, Stanford, PulseBat тощо);

– позитивними результатами впровадження програмно-інформаційного комплексу в практичну діяльність;– апробацією результатів на 25 міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, а також публікаціями у виданнях, що індексуються у Scopus (Q1, Q2).

Повнота опублікування результатів дисертації

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 28 наукових працях, з них: 3 статті у міжнародних виданнях, що індексуються у Scopus (Q1, Q2) та Web of Science; 4 розділи у колективних монографіях з індексацією у Scopus; 10 статей у вітчизняних фахових наукових виданнях категорії Б; 11 тез доповідей на міжнародних конференціях. Кількість та якість публікацій є достатніми для висвітлення основних наукових результатів дисертації.

Структура та зміст дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (159 найменувань) та чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 196

сторінок, у тому числі 112 сторінок основного тексту, 24 рисунки, 37 таблиці. Структура роботи є логічною і відповідає поставленим завданням. Автореферат повністю відображає основний зміст дисертації.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У підрозділі 1.5, присвяченому нормативно-правовому забезпеченню, наведено загальний аналіз світових моделей регулювання та ключових європейських актів (Директива 2006/66/ЕС, Регламент 2023/1542). Однак у роботі відсутній детальний аналіз конкретних статей діючих законів України – «Про ринок електричної енергії», «Про альтернативні джерела енергії», «Про розвиток установок зберігання енергії» – щодо участі ВБЕТ у балансуєчому ринку та ринку допоміжних послуг. Не з'ясовано, чи існує пряма заборона або обмеження для використання саме вторинних (second-life) батарей в окремих сегментах, чи діють ті самі вимоги, що й для нових систем.

2. У таблиці 4.14 (автореферат) зазначено доцільність використання ВБЕТ у різних сегментах ринку (балансуючий ринок – «висока», ринок «на добу наперед» – «середня», локальні мікромережі – «дуже висока»). Однак не наведено кількісних обґрунтувань з урахуванням чинних в Україні вимог до мінімальної потужності, часу реакції та тривалості участі. Було б доцільно детальніше обґрунтувати критерії віднесення сценаріїв до категорій "висока", "середня" та "дуже висока".

3. Запропонована система взаємопов'язаних моделей орієнтована переважно на рівень локальних енергетичних систем. Водночас окремий інтерес становить аналіз можливостей масштабування підходу для більших енергетичних об'єктів або регіональних енергосистем.

4. У роботі основну увагу приділено технічним та економічним аспектам інтеграції ВБЕТ. Водночас додаткового дослідження потребує оцінювання впливу запропонованих рішень на показники надійності та стійкості електроенергетичних систем у довгостроковій перспективі.

5. У таблиці 4.2 (автореферат, с. 15) наведено прогнозований залишковий ресурс ВБЕТ для фіксованого та адаптивного режимів. Показано, що застосування адаптивного управління дозволяє збільшити ресурс на 2–3 роки. економічні показники їх використання. Було б доцільно додатково проаналізувати вплив збільшення залишкового ресурсу ВБЕТ на економічні показники їх використання. Така оцінка могла б посилити аргументацію економічної доцільності впровадження адаптивного управління.

6. У тексті автореферату наявні окремі редакційні недоліки: на с. 12 у формулі (3) та (4) не розшифровано позначення $f(\text{SOC})$ та $g(N_{\text{cycle}}, \text{DOD}, C_{\text{rate}})$; на с. 18 у формулі (7) позначення $C_{\text{зарядж}}(t)$ наведено без пояснення, чи це середньозважена вартість за добу, чи погодинна; у п. 4.8.4 (с. 26) фраза «для державних органів (Міненерго, НКРЕКП)» потребує уточнення – НКРЕКП не є державним органом у класичному розумінні, а є регулятором.

Загальний висновок.

Дисертаційна робота Костенко Ганни Петрівни «Моделі та методи управління інтеграцією вторинних батарей електротранспорту в електроенергетичні системи» є завершеним науковим дослідженням, яке містить нові науково обґрунтовані результати в галузі економічного оцінювання та нормативно-правового забезпечення інтеграції ВБЕТ в електроенергетичні системи. Отримані результати мають суттєве значення для розвитку ринку систем накопичення енергії в Україні, підвищення гнучкості енергосистеми та реалізації принципів циркулярної економіки.

Дисертація відповідає вимогам п.п. 7, 8, 9 «Порядку присудження наукових ступенів» (Постанова Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567 зі змінами), а її автор Костенко Ганна Петрівна заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси.

Офіційний опонент

Тимчасово виконуючий обов'язки
Голови Державної інспекції
енергетичного нагляду України,
канд. техн. наук, доцент


Анатолій ЗАМУЛКО
М.П.

«19» 06 2026 року