

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Костенко Ганни Петрівни

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

Актуальність теми дисертації

Актуальність дисертаційної роботи обумовлена сучасними тенденціями та викликами у сфері енергетики та сталого розвитку. Кліматичні зміни та проблеми екології, а також вичерпання традиційних енергетичних ресурсів, формують вимоги до енергетичного переходу, спрямованого на декарбонізацію, скорочення використання викопних видів палива та масштабного впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Однак висока частка ВДЕ обумовлює варіабельність генерації, підвищує вимоги до гнучкості, резервування та балансування в реальному часі, що підвищує складність функціонування та управління енергосистемами. Важливим фактором забезпечення надійності та стійкості електроенергетичних систем (ЕЕС) є можливість резервування потужності, переносу навантажень в часі, що потребує акумуляування енергії та формує зростаючий попит на установки зберігання енергії (УЗЕ). Засоби акумуляування стають ключовим елементом у забезпеченні балансу попиту і пропозиції, підвищенні гнучкості, інтеграції розподіленої генерації, одночасно збільшуючи ефективність використання варіативних ВДЕ.

Одночасно енергетичний перехід передбачає електрифікацію багатьох галузей, в тому числі транспорту. Поява парку електромобілів слугує також елементом гнучкості та джерелом розподіленого зберігання електроенергії. При цьому електротранспорт та ЕЕС можуть використовувати подібні установки зберігання (УЗЕ), при тому що вимоги до їх стану в енергетиці толерантніші, ніж в автомобілях. Це природним чином пропонує повторне використання УЗЕ, які є досить вартісною складовою. Потрібне вирішення ряду складних науково-технічних завдань, обумовлених невизначеністю процесів деградації батарей, можливостями достовірної оцінки їх технічного стану та залишкового ресурсу, обґрунтованості розміщення у структурі енергосистеми та вибору оптимальних режимів експлуатації за наявності багатьох критеріїв. Це поєднує питання енергетичної безпеки, економічної доцільності, екологічних вимог, соціальних питань, тощо. Оскільки використання сучасних методів перебудови енергетики потребує знання світового досвіду та існуючих практик, то дисертація містить ґрунтовний огляд публікацій та здобутків за тематикою досліджень.

Таким чином, дисертаційна робота Костенко Г.П., спрямована на розроблення інтегрованих підходів до управління процесами використання



вторинних батарей електротранспорту (ВБЕТ) у енергосистемах, які забезпечують підвищення надійності, економічної ефективності та екологічної безпеки, а також зменшення невизначеності при прийнятті рішень щодо їх інтеграції та експлуатації, є досить *актуальною* і має важливе наукове та прикладне значення для розвитку енергетики України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами

Дисертаційну роботу виконано відповідно до планів наукових досліджень Інституту загальної енергетики НАН України у межах низки бюджетних тем, зокрема: «Розширення можливостей застосування вітрових і сонячних електростанцій у структурі об'єднаної енергосистеми України» (ДР №0123U100243), «Розвиток математичних моделей та засобів управління об'єднаними енергосистемами за участі потужних вітрових і сонячних електростанцій в нормальних та аварійних режимах» (ДР №0122U000343), «Розроблення структури та забезпечення функціонування самодостатньої розподіленої генерації» (ДР №0125U001572), де автор брала участь як виконавець. Це підтверджує відповідність дисертаційного дослідження пріоритетним напрямкам розвитку енергетичної науки в Україні.

Обґрунтованість наукових результатів, їх достовірність та новизна

Основні положення дисертації, висновки і рекомендації досить обґрунтовані. Теоретичні дослідження базуються на використанні положень теорії ймовірності та математичної статистики. Використано апробовані методи математичного та імітаційного моделювання, методи прогнозування та аналізу часових рядів, методи оптимізації та економіко-екологічного аналізу. Пропоновані моделі верифіковано на відкритих експериментальних даних.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження наступна:

- вперше розроблено систему взаємопов'язаних моделей управління інтеграцією вторинних батарей електротранспорту в енергетичні системи, що дозволяє узгоджено враховувати технічні, економічні та експлуатаційні фактори в умовах деградації та змін зовнішніх умов;
- вперше запропоновано модель прогнозування доступності ресурсу вторинних батарей електротранспорту, що базується на представленні процесу вибуття батарей з експлуатації, коефіцієнти доступності та ефективну залишкову ємність, що дозволяє визначати обсяги та часові параметри ресурсу батарей;
- вперше запропоновано метод дворівневої кластеризації вторинних батарей електротранспорту з урахуванням рівня деградації, економічних показників та вимог до надійності; запропоновано інтегральний показник деградації;
- вперше розроблено метод адаптивного управління режимами використання вторинних батарей електротранспорту в електроенергетичних системах на основі порогових значень ряду запропонованих показників.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні науково обґрунтованої основи щодо інтеграції вторинних батарей електротранспорту в енергетичні системи. Сформовано адресні рекомендації для державних органів, операторів енергосистем та наукових установ. Запропоновані підходи можуть бути використані у процесі планування розвитку систем накопичення енергії, обґрунтування режимів їх роботи, оцінювання економічної ефективності та підвищення гнучкості енергосистеми в умовах зростання частки ВДЕ. Розроблено окремий програмно-інформаційний комплекс для управління інтеграцією ВБЕТ в ЕЕС. Загалом практична цінність полягає у сприянні формуванню стратегій розвитку енергетичного сектору та впровадження принципів циркулярної економіки.

Отже, в дисертаційній роботі вирішено поставлене **наукове завдання** щодо 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.

Структура, зміст дисертації та її завершеність

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та чотирьох додатків. Основний зміст викладений на 119 сторінках друкованого тексту, загальний обсяг дисертації 156 сторінок.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету та завдання дослідження, наукову новизну, практичне значення, науковий доробок здобувача, наведено структуру дисертації.

У **першому розділі** досліджено сучасні тенденції розвитку глобальної та національної енергетики, що формують передумови інтеграції УЗЕ на базі ВБЕТ у локальні енергосистеми. Систематизовано ключові фактори, що впливають на роботу таких систем. Встановлено, що міжнародне нормативно-правове забезпечення 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.

За результатами аналізу визначено наукову проблематику та завдання дослідження, спрямоване на розроблення системи параметрів і математичних моделей управління інтеграцією ВБЕТ, оцінювання технічного стану батарей, прогнозування залишкового ресурсу, формування економічних показників ефективності, кластерний розподіл за напрямками використання та оптимізацію режимів експлуатації з урахуванням невизначеності.

У **другому розділі** запропоновано систему управління інтеграцією ВБЕТ в енергетичні системи, реалізовану у вигляді системи взаємопов'язаних параметрів та математичних моделей. Запропоновано модель прогнозування

доступності ресурсу ВБЕТ для використання в УЗЕ, визначено його річний обсяг, запропоновано підхід до оцінювання технічного стану та ресурсу. Для оцінки економічної доцільності адаптовано модель приведених витрат на зберігання енергії. Запропоновано модель кластерного розподілу, яка забезпечує групування доцільних напрямів використання ВБЕТ. Запропоновано узагальнену оптимізаційну модель управління активами ВБЕТ; формалізовано механізм переходу між режимами експлуатації ВБЕТ залежно від їх фактичного стану та зовнішніх умов, що забезпечує адаптивне управління інтеграцією ВБЕТ та зменшує невизначеність функціонування енергосистеми.

У *третьому розділі* представлено опис розрахункового програмно-інформаційного комплексу (ПК) «Система управління ВБЕТ». Визначено склад вхідних даних і сформовано процедури їх підготовки, реалізовано алгоритмічну основу функціонування комплексу, сформовано індикаторно-пороговий механізм адаптивного управління. Розроблене програмно-інформаційне забезпечення створює основу для інтеграції математичних моделей у процес прийняття управлінських рішень, підвищення ефективності використання ВБЕТ.

У *четвертому розділі* наведено результати числових досліджень із використанням розроблених параметрів та математичних моделей. На основі інтегрального показника деградації акумуляторних батарей виконано розрахунки зміни їх технічного стану у часі залежно від режимів експлуатації, оцінено швидкість деградації. Отримані результати дозволили визначити прогностичний залишковий ресурс батарей для різних сценаріїв використання. Виконано розподіл батарей за сценаріями використання відповідно до їх техніко-економічних характеристик, показано, що оптимізація резерву дозволяє мінімізувати очікувані втрати від відмов при забезпеченні заданого рівня надійності. Отримані результати свідчать, що використання ВБЕТ дозволяє знизити приведену вартість зберігання енергії, скоротити потребу у дизель-генераторах та зменшити викиди CO₂ від їх використання, а також підтверджують ефективність розроблених моделей та доцільність їх застосування, що підтверджує досягнення мети дисертаційної роботи.

Детальні *висновки* наведені після кожного розділу, а загальні висновки – в кінці основної частини.

У *додатках* наведено характеристики використаних наборів даних, фрагменти програмної реалізації розроблених моделей, акти впровадження.

Розділи дисертації логічно пов'язані між собою і є цілісним дослідженням. Дисертаційна робота чітко висвітлює методи досліджень та отримані результати, і оформлена відповідно до «Вимог до оформлення дисертації», затверджених наказом МОН України від 12 січня 2017 р. № 40.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою, в логічному стилі.

Результати досліджень представлено чітко та послідовно, основні положення аргументовані належним чином. Текст роботи викладено науковим стилем мовлення, технічно грамотно, і використана переважно загальноприйнята термінологія у галузі енергетики, енергоефективності та електричної інженерії. Для іншомовних термінів, які не мають усталених відповідників, додано оригінальні назви.

Повнота опублікування результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені у 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 наукових фахових конференціях.

Публікації здобувача оформлені на достатньому науковому рівні, фактів порушення принципів академічної доброчесності не виявлено.

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, достатньою мірою висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Досліджувані показники та процеси, які мають стохастичну природу, не завжди строго описані в термінах випадкових величин; зокрема, стосовно складових невизначеності стану батарей $\Delta Q(t)$ (ф.5 автореферату та ф.2.5 дисертації) нема оцінки функцій щільності розподілу врахованих величин, або їх довірчих інтервалів.

2. Для випадкових процесів, що відображають поточну генерацію вітрових та сонячних електростанцій, в сценаріях їх балансування (розд. 4.4) не зазначено джерело даних (наприклад, реаналіз статистичних даних, імітаційне моделювання, інше); сценарії сформовано для типових прикладів без указання на імовірнісні показники (поточну мінливість, сезонну варіативність, річні повторюваності), що дозволило б поширити результати дослідження на триваліші часові горизонти.

3. При використанні інтегрального показника інтеграції $K(t)$ (ф.19 автореферату та ф.2.19 дисертації) не вказано ранжування чи критерії такого ранжування для множини врахованих показників, що обмежує можливості практичного застосування критерію при виборі управлінських рішень (ф.21).

4. 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 комплексних енергосистем з відновлюваними джерелами енергії.

5. Викладення матеріалу загалом чітке та стилістично виважене, однак присутня певна кількість стилістичних та редакційних недоліків, що загалом не впливає на розуміння матеріалу.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними, мають переважно рекомендаційний характер, не применшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів і лишають позитивною загальну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук **Костенко Ганни Петрівни** на тему «Моделі та методи управління інтеграцією вторинних акумуляторних батарей електротранспорту в електроенергетичні системи» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є завершеним науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для обраної галузі знань.

Дисертаційна робота за актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, практичною цінністю та науковою новизною відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України та «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567 зі змінами, а її автор, **Костенко Ганна Петрівна** заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси.

Офіційний опонент:

заступник директора з наукової роботи

Інституту відновлюваної енергетики НАН України,

член-кор. НАН України, докт. техн. наук, ст.н.с.

Микола КУЗНЕЦОВ

«15» 06 2026 року

