

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Буратинського Ігоря Михайловича

«Моделювання спільної роботи сонячної електростанції та акумуляційної системи зберігання енергії в умовах підвищення стабільності та економічної ефективності їх функціонування в енергосистемі», що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми дисертації.

Активне впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є одним з головних напрямів розвитку сучасної енергетики. Зокрема, широке впровадження відновлюваної енергетики є предметом ряду міжнародних угод та зобов'язань України. Потреба в застосуванні відновлюваної енергії спричинена як необхідністю переходу до сталого розвитку, так і екологічними вимогами. Крім того, важливим напрямом реформування енергетики є перехід від централізованого виробництва енергії до розосередженої генерації, що зменшує втрати та дозволяє повніше використовувати місцевий потенціал. Важливим фактором при цьому виступає також забезпечення енергетичної безпеки внаслідок зменшення залежності від зовнішніх умов постачання енергії. Крім того, умови воєнного стану та повоєнної відбудови ставлять задачу гарантованого забезпечення електричною енергією критично важливих об'єктів, забезпечення побутових умов незалежно від загального стану енергетичної інфраструктури. Усім цим вимогам відповідає представлена дисертація, в якій пропонуються способи забезпечення надійного енергопостачання від відновлюваних джерел, а саме сонячних електростанцій, що дозволяє використати місцеві ресурси, наблизити генерацію до споживача, зменшити викиди парникових газів.

Основним недоліком роботи сонячних електростанцій (СЕС) є залежність потужності їх генерації від добових та сезонних змін інтенсивності сонячного випромінювання, що потребує додаткових заходів для регулювання активної потужності в енергосистемі – ці питання є предметом розгляду в дисертації. Важливим фактором є також орієнтація на економічну ефективність пропонованих заходів, що необхідно в умовах відбудови економіки за обмежених фінансових можливостей. Отже, мета дисертаційного дослідження повністю відповідає задачам сталого розвитку суспільства, сформульованим ООН, та актуальним потребам вітчизняної енергетики.

Оскільки використання сучасних методів перебудови енергетики потребує знання світового передового досвіду та існуючих практик, то пропонована дисертація містить ґрунтовний огляд публікацій та здобутків за тематикою досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами.

Тематика та розділи цієї дисертації входили до складу наукових робіт, які були виконані в Інституті загальної енергетики Національної академії наук (НАН) України.

Результати досліджень здобувача отримані в процесі виконання фундаментальної наукової роботи «Удосконалення математичних моделей та програмно-інформаційних засобів для прогнозування розвитку об'єднаних енергосистем з використанням відновлюваних джерел енергії в сукупності з акумулюючими засобами», а також наукової роботи «Визначення напрямів розвитку структури генеруючих потужностей Об'єднаної енергосистеми України за умов спільної роботи традиційних та відновлюваних джерел енергії і посилення екологічних вимог» за цільовою програмою наукових досліджень НАН України, відомою як «Нова енергетика».

Новизна представлених теоретичних та/або експериментальних результатів проведених здобувачем досліджень.

Проведений комплекс досліджень спрямований на вирішення такого актуального наукового завдання, як розроблення методів і моделей для визначення оптимальних параметрів СЕС, до складу якої входить система акумулювання електроенергії (САЕ) для підтримки потужності відпуску електричної енергії в енергосистему на заявленому рівні, за умов забезпечення економічної ефективності їх спільного функціонування.

Серед результатів дисертаційного дослідження, які оцінюються автором як отримані вперше, можна зазначити:

- розроблена нелінійна оптимізаційна математична модель визначення технічних параметрів обладнання СЕС, яка враховує залежність добової середньозваженої собівартості виробництва електричної енергії від проєктних техніко-економічних показників та добової зміни інтенсивності сонячного випромінювання;

- метод визначення технічних параметрів обладнання СЕС, який складається із систематизованої сукупності кроків використання нелінійної математичної моделі визначення параметрів її обладнання при заданій інтенсивності сонячного випромінювання протягом року, та визначення найбільш економічно ефективного співвідношення встановленої потужності інверторів і фотоелектричних модулів (ФЕМ);

- розроблена розрахункова математична модель визначення технічних параметрів САЕ, яка входить у структуру СЕС, використання якої, на відміну від існуючих моделей, дозволяє знаходити номінальну ємність та потужність САЕ, забезпечити підтримку потужності відпуску електричної енергії в енергосистему на заявленому рівні та відповідно до потреб споживання електроенергії;

- метод визначення технічних параметрів і режимів роботи САЕ, яка входить у структуру СЕС, із застосуванням розрахункової математичної моделі визначення номінальної ємності та потужності САЕ, що забезпечує стабілізацію потужності відпуску електроенергії в енергосистему на заявленому рівні та виключає використання маневрених резервів.

Тут слід зазначити, що заявлені методи стосуються саме кроків по використанню запропонованих математичних моделей, а власне математичні засоби базуються на стандартних математичних методах з використанням доступних спеціалізованих комп'ютерних програм.

Ряд використаних автором методів набули подальшого розвитку, зокрема метод проведення техніко-економічної оцінки впровадження інвестиційних проєктів гібридних електростанцій, у якому враховано пропонувані режими спільної роботи СЕС та САЕ для підвищення їх економічної ефективності за рахунок доступу до конкурентного ринку електричної енергії.

Наукова обґрунтованість представлених результатів здобувача.

Основні положення дисертації, висновки і рекомендації досить обґрунтовані. Теоретичні дослідження базуються на використанні наступних методів: системного аналізу – для визначення параметрів обладнання СЕС у частині співвідношення встановленої потужності інверторів/ФЕМ та визначення необхідних технічних параметрів САЕ; нелінійного програмування – для оптимізації параметрів обладнання СЕС у частині співвідношення встановленої потужності інверторів/ФЕМ; статистичних – для аналізу результатів модельних розрахунків щодобової оптимізації структури обладнання СЕС протягом року; розрахункових – для визначення необхідних технічних параметрів САЕ, яка входить у структуру гібридної СЕС; техніко-економічної оцінки – для визначення середньозваженої добової собівартості виробництва електроенергії СЕС та рентабельності впровадження нових інвестиційних проєктів гібридних СЕС.

Аналіз фактичних даних та результатів теоретичних досліджень виконано із застосуванням апробованих комп'ютерних програм.

По кожному з розділів дисертації зроблено окремі висновки, а в заключній частині наведено узагальнюючі висновки. Висновки є обґрунтованими, логічно завершеними та впливають зі змісту дисертації. Зокрема, у висновках детально відображено результати вирішення поставлених наукових задач.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується коректною постановкою задач дослідження, використанням перевірених на практиці методів дослідження та комплексного аналізу отриманих результатів.

Буратинський І.М. в повній мірі виконав поставлене наукове завдання.

Наукове значення та практична цінність

Розроблений метод визначення оптимальних технічних параметрів обладнання СЕС доцільно використовувати для оцінки конкурентоспроможності їх функціонування в сучасних ринкових умовах.

Розроблений метод визначення номінальних технічних параметрів систем акумулювання енергії в комбінації з сонячною генерацією доцільно використовувати для визначення доцільної ємності та потужності САЕ, необхідних для підтримки потужності відпуску електричної енергії на заявленому рівні, з метою зниження обсягів маневрених резервів, призначених для компенсації поточних коливань потужності СЕС.

Результати розвинутого методу техніко-економічної оцінки доцільно використовувати для визначення рентабельності впровадження гібридних СЕС, у структуру яких входить САЕ, із урахуванням поточних та перспективних умов на ринку електричної енергії.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у ТОВ «Українські технологічні продукти» для прийняття проектних рішень, та використано при підготовці інформаційно-аналітичних матеріалів до круглого столу «Реалізація вимог оновленого національно визначеного внеску України до Паризької угоди» (2021 р.), до робочої наради НЕК «Укренерго» на тему «Перспективи розвитку відновлюваної енергетики» та обговорень проекту «Звіту з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву у 2021 році», що підтверджено відповідними довідками про впровадження.

Оцінка публікацій здобувача.

Матеріали дисертаційної роботи відображені у 13 опублікованих наукових працях, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях України та 3 статті у наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus та/або Web of Science.

Ряд публікацій видано у співавторстві, щодо них вказано доробок автора дисертації. Зміст публікацій відповідає матеріалам, викладеним у дисертації.

Основні положення роботи та її результати доповідались на 5 міжнародних науково-технічних конференціях, відповідну апробацію матеріалів дисертації засвідчено у тезах конференцій, серед них 1 публікація з індексацією у Scopus.

Усі наукові результати, що виносяться на захист, отримані Буратинським І.М. особисто.

Оцінки наукового рівня дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, кожен з яких супроводжується висновками, та загальних висновків, а також списку використаних джерел (120 найменувань, із них 45 латиницею) і двох додатків. Основний зміст викладено на 149 сторінках друкованого тексту, і відповідає існуючим вимогам (наказ МОН України від 12.01.2017 № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації»).

Вступ містить обґрунтування вибору теми дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, мету та завдання, об'єкт і предмет дослідження, використані методи, наукову новизну та теоретичне і практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості щодо апробації роботи, публікацій і особистого внеску здобувача.

В першому розділі описано особливості структурної будови та функціонування сонячних електростанцій в енергосистемах. Проведено аналіз проблем функціонування енергосистем із значною часткою встановлених потужностей сонячних фотоелектричних електростанцій, зроблено огляд сучасних досліджень в цій царині та аналіз відповідного законодавства. За результатами визначено актуальне наукове завдання дослідження.

В другому розділі запропоновано метод визначення економічної ефективності функціонування сонячних електростанцій із урахуванням їх структурних особливос-

тей, який представлено як вперше розроблений. В основу методу покладено нелінійну модель оптимізації параметрів обладнання сонячної фотоелектричної електростанції в частині співвідношення встановленої потужності інверторів та ФЕМ за критерієм мінімізації добової середньозваженої собівартості виробництва електроенергії. Застосування методу проілюстровано на прикладах розрахунків щодо зниження середньозваженої собівартості електроенергії з урахуванням територіального розподілу сонячної енергії по географічних областях України та відповідного оптимального співвідношення встановленої потужності ФЕМ та інверторів.

У **третьому розділі** викладено метод стабілізації потужності сонячної електростанції із використанням у її структурі системи акумуляування електроенергії. Наведено удосконалену нелінійну модель оптимізації параметрів обладнання СЕС, до складу якої входить САЕ. Завдяки використанню акумуляування енергії забезпечується розрахункове зменшення обсягів маневрених резервів, які застосовуються для компенсації змін поточної потужності СЕС через негарантований характер сонячного випромінювання.

Четвертий розділ присвячений методам техніко-економічної оцінки впровадження гібридної сонячної електростанції в ринкових умовах. Наведено результати оцінки рентабельності впровадження різних варіантів проектів фотоелектричних електростанцій із стандартною та оптимізованою структурою, досліджено функціонування системи акумуляування на ринку електричної енергії в ОЕС України.

У **висновках** узагальнено основні наукові та практичні результати, отримані в дисертаційній роботі.

Розділи дисертації логічно пов'язані між собою і є цілісним дослідженням. Дисертаційна робота Буратинського І.М. написана з використанням сучасної наукової термінології, чітко висвітлює методи досліджень та отримані результати.

Буратинський І.М. в повній мірі оволодів методологією наукових досліджень.

Зауваження.

1) Пропонована автором модель середньозваженої добової собівартості виробництва електроенергії на СЕС (LDCOE) по суті не відрізняється від традиційної моделі LCOE, в якій також враховується потужність обладнання АС та DC і сумарна генерована енергія; різниця лише в тому, що пропорція потужностей АС та DC розглядається автором як окремий параметр, а для осереднення щодобових результатів пропонуються різні підходи.

2) Розрахунки потенційної роботи СЕС на прикладі метеоданих одного року (2004-го), та зокрема кількох обраних днів, є звууженням бази можливих варіантів: адже не наведено ні порівняння даного року з іншими (презентативності обраних даних), ні оцінки можливого розкиду даних відносно цього прикладу (характеру розподілу імовірності окремих станів, довірчого інтервалу, тощо). Отже, це лише один приклад, і не найбільш характерний.

3) Властивості поведінки сонячної генерації досліджуються на прикладі окремо взятої СЕС, що розглядається як точка нульового розміру; насправді при впрова-

дженні сонячної енергетики з об'єднаною енергосистемою буде взаємодіяти система географічно розосереджених станцій, сумарна генерація яких в силу слабкої корельованості швидкоплинних змін матиме інші показники як інтегрований випадковий процес. Автор зазначив, що використав питомі значення потужності СЕС на основі фактичних даних НЕК «Укренерго» за 2019 рік, однак саме цей рік не може вважатися презентативним, оскільки мало місце значне введення в експлуатацію нових СЕС – за рік їх встановлена потужність зросла з 1,4 ГВт до 4,9 ГВт, це ще без урахування дахових станцій. Отже, переважна частина аналізованих станцій перебувала в процесі монтажу, налагоджувальних робіт, пробної генерації ще до офіційної здачі в експлуатацію.

4) Варто зауважити, що при розрахунку накопиченої енергії в удосконаленій нелінійній математичній моделі (стор. 100) не вся надлишкова електрична енергія може йти на заряджання АБ, адже акумулятори мають допустиму швидкість заряджання (власне потужність), яка має бути співмірною з темпом змін генерації СЕС. Це ж стосується обмежень по ємності.

5) Оцінка економічної складової діяльності енергосистем з СЕС та САЕ виглядає надто песимістично, оскільки ґрунтується на фіксованих на певний час докризових цінах на електричну енергію та вартостях обладнання. Варто врахувати тенденцію стрімкого здешевлення сонячних панелей, неминучий перехід від дотаційних до ринкових тарифів на електроенергію; не враховано також такий важливий фактор, як уникнення імовірних збитків від ненаданого енергопостачання (умовну плату за надійність), фінансові санкції за порушення зобов'язань постачальника енергії, тощо. В сучасних кризових умовах можливість отримання електроенергії іноді взагалі не має фінансового виміру. Отже, висновки щодо окупності проектів можна розглядати лише як приклад застосування пропонованої методології з розрахунками, виконаними за специфічних припущень.

6) Є окремі зауваження щодо опису автором властивостей обладнання; так, стверджується, що при збільшенні встановленої потужності ФЕМ над встановленою потужністю інверторів СЕС швидше набирає та знижує свою потужність – насправді такої залежності нема, що видно наприклад на рис. 2.1, де темп зміни потужності визначається лише номінальною потужністю СЕС; потужність інверторів при реальній експлуатації також допускає деяке перевищення номінальних значень.

7) Викладення матеріалу загалом чітко та стилістично виважене, однак присутня певна кількість орфографічних та синтаксичних помилок, що не впливає на розуміння матеріалу.

Зроблені зауваження мають переважно формальний або рекомендаційний характер та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Загальний висновок опонента по дисертаційній роботі

Дисертаційна робота Буратинського Ігоря Михайловича на тему «Моделювання спільної роботи сонячної електростанції та акумуляційної системи зберігання енергії в умовах підвищення стабільності та економічної ефективності їх функціонування в енергосистемі» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що вирішують актуальну науково-прикладну задачу щодо розроблення методів і моделей для визначення оптимальних параметрів сонячних електростанцій з системами акумулювання енергії, за умов забезпечення економічної ефективності їх спільного функціонування. Отримані результати є істотним вкладом як до загальних теоретичних засад забезпечення відновлюваною енергією, так і до питань раціонального вибору технічних параметрів обладнання, а також спрямовані на безпосереднє використання в практиці проектування енергетичних об'єктів за вимог економічної ефективності.

За напрямом обраних і вирішених завдань дисертаційна робота, за змістом і одержаними результатами відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор, Буратинський Ігор Михайлович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Офіційний опонент

доктор технічних наук,
заступник директора з наукової роботи
Інституту відновлюваної енергетики
НАН України



Микола КУЗНЕСЦОВ