

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.

Інтенсивна розбудова відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема фотоелектричних станцій (ФЕС), яка відбулась протягом 2018 – 2020 років, призвела до зростання частки ВДЕ в балансі Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України і в певні години доби вона досягала 16 – 20 %. Відсутність достатнього об'єму маневрених потужностей в ОЕС України, який дозволив би збалансувати такі потужності ВДЕ, зниження навантаження зумовлене пандемією COVID-19, а потім і повномасштабним вторгненням РФ, призвело до значних обмежень генерованої потужності фотоелектричними та вітровими станціями. Оскільки ці станції відносяться до умовно керованих, то їх обмеження полягало у відключенні частини генеруючого обладнання, а подекуди, і повне відключення станцій від мережі.

Очевидно, що такі обмеження однаково не вигідні державі, яка вирішила розвиватись по шляху декарбонізації, і інвестору, який вклав кошти в будівництво недешевого енергетичного об'єкта, а потім обмежується, як правило, в дні з максимальною сонячною інсоляцією і не може повернути вкладені інвестиції.

Крім цього, відсутність системного підходу під час видачі технічних умов на приєднання, зокрема фотоелектричних станцій, призвело до підвищення втрат електричної енергії в розподільних електричних мережах, погіршенню якості електричної енергії, перевантаженню певних елементів електричної мережі. В основному ці негативні наслідки зумовлені неспіврозмірністю потужності приєднаних станцій та споживання і невідповідністю їх графіків.

Основну частину окреслених проблем можна вирішити, застосовуючи системи накопичення електричної енергії. Тому розроблення методів і моделей для визначення оптимальних параметрів фотоелектричних станцій, до складу

яких входить система акумулювання, є **актуальним** науковим завданням, яке потребує вирішення.

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» (2021 р., № ДР 0119U100109), 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» (2021 р., № ДР 0119U101745) за цільовою програмою наукових досліджень НАН України, відомою як «Нова енергетика».

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

Результати отримані в процесі дисертаційного дослідження несуть таку наукову новизну:

1. Уперше розроблено нелінійну математичну модель, яка враховує залежність собівартості виробництва електричної енергії від проектних техніко-економічних показників та добової зміни інтенсивності сонячного випромінювання, що дозволяє знаходити оптимальне співвідношення встановленої потужності інверторів і фотоелектричних модулів (ФЕМ).

2. Уперше розроблено метод визначення оптимальних технічних параметрів обладнання фотоелектричної станції (ФЕС) за критерієм мінімуму собівартості виробництва електроенергії, який складається із систематизованої сукупності кроків використання нелінійної математичної моделі, що дозволить підвищити конкурентоздатність інвестиційних проєктів з будівництва ФЕС.

3. Уперше розроблено метод визначення технічних параметрів і режимів спільної роботи системи акумулювання електричної енергії (САЕ) і ФЕС, що забезпечує стабілізацію графіка генерування електроенергії в енергосистемі на заявленому рівні та виключає використання маневрених резервів, які застосовуються для компенсації добової нестабільності фотоелектричних станцій.

4. Отримав подальший розвиток метод проведення техніко-економічного оцінювання інвестиційних проєктів гібридних електростанцій, у якому, на

відміну від існуючих, враховано розроблені режими спільної роботи ФЕС та САЕ для підвищення економічної ефективності використання доступної ємності акумуляторних батарей (АБ) за рахунок закупівлі додаткової електричної енергії на конкурентному ринку.

Наукова обґрунтованість представлених результатів здобувача.

Наукові положення та висновки, що містяться в дисертаційній роботі, є теоретично обґрунтованими і підтверджуються проведеним моделюванням під час виконання науково-дослідних робіт, апробацією на наукових міжнародних конференціях і наукових семінарах.

Представлена дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням. Зміст дисертації, структура, послідовність та повнота розв'язаних задач цілком відповідають темі роботи. Також достовірність підтверджується результатами впровадження дисертаційного дослідження у ТОВ «Українські технологічні продукти». Крім цього матеріали дисертаційної роботи були використані під час підготовки інформаційно-аналітичних матеріалів до круглого столу «Реалізація вимог Оновленого національно визначеного внеску України до Паризької угоди». Це підтверджено відповідними довідками про впровадження.

Представлена робота відповідає принципам академічної доброчесності, а саме: відтворення в тексті наукової роботи результатів дослідження інших науковців наведено з посиланнями, що не порушує Закон України «Про авторське право і суміжні права»; адекватність та точність наведеної інформації (без спотворення) з цитуванням із іноземних джерел.

Наукове значення та практична цінність.

Полягає в тому, що на підставі виконаних досліджень вирішено актуальну науково-прикладну задачу визначення номінальних технічних параметрів системи акумуляування електроенергії, яка входить у структуру фотоелектричної станції, що дозволить знизити обсяги маневрених резервів, які застосовуються в енергосистемі для компенсації добової нестабільності таких джерел енергії. Отримані в дисертації результати можуть бути практично використані у процесі виконання техніко-економічного оцінювання будівництва гібридних фотоелектричних станцій із урахуванням поточних та перспективних умов на ринку електричної енергії.

Оцінка публікацій здобувача.

Викладені в дисертаційній роботі результати дослідження отримали достатній рівень апробації. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 13 наукових праць, 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 Core Collection. Апробацію матеріалів дисертації засвідчено у 5 публікаціях матеріалів конференцій, серед яких одна доповідь на конференції з індексацією у Scopus.

Структура та зміст дисертації.

Структура дисертації побудована відповідно до мети та задач дослідження. Викладення основного матеріалу дисертації, наукових положень, результатів та висновків логічне та аргументоване. Дисертація написана в науковому стилі та оформлена відповідно до чинних умов.

Дисертаційна робота Буратинського І. М. викладена на 171 сторінці, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 149 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 19 таблицями та 24 рисунками. Список використаних джерел містить 120 найменувань, з них 75 кирилицею та 45 латиницею.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, зазначено зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета і завдання дослідження, об'єкт та предмет дослідження, викладені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведено особистий внесок здобувача, публікації та апробацію наукових результатів.

У **першому розділі** виконано огляд проблеми функціонування енергосистем із значною часткою фотоелектричних станцій. Розглянуто шляхи їх вирішення в тому числі використовуючи накопичувачі електричної енергії. Виконано огляд та аналіз наукових публікацій за темою дослідження, враховуючи які здійснено постановку задач дослідження.

У **другому розділі** приведено математичні моделі та метод визначення оптимальних параметрів обладнання сонячних електростанцій (СЕС), який дозволяє визначити оптимальні параметри обладнання СЕС відповідно до добових графіків інтенсивності сонячного випромінювання протягом року.

Наведено сформовані техніко-економічні показники функціонування сонячних електростанцій, що використовуються для визначення середньозваженої собівартості виробництва електроенергії, та результати проведеного дослідження впливу зміни співвідношення встановленої потужності фотоелектричних модулів/інверторів на обсяги та середньозважену собівартість виробництва електроенергії.

У **третьому розділі** наведено математичну модель визначення технічних параметрів системи акумуляування електроенергії, яка входить у структуру

сонячної електростанції, для стабілізації її потужності в період пікової інтенсивності сонячного випромінювання, а також забезпечення відпущеної потужності на заявленому рівні, у тому числі відповідно до потреб забезпечення графіка електричного навантаження.

Наведено результати моделювання щодо визначення номінальної ємності та номінальної потужності системи акумуляування електроенергії, яка входить у структуру гібридної сонячної електростанції.

У **четвертому розділі** представлено результати оцінювання рентабельності впровадження проєктів сонячних електростанцій із оптимізованою структурою, визначеною за розробленим методом, який ґрунтується на визначенні співвідношення встановленої потужності інверторів та фотоелектричних модулів.

Представлено результати функціонування системи акумуляування електроенергії, яка використовується під час купівлі електричної енергії в період найнижчих цін на ринку «на добу наперед» в Об'єднаній енергосистемі України та її продажу в період найвищих цін.

Висновки по дисертаційній роботі підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень.

Список використаної літератури із 120 найменувань охоплює сучасні вітчизняні та закордонні публікації за темою дисертаційних досліджень.

Додатки до дисертаційної роботи містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список публікацій.

Відповідність дисертаційної роботи вимогам МОН України

Матеріал дисертації викладено досить логічно і обґрунтовано, усі розділи мають свою специфіку, котра у сукупності свідчить про цілісність та завершеність дисертаційної роботи. Таким чином, представлена дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, яка написана науковою мовою. Зміст, структура, послідовність та повнота розв'язаних задач цілком відповідають як темі роботи так і затвердженим вимогам до написання дисертаційних досліджень МОН України.

Зауваження.

1. Потребує пояснення теза автора, що схема запропонована на рисунку 1.4 виключає можливість маніпулювання. Оскільки наявність двох ліній і лічильників на них не виключає такої можливості враховуючи, що і накопичувальна система і станція під'єднанні до РП в одній точці.

2. З роботи не зрозуміло чому автор в моделі (2.8), при визначенні електричної енергії, яка генерується ФЕС, використав лінійну залежність генерованої потужності від сонячного випромінювання. Хоча в першому розділі констатував, з посиланням на літературні джерела, що ця залежність є складною і окрім сонячної інсоляції включає температуру модуля, швидкість вітра та вологість повітря.

3. В роботі не обґрунтовується вибір значення коефіцієнта деградації фотоелектричних модулів β під час перевірки отриманих математичних моделей. Це може вносити суттєву похибку оскільки деградація безпосередньо впливає на об'єм виробленої електроенергії.

4. Необґрунтовано нехтування деградацією решти силового обладнання фотоелектричної станції і чистотою поверхні фотоелектричних модулів в розроблених математичних моделях.

5. Автором розроблено метод використання математичної моделі щодобової оптимізації структури обладнання СЕС протягом року, який передбачає статистичну обробку та аналіз отриманих результатів моделювання. Однак, виконуючи перевірку методу, на с. 87 зазначається, що результат отримується взяттям лише середнього арифметичного від множини реалізацій моделювання.

6. Автором розроблено модель (3.1) для оптимізації структури обладнання СЕС, яка працює разом з САЕ, однак залишається поза увагою врахування нелінійності характеристики заряду і розряду АБ, що суттєво впливає на об'єм накопиченої електричної енергії.

7. В роботі мова йде про балансування потужності, хоча автор часом результати наводить приведені до добової енергії чим обмежує розуміння отриманих результатів.

8. У першому розділі автором наводиться ряд загально відомої інформації, яка лише збільшує об'єм дисертаційної роботи:

на с. 42 наводиться інформація про роботу фотоелектричних станцій;

на с. 50 наводиться опис будови та параметрів електрохімічних систем накопичення.

9. Автор широко використовує термін «сонячні фотоелектричні електростанції», який не є загальноприйнятим і коректним.

10. Рукопис дисертаційної роботи містить мовні зауваження, наприклад, неузгоджене речення на стор.100 («..уся надлишкова електричної енергії заряджається в АБ.») та інше.

Загальний висновок опонента по дисертаційній роботі.

Детальний аналіз матеріалу дисертаційної роботи та опублікованих наукових праць дає змогу стверджувати, що дисертаційна робота Буратинського Ігоря Михайловича «Моделювання спільної роботи сонячної електростанції та акумуляційної системи зберігання енергії в умовах підвищення стабільності та економічної ефективності їх функціонування в енергосистемі» містить усі ознаки завершеної наукової роботи. В ній отримано нові науково обґрунтовані теоретичні результати, що дають змогу підвищити показники ефективності роботи сонячних електричних станцій в електроенергетичних системах.

Дисертаційна робота Буратинського І.М. є самостійно виконаним науковим дослідженням. Матеріал дисертації викладено послідовно, стиль викладання доказовий, чіткий і лаконічний. Висновки до кожного розділу і дисертації в цілому тісно пов'язані з її змістом і відображають суть виконаних досліджень. Публікації автора повністю висвітлюють наукові положення і результати наукових досліджень.

Враховуючи актуальність теми дисертаційної роботи, а також отримані достовірні наукові результати, що мають наукову і практичну значимість, та, враховуючи достатню повноту висвітлення основних положень дисертаційної роботи в опублікованих працях, вважаю, що представлена дисертаційна робота 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 року № 44, а її автор Буратинський Ігор Михайлович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Офіційний опонент

доктор технічних наук,
професор, завідувач кафедри
електричних станцій та систем
Вінницького національного
технічного університету



Вячеслав КОМАР

Візит сержант *Комар* *Візит*