

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу **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»**, що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**Актуальність теми дослідження, її зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Особливістю роботи сонячної електростанції є те, що виробнича потужність її генерації безпосередньо залежить від інтенсивності сонячного випромінювання. Тому добовий графік їх роботи має характер щоденного зростання ближче до полуденних годин та подальшого зниження надвечір. При збільшенні виробничої потужності сонячних електростанцій у час профіциту в енергосистемі, що відбувається у полуденні години доби, при піковій інтенсивності сонячного випромінювання, для забезпечення балансу в енергосистемі маневрені електростанції повинні зменшити свою потужність, а при зниженні потужності сонячних електростанцій, навпаки, збільшити свою потужність виробництва електроенергії. Тому, при значній частці встановлених потужностей сонячних електростанцій, умовою забезпечення балансової надійності в енергосистемі є наявність достатніх резервів маневреної генерації.

Забезпечити стабільну роботу електростанції розподіленої генерації, без необхідності збільшення обсягів маневрених резервів, можна шляхом впровадження у їх структуру систем акумулювання електроенергії. Впровадження систем акумулювання електроенергії електрохімічного типу на основі літій-іонних акумуляторних батарей має ряд переваг порівняно із іншими технологіями, оскільки вони мають високу енергетичну щільність, ефективність та тривалість роботи. При чому, відбувається постійне здешевлення вартості літій-іонних акумуляторних батарей.

Важливим є те, що при моделюванні спільної роботи сонячних електростанцій та систем акумулювання електроенергії потрібно враховувати сучасні ринкові умови, які передбачають конкуренцію між виробниками. Оцінка конкурентоспроможності електростанцій розподіленої генерації повинна проводитись на основі загальноприйнятих показників, яким є середньозважена собівартість виробництва електричної енергії.

Недоліком використання загальноприйнятих підходів є застосування для визначення прогнозних обсягів виробництва електричної енергії коефіцієнта використання встановленої потужності, що не дозволяє проводити точну оцінку для електростанцій розташованих на різних географічних територіях. Тому визначення оптимальних параметрів сонячної електростанції потребує принципово нового підходу, який повинен враховувати інтенсивність сонячного випромінювання.



Серед існуючих моделей спільної роботи сонячних електростанцій та систем акумулювання електроенергії немає таких, що дозволяють визначити номінальну ємність та потужність акумуляторних батарей спільне економічно ефективне функціонування яких забезпечуватиме підтримку потужності відпуску електричної енергії в енергосистему на заявленому рівні. Тому обрана тема дисертації Буратинського І.М. є актуальною, враховуючи сучасні ринкові умови, які передбачають одночасне забезпечення стабільності та економічності функціонування сонячних електростанцій та систем зберігання енергії в енергосистемі.

Актуальність обраної теми дисертаційної роботи Буратинського І.М. підтверджується тим, що основні результати отримані при проведенні дослідження увійшли до 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» та 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» цільової програми наукових досліджень НАН України «Інтелектуальна екологічно безпечна енергетика з традиційними та відновлюваними джерелами енергії» («Нова енергетика»).

#### **Оцінка наукового рівня дисертації.**

Дисертаційна робота Буратинського І.М. викладена на 171 сторінках машинописного тексту, 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 *першому* розділі дисертації Буратинського І.М. описано особливості структурної будови сонячних фотоелектричних електростанцій, загальні тренди зростання їх встановленої потужності та проблеми функціонування енергосистем із значною часткою їх встановлених потужностей. Зроблено огляд існуючих досліджень та показано актуальність підвищення стабільності роботи сонячних електростанцій, за рахунок впровадження у їх структуру систем акумулювання електроенергії з метою зниження обсягів маневрених резервів в енергосистемі.

У *другому* розділі наведено вперше розроблений метод визначення параметрів обладнання сонячних електростанцій у частині співвідношення встановленої потужності інверторів та фотоелектричних модулів, для забезпечення найнижчої собівартості виробництва електричної енергії в умовах добових та сезонних змін інтенсивності сонячного випромінювання. Описано вперше розроблену нелінійну модель оптимізації співвідношення встановленої потужності інверторів та фотоелектричних модулів сонячної електростанції за критерієм мінімізації добової середньозваженої собівартості виробництва електроенергії, в умовах зміни інтенсивності сонячного випромінювання.



У *третьому* розділі наведено розроблений метод визначення необхідних технічних параметрів і режимів роботи системи акумулювання електроенергії, яка входить у структуру гібридної сонячної електростанції. Наведено удосконалену нелінійну модель оптимізації параметрів обладнання сонячної фотоелектричної електростанції, до складу якої входить система акумулювання електроенергії для збереження надлишкової електричної енергії та мінімізації собівартості виробництва електричної енергії. Наведено вперше розроблену розрахункову математичну модель визначення необхідних технічних параметрів системи акумулювання електроенергії, яка входить у структуру сонячної фотоелектричної електростанції.

У *четвертому* розділі наведено розвинутий метод проведення техніко-економічної оцінки впровадження інвестиційних проєктів гібридних сонячних електростанцій. Наведено результати оцінки рентабельності впровадження проєктів сонячних фотоелектричних електростанцій із стандартними та оптимізованими параметрами із урахуванням розроблених режимів спільної роботи сонячної електростанції та системи акумулювання електроенергії.

У висновках дисертаційної роботи викладено найбільш важливі наукові та практичні результати отримані в результаті дослідження. Наведено результати оптимізації параметрів обладнання сонячних фотоелектричних електростанцій для географічних регіонів України. Наведено результати оцінки рентабельності впровадження інвестиційних проєктів гібридних сонячних електростанцій відповідно до сформованих режимів спільної роботи сонячної електростанції та системи акумулювання електроенергії.

#### **Оцінка публікацій здобувача.**

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.

Основні наукові результати, отримані автором дисертації, наведено у наукових працях, поданих у списку публікацій.

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

Наукова новизна проведеного дослідження полягає в розробці принципово нових методів і моделей для визначення оптимальних параметрів обладнання сонячної електростанції в частині співвідношення встановленої потужності фотоелектричних модулів та інверторів для забезпечення найнижчої собівартості виробництва електричної енергії протягом року, та визначення номінальної ємності та потужності система акумулювання електроенергії, яка входить у структуру сонячної електростанції, що необхідна для підтримки потужності відпуску електричної енергії в енергосистему на заявленому рівні в період пікової інтенсивності сонячного випромінювання, протягом одного повного циклу заряджання/розряджання акумуляторних батарей, а також відповідно до потреб споживання.



### **Наукова обґрунтованість представлених результатів здобувача.**

Для досягнення поставленої мети дослідження було сформульовано та вирішено завдання із розробки методу визначення оптимальних параметрів обладнання сонячної електростанції, що забезпечує найнижчу середньозважену собівартість виробництва електроенергії протягом року та методу визначення необхідних технічних параметрів системи акумуляування електроенергії, яка входить у структуру гібридної сонячної електростанції для забезпечення підтримки потужності відпуску електричної енергії в енергосистему на заявленому рівні. Також було сформульовано та вирішено завдання із розвитку методу проведення техніко-економічної оцінки впровадження інвестиційних проєктів гібридних сонячних електростанцій до складу яких входить система акумуляування електроенергії.

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

### **Рівень виконання поставленого наукового завдання.**

Дисертаційна робота Буратинського І.М. є кваліфікаційною науковою працею, виконаною ним особисто, якій розв'язано наукове завдання з розробки методів і моделей для визначення оптимальних параметрів сонячної електростанції, до складу якої входить система акумуляування електроенергії для підтримки потужності відпуску електричної енергії в енергосистему на заявленому рівні, за умов забезпечення економічної ефективності їх спільного функціонування, що має важливе значення для електроенергетики. Основні положення та результати дослідження, викладені в тексті дисертації, отримано автором самостійно.

### **Рівень оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності.**

Буратинський І.М. в повній мірі оволодів методологією наукових досліджень, що підтверджується використанням сучасних наукових методів досліджень, насамперед, системного аналізу; нелінійного програмування; статистичного; розрахункового; техніко-економічного оцінювання.

Усі наукові результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто.

### **Відомості про дотримання академічної доброчесності.**

У дисертації Буратинського І.М. фактів академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації отриманих результатів, не виявлено. Дисертація Буратинського І.М. повністю 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.

### **Недоліки та зауваження до роботи.**

У Розділі 1.3 в описі до Рис. 1.4 «Структурна схема приєднання САЕ до СЕС (AC Coupled) із двома окремими обліками електричної енергії» було б доцільно зазначити про «реверсний» режим, який дозволяє реалізувати дана схема приєднання.



У Розділі 2.4 в описі до таблиці 2.7 «Вхідні дані для визначення ефективності роботи СЕС» було б доцільно зазначити про можливість екстраполяції використаного у дослідженні діапазону ефективності роботи сонячної електростанції.

У Розділі 3.2 при оцінці наслідків стабілізації потужності гібридної сонячної електростанції із використанням у її структурі системи акумулювання електроенергії доцільно було б додатково проаналізувати зміну форми добового графіка відпуску електроенергії цією сонячною електростанцією та його заповнюваності із застосуванням відповідних показників.

По тексту дисертації необхідно чітко відрізнити географічні регіони від адміністративних областей та їх географічних центрів.

Наведені недоліки до дисертаційної роботи Буратинського І.М. є незначними та не зменшують її наукової цінності та важливості отриманих результатів.

### **Висновки щодо дисертаційної роботи.**

Дисертація Буратинського І.М. «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, у якій розв'язано наукове завдання, що має важливе значення для електроенергетики.

Основні результати дисертації Буратинського І.М. повністю відображені в 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 Core Collection. Апробацію матеріалів дисертації засвідчено у 5 публікаціях матеріалів конференцій, серед яких одна з індексацією у Scopus.

Вважаю, що Буратинський Ігор Михайлович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

### **Рецензент**

кандидат технічних наук,  
провідний науковий співробітник  
відділу трансформації структури  
паливно-енергетичного комплексу  
Інституту загальної енергетики  
НАН України



Олександр ТЕСЛЕНКО

Підпис Тесленка О.І. засвідчую.  
Учений секретар  
Інституту загальної енергетики НАН України  
канд. техн. наук



Ірина ЛЕЩЕНКО