

ВІДГУК

офіційного опонента Запорозжя Артура Олександровича
на дисертаційну роботу **Степаненка Віталія Анатолійовича**
«Управління інтеграцією відновлюваних джерел енергії до розподільних
електричних мереж»,
що представлена на здобуття ступеня доктора філософії
з галузі знань 14 «Електрична інженерія»
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Актуальність теми дисертації

У контексті стрімких технологічних змін і глобальної тенденції до низьковуглецевого розвитку Україна, переживаючи військові загрози та регулярні атаки на енергетичну інфраструктуру, здійснює усвідомлений перехід до активного розвитку розподіленої генерації, ініціюючи необхідні стратегічні кроки у цьому напрямку. Розподілена генерація визначена Урядом України як важливий фактор для відновлення енергетичної безпеки та вирішення завдань трансформації енергетичної системи у напрямку декарбонізації та «зеленого» переходу відповідно до екологічних вимог Європейського Союзу. Особливе значення в цьому процесі надається відновлюваній розподіленій генерації, що сприяє зміцненню енергетичної безпеки, підвищує енергетичну самодостатність регіонів і відіграє ключову роль у зниженні екологічного навантаження, забезпечуючи при цьому більш високу гнучкість і надійність енергосистеми.

В той же час, велика частка ВДЕ може становити загрозу для енергосистеми в залежності від її технічної готовності до інтеграції змінної генерації. У більшості випадків виклики починають проявлятися тоді, коли частка ВДЕ перевищує 20–30% від загального обсягу електричної енергії в системі. На цьому рівні вже можуть виникати проблеми з балансуванням попиту і пропозиції, підтриманням стабільної частоти та напруги, а також з локальними перевантаженнями мереж. Якщо ж частка ВДЕ зростає до 40–50% і більше без відповідних компенсуючих заходів, ризики для надійної роботи системи істотно зростають. Це пов'язано з тим, що ВДЕ мають нестабільний характер генерації, що ускладнює управління енергосистемою в реальному часі. Водночас у країнах із високим рівнем розвитку мережевої інфраструктури та застосуванням сучасних технологій можлива безпечна інтеграція навіть понад 70% ВДЕ. Проте для України, де розподільні мережі ще не адаптовані до нових умов, критичним рівнем може бути межа в 20–30%, перевищення якої без модернізації інфраструктури та систем управління може спричинити дестабілізацію роботи енергосистеми.

Тому поставлена в дисертаційній роботі мета розробки та впровадження системи управління інтеграцією ВДЕ до розподільних електричних мереж є актуальною та важливою для вітчизняної електроенергетики.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами

Дисертаційна робота Степаненка В.А. підготовлена на кафедрі електропостачання Навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського» в рамках відповідної освітньо-наукової програми за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки.

3. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Обґрунтованість та достовірність наукових положень і висновків дисертації Степаненка В.А. зумовлені проведенням порівняльним аналізом літературних джерел, що включають 104 найменування стосовно теми дисертації, математичною та логічною строгістю побудови підходів і моделей, коректністю постановки й вирішення завдань досліджень, використанням широко апробованих методів аналізу ризиків складних систем та методів багатокритеріального прийняття рішень.

Обґрунтованість висновків і одержаних результатів дисертаційної роботи підтверджуються результатами комп'ютерного моделювання, та засвідчують високу ефективність запропонованих методів і засобів. Здобуті Степаненком В.А. наукові результати відповідають завданням досліджень та підтверджуються їх апробацією на науково-технічних конференціях і семінарах.

Високий рівень отриманих результатів також підтверджується їх впровадженням в ТОВ «Розумні енергосистеми» та у навчальний та науковий процес кафедри електропостачання Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського».

В дисертаційній роботі сформовано наукове завдання, що полягає у розробці та впровадженні системи управління інтеграцією ВДЕ до розподільних електричних мереж шляхом застосування ринкових механізмів.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

4. Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Степаненка В.А. повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям підвищення ефективності режимів роботи розподільних мереж.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Степаненка Віталія Анатолійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

5. Оцінка мови, структури та змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Дисертаційна робота викладена технічною мовою із використанням наукової термінології, має логічну структуру та доступна для розуміння. Текст дисертації має достатній обсяг та проілюстрований значною кількістю рисунків, що дозволяють краще пояснити отримані результати.

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 181 сторінки.

У *вступі* описано актуальність дослідження, сформульовано мету та завдання дослідження, об'єкт, предмет та методи дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також відомості про наявні публікації, апробацію та особистий внесок здобувача.

Перший розділ присвячено всебічному аналізу проблем інтеграції ВДЕ до систем розподілу електричної енергії в контексті сучасної європейської політики, зокрема вимог четвертого енергетичного пакета ЄС. Розглянуто ключові нормативно-правові документи, що регламентують інтеграцію ВДЕ, а також специфіку їх імплементації в Україні. Підкреслюється, що стрімке зростання частки ВДЕ відбувається без урахування технічного стану розподільних мереж, що створює ризики для стабільності енергосистеми. Проаналізовано поточний стан нормативного забезпечення приєднання ВДЕ, висвітлено проблеми застарілої інфраструктури, стохастичної природи генерації та існуючих механізмів державного стимулювання розвитку ВДЕ.

У *другому розділі* дисертації здійснено аналіз режимів функціонування електричних мереж у контексті зростаючої інтеграції ВДЕ. Показано, що через

технічні особливості генерації виникають нові виклики для забезпечення стійкості та якості електропостачання. Значну увагу приділено параметрам якості електроенергії та їх змінам в умовах зростання частки ВДЕ. Обґрунтовано необхідність формування набору ключових показників для оцінки ефективності інтеграції ВДЕ та впровадження системи експертного оцінювання на основі методу Дельфі. Запропоновано та здійснено формалізовану процедуру збору та обробки експертних даних, що враховують ймовірність виникнення та наслідки основних технічних ризиків.

У *третьому розділі* обґрунтовано доцільність застосування коефіцієнта ефективності інтеграції ВДЕ та запропоновано підхід до формування «паспорта ризику» для системного аналізу загроз, що виникають при інтеграції ВДЕ. Значну увагу приділено вибору відповідного математичного апарату для прийняття рішень, зокрема використанню методу нечіткої логіки. Крім того, обґрунтовано доцільність застосування непрямих економічних механізмів впливу – передусім, впровадження диференційованих тарифів на послуги з розподілу, що враховують вплив ВДЕ на мережу. Такий підхід дозволяє створити адаптивну систему стимулювання власників ВДЕ до забезпечення нормативних умов функціонування системи розподілу та зменшення ризиків.

У *четвертому розділі* дисертації представлено прикладну реалізацію запропонованих теоретичних підходів до управління інтеграцією ВДЕ в розподільні електричні мережі. Використано інструментарій нечіткої логіки в середовищі *MATLAB* для розрахунку коефіцієнта ефективності інтеграції ВДЕ, який базується на параметрах якості електроенергії. На основі отриманих результатів запропоновано диференційований підхід до тарифоутворення, в якому тариф залежить від значення коефіцієнта ефективності інтеграції ВДЕ. Для забезпечення циклічного вдосконалення процесу інтеграції ВДЕ запропоновано адаптований цикл *PDCA*.

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

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

6. Наукове значення та практична цінність

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

– вперше запропоновано використання нового показника (коефіцієнт ефективності інтеграції ВДЕ) для оцінки процесу інтеграції ВДЕ, який на відміну від інших показників, дає можливість системно оцінювати та сформулювати систему контролю впливу таких електроустановок на мережу, і

котрий базується на комплексному аналізі параметрів мережі і оцінці ризиків, що виникають при функціонуванні ВДЕ;

- удосконалено методологію оцінки ризиків, які виникають при інтеграції ВДЕ до систем розподілу електричної енергії, заснованої на можливості варіативних оцінок ризиків, які на відміну від існуючих оцінок можуть бути використані при формуванні економічних стимулів управління процесами інтеграції;

- набула подальшого розвитку методологія визначення тарифів на послуги з розподілу електричної енергії, яка дозволяє економічно стимулювати власників ВДЕ до забезпечення нормативних умов функціонування системи розподілу шляхом запровадження відповідної диференціації цих тарифів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що створена система на базі показника ефективності інтеграції надає можливість швидко здійснювати процедуру оцінювання за допомогою інструментарію нечіткої логіки і кількісно оцінити ступінь інтеграції відновлюваних джерел енергії. Також вона може бути доповнена або змінена експертом шляхом введенням інших правил, корегуванням функцій належності для змінних та додаванням нових параметрів.

7. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації Степаненка В.П. висвітлені у 6 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 публікація у періодичному науковому виданні, проіндексованому у базі даних Scopus, як матеріали конференції; 1 стаття у міжнародному виданні.

Також результати дисертації були апробовані на 4 наукових фахових конференціях.

Публікації здобувача мають високий науковий рівень, проходили рецензування та перевірку на плагіат згідно умов видавництва. Особистий внесок здобувача до представлених наукових публікацій є вагомим. Публікації охоплюють всі результати дисертаційного дослідження.

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

8. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Загалом робота складає позитивне враження, але варто відмітити декілька зауважень:

8.1. У пункті «Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами» (с. 14) невірно вказані пріоритетні напрями розвитку науки і техніки. Їх бажано уточнити згідно актуальної постанови КМУ № 476 від 30 квітня 2024 р.

- 8.2. Рис. 1.10 (стор. 42) названо «Схема функціонування CfD », хоча на рисунку зображений графік.
- 8.3. На рис. 1.11 (стор. 49) некоректно відображена блок-схема структури $V2G$, а саме немає розмежування потоку енергії від керуючих та контрольних сигналів.
- 8.4. Перелік показників для визначення якості електричної енергії в розподільних системах (с. 62-65) слід було оформити як додаток до дисертаційної роботи.
- 8.5. У розділі 3 запропоновано структуру паспорта ризику, однак відсутній приклад його практичного заповнення або апробації на реальному об'єкті. Демонстрація конкретного прикладу суттєво підвищила б прикладну цінність і достовірність запропонованого підходу.
- 8.6. Не проведено моделювання роботи електричної мережі з інтегрованими ВДЕ в програмному середовищі *DIgSILENT PowerFactory*, що є необхідною умовою для обґрунтованого застосування диференціації тарифів на послуги з розподілу електричної енергії.
- 8.7. На стор. 140 зазначено, що «У діапазоні $k_{ef.integ}$ від 0,55 до 0,65 забезпечується відповідність нормативним параметрам якості електроенергії», проте не вказано при яких значення факторів відбувалася дана перевірка.
- 8.8. В роботі застосовано лінійні формули для розрахунку винагород/штрафів, проте питання коректності вибору коефіцієнтів (напр., 2,406; 1,163 в формулах 4.6 та 4.7) потребує більш детального обґрунтування (ст. 142).
- 8.9. У висновках зазначено, що «максимальний розмір штрафу та винагороди не може перевищувати 45% від базового тарифу», хоча насправді 45% є середнім значенням, і для окремих операторів системи розподілу цей показник може бути як більшим, так і меншим.
- 8.10. Метод експертних оцінок є важливим елементом цієї роботи, але суб'єктивний характер отриманих в результаті його застосування даних потребує додаткового узгодження. Було б корисно провести аналіз надійності та узгодженості отриманих оцінок (наприклад, через статистичні показники), щоб визначити, наскільки варіативність експертних думок впливає на фінальний коефіцієнт інтеграції.
- 8.11. Бажано окреслити основні обмеження застосованих методів і моделей, а також перспективи подальшої роботи, зокрема можливість розширення представлених результатів на більш комплексні або гнучкі рішення для інтеграції ВДЕ через динамічні зміни у структурі енергосистеми.
- 8.12. Викладення матеріалу загалом чітко та стилістично виважене, однак наявна певна кількість орфографічних, стилістичних та синтаксичних помилок, що не впливають на розуміння матеріалу.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

9. Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Степаненка Віталія Анатолійовича на тему «Управління інтеграцією відновлюваних джерел енергії до розподільних електричних мереж» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 «Електрична інженерія». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6 – 9 «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.

Здобувач Степаненко Віталій Анатолійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Офіційний опонент:

Заступник директора
з науково-організаційної роботи
Інституту загальної енергетики
Національної академії наук України,
доктор технічних наук,
старший дослідник



Артур ЗАПОРОЖЕЦЬ

М.П.

«28» квітня 2025 року