

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Дерев'янка Дениса Григоровича
«Розвиток наукових засад оптимальної взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів
в локальних електроенергетичних системах»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси

Актуальність теми дисертаційного дослідження

Останніми роками перехід до декарбонізованих, децентралізованих і цифрових енергетичних систем збільшив ризики щодо кібербезпеки таких систем, а вплив погодних умов на роботу окремих типів генерувальних установок по-новому піднімає питання енергетичної безпеки. Зокрема, відсутність гнучкості системи стала більш помітною проблемою зі зростанням частки різнотипних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та розосереджених енергетичних ресурсів (РЕР) одночасно з поступовим виведенням з роботи різноманітних теплових генерувальних установок. Важливість РЕР як окремого виду «ресурсу» мережі з кожним роком зростає дедалі більше. Джерела розосередженої генерації (РГ) та активні споживачі є також значним енергетичним ресурсом, підключеним до мережі. Щоб задіяти їх у наданні допоміжних послуг під час роботи мережі, їх потрібно об'єднувати та контролювати, щоб мати можливість здійснювати спільне керування ними як групою генераторів для надання послуг, які відповідають вимогам операторів систем передачі (ОСП) та операторів систем розподілу (ОСР). Розосереджені енергетичні ресурси більше не можна розглядати як окремі пристрої, підключені до мережі; вони мають бути інтегровані та керовані як частина систем передачі й розподілу.

Впровадження РЕР впливає на розподільні електричні мережі (ЕМ) і перетворює їх на активні елементи локальних електроенергетичних систем (ЛЕС). Відтак, зі зростанням частки генерованої електроенергії від джерел РГ збільшується їх вплив на параметри режимів ЕМ ЛЕС. Це зумовлює необхідність розробити методологію взаємної інтеграції ЛЕС із РЕР із централізованою енергосистемою, котра створить умови для забезпечення відповідних параметрів якості електропостачання та надійності. Така інтеграція можлива лише за умови оптимальної взаємодії РЕР, котрі являють собою як окремі установки РГ чи СНЕ, так і ЛЕС у цілому. Тому, здійснений в дисертаційній роботі Дерев'янка Д.Г. розвиток наукових засад оптимальної взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів в локальних електроенергетичних системах є розв'язанням актуальної наукової проблеми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами Дослідження по темі дисертаційної роботи виконано в рамках виконання 7 госпдоговірних робіт Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського) спільно з підприємствами України та науково-дослідних робіт, які фінансовано Міністерством освіти і науки України та 1 міжнародного проекту: № 0117U004285 «Розроблення науково-методологічних основ агрегування та керування віртуальними електростанціями і активними споживачами в умовах енергоринку» від 24.02.2017, №0117U003825 «Дослідження оптимального функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів із застосуванням комплексного акумуляування електричної та теплової енергій» від 06.10.2017, № 5 «Дослідження та порівняння базових рівнів споживання енергоресурсів протягом двох опалювальних сезонів двоповерхової будівлі готельного комплексу «ЛІГЕНА», розташованого за адресою: м. Бориспіль, вул. В. Момота, 53» від 30.06.2020, №8E201.01.01.05.001-РО-КРІ-01 «Розробка та обґрунтування плану розвитку та шляхів

підвищення ефективності громадського електротранспорту м. Чернігів» від 22.08.2017, №Д/0201.01/2400.01/10 «Порівняльний аналіз сучасних адміністративно-нормативних перетворень на лібералізованих ринках електричної енергії та газу України; аналіз сучасних технологічних трендів та прогностичних моделей в умовах функціонування лібералізованих ринках електричної енергії та газу України» від 12.02.2021, №Д/0201.01/2400.01/19 «Обґрунтування доцільності заміни кабельних ліній 10 кВ у м. Чернігові» від 25.05.2021, № НОН/221/2022 «Boosting the Blue Economy in the Black Sea Region by Initiating a Business Collaboration Framework in the field of Fisheries and Aquaculture, Coastal and Maritime Tourism and Maritime Transport» від 13.07.2022, №РН/34-2023 «Smart-моніторинг ефективності функціонування локальних систем енергозабезпечення з альтернативними джерелами енергії» від 29.05.2023. Виконані дослідження відповідають напрямку «Енергетика та енергоефективність» Закону України № 2623-III від 13.01.2024 р. «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», комплексній програмі КПП ім. Ігоря Сікорського «Енергетика сталого розвитку». Автор був відповідальним виконавцем частини з указаних держбюджетних науково-дослідних робіт і приймав безпосередню участь у їх виконанні.

Оцінка обґрунтованості та значення наукових положень дисертації, їх достовірності та новизни

Ознайомившись зі змістом дисертаційного дослідження Дерев'янка Д.Г., опублікованими науковими працями та рефератом дисертації, можна стверджувати, що завдання, результати і висновки поданої до розгляду роботи цілком обґрунтовані. В роботі згідно до вимог сформульована актуальність теми, визначено об'єкт (процеси перетворення розосереджених енергетичних ресурсів у межах локальних електроенергетичних систем, автономних та приєднаних до ОЕС України) та предмет дослідження (режимні параметри агрегації та взаємодії елементів РГ та накопичувачів всередині ЛЕС та означених систем з операторами систем розподілу ОЕС України). Мета і завдання дослідження цілком відповідають заявленій темі. Достатньо широким є перелік використаних джерел, який включає в себе 188 джерел (з них 154 іноземною мовою).

Перевагою роботи є розвиток методології, розроблення моделей та методів, які забезпечують агрегацію і взаємодію елементів розосередженої генерації і накопичувачів у межах локальних електроенергетичних систем та самих систем з операторами систем розподілу ОЕС України. Спочатку автор аналізує структуру та особливості функціонування ЛЕС із РЕР, а також законодавчу базу щодо впровадження джерел РГ в Україні. Проведений аналіз дає змогу сформулювати ієрархічну модель функціонування ЛЕС із різнотипними РЕР, що надалі і визначає задачі, які вирішувалися у дисертаційній роботі.

На основі аналізу структури і режимів активних споживачів сформульовано задачу оптимізації режимів їх функціонування, що дає змогу врахувати як економічні, так і енергетичні характеристики їх роботи, а також враховує реакцію активних споживачів на програми керування попитом (с. 141). Запропонована модель оцінювання ефективності функціонування активних споживачів (с. 134) дає змогу визначити, що максимальний рівень ефективності може бути досягнутий через збільшення коефіцієнта автономності, а отже, частки споживаної електроенергії від джерел РГ і системи накопичення, а також через максимізацію прибутку від продажу надлишків генерованої джерелами РГ електроенергії в мережу. Запропонований спосіб візуалізації показників функціонування активного споживача (с. 153) дає змогу за допомогою діаграм Шумана проводити багатофакторне оцінювання ефективності його роботи. Побудовані профілі функціонування активного споживача відображають ефективність його роботи щодо

середніх і максимальних значень функцій сформованої оптимізаційної задачі (с. 154, 155).

Надалі дисертантом проаналізовано практичні аспекти оптимальної роботи ЛЕС в умовах агрегування різнотипних РЕР (розділ 3). Сформовано оптимізаційну задачу на рівні взаємодії різнотипних РЕР між собою у межах означених систем (с. 204). Зіставний аналіз методів визначення величини питомих витрат на генерацію електроенергії *LCOE* (Levelized Cost of Energy) в системах із джерелами РГ і накопичувачами дав змогу вдосконалити методологію визначення зазначеного показника (с. 171), що дозволяє врахувати усі типи джерел енергії у ЛЕС та дати відповідні цінові сигнали потенційним інвесторам, котрі збираються інвестувати у розвиток РЕР. У межах вирішення оптимізаційної задачі на даному ієрархічному рівні Дерев'янком Д.Г. сформовано безрозмірну функцію (с. 183), яка дозволяє отримати оцінки рівня нерівномірності споживання електроенергії навантаженнями в ЛЕС з накопичувачами електричної енергії залежно як від тривалості інтервалів, на кожному з яких є постійний відбір потужності, так і інтенсивності розряду накопичувачів на цих інтервалах. Запропонований дисертантом показник ефективності запровадження програм керування попитом на електричну енергію (с. 188) дає змогу визначити фактичні можливості споживачів щодо зміни своїх графіків навантаження, що вкрай важливо для системного оператора. Далі Дерев'янком Д.Г. сформульовано основні вимоги та процедури інтеграції РЕР у ЛЕС на основі ринкових моделей взаємодії (параграфи 4.2, 4.3). Запропонована теоретико-ігрова модель агрегування РЕР у ЛЕС дала змогу сформулювати два стратегічних напрями керування РЕР у ЛЕС під час їх агрегування. Перший напрям дає змогу агрегатору неявно стимулювати РЕР до максимізації генерування електричної енергії від джерел РГ та СНЕ, а другий створює більш жорсткі умови, котрі стимулюватимуть РЕР максимально дотримуватися умов контракту. Отримані результати дали змогу розвинути теоретико-ігрові моделі оптимальної взаємодії ЛЕС з ОЕС України на рівні операторів систем розподілу (розділ 5). За результатами дослідження запропоновано архітектуру системи Smart-моніторингу ЛЕС із РЕР, котра враховує усі типи джерел РГ і СНЕ та особливості їх функціонування (с. 248). У межах того ж ієрархічного рівня запропоновано модель оптимальної взаємодії РЕР трьох типів з агрегатором/оператором ЛЕС (с. 250-262). Визначено оптимальні стратегії агрегування різнотипних РЕР у ЛЕС на основі визначення рівноваги за Нешем для кожного типу РЕР під час взаємодії з агрегатором (с. 266). Отримані дисертантом наукові результати дали змогу сформулювати методіку підвищення енергетичної ефективності ЛЕС з активними споживачами (с. 284), яка дає змогу на основі оцінювання технічних та економічних параметрів режимів роботи активних споживачів формувати коригувальні дії щодо режимів їх роботи та визначати потенціал до підвищення ефективності його функціонування, а відтак і до функціонування ЛЕС. Зазначена методіка дає змогу оцінити потенціал автономної роботи активних споживачів, що вкрай позитивно вплине на режими роботи ЛЕС в умовах російської агресії. Розроблене Дерев'янком Д.Г. нормативно-методичне забезпечення агрегування різнотипних РЕР у ЛЕС (параграф 7.2) дає змогу впроваджувати локальні енергетичні ринки для підвищення автономності роботи ЛЕС із РЕР, що особливо важливо за функціонування ОЕС України в умовах російської агресії.

Високий рівень отриманих наукових результатів, що підтверджуються довідками та актами впровадження свідчить про суттєвий внесок дисертанта у теорію та практику функціонування ЛЕС з джерелами розосередженої генерації та системами накопичення електричної енергії.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження не викликає сумнівів і полягає в наступному:

Вперше:

- розроблено метод оцінювання ефективності функціонування активного споживача в ЛЕС з джерелами РГ та СНЕ, на основі поєднання технічних та економічних показників його функціонування;
- розроблено метод коригування ціни при динамічній тарифікації, котрий би враховував наявну пропозицію по генеруванню в кожний окремий момент часу у рамках ЛЕС з джерелами РГ та СНЕ, на основі наявної пропозиції та при групуванні окремих часових зон за їх еластичністю;
- запропоновано метод взаємної інтеграції моделей локальних систем з джерелами РГ та моделей централізованих ЕЕС у рамках теорії ігор, який ґрунтується на використанні механізмів динамічної тарифікації, з врахуванням інтересів власників РГ/СНЕ, агрегаторів ЛЕС та операторів систем розподілу;
- запропоновано модель агрегування розосереджених енергетичних ресурсів з урахуванням їх типів та функціональних відмінностей на основі теоретико-ігрових моделей взаємодії.

Вдосконалено:

- методологію визначення показника питомої собівартості генерування електричної енергії *LCOE* для локальних електроенергетичних систем, на основі аналізу складових ЛЕС з джерелами РГ та СНЕ та методик оцінювання приведенного показника вартості електричної енергії;
- методологію визначення ефективності функціонування систем накопичення електроенергії на основі використання показника реактивної потужності за Фризе, що ґрунтується на оцінюванні нерівномірності відбору електроенергії в системах з накопичувачами електроенергії.

Набули подальшого розвитку:

- науково-прикладні основи оцінювання ефективності функціонування ЛЕС з джерелами РГ та СНЕ, на основі комплексного аналізу групи технічних показників, набору економічних характеристик та моделей динамічної тарифікації;
- теоретико-ігрові моделі взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів на основі дослідження проблем синтезу ЛЕС з РЕР із централізованими ЕЕС;
- модель оцінювання ефективності функціонування активного споживача на основі візуалізації його технічних та економічних характеристик, побудови профілів його роботи, що ґрунтується на сформованій у роботі системі критеріїв та показників.

Практичне значення роботи полягає у вирішенні актуальної науково-прикладної проблеми розвитку наукових основ оптимальної взаємодії РЕР у ЛЕС щодо розвитку теоретичних засад, розробки моделей і методів, які забезпечують агрегацію і взаємодію елементів РГ та накопичувачів у межах таких систем та з операторами систем розподілу ОЕС України. Практичне впровадження результатів досліджень сприяє підвищенню ефективності ЛЕС із РЕР, а саме:

- Розроблено методику підвищення енергетичної ефективності ЛЕС з активними споживачами, яка ґрунтується на розробленому методі оцінювання ефективності функціонування активного споживача в ЛЕС із джерелами РГ та СНЕ, дає змогу на основі оцінювання технічних та економічних параметрів режимів роботи активних споживачів формувати коригувальні дії щодо режимів їх роботи й визначати потенціал до підвищення ефективності його функціонування, а відтак і до функціонування ЛЕС (метод оцінювання ефективності функціонування активних споживачів на основі їх реагування на програми керування попитом впроваджено у ДТЕК Київські регіональні електромережі).
- Запропонована модель коригування ціни при динамічній тарифікації дає

змогу визначити величину зміни ціни на електричну енергію при динамічній тарифікації для споживачів в реальних умовах враховуючи наявну пропозицію по генеруванню у режимі реального часу (впроваджено у роботу МПП «АНІГЕР»).

– Розроблено нормативно-методичне забезпечення агрегування різнотипних РЕР в ЛЕС, котре включає в себе теоретико-ігрову модель локального енергетичного ринку та механізм агрегування розосереджених енергетичних ресурсів з урахуванням їх типів та функціональних відмінностей (впроваджено у роботу НКРЕКП, МПП «АНІГЕР» та ДТЕК Київські регіональні електромережі).

– Вдосконалена методологія визначення показника питомої собівартості генерування електричної енергії LCOE для ЛЕС дає змогу врахувати усі типи джерел РГ та СНЕ та дати відповідні цінові сигнали потенційним інвесторам.

– Вдосконалені теоретико-ігрові моделі взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів із централізованими ЕЕС дають змогу підвищити ефективність їхньої взаємодії завдяки можливості відображення різносторонньої взаємодії (на технічному та економічному/ринковому рівнях), що позитивно вплине на режими роботи зазначених систем.

– З урахуванням отриманих результатів, запропоноване нормативно-методичне забезпечення може бути впроваджено у рамках реалізації Стратегії розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024 - 2026 роках та плану заходів щодо реалізації Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року при побудові Microgrid систем для підвищення надійності ЕМ та якості електропостачання, за умови, що всі джерела РГ та власники СНЕ зможуть продавати згенеровану електричну енергію лише через оператора/агрегатора Microgrid.

Матеріали дисертації впроваджено в навчальний процес КПІ ім. Ігоря Сікорського. Запропоновані методи та моделі також впроваджено у ТОВ «Приморська енергетична компанія» та використано у 7 держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних роботах КПІ ім. Ігоря Сікорського та 1 міжнародному проєкті, в яких здобувач був або відповідальним виконавцем або учасником.

Всі отримані автором результати є новими, достовірними та належно обґрунтованими.

Повнота викладу основних результатів дисертації підтверджується апробацією результатів дисертаційного дослідження в публікаціях у фахових виданнях, оприлюдненням на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях. Результати дисертації опубліковано у 29 наукових працях, у тому числі 2 монографії (розділи у колективних монографіях); 17 статей у провідних наукових періодичних виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, з них: 16 статей у наукових періодичних виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України (в т.ч. 4 включених до категорії “А”, усі відносяться до Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports), 1 стаття у наукових періодичних виданнях інших держав з наряду, з якого підготовлено дисертацію (включена до міжнародних наукометричних баз SCOPUS, Q2 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports); 10 тез та доповідей на наукових конференціях.

Мова та стиль дисертації.

За змістом подана дисертація в цілому вирішує поставлену мету та завдання дослідження. Текст дисертації викладено державною мовою аргументовано, логічно та послідовно. Стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття та

використання. Структура дисертації та реферату дисертації, оформлення, мова та стиль викладення відповідають вимогам, які ставить до докторських дисертацій Міністерство освіти і науки України.

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

Зауваження та рекомендації щодо змісту дисертації:

1. У науковій новизні дисертаційної роботи стилістично некоректно сформульовано перший пункт, а саме «розроблено метод оцінювання ефективності функціонування активного споживача...котрий дає змогу оцінювати ефективність його роботи».

2. У розділі 1 наведено загальні тенденції розвитку відновлюваних джерел енергії, проте не зрозуміло чи це корелюється із розвитком локальних ринків про які йде мова в подальшому. Доцільно було б навести особливості формування і роботи локальних ринків якраз у контексті розвитку та широкого впровадження відновлюваних джерел енергії.

3. Наведена у розділі 2 модель оцінювання ефективності функціонування активного споживача зображена на рис. 2.1 потребує більш детального опису, а саме послідовності визначення окремих складових моделі та її репрезентативних показників, що в самій роботі відсутнє.

4. У вдосконаленій методології визначення показника питомої собівартості генерування електричної енергії *LCOE* для локальних електроенергетичних систем у якості розрахункового прикладу використано установки ВДЕ малої потужності (до 30 кВт). Для більшої наочності було б доцільно здійснити порівняння отриманих результатів з результатами, які відображатимуть характеристики установок більшої потужності.

5. У дисертаційній роботі не обґрунтовано, чому для вирішення сформульованих дисертантом оптимізаційних задач використовується саме математичний апарат теорії ігор.

6. При розв'язанні теоретико-ігрових задач дисертантом у якості значень функцій виграшів використовуються дискретні величини, проте з самої роботи не зрозуміло звідки взято наведені у тексті значення і чи вони є результатом моделювання роботи окремих установок, – гравців.

7. У параграфі 7.2 дисертаційної роботи наведено запропоноване дисертантом нормативно-методичного забезпечення агрегування різнотипних розосереджених енергетичних ресурсів у локальних електроенергетичних системах, яке базується на ринковій моделі сигнальної гри з неповною інформацією. У даному контексті було б доцільно порівняти запропоноване нормативно-методичного забезпечення з наявним нормативно-методичним забезпеченням щодо функціонування енергоринку в Україні, що у самій роботі відсутнє.

8. В роботі є ряд стилістичних помилок («досліджено нове рішення...» ст. 162 та ін.) та введено термін «базова надійність», який в подальшому у роботі не застосовується.

9. На ст. 270 у рис. 6.16 відсутня шкала *Ox* на графіку а також підписи до неї.

Висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Дерев'янка Д.Г.

Відповідність реферату змісту дисертаційної роботи

У тексті реферату відображено основні положення, зміст, результати та висновки здійсненого дослідження. Зміст реферату та основні положення дисертаційної роботи є ідентичними.

Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Вважаю, що дисертаційна робота Дерев'янка Дениса Григоровича на тему «Розвиток наукових засад оптимальної взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів в локальних електроенергетичних системах» є завершеною науковою працею, що виконана на високому науковому і методичному рівнях, в якій представлено нові наукові результати, спрямовані на вирішення важливої науково-технічної проблеми розвитку наукових основ оптимальної взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів у ЛЕС щодо розвитку теоретичних засад, розробки моделей і методів, які забезпечують агрегацію і взаємодію елементів РГ та накопичувачів у межах таких систем та з операторами систем розподілу ОЕС України. Реферат повністю відображає основні положення дисертації. За актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною, змістом та оформленням дисертаційна робота повністю відповідає вимогам пп. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197, а її автор Дерев'янка Денис Григорович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси.

Офіційний опонент:

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


Петро ЛЕЖНЮК

Учений секретар Вченої ради ВНТУ,
кандидат технічних наук, доцент


Інна ВІШТАК

