

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з наукової роботи  
Національного технічного  
університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»  
Д. н., проф.  
Сергій СТРЕНКО  
« 16 » 2024 р.



## ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів докторської дисертації Дерев'янка Дениса Григоровича на тему «Розвиток наукових засад оптимальної взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів в локальних електроенергетичних системах», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.01 «Енергетичні системи та комплекси».

(Витяг з протоколу № 1 від 06 вересня 2024 р. наукового семінару кафедри електропостачання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»)

Тему дисертаційної роботи «Розвиток наукових засад оптимальної взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів в локальних електроенергетичних системах» затверджено на засіданні Вченої ради КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від «24» червня 2024 року)

Структурний підрозділ для проведення попередньої експертизи дисертації та рецензентів затверджено Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від «24» червня 2024 року).

Заслухавши та обговоривши доповідь Дерев'янка Д.Г., а також за результатами попередньої експертизи представленої дисертації, ухвалили прийняти такий висновок:

### 1. Актуальність теми дослідження

Зростання частки генерування електричної енергії від джерел розосередженої генерації (РГ) та відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у загальному енергетичному балансі має низку переваг та недоліків. Перевагами зростання низьковуглецевих генеруючих потужностей поблизу споживача є: низький рівень забруднення навколишнього середовища; зниження втрат від передачі електричної енергії в ОЕС України;

диверсифікація генерувальних потужностей; джерела РГ можуть працювати майже без обслуговування з мінімальними експлуатаційними витратами; відсутність необхідності транспортування первинного палива до джерела енергії. З іншого боку, значним недоліком більшості типів ВДЕ є нестабільність енергетичного ресурсу, що може призвести до відхилень частоти систем, відхилень напруги, реверсування потоків потужності, вплив на інші технічні параметри електромереж та, як наслідок, до додаткових відключень, що впливають на надійність електроенергетичних систем.

Перехід до декарбонізованих, децентралізованих і цифрових енергетичних систем збільшив ризики щодо їх кібербезпеки, а вплив погодних умов на роботу окремих типів генерувальних установок, по новому піднімає питання енергетичної безпеки. Відсутність гнучкості системи, зокрема, стала більш помітною проблемою зі зростанням частки різнотипних ВДЕ та розосереджених енергетичних ресурсів, одночасно з поступовим виведенням з роботи різноманітних теплових установок.

Джерела РГ та активні споживачі з власними генерувальними установками є значним енергетичним ресурсом, підключеним до мережі. Для того, щоб задіяти їх у наданні допоміжних послуг при роботі мережі, їх доцільно об'єднувати та контролювати, щоб мати можливість здійснювати спільне керування ними як групою генераторів для надання послуг, які відповідають вимогам операторів системи передачі (ОСП) та операторів системи розподілу (ОСР). Важливість розосереджених енергетичних ресурсів (РЕР), як окремого виду «ресурсу» мережі з кожним роком зростає все більше. РЕР більше не можна розглядати як окремі пристрої, підключені до мережі; вони повинні бути інтегровані та керовані як частина систем передачі та розподілу.

Впровадження РЕР впливає на локальні електроенергетичні системи (ЛЕС) і перетворює їх на активні елементи. А відтак, зі зростанням частки генерованої електроенергії від джерел РГ збільшується їх вплив на параметри режимів ЛЕС. Це призводить до необхідності розробки методології взаємної інтеграції локальних енергетичних систем з РЕР з 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 системи накопичення енергії (СНЕ), так і ЛЕС в цілому.

У роботах провідних вчених України та світу розроблені основи аналізу та теорії керування енергетичними системами, у тому числі з ВДЕ та системами накопичення електроенергії, що засновані на аналізі процесів та режимів роботи. Однак сформовані теоретичні положення не враховують комплексно усіх складових означених систем з урахуванням воєнного стану у країні та стрімкої децентралізації генерувальних потужностей.

Тому, для локальних електроенергетичних систем з джерелами РГ та СНЕ актуальним є розвиток наукових засад, а саме: створення методології та практичного інструментарію (методів, моделей, алгоритмів і програм) оптимальної взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів з урахуванням

особливостей їх функціонування та потреб енергосистеми. Викладене вище та критичний аналіз міжнародного досвіду вирішення проблеми визначили напрямки наукових досліджень, результати яких викладені в дисертаційній роботі.

## **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Виконані у роботі дослідження відповідають напрямку «Енергетика та енергоефективність» Закону України № 2623-III від 13.01.2024 р. «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», комплексній програмі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського) «Енергетика сталого розвитку». Дисертаційне дослідження виконувалося згідно з планом наукових робіт кафедри електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського у рамках науково-дослідних робіт: № 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-PO-KPI-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.

## **3. Наукова новизна отриманих результатів**

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

Вперше:

– розроблено метод оцінювання ефективності функціонування активного споживача в ЛЕС з джерелами РГ та СНЕ, на основі поєднання технічних та

економічних показників його функціонування, котрий дає змогу оцінювати ефективність його роботи та визначати напрям її підвищення;

– розроблено метод коригування ціни при динамічній тарифікації, котрий би враховував наявну пропозицію по генеруванню в кожний окремий момент часу у рамках локальних електроенергетичних систем з джерелами РГ та СНЕ, на основі наявної пропозиції та при групуванні окремих часових зон за їх еластичністю, що дозволяє визначити максимальний ефективний рівень впливу на зміну ціни на електроенергію при динамічній тарифікації.

– запропоновано метод взаємної інтеграції моделей локальних систем з джерелами РГ та моделей централізованих електроенергетичних систем у рамках теорії ігор який ґрунтується на використанні механізмів динамічної тарифікації у межах програм керування попитом, на основі аналізу особливостей функціонування різнотипних джерел РГ та СНЕ у рамках ЛЕС, а також інтересів власників РГ/СНЕ, агрегаторів ЛЕС та операторів систем розподілу, який дає змогу знайти раціональне рішення серед інших рішень поставленої ігрової задачі знаходженням рівноважних за Нешем стратегій, які відображають інтереси усіх гравців.

– запропоновано модель агрегування розосереджених енергетичних ресурсів з урахуванням їх типів та функціональних відмінностей на основі теоретико-ігрових моделей взаємодії, який спонукає елементи локальних електроенергетичних систем до оптимальної взаємодії при їх агрегуванні та керуванні їх ustalеними режимами.

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, генерованої різними типами генерувальних установок та накопичувачами електричної енергії, що дає змогу врахувати усі типи джерел РГ та СНЕ та дати відповідні цінкові сигнали потенційним інвесторам, націлені інвестувати у розвиток РГ з огляду на структуру кожної окремо взятої локальної електроенергетичної системи;

– 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, яка дозволяє отримати оцінки рівня нерівномірності споживання електроенергії навантаженнями залежно як від тривалості інтервалів, на яких відбувається постійний відбір потужності, так і від інтенсивності розряду накопичувачів на цих інтервалах.

Набули подальшого розвитку:

– науково-прикладні основи оцінювання ефективності функціонування локальних електроенергетичних систем з джерелами РГ та СНЕ, на основі комплексного аналізу групи технічних показників, набору економічних характеристик та моделей динамічної тарифікації, що дають змогу більш

комплексно оцінювати ефективність функціонування локальних електроенергетичних систем та ефективність взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів в означених системах;

-теоретико-ігрові моделі взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів на основі дослідження проблем синтезу локальних електроенергетичних систем з РЕР із централізованими електроенергетичними системами, що дають змогу знайти оптимальний профіль стратегій взаємодії елементів системи у вигляді формалізованої гри завдяки можливості відображення різносторонньої взаємодії (на технічному та економічному/ринковому рівнях) зазначених систем;

- 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, які дають змогу оцінювання ефективності функціонування активних споживачів з джерелами РГ та СНЕ у своїй структурі та за застосування моделей динамічної тарифікації.

#### **4. Ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків, сформульованих у дисертаційній роботі.**

Наукове значення роботи полягає в розробленні теоретичних та практичних висновків і рекомендацій, які викладені в науковому дисертаційному дослідженні. Детальне ознайомлення з дисертацією показує, що основні результати досліджень Дерев'янка Д.Г. достатньою мірою обґрунтовані, їх наукова достовірність не викликає сумнівів, оскільки вони отримані у результаті ґрунтовної аналітичної роботи здобувача.

Автором дисертації чітко та логічно побудовані мета, завдання та об'єкт дослідження, обґрунтовано теоретичні основи та методологічні підходи щодо їх виконання, розроблено і належним чином апробовано відповідні положення, які у своїй комплексності є науковим шляхом вирішення поставлених завдань. Потрібно зазначити, що завдання дослідження, положення наукової новизни і висновки дисертації є логічно взаємопов'язаними. Дисертаційна робота Дерев'янка Д.Г. є оригінальною науковою працею, виконаною на належному теоретико-методологічному і прикладному рівні. Вона має послідовну та виважену структурну побудову і є комплексним та завершеним науковим дослідженням. Зміст роботи та велика кількість використаних математичних методів та моделей свідчать про різносторонню, і водночас комплексну наукову компетентність її автора.

Наукова обґрунтованість та достовірність основних положень дисертації, отриманих результатів, висновків та сформульованих рекомендацій забезпечувалася здобувачем за рахунок застосування сукупності загальнонаукових і спеціальних методів наукових досліджень, використанням актуальної нормативно-правової й статистичної інформації з національних і міжнародних офіційних інформаційних джерел, а також проведеним у роботі ґрунтовним аналізом фундаментальних праць

вітчизняних і зарубіжних учених з досліджуваної проблеми, апробацією основних наукових положень та отриманих результатів дослідження як на всеукраїнських, так і на міжнародних науково-практичних конференціях.

Вищезазначене підтверджує високу ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи Дерев'янка Д.Г.

Сформульовані автором дисертації висновки характеризуються новизною, логічністю й аргументованістю. Основні положення і результати дисертаційної роботи пройшли достатньо широку апробацію, яка підтверджується різноплановими публікаціями автора, у тому числі за кордоном, виступами на науково-практичних конференціях. Виконання поставлених наукових завдань щодо вирішення сформульованої проблеми надали автору можливість обґрунтувати положення, які розкривають теоретичну сутність дослідження та характеризуються науковою новизною.

## **5. Теоретичне та практичне значення результатів роботи, впровадження**

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів роботи полягає у комплексному вирішенні актуальної науково-прикладної проблеми розвитку наукових основ оптимальної взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів у локальних електроенергетичних системах в частині розвитку теоретичних засад, розробки моделей та методів, які забезпечують агрегацію і взаємодію елементів розосередженої генерації та накопичувачів у межах таких систем та із операторами систем розподілу ОЕС України.

Практичне впровадження результатів досліджень сприяє підвищенню ефективності функціонування локальних електроенергетичних систем з розосередженими енергетичними ресурсами, а саме:

– Розроблена методика підвищення енергетичної ефективності локальних електроенергетичних систем з активними споживачами, котра базується на розробленому методі оцінювання ефективності функціонування активного споживача в ЛЕС з джерелами РГ та СНЕ дає змогу на основі оцінювання технічних та економічних параметрів режимів роботи активних споживачів формувати коригуючі дії щодо режимів їх роботи та визначати потенціал до підвищення ефективності його функціонування а відтак і до функціонування ЛЕС. Також, дана методика дає змогу оцінити потенціал автономної роботи активних споживачів, що вкрай позитивно вплине на режими роботи ЛЕС в умовах російської агресії.

– 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.

– Розроблене 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, дає змогу впроваджувати локальні енергетичні ринки для підвищення автономності роботи ЛЕС із РЕР, що особливо важливо за функціонування ОЕС України в умовах російської агресії.

– Вдосконалена методологія визначення показника питомої собівартості генерування електричної енергії *LCOE* для локальних електроенергетичних систем дає змогу врахувати усі типи джерел РГ та СНЕ та дати відповідні цінові сигнали потенційним інвесторам, котрі збираються інвестувати у розвиток РГ з огляду на структуру кожної окремо взятої локальної електроенергетичної системи;

– Вдосконалені теоретико-ігрові моделі взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів із централізованими електроенергетичними системами 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 електричної енергії лише через оператора/агрегатора Microgrid.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено:

– при виконанні міжнародного проєкту № 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;

– при виконанні НДР «Smart-моніторинг ефективності функціонування локальних систем енергозабезпечення з альтернативними джерелами енергії» (терміни виконання: 29.05.2023 – 31.12.2024 р. № РН-34/2023 від 29.05.2023);

– при виконанні НДР № 0117U004285 «Розроблення науково-методологічних основ агрегування та керування віртуальними електростанціями і активними споживачами в умовах енергоринку» від 24.02.2017;

– при виконанні НДР №0117U003825 «Дослідження оптимального функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів із застосуванням комплексного акумулювання електричної та теплової енергій» від 06.10.2017;

– при виконанні НДР № 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;

- при виконанні НДР №8Е201.01.01.05.001-РО-КРІ-01 «Розробка та обґрунтування плану розвитку та шляхів підвищення ефективності громадського електротранспорту м. Чернігів» від 22.08.2017;
- при виконанні НДР №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;
- при виконанні НДР №Д/0201.01/2400.01/19 «Обґрунтування доцільності заміни кабельних ліній 10 кВ у м. Чернігові» від 25.05.2021;
- Національною комісією, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), а саме при створенні передумов до впровадження локальних енергетичних ринків в Україні, що є вкрай важливим для ефективного функціонування енергетичних ринків та їх взаємній інтеграції з ринками інших держав;
- у ТОВ «Приморська енергетична компанія» у якості бази техніко-економічного обґрунтування впровадження систем накопичення електричної енергії для реалізації цінового арбітражу, яке ґрунтується на аналізі цін ринку «на добу наперед» по періодах доби. Застосована методологія визначення ефективності функціонування систем накопичення електроенергії дала змогу підвищити ефективність застосування вже впровадженої системи накопичення електричної енергії на 24% і наразі використовується для визначення параметрів систем накопичення для ефективного реалізації моделі цінового арбітражу;
- у МПП «АНГЕР» при розробці архітектури систем моніторингу енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації;
- у навчальний процес кафедри електропостачання (ОК «Сучасні моделі бізнес-процесів в енергетичних компаніях» для ОПП магістрів «Системи забезпечення споживачів електричною енергією»).

## **6. Апробація результатів дисертації**

Основні положення дисертації доповідалися на 14 міжнародних науково-технічних конференціях: «Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС» (Свалява, 2010; Київ, 2022); «International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2017» (Кременчук, 2017, ); «IEEE KhPI Week on Advanced Technology» (Харків, 2020, 2021, 2022); «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS» (Київ, 2020, 2021, 2022, 2023 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетика України: відновлення та модернізація – 2023» (Київ, 2023); міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ, 2017-2019) та на науковому семінарі «Системи енергетичного менеджменту» (Київ, 2022, 2023).



## 7. Оцінка змісту дисертації

У першому розділі проведено аналіз структури та особливостей функціонування локальних електроенергетичних систем з розосередженими енергетичними ресурсами. Детальний аналіз моделей систем з розосередженими енергетичними ресурсами дав змогу виокремити окремі елементи локальних електроенергетичних систем такі, як активні споживачі та віртуальні електростанції.

Проаналізована законодавча база щодо впровадження джерел РГ в Україні дала змогу визначити підґрунтя для забезпечення взаємодії різнотипних розосереджених енергетичних ресурсів шляхом запровадження локальних ринків електричної енергії. Систематизовано основні вимоги до учасників локальних ринків електричної енергії

Проведений аналіз критеріїв оцінювання енергетичної результативності функціонування локальних електроенергетичних систем з розосередженими енергетичними ресурсами дав змогу визначити складові для проведення економічного аналізу означених систем.

Аналіз методів та способи оптимізації техніко-економічних характеристик локальних електроенергетичних систем з розосередженими енергетичними ресурсами дав змогу визначити основні напрямки оптимізації. Проведена класифікація системи керування локальних електроенергетичних систем з джерелами РГ та системами накопичення енергії дала змогу визначити основні напрями роботи систем керування локальних електроенергетичних систем та окреслила напрями агрегування різнотипних джерел РГ та систем накопичення енергії.

Сформовано ієрархічну модель функціонування локальних електроенергетичних систем із різнотипними розосередженими енергетичними ресурсами.

У другому розділі сформовано моделі оптимальної взаємодії активного споживача та локальної електроенергетичної системи шляхом розвитку підходів до визначення технічних та економічних показників функціонування активних споживачів в умовах керування попитом на енергетичні ресурси.

Сформовано баланси миттєвих потужностей для моделей активних споживачів, що містять джерела розосередженої генерації, систему накопичення та мають зв'язок з мережею. Отримані рівняння балансів дали змогу сформулювати задачу оптимізації режимів функціонування активних споживачів, яка дає змогу врахувати економічні, енергетичні та екологічні характеристики їх роботи. Запропонована на їх основі модель оцінювання та показник ефективності функціонування активного споживача, поєднують в собі економічні та енергетичні показники.

Запропонована модель оцінювання ефективності функціонування активного споживача поєднує в собі економічні та енергетичні показники. За аналізу отриманої множини значень запропонованого показника ефективності функціонування активного споживача зроблено висновок, що максимальне його значення можна досягти шляхом збільшення коефіцієнта

автономності роботи активного споживача, а отже частки споживаної електроенергії від джерел РГ та системи накопичення, а також шляхом максимізації прибутку від продажу надлишків генерованої джерелами РГ електроенергії в мережу.

Представлений метод візуалізації показників функціонування активного споживача дає змогу за допомогою діаграм Шумана проводити багатofакторну оцінку ефективності його роботи. Побудовані профілі функціонування активного споживача відображають ефективність його роботи по відношенню до середніх та максимальних значень функцій сформованої оптимізаційної задачі. Запропонований спосіб візуалізації та розширена множина показників дають змогу враховувати структуру та усталені режими роботи активних споживачів на основі їх відхилення від цільових значень заданих функцій.

У третьому розділі узагальнено практичні аспекти оптимальної роботи локальних електроенергетичних систем в умовах агрегування різнотипних розосереджених енергетичних ресурсів. Сформовано оптимізаційну задачу на рівні взаємодії різнотипних розосереджених енергетичних ресурсів між собою у рамках означених систем.

На основі співставного аналізу методів визначення величини питомих витрат на генерацію електроенергії в системах з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами. Удосконалена методологія визначення показника *LCOE* дає змогу врахувати усі типи джерел енергії у локальних електроенергетичних системах та дати відповідні цінові сигнали потенційним інвесторам, котрі збираються інвестувати у розвиток розосереджених енергетичних ресурсів.

Сформована функція, яка дозволяє отримати оцінки рівня нерівномірності споживання електроенергії навантаженнями залежно як від тривалості інтервалів, на яких відбувається постійний відбір потужності, так і інтенсивності розряду накопичувачів на цих інтервалах.

Запропонований показник ефективності запровадження програм керування попитом на електричну енергію дає змогу визначити фактичні можливості споживачів по зміні своїх графіків навантаження, що є вкрай важливо для системного оператора.

Проведено аналіз та сформовано основні функції, які повинна виконувати система моніторингу в локальних електроенергетичних системах з розосередженими енергетичними ресурсами.

У четвертому розділі сформульовано основні вимоги та процедури інтеграції розосереджених енергетичних ресурсів у локальних електроенергетичних системах на основі ринкових моделей взаємодії.

Проведено аналіз функціональних зв'язків елементів локальних електроенергетичних систем на різних рівнях, взаємодії у межах моделі *SGAM*. Визначено, що для різних типів розосереджених енергетичних ресурсів взаємодія на різних рівнях відрізнятиметься. Останнє є важливим, оскільки дало змогу уточнити завдання агрегування розосереджених енергетичних ресурсів у локальних електроенергетичних системах.

Сформована ринкова модель агрегування розосереджених енергетичних ресурсів у локальних електроенергетичних системах, що ґрунтується на апараті теорії ігор та правилах роботи енергетичного ринку України і враховує усі можливі режими функціонування розосереджених енергетичних ресурсів у локальних електроенергетичних системах.

Запропонована теоретико-ігрова модель агрегування розосереджених енергетичних ресурсів у локальних електроенергетичних системах дає змогу сформулювати два стратегічних напрями керування розосередженими енергетичними ресурсами у локальних електроенергетичних системах при їх агрегуванні. Перший напрям дає змогу агрегатору неявно стимулювати розосереджені енергетичні ресурси до максимізації генерування електричної енергії від джерел РГ та систем накопичення електроенергії, а другий створює більш жорсткі умови, котрі стимулюватимуть розосереджені енергетичні ресурси максимально дотримуватися умов контракту.

У п'ятому розділі набули подальшого розвитку теоретико-ігрові моделі оптимальної взаємодії локальних електроенергетичних систем з операторами систем розподілу.

Формалізовано постановку задачі оптимізації для моделей локальних систем з розосередженими енергетичними ресурсами та моделей централізованих електроенергетичних систем у рамках теорії ігор.

Запропонована процедура оптимізації моделі синтезованої системи у рамках формалізованої гри на основі використання механізмів динамічної тарифікації у рамках програм керування попитом, котра дає змогу знайти найбільш оптимальне рішення серед інших оптимальних рішень поставленої ігрової задачі знаходженням рівноважних за Нешем стратегій гравців.

За результатами дослідження запропоновано архітектуру системи Smart-моніторингу локальних електроенергетичних систем із розосередженими енергетичними ресурсами, котра враховує усі типи джерел РГ та систем накопичення енергії та особливості їх функціонування. Дана система працює безперервно в певних часових інтервалах, забезпечуючи обмін інформаційними потоками, які дозволяють, в свою чергу, керувати енергопотоками, забезпечуючи оптимальне функціонування системи моніторингу на всіх трьох рівнях, а відтак і оптимальну роботу локальних електроенергетичних систем.

У шостому розділі запропоновано Механізм оптимальної взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів трьох типів: «Некеровані генерувальні установки РГ», «Керовані генерувальні установки РГ» та «Системи накопичення електричної енергії» з агрегатором/ оператором локальних електроенергетичних систем.

Визначено оптимальні стратегії агрегування різнотипних розосереджених енергетичних ресурсів у локальних електроенергетичних системах на основі визначення рівноваги за Нешем для кожного типу розосереджених енергетичних ресурсів при взаємодії з агрегатором.

Для забезпечення можливості дотримання визначених оптимальних стратегій агрегування різнотипних розосереджених енергетичних ресурсів

сформовано вимоги до процедур моніторингу та керування у локальних електроенергетичних системах.

У цьому розділі розроблено науково-методичне забезпечення підвищення ефективності взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів у локальних електроенергетичних системах.

Розроблена методика підвищення енергетичної ефективності локальних електроенергетичних систем з активними споживачами дає змогу на основі оцінювання технічних та економічних параметрів режимів роботи активних споживачів формувати коригуючі дії щодо режимів їх роботи та визначати потенціал до підвищення ефективності його функціонування, а відтак і до функціонування ЛЕС. Також дана методика дає змогу оцінити потенціал автономної роботи активних споживачів, що вкрай позитивно вплине на режими роботи ЛЕС в умовах російської агресії.

Розроблене нормативно-методичне забезпечення агрегування різнотипних РЕР в ЛЕС дає змогу впроваджувати локальні енергетичні ринки для підвищення автономності роботи ЛЕС із РЕР, що особливо важливо за функціонування ОЕС України в умовах російської агресії.

Вдосконалені теоретико-ігрові моделі взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів із централізованими електроенергетичними системами 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.

## **8. Дотримання принципів академічної доброчесності**

За результатами науково-технічної експертизи дисертація Дерев'янка Д.Г. визнана оригінальною роботою і 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.

**9. Перелік публікацій за темою дисертації** із зазначенням особистого внеску здобувача.

За результатами досліджень опубліковано 29 наукових праць, 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 напрямку, 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.

1. Denysiuk S., Derevianko D., Bielokha H. (2023). Synthesis of Models of the Complex Electric Power Systems. In: Kyrylenko, O., Denysiuk, S., Derevianko, D., Blinov, I., Zaitsev, I., Zaporozhets, A. (eds) Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control, vol 220. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_6)

Аналіз тенденцій розвитку джерел РГ, аналіз методів DSM у ЛЕС із РЕР, формулювання та розв'язання задачі оптимізації режимів роботи та стратегій взаємодії РЕР у ЛЕС з ОЕС України

2. Derevianko D., Zaichenko S. Game-Theoretic Models of Dynamic Pricing in Microgrids with Distributed Generation Sources. In: O. Kyrylenko et al. (eds.), Power Systems Research and Operation, Studies in Systems, Decision and Control 512, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_10)

Аналіз тенденцій розвитку джерел РГ, моделі взаємодії різнотипних РЕР згідно архітектури SGAM, теоретико-ігрова модель агрегування різнотипних РЕР.

3. Дерев'янку Д.Г., Горенко Д.С. Особливості побудови та функціонування віртуальних електростанцій в умовах розвитку ОЕС України. // Енергетика: економіка, технологія, екологія. №3, 2016. С.61-69, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2016.85898>.

Структурна модель віртуальної електростанції

4. Дерев'янку Д.Г. Особливості режимів функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів / Д. Г. Дерев'янку, О. С. Ярмолюк, О. А. Беспалий // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2018. – № 2. – С. 61–67. DOI: 10.30929/2072-2052.2018.2.42.61-67

Особливості режимів функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення з джерелами РГ

5. Дерев'янку Д.Г., Панасенко В.С., Масло О.С., Загорський О.М.. Оцінювання надійності у локальних системах з установками відновлюваної енергетики. // Енергетика: економіка, технологія, екологія. №3, 2019. С.37-45, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2019.196379>.

Структура локальних електроенергетичних систем з різнотипними джерелами РГ та накопичувачами

6. Денисюк С.П., Дерев'янку Д.Г., Горенко Д.С. Особливості оцінювання режимів функціонування локальних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами. // Енергетика: економіка, технологія, екологія. №1, 2020. С.7-20, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2020.217558>.

Структура локальних електроенергетичних систем з різнотипними джерелами РГ та накопичувачами, узагальнені характеристики

накопичувачів, Способи комплексного оцінювання енергетичних процесів у ЛЕС з РГ та накопичувачами на основі методів просторової візуалізації

7. Зайченко С.В., Куліш Р.Д., Дерев'янку Д.Г., Жукова Н.І., Обґрунтування діагностичних параметрів автономних джерел електричної енергії на базі двигуна внутрішнього згорання при розробці системи технічного діагностування. // Енергетика: економіка, технологія, екологія. №3, 2020. С.29-34, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2020.228607>.

модель автономного джерела електричної енергії

8. Дерев'янку Д.Г., Данілін О.В., Гілевич К.М. Особливості блискавкозахисту наземних сонячних електростанцій в Україні. // Енергетика: економіка, технологія, екологія. №4, 2020. С.59-63, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2020.233596>.

Спосіб блискавкозахисту сонячних електростанцій з огляду на режими їх функціонування у різних кліматичних умовах

9. Дерев'янку Д.Г., Колодяжна А.О., Ницун Ю.Г. Особливості визначення економічних показників доцільності впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності. // Енергетика: економіка, технологія, екологія. №2, 2021. С.87-94, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2021.247412>

Класифікація ефектів від впровадження енергоефективних заходів, співставний аналіз економічних показників рентабельності

10. Дерев'янку Д.Г., Беспала Н.Г., Богойко І.І., Колодяжна А.О. Перспективи застосування відновлювальних джерел енергії для тепlopостачання громадських і житлових будівель в Україні. // Енергетика: економіка, технологія, екологія. №2, 2022. С.41-47, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261369>

Аналіз тенденцій розвитку джерел РГ

11. Денисюк С.П., Дерев'янку Д.Г., Белоха Г.С., Зайченко С.В. Цінові моделі агрегування для Microgrid систем з розосередженими джерелами енергії. // Енергетика: економіка, технологія, екологія. №3, 2022. С.7-12, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.270225>

Цінові моделі агрегування для Microgrid систем з розосередженими джерелами енергії що враховують типи джерел РГ

12. Дерев'янку Д.Г., Воробель В.В.. Підвищення ефективності функціонування Microgrid систем з накопичувачами // Енергетика: економіка, технологія, екологія. №4, 2023. С.22-28, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290885>.

Модель цінового арбітражу для систем накопичення електричної енергії

13. Дерев'янку Д.Г., Перегуда О.В.. Особливості побудови систем Smart-моніторингу Microgrid систем // Енергетика: економіка, технологія, екологія. №1, 2024. С.57-64, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.298816>

Структура системи Smart-моніторингу для Microgrid систем з різнотипними джерелами РГ

14. Белоха Г.С., Стржелецьки Р.Х., Дерев'янку Д.Г., Радиш І.П. Аналіз та оптимізація процесів заряду електромобілей в транзактивних

енергетичних системах// Енергетика: економіка, технологія, екологія. №2, 2024. С.59-66, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303076>

Модель транзактивної системи спрямована на зарядку електромобілей

15. Блінов, І., Трач, І., Парус, Є., Дерев'яно, Д. і Хоменко, В. 2022. Регулювання напруги та реактивної потужності в розподільних електричних мережах шляхом використання розосереджених відновлюваних джерел енергії. Технічна електродинаміка. 2022, 2 (Бер 2022), 060. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2022.02.060>.

Оптимізація режимів в СЕП з розосередженими відновлюваними джерелами енергії

16. Денисюк, С., Дерев'яно, Д. і Белоха, Г. 2022. Синтез моделей локальних електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації. Технічна електродинаміка. 2022, 4 (Лип 2022), 048. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2022.04.048>.

Методологія взаємодії ЛЕС з ОЕС України. Теоретико-ігрові моделі оптимальної взаємодії ЛЕС з ОЕС України

17. Денисюк, С., Белоха, Г. і Дерев'яно, Д. (2023) Оптимізація витрат первинного палива на локальних ринках електроенергії в системах з дизель-генераторами. Технічна електродинаміка. № 1 (Січень, 2023), 056. <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.056>.

Модель локального енергетичного ринку з різнотипними джерелами розосередженої генерації

18. Дерев'яно Д.Г., Швірські К. 2024. Побудова моделей оптимальної взаємодії джерел розосередженої генерації та систем акумулювання енергії у межах Microgrid систем. Технічна електродинаміка. 1 (Січ 2024), 053. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2024.01.053>.

Модель оптимальної взаємодії джерел розосередженої генерації та систем акумулювання енергії у межах Microgrid систем

19. Denysiuk, S., Zaichenko, S., Opryshko, V., & Derevianko, D. (2021). Assessment of consumers power consumption optimization based on demand side management. EUREKA: Physics and Engineering, (2), 19-31. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001689>

Використання показника  $Q_{\Phi}$  для оцінювання ефективності функціонування систем з джерелами РГ та активними споживачами

20. S. Denysiuk and D. Derevianko, "A novel method of complex reliability assessment in microgrids with distributed generation," 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2017, pp. 212-215, doi: 10.1109/MEES.2017.8248892.

Модель microgrid з джерелами РГ

21. S. Denysiuk, D. Derevianko and D. Horenko, "Reliability analyses in local power systems with DG sources based on the exchange processes assessment," 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2020, pp. 232-235, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250103.

Методи оцінювання режимів функціонування microgrid з джерелами РГ

22. S. Denysiuk and D. Derevianko, "Optimisation features of energy processes in energy systems with Distributed Generation," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 211-214, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160212.

Алгоритм оптимізації енергетичних систем з джерелами ПГ

23. D. Derevianko and K. Hilevych, "Reliability assessment in local power systems with renewables," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 243-246, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160277.

Модель microgrid з джерелами ПГ

24. S. Zaichenko, S. Shevchuk, R. Kulish, S. Denysiuk, D. Derevianko and V. Opryshko, "Identification of the least reliable elements of autonomous power plant based on internal combustion and diesel engines by the method of the lowest residual entropy," 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2021, pp. 549-552, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570078.

Модель автономного джерела електричної енергії

25. S. Denysiuk and D. Derevianko, "The Cost Based DSM Methods in Microgrids with DG Sources," 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2021, pp. 544-548, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570096.

Цінові моделі керування попитом для Microgrid з джерелами ПГ

26. S. Denysiuk, H. Bielokha, D. Derevianko and B. Vadym, "Design and modeling PV converter with hysteresis control," 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 165-168, doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969345.

Аналіз тенденцій розвитку джерел ПГ,

27. S. Denysiuk, D. Derevianko, H. Bielokha and S. Zaichenko, "Cost-effective Reliability Improvement Methods in Power Systems with Renewables," 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 372-377, doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969244.

Вдосконалений показник визначення питомої собівартості електричної енергії від ПГ

28. S. Denysiuk, D. Derevianko and H. Bielokha, "Dynamic Pricing in Transactive Energy System with Solar, Wind-generators and Diesel Generator," 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1-4. 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10313000.

Модель транзактивної системи з різномісними РЕР

29. D. Derevianko, O. Arlamov, H. Bielokha and K. Liakhova, "Solar PV Systems Installed on Solar Blinds and Shutters to cover the DHW needs in the Mediterranean Countries," 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10311578.

Модель та особливості побудови локальної системи електрозабезпечення



Якість та кількість публікацій відповідають “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”.

ВВАЖАТИ, що дисертаційна робота Дерев’янка Дениса Григоровича «Розвиток наукових засад оптимальної взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів в локальних електроенергетичних системах», що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, є кваліфікаційною науковою працею, виконаною здобувачем самостійно, за своїм науковим рівнем та практичною та теоретичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам п.7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», що їх пред’являють до докторських дисертацій, та паспорту спеціальності 05.14.01 «Енергетичні системи та комплекси».

РЕКОМЕНДУВАТИ дисертаційну роботу «Розвиток наукових засад оптимальної взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів в локальних електроенергетичних системах», подану Дерев’янком Денисом Григоровичем на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, до захисту у спеціалізованій раді Д 26.002.20 за спеціальністю 05.14.01 «Енергетичні системи та комплекси»

Рецензент  
д-р техн. наук, професор



Валерій КИРИК

Рецензент  
д-р техн. наук, професор



Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

Рецензент  
д-р техн. наук, професор



Василь БУДЬКО