НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

ЄВТУХОВА Тетяна Олександрівна

УДК 621.311:697.34

МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ СЕРВІС-ОРІЄНТОВАНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНАЛЬНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Спеціальність 05.14.01 – «Енергетичні системи та комплекси»
Галузь знань 14 – електрична інженерія

РЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, ст. дослідник Олег ДЕКУША

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
Ідентифікаційний код 04589627
М. КИЇВ

Науковий консультант: Нікітін Євген Євгенович
доктор технічних наук, с. н. с.

Київ – 2026

Євтухова Т. О. Методологічні засади сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.14.01 – «Енергетичні системи та комплекси». – Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, 2026.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Стан об'єктів регіональних енергосистем (РЕС), що значною мірою визначають ефективність, самодостатність та стійкість функціонування енергетичної системи України, характеризується високою зношеністю енергетичного обладнання, дефіцитом резервних і маневрових потужностей, низькою гнучкістю попиту – домогосподарства та промисловість не залучені до системного регулювання навантаження, а локальні СЕС, ВЕС, накопичувачі, когенераційні установки не інтегровані у загальну архітектуру управління. Існуюча модель управління не забезпечує достатньої гнучкості реагування на регіональні виклики і кризові ситуації та потребує формування нового підходу, що дозволяє делегувати частину управлінських функцій з національного на регіональний рівень з урахуванням особливостей локальної ресурсної бази, місцевого бізнесу та споживачів, обмежена участь яких у регулюванні навантаження знижує стійкість та ефективність РЕС.

Системний аналіз проблем розвитку РЕС визначив потребу комплексного розв'язання взаємопов'язаних науково-теоретичних і прикладних завдань технічного, економічного, управлінського та людиноцентричного характеру, спрямованих на підвищення ефективності, самодостатності та стійкості функціонування регіональних енергосистем. Вагомий внесок у розв'язання цих науково-теоретичних та прикладних завдань зробили українські та зарубіжні вчені: В. П. Бабак, Б. І. Басок, І. В. Блінов, С. П. , Денисюк, Д. Г. Дерев'янко, М. М. Кулик, В. Р. Купчак, П. Д. Лежнюк, Є. Є. Нікітін, О. В. Новосельцев, Р. З. Подолець, С. Е. Саух, М. К. Сухонос, P. Gaiardelli, C. Grönroos, R. Haas, S. Hansen, I. Karpen, M. Kwon, L. Li, R. Lusch, C. Nolden, F. Polzin, D. Sarno, S. Sorrell, A. Tukker, S. Vargo, C. Vezzoli та інші.

Разом з тим, не вирішеними залишилися теоретико-методологічні завдання з урахування синергетичних ефектів міжсекторальної та територіальної інтеграції енергетичних сервісів, сервіс-орієнтованої взаємодії виробників, споживачів, прос'юмерів та агрегаторів в умовах невизначеності, впливу кризових явищ на ефективність та стійкість РЕС, верифікації та валідації моделей їх розвитку. Тому створення, розроблення та практичне застосування методологічних засад сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, як системоутворюючих складових енергетичної системи України, є актуальною науково-прикладною проблемою, що потребує вирішення.

Мета дисертаційного дослідження – розроблення теоретико-методологічних засад розвитку регіональних енергосистем, що визначають цілісно узгоджену сукупність взаємопов'язаних понять, властивостей і характеристик сервіс-орієнтованого розвитку, та відповідних методів, моделей і механізмів підвищення ефективності, самодостатності та стійкості РЕС у складі інтегрованої енергосистеми України в умовах невизначеності і кризових явищ.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі завдання:

1. Розроблено та науково обґрунтовано теоретико-методологічні засади сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, що ґрунтуються на методах і моделях системної парадигми переходу від продуктової до сервіс-орієнтованої інфраструктури енергозабезпечення регіонів;

2. Розроблено концептуальний підхід до інтеграції енергетичних сервісів, що формалізує створення цінності (корисності) у системі через багатовимірні характеристики ефективності функціонування енергетичної інфраструктури РЕС, економічної результативності енергетичних процесів, якості сервіс-орієнтованої взаємодії учасників ринку та рівня стійкості енергосистеми;

3. Розроблено метод оцінювання стійкості РЕС, визначено параметри інтегрального показника стійкості та проведено оцінювання економічної вартості підвищення стійкості РЕС через показник прихованої вартості стійкості.

4. Розроблено економіко-математичні моделі та відповідне програмно-інформаційне забезпечення моделювання сценаріїв розвитку РЕС в умовах трансформації та проведено розрахунки з урахуванням невизначеності;

5. Проаналізовано результати моделювання та визначено залежність між ефективністю функціонування РЕС та рівнем її самодостатності, гнучкості та стійкості;

6. Розроблено методологічні засади верифікації та валідації результатів моделювання сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, які визначають загальні положення, критерії та методичні підходи до оцінювання достовірності, адекватності й робастності моделей в умовах ризиків і невизначеності.

Об'єкт дослідження – процес розвитку РЕС в умовах децентралізації, зростання частки ВДЕ та вимог до забезпечення стійкості.

Предмет дослідження – теоретичні положення, методи, моделі та механізми створення, функціонування, управління й сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем, спрямовані на підвищення ефективності, самодостатності та стійкості енергозабезпечення регіонів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань були використані методи сервіс-домінантної парадигми як основи теоретико-методологічного підходу до розвитку регіональних енергосистем, теорії системи систем для організації взаємодії інфраструктурних підсистем і об'єктів РЕС, теоретичних положень методологічного підходу «енергія як сервіс» для визначення оптимального розподілу енергоресурсів, методи оптимізації, комп'ютерного моделювання та сценарного аналізу для кількісного оцінювання стійкості енергетичних систем в умовах невизначеності та ризиків, методи економічного аналізу для оцінювання ефективності функціонування РЕС та визначення економічної вартості підвищення їх стійкості.

Наукова новизна: полягає у розвитку теоретичних, методологічних та прикладних засад сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, що забезпечують підвищення їх стійкості, самодостатності та ефективності функціонування в умовах невизначеності, кризових явищ і міжсекторної інтеграції:

1. Уперше розроблено методологічні засади сервіс-орієнтованого розвитку РЕС як складових інтегрованої енергетичної системи країни, що базуються на переході від ресурсної до сервісної моделі балансування енергетичних потоків, інтегральному оцінюванні енергетичної ефективності, самодостатності та стійкості РЕС, а також

багатокритеріальній оптимізації їх структури з урахуванням міжсистемних перетоків електроенергії та накопичення енергії.

2. Уперше запропоновано концептуальний підхід до інтеграції енергетичних сервісів у структуру РЕС, який формалізує процес створення цінності через багатовимірні характеристики сервіс-орієнтованої взаємодії виробників енергії, споживачів, прос'юмерів, агрегаторів та операторів енергетичних сервісів і дозволяє розглядати РЕС як багаторівневу систему систем.

3. Уперше сформульовано теоретичні положення сервіс-орієнтованої моделі функціонування РЕС, відповідно до яких основним об'єктом балансування виступають не енергоресурси, а енергетичні сервіси, що дозволило сформувати новий клас балансів мультисекторних енергетичних систем, що включає баланси енергетичних сервісів, міжсекторних перетворень енергії, втрат енергії, дефіциту енергопостачання як надбудову над традиційними балансами паливно-енергетичних ресурсів та забезпечує перехід від балансування енергії до балансування корисного результату її використання через цільові показники енергозабезпечення.

4. Уперше сформульовано авторське трактування енергетичних сервісів як інтегрованого результату генерації, передачі, розподілу, накопичення, трансформації та управління енергією, яке відображено у багатовимірній класифікації енергетичних сервісів для задач сервіс-орієнтованого розвитку енергетичних систем.

5. Розвинуто метод комплексного оцінювання стійкості РЕС, який, на відміну від існуючих, враховує здатність системи функціонувати в умовах збурень, адаптуватися до змін режимів роботи, забезпечувати балансування навантажень, резервування потужності та відновлення після аварій, що дозволяє визначати граничні витрати підвищення рівня стійкості енергосистеми.

6. Розвинуто метод багатокритеріальної оптимізації структури РЕС, який забезпечує одночасне врахування енергоефективності, енергетичної самодостатності, структурно-режимної стійкості та міжсистемної взаємодії РЕС у складі інтегрованої енергосистеми України.

7. Розроблено економіко-математичну модель і програмно-аналітичний інструментарій сценарного моделювання розвитку РЕС, що відрізняються від

існуючих урахуванням сервіс-орієнтованої взаємодії учасників енергетичної системи та дозволяють оцінювати синергетичні ефекти інтеграції енергетичних сервісів.

8. Дістали подальшого розвитку методи сценарного аналізу функціонування енергетичних систем в умовах кризових впливів і невизначеності, а також методичний підхід до верифікації та валідації моделей розвитку РЕС.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні цілісно узгодженої сукупності методів, моделей та програмно-аналітичного інструментарію, призначених для використання органами державного та регіонального управління, операторами енергетичної інфраструктури й територіальними громадами для кількісного обґрунтування стратегій розвитку РЕС, формування програм підвищення ефективності, самодостатності та стійкості енергозабезпечення регіонів в умовах децентралізації, невизначеності та кризових впливів:

1. Запропоновано метод мультисекторного балансування енергетичних сервісів та систему інтегральних критеріїв, які забезпечують можливість сценарного оцінювання стану РЕС під час системно інтегрованого планування розвитку електроенергетичної, теплової та газової інфраструктури регіонів з урахуванням складу об’єктів генерації, накопичення енергії та механізмів керування попитом.

2. Розроблено підхід до інтегрального оцінювання стійкості енергозабезпечення регіонів, що забезпечує комплексне врахування технічних, економічних та організаційних факторів при прийнятті управлінських рішень щодо оцінювання наслідків пошкодження інфраструктури, дефіциту ресурсів, та зовнішніх загроз, а також може використовуватися для обґрунтування резервування потужностей, підвищення захищеності критичної інфраструктури та підготовки енергетичних планів.

3. Реалізовано сценарний аналіз фронтиру стійкості РЕС, що дозволяє на практиці визначати компроміс між витратами, рівнем енергетичної стійкості, самодостатністю та ефективністю функціонування системи при виборі варіантів модернізації енергетичної інфраструктури.

4. Запропоновано метод оцінювання внеску енергетичних сервісів у забезпечення стійкості РЕС на основі показника Шеплі, який забезпечує можливість

ранжування технологій та сервісів за їх впливом на стійкість системи і може використовуватися для визначення пріоритетів інвестування у ВДЕ, накопичувачі енергії, когенерацію та системи керування попитом.

5. Розроблено підхід до оцінювання невизначеності результатів моделювання розвитку РЕС в умовах обмеженої статистичної інформації та дефіциту даних, що є особливо актуальним для повоєнного відновлення та кризових умов функціонування енергетики України.

6. Розроблено методику кількісного оцінювання обґрунтованості результатів моделювання прогнозних енергетичних систем, що підтверджується не прямим порівнянням з неіснуючим реальним об’єктом, а відповідністю міжнародним принципам верифікації, валідації та кількісної оцінки невизначеності.

7. Результати дослідження використано органами державного управління та в організаціях і провідних науково-дослідних інститутах країни при формуванні напрямів розвитку регіональних енергетичних систем, підвищенні їх енергетичної самодостатності, стійкості й ефективності функціонування та у навчальному процесі вищих навчальних закладів.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях і круглих столах, зокрема: XXI-XXVI конференціях «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», Київ, Україна, 2020-2025; IEEE International conferences on Energy Smart Systems (ESS), Київ, Україна, 2022, 2026 (Scopus); XVIII конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку», Київ, Україна, 2022; «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку», Київ, Україна, 2023; IX та X International conference «Theory and practice of rational use of traditional and alternative fuels and lubricants», Київ, Україна-Польща, 2023, 2025; I, II та IV конференціях «Цифрові технології в енергетиці і автоматиці», Київ, Україна, 2023, 2024, 2026; «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації», Київ, Україна, 2025; «German–Ukrainian forum on reconstruction and innovation», Dresden, Germany, 2026; «Global trends and directions of scientific research

development», Bilbao, Spain, 2026; «International Conference on Environmental Science, Sustainability & Global Innovation», Barcelona, Spain, 2026; Круглому столі «Трансформація енергетичної системи. Виклики та підходи», Київ, Україна, 2025.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто на основі узагальнення результатів досліджень, проведених як індивідуально так і колективно. У дисертації не використовувались ідеї та розробки, що належать співавторам спільно опублікованих наукових праць.

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить: обґрунтування концептуальних засад управління ефективністю функціонування енергосистем на основі енергетичних сервісів [1-3, 28-30, 32]; розроблення методологічних положень формування сервіс-орієнтованих моделей функціонування РЕС у контексті низьковуглецевого переходу [4, 6, 8, 20-22, 25-27, 34]; формування підходу до визначення показників енергоефективності складних енергетичних систем та розроблення окремих положень комплексно збалансованого енергетичного менеджменту [5, 7, 9-11, 14, 15, 17, 18, 29, 31]; розроблення методологічних підходів і математичних моделей формування сценаріїв трансформації РЕС та їх оптимізації на основі методів штучного інтелекту, математичного програмування і динамічного моделювання [6, 8, 9, 11-14, 16, 19, 36]; проведення аналізу ринкових аспектів реформування регіональних систем теплопостачання [11, 13, 23, 24, 33-37]; обґрунтування положень системного підходу до декарбонізації регіональної енергетики та визначення підходів до формування бізнес-моделей сталого енергетичного розвитку РЕС [2, 6-8, 17, 19, 20-29].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відділі прогнозування енергетичної ефективності та перспективних паливно-енергетичних балансів Інституту загальної енергетики НАН України в рамках науково-дослідної роботи НАН України за темою «Розвиток системи математичних моделей довгострокового прогнозування споживання основних видів паливно-енергетичних ресурсів в економіці країни з урахуванням діючих екологічних обмежень» (№ РК 0122U000178); та у відділі трансформації структури паливно-

енергетичного комплексу Інституту загальної енергетики НАН України в рамках науково-дослідної роботи НАН України за темою «Прогнозування обсягів вуглезабезпечення України відповідно до структури її загального енергетичного балансу» (№ РК 0123U100309).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 37 наукових праць, серед яких: 2 монографії, 25 статей у періодичних виданнях, зокрема 9 статей та 4 розділи монографій в іноземних виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних, 6 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 235 найменувань, 3 додатків та містить 31 рисунок та 37 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 362 сторінки.

Основний зміст роботи. Дисертаційна робота присвячена розробці теоретико-методологічних засад сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем, що визначають цілісно узгоджену сукупність взаємопов'язаних методів, моделей і механізмів, які реалізують можливості підвищення ефективності, самодостатності і стійкості функціонування РЕС шляхом зміщення акценту з використання енергії як товару на енергію як послугу для задоволення потреб споживача, і де енергетичні ресурси та технології розглядаються як засоби забезпечення цих потреб. Це здійснено в рамках існуючої моделі функціонування енергетичного сектору України за умов системного застосування на регіональному рівні інтегрованих сервісів з енергоефективності, керування попитом, балансування тощо та удосконалення ринкових (бізнес-моделі, фінансові інструменти, мультиплікатори сервісів), соціальних (споживачі як активні учасники, місцеві енергетичні кооперативи) і цифро-аналітичних компонентів (прогнозування попиту, оптимізація, енергетичний менеджмент). У сервіс-орієнтованій моделі розвитку РЕС цільовим результатом є не оптимальний набір потужностей чи обсяг виробленої енергії як такий, а гарантований рівень енергетичного сервісу, що безпосередньо задовольняє потреби споживача.

У вступі розкрито актуальність напряму досліджень та обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наведено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, вказано зв’язок з науковими програмами, темами, планами, методи досліджень, стан публікацій та апробацію результатів дисертаційного дослідження, наведено відомості про їхнє впровадження та зазначено структуру роботи.

У першому розділі проаналізовано сучасні тенденції розвитку енергетичних систем та особливості функціонування РЕС в умовах трансформації енергетичного сектору країни, розглянуто системну архітектуру та визначено проблеми функціонування регіональної енергетики. Проведено системний аналіз базових методів і моделей сервіс-орієнтованого розвитку РЕС та систематизовано засади сервіс-орієнтованої парадигми їх розвитку на основі теорії системи систем та теорії можливості.

Оскільки у чинному законодавстві України поняття «регіональна енергетична система» та «інтегрована енергетична система» (ІЕС) на сьогодні не мають усталеного нормативного визначення, хоча й активно використовуються у міжнародному та українському науковому просторі, в роботі РЕС визначено як «систему систем» регіонального рівня у складі енергетичної системи країни, що використовує механізми балансування, реагування на попит та управління енергоспоживанням як платформу для сервіс-орієнтованої взаємодії секторів електроенергетики, газо- та теплопостачання, транспорту, комунальної інфраструктури та споживання, розташованих на території регіону (області), та залучає енергосервісні компанії, постачальників енергоефективного обладнання і матеріалів, а також інвесторів як учасників проєктів, спрямованих на підвищення енергоефективності, самодостатності й стійкого енергозабезпечення регіону. ІЕС визначено як «систему систем» національного рівня, яка об'єднує енергетичні сектори країни (електроенергетичний, тепловий, газовий та інші) через фізичні, інформаційні та сервісні зв'язки для координації та балансування потоків енергетичних ресурсів і енергетичних сервісів, забезпечуючи досягнення цілей енергетичної ефективності, самодостатності та стійкості розвитку енергетики країни, недосяжних на рівні

окремих секторів. Це відповідає сучасним тенденціям розвитку світової енергетики, орієнтованим на перехід до інтегрованої багатосекторної моделі, що охоплює усі сектори енергосистеми. ОЕС України в роботі розглядається у межах ІЕС як базовий електроенергетичний сектор, що взаємодіє з тепловими, газовими, накопичувальними та сервісними секторами РЕС через механізми балансування, резервування, цифрової координації та управління енергетичними сервісами.

Під сервіс-орієнтованим розвитком у роботі розуміється процес цілеспрямованого формування структури, функцій та механізмів управління РЕС, у межах якого визначення структури генеруючих, мережевих, накопичувальних і керованих споживчих ресурсів, а також оптимізація режимів їх функціонування здійснюються відповідно до потреб споживачів у конкретних енергетичних сервісах та встановлених параметрів їх надання – корисності, якості, надійності, доступності, гнучкості і стійкості, а енергетичні ресурси та технології розглядаються як засоби забезпечення цих параметрів.

Сервіс-орієнтовану модель розвитку енергетичної інфраструктури РЕС побудовано на платформі системної парадигми переходу від продуктової до сервіс-орієнтованої моделі розвитку енергетичної інфраструктури РЕС, базові положення якої представлено на рисунку 1 у порівнянні з існуючою продукт-орієнтованою парадигмою та оцінкою науково-прикладної значущості сервіс-орієнтованих рішень.

Перехід від продукт-орієнтованого до сервіс-орієнтованого розвитку РЕС означає зміну методології оцінювання функціонування та розвитку інфраструктури енергосистеми, проблему системної інтеграції якої формалізовано у вигляді

$$\mathcal{P} = \{P^{tech}, P^{org}, P^{inst}\}, \quad (1)$$

де: P^{tech} – технічні складові проблеми (зношеність, дефіцит резервів, фізичні пошкодження); P^{org} – організаційно-економічні складові (централізація, відсутність міжрегіональної координації, низька гнучкість попиту); P^{inst} – інституційні складові (невизначеність, відсутність єдиних принципів, процесів і механізмів підвищення енергоефективності, самодостатності та стійкості).

Базова продукт-орієнтована парадигма	Сервіс-орієнтована парадигма	Науково-прикладна значущість сервіс-орієнтованих рішень
1. Централізована модель енергозабезпечення (вертикально інтегроване управління, обмежена роль регіонів)	Надання послуг сервіс-орієнтованої децентралізації, кооперації споживачів, громада як активний суб'єкт управління	Модернізація та підвищення ефективності енергетичного обладнання; залучення місцевих енергоресурсів
2. Товароцентрична логіка ринку паливно-енергетичних ресурсів (енергія – продукт, ціна - основний параметр)	Урахування нематеріальних цінностей (гнучкість, стійкість, прозорість), енергія як сервіс	Реалізація агент-орієнтованої взаємодії виробників і споживачів та гнучкого тарифоутворення
3. Відсутність методології системно-узгодженої децентралізації структури і сервісів РЕС	Удосконалення методологічних підходів теорії системи систем та в задачі децентралізації РЕС	Підвищення стійкості функціонування РЕС, нові структури надання енергосервісних послуг
4. Дисбаланс і прогалини доступу до послуг енергопостачання та споживання	Усунення асиметрії надання послуг шляхом інтеграції сервісів створення кооперaційної вартості	Підвищення енергетичної ефективності, стійкості та самодостатності регіонів
5. Домінування логіки максимізації витрат і втрат енергії на боці споживання	Застосування системно інтегрованих енергетичних послуг	Зниження витрат і втрат енергії з урахуванням регіональних пріоритетів
7. Відсутність формалізованої оцінки ефективності децентралізації енергетики	Визначення інтегрального показника ефективності енергозабезпечення громади	Створення інструменту прийняття управлінських рішень на рівні РЕС
8. Недостатнє урахування соціального виміру в енергомоделях	Інтеграція соціальних чинників в моделі прийняття рішень	Впровадження соціально-орієнтованих сервісних послуг

Рис. 1. Концептуальна платформа сервіс-орієнтованого розвитку РЕС

Напрями оптимального розвитку РЕС визначено шляхом мінімізації зважених втрат $\mathbb{E}[\mathbb{L}]$ з урахуванням невизначеності (дефіцит потужності, погодні фактори, мережні обмеження тощо) та обмежень щодо незбільшення встановленої потужності / виробітку енергії в РЕС

$$\min \mathbb{E}[\mathbb{L}] = f(\text{ENS}, \text{SAIDI}, \text{CI}), \tag{2}$$

де: $\mathbb{L}$ – втрати споживачів / економіки / критичної інфраструктури через порушення у роботі, обмеження, низьку якість постачання; $f(\cdot)$ – збитки, які моделюються як функція індикаторів стійкості / надійності; ENS – недопоставлена енергія споживачам внаслідок відключення / дефіциту / обмежень, кВт·год.; SAIDI – середня тривалість перерви енергопостачання, год/споживача за період, год.; CI – індекс критичності / важливості наслідків, що трактується як ваговий коефіцієнт критичних споживачів /

об’єктів, або інтегральний показник вартості / критичності перерви. Тут і далі ENS, SAIDI, CO_2, показники стійкості тощо визначаються через результати функціонування системи, що залежать від структури генерації, резервів, накопичення, балансування, параметрів попиту та сервісних рішень тощо.

Замість традиційної форми мінімізації обсягів споживання енергії запропоновано функцію максимізації цінності енергетичних сервісів $V_{i,s}$

$$\sum_{i,s} V_{i,s}\,(E, I, T) \rightarrow max, \tag{3}$$

де: E – енергетичні ресурси; I – інституційні параметри; T – технологічна конфігурація РЕС; усе за обмежень. Поняття «цінності» формалізовано через еквіваленти технічно вимірюваних параметрів ключових показників ефективності (KPI) сервіс-орієнтованих послуг (таблиця 1), що розглядаються як функціонали від вектора керування системою.

Таблиця 1 – Технічні еквіваленти цінностей РЕС

Феноменологічна цінність	Технічний еквівалент
Надійність	SAIDI, *SAIFI, ENS
Автономність	*SSR (коефіцієнт енергетичної самодостатності)
Доступність	LCOE, тарифна стабільність
Стійкість	TTR (час відновлення), запас енергії
Екологічна цінність	CO_2/кВт·год, частка ВДЕ

*SAIFI – середня кількість перерв електропостачання, які припадають на одного споживача за певний період; *SSR – відношення обсягу кінцевого енергоспоживання регіону, фактично покритого за рахунок локальних джерел і ресурсів, до загального обсягу його енергетичних потреб за відповідний період.

Розв’язання задач (1)-(3) здійснено на основі положень теорії системи систем (SoS), більш конкретно – як «acknowledged» тип SoS, в межах якого РЕС відображається множиною $\mathcal{R}$ інтегрованих підсистем S_k (секторів), що мають власні цілі, зберігають операційну автономію, але координуються через спільні механізми балансування, резервування, сервісної взаємодії та міжсистемних перетоків

$$\mathcal{R} = \bigcup_{i=1}^{N} S_i, \tag{4}$$

де: координація забезпечується сервісними контрактами, правилами взаємоузгодженого балансування та агрегуванням ресурсів гнучкості. Теорія можливостей за SoS-підходом забезпечує формальний перехід від неповних і наближених даних про складові РЕС до множин допустимих сценаріїв та обмежень

для вибору рішень, що дає підставу оцінювати витрати, забезпеченість енергетичних сервісів, гнучкість і стійкість системи за невизначених вихідних параметрів. При цьому локальне зменшення ENS і SAIDI досягається через керування попитом і накопиченням енергії, зменшення наслідків переривань – через резервне енергозабезпечення об'єктів критичної інфраструктури (CI-backup); а зменшення кількості та тривалості відмов – через сервісну агрегацію.

Проведено аналіз сучасних методів, моделей і механізмів сервіс-орієнтованого розвитку та взаємодії РЕС-ІЕС, сформовано теоретико-методологічні засади розв'язання наявних проблем, упорядковувано можливості їх системного узгодження та сервіс-орієнтованого узагальнення у сфері енергетичних систем, виявлено ключові домінанти та системні протиріччя розвитку РЕС, які зумовили необхідність постановки та комплексного вирішення відповідної науково-прикладної проблеми (рисунок 2).



Рис. 2. Методологічна платформа формулювання науково-прикладної проблеми

Показано, що існуюча концепція не розрахована на реалізацію сучасних можливостей підвищення ефективності, самодостатності та стійкості функціонування РЕС як цілісної системи надання послуг соціальної спрямованості.

У другому розділі систематизовано базові поняття та усунуто термінологічну неоднозначність у концептуальних тлумаченнях понять «енергетичні послуги» і «енергосервісні послуги», визначено основні положення їх інтеграції та запропоновано розглядати як системно інтегровану діяльність у сфері виробництва, перетворення, розподілу, постачання та споживання енергії, спрямовану на створення вимірюваної доданої вартості для надавачів і споживачів шляхом інтеграції енергетичних ресурсів, технологій, організаційних рішень і сервісних дій. Визначено складники інтегрованих сервісних послуг: енергоефективність; гнучкість; балансування / резервування з регіональною пріоритизацією та агрегуванням; надійність / острівність; системно-узгоджене залучення джерел фінансування сервіс-орієнтованих проєктів; моніторинг і верифікація результатів реалізації інвестиційних проєктів; послуги структурно-режимної стійкості РЕС. Розроблено системно узгоджену класифікацію сервісних послуг за технологічними, функціонально-економічними, та екологічними ознаками (рисунок 3).



Рис. 3. Структурні ознаки багатовимірної класифікації сервісних послуг

На відміну від існуючих підходів вперше здійснена інтеграція енергетичних, енергосервісних, управлінських та екологічно орієнтованих послуг РЕС, де кожна послуга виконує чітко визначену системну функцію – від фізичного постачання і споживання енергії до підтримки стійкості, оптимізації режимів та формування доданої вартості.

Проведено формалізацію множини інтегрованих сервісних послуг

$$\mathcal{S} = \mathcal{S}^{\text{base}} \cup \mathcal{S}^{\text{sys}} \cup \mathcal{S}^{\text{eff}} \cup \mathcal{S}^{\text{dig}} \cup \mathcal{S}^{\text{eco}} \cup \mathcal{S}^{\text{sec}}, \quad (5)$$

де: $\mathcal{S}$ – множина сервіс-орієнтованих послуг РЕС; $\mathcal{S}^{\text{base}}$– базові енергетичні послуги; $\mathcal{S}^{\text{sys}}$– системні (надійність, балансування); $\mathcal{S}^{\text{eff}}$ – енергосервісні (ефективність); $\mathcal{S}^{\text{dig}}$ – управлінсько-цифрові; $\mathcal{S}^{\text{eco}}$ – екологічні; $\mathcal{S}^{\text{sec}}$ – структурно-режимної стійкості.

Формалізовано функцію інтегральної корисності портфеля сервіс-орієнтованих послуг РЕС: $\mathcal{V}_{sys} = \sum_{i\in\mathcal{S}} w_i \; U_i(x_i),$ (6)

де: $\mathcal{V}_{sys}$ – інтегральна корисність (цінність) портфеля енергетичних сервісів; $\mathcal{S}$ – множина енергетичних сервісів РЕС; i – індекс сервісу ($i \in \mathcal{S}$); x_i – керована змінна рівня (обсягів) використання i-го сервісу в РЕС (встановленої потужності об'єктів генерації, обсягів керованого попиту, доступних резервів тощо); $U_i(x_i)$ – функція корисності i-го сервісу, відображає залежність показників ефективності, самодостатності, гнучкості, стійкості тощо функціонування РЕС від x_i; w_i – ваговий коефіцієнт значущості i-го сервісу в РЕС, $\sum w_i = 1$.

Визначено складову інтегральної корисності, що виникає внаслідок синергії взаємодії сервісів $\mathcal{V}_{syn} = \sum_{i\in\mathcal{S}} \sum_{j>i} \gamma_{i,j} \; x_i \, x_j$, де: $\mathcal{V}_{syn}$ – синергетична складова інтегральної корисності сервісів; $\gamma_{i,j}$ – коефіцієнт синергії між сервісами i та j; $x_i x_j$ – синергетичний ефект, що виникає за одночасного надання обох сервісів. Системну корисність сервіс-орієнтованих послуг РЕС визначено як:

$$\mathcal{V} = \mathcal{V}_{sys} + \mathcal{V}_{syn}. \quad (7)$$

Визначено умови реалізації ефектів масштабу від впровадження ЕСКО-заходів на множині об'єктів регіону, що потребувало проведення формалізації ризик-орієнтованої процедури кількісного оцінювання очікуваних вигід, у межах якої інтегральна корисність системи коригується з урахуванням ризиків, втрат та обмежень $V^R_{\text{SYS}} = \sum_{i=1}^{N} V_{ES_i} - \sum_{j=1}^{M} \mathbb{E}(L_j),$ (8)

де: V_{SYS}^{R} – ризик-скоригована інтегральна корисність системи; $\mathbb{E}(L_j)$ – оцінка нечітко визначених показників втрат, пов'язаних з L_j-м ризиком; N – кількість послуг, інтегрованих у систему; M – кількість ідентифікованих ризиків.

Цільову функцію (W) системної корисності РЕС, що відображає техніко-економічний і екологічний ефекти та ефект стійкості за рахунок реалізації енергетичних і енергосервісних послуг на рівні системи, представлено у вигляді

$$W = \sum_{\omega} \pi_{\omega} \sum_{n,t} [\, w^{sys} \hat{S}_{n,t,\omega}^{sys} + w^{eff} \hat{S}_{n,t,\omega}^{eff} + w^{dig} \hat{S}_{n,t,\omega}^{dig} + w^{eco} \hat{S}_{n,t,\omega}^{eco} + + w^{sec} \hat{S}_{n,t,\omega}^{sec} - \\ - C_{n,t,\omega}^{\text{PEC}} - \lambda_{n,t,\omega} \mathcal{R}_{n,t,\omega}^{risk}] \to opt, \qquad (9)$$

де: π_{ω} – оцінка невизначеності сценарію ω реалізації послуг, $\sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} = 1$; $\hat{S}_{n,t,\omega}^{sys}$ – параметри системної корисності; $\hat{S}_{n,t,\omega}^{eff}$ – теж, економії енергії та ресурсів; $\hat{S}_{n,t,\omega}^{dig}$ – оптимізації та керованості; $\hat{S}_{n,t,\omega}^{eco}$ – екологічності, $\hat{S}_{n,t,\omega}^{sec}$ – стійкості; $C_{n,t,\omega}^{\text{PEC}}$ – загальносистемних витрат; $\mathcal{R}_{\omega}^{risk}$ – ризику; $w^{(\cdot)} \geq 0$ – вагові коефіцієнти, що відображають системну корисність економії одиниці енергії відповідним сервісом; $\lambda_{n,t,\omega} \geq 0$ – вагові коефіцієнти ризику; n – кількість об'єктів регіону, на яких надається сервіс; t – час.

На відміну від традиційної багатокритеріальної оптимізації енергосистеми, сервіс-орієнтована модель включає у цільову функцію параметри якості енергозабезпечення, враховує сервісну взаємодію між учасниками, інтегрує механізми керування попитом, резервування, накопичення та гнучкості й оцінює результати не лише через мінімізацію витрат, а й через системну корисність енергетичних сервісів. Для обчислення системного результату, сумування по множині сценаріїв у (9) здійснено на основі теорії нечітких множин та теорії можливості, що дозволило оптимізувати функціонування РЕС в умовах невизначеності зовнішніх впливів та режимів роботи.

Включення енергоефективності у цільову функцію (9) означає, що енергоефективність стає системною корисністю, а не локальним ефектом, сервісний рівень якої визначається через граничну системну вигоду, і де оптимізація переходить від мінімізації витрат до максимізації сервісної цінності.

Стійкість РЕС, на відміну від традиційних підходів, формалізовано в межах системи як емерджентний результат взаємодії сервісних підсистем, реалізований через механізм енергія-як-сервіс. Доведено, що стійкість РЕС не може бути забезпечена без сервісної інтеграції енергоефективності, гнучкості та цифрового керування, узгоджених через договірні та інформаційні механізми.

Сформульовано системну задачу максимізації стійкості РЕС

$$\max_{x,u,y}\{\mathcal{R}^{\text{PEC}} - \sum_{\omega\in\Omega}\pi_\omega \cdot C^{\text{PEC}}_{n,t,\omega} - \lambda_{n,t,\omega}\,\mathcal{R}V^{risk}_{n,t,\omega}\}, \quad (10)$$

де: $\mathcal{R}^{\text{PEC}}$ – інтегрований показник системної стійкості РЕС, що відображає сукупний ефект енергоефективних сервісів, зниження ENS (недопостачена електрична енергія), екологічного впливу та ризиків функціонування; x – інвестиційні рішення (резерви, накопичення, модернізація); u – функція керування режимами; y – вибір типу сервісного договору; $\mathcal{R}V^{risk}_{n,t,\omega}$ – ризик недосягнення заданого рівня стійкості; усе за обмежень потужності, автономності та M&V-узгодженості.

Аналогічно сформульовані системні задачі оптимізації критеріїв ефективності, самодостатності і ENS та на їх основі формалізовано вектор цільових результатів сервіс-орієнтованого розвитку РЕС у вигляді

$$\mathrm{q}_{t,c,\omega} = \left(F_{t,\omega}, S^c_{t,\omega}, k^c_{cov,t,\omega}, E^{dev}\right), \quad (11)$$

де: $F_{t,\omega}$ – інтегральний часовий показник гнучкості; $S^c_{t,\omega}$ – показник самодостатності, що характеризує здатність РЕС покривати потребу в енергетичних сервісах за рахунок локальних джерел, накопичувачів, керування попитом і координованої взаємодії енергетичних підсистем; $k^c_{cov,t,\omega}$ – показник покриття попиту системи; E^{dev}_t – ефективність сервіс-орієнтованого розвитку, що визначається співвідношенням приросту інтегральної цінності РЕС і витрат на реалізацію відповідного напряму. Розв'язання задач оптимізації розвитку РЕС здійснено у класі задач нелінійного програмування з цілочисельними змінними (MINLP), що дозволило врахувати як індивідуальну корисність енергетичних сервісів, так і синергетичні ефекти їх взаємодії.

У третьому розділі розроблено методологічні положення балансово-оптимізаційного підходу до моделювання РЕС як складових ІЕС країни з урахуванням

специфіки формування інтегрованого енергетичного та енергосервісного балансів, визначено їх структурно-логічну архітектуру та функціональне призначення, алгоритмічну послідовність побудови і застосування, здійснено формалізацію балансово-оптимізаційних рівнянь взаємодії РЕС-ІЕС. Враховуючи складності прямого розв'язання цієї задачі, запропоновано використання теоретико-методологічних положень сервіс-домінантної парадигми та теорії системи систем.

У загальному вигляді модель ІЕС представлено операторним рівнянням, у якому система взаємопов'язаних балансних співвідношень подається у вигляді відображення оператора $\Phi(\cdot)$ від простору змінних стану системи

$$\Phi\left(D^{\text{serv}},\ S^{\text{serv}},\ ENS,\ X^{\text{conv}},\ SOC,\ P^{\text{flow}},\ Loss,\ Reserve,\ S_{int},\ I_{3E}\right) = 0, \quad (12)$$

де: $\Phi(\cdot)$ – оператор узгодження системи балансів регіональних підсистем; D^{serv} – вектор попиту на енергетичні сервіси; S^{serv} – вектор фактично забезпечених енергетичних сервісів; ENS – вектор дефіциту сервісів; X^{conv} – вектор міжсекторних перетворень енергії; SOC – теж, станів накопичувачів, P^{flow} – міжрегіональних перетоків, $Loss$ – втрат енергії, $Reserve$ – резервів потужності; S_{int} – інтегральних показників самодостатності системи, I_{3E} – інтегральних показників 3Е-ефективності (енергетика, економіка, екологія).

На відміну від традиційного підходу, в якому розвиток енергетичних систем описується через систему балансів паливно-енергетичних ресурсів, у роботі використано інтегровану систему балансування, що поєднує класичні енергетичні баланси електро-, тепло- і газопостачання з балансами енергетичних сервісів. Це дозволило здійснювати оцінювання не тільки фізичних потоків енергії, а й результатів її використання у вигляді енергетичних сервісів, що забезпечують досягнення цільових параметрів ефективності, самодостатності та стійкості РЕС. Базовим є баланс надання енергетичних сервісів у регіоні

$$D_{r,t}^{k} = S_{r,t}^{k} + ENS_{r,t}^{k}, k \in \{e, h, g\}, \quad (13)$$

де: $D_{r,t}^{k}$ – обсяг попиту на енергетичний сервіс типу k у регіоні r в момент часу t; $S_{r,t}^{k}$ – фактично забезпечений обсяг енергетичного сервісу типу k; $ENS_{r,t}^{k}$ – ненаданий обсяг енергетичного сервісу.

Баланс регіонального електроенергетичного сектору представлено як

$$G_{r,t} + RES_{r,t} + E_{r,t}^{CHP} + Discharge_{r,t} + NetImport_{r,t} = D_{r,t}^{e} + Charge_{r,t} + E_{r,t}^{HP} + \\ + Loss_{r,t}^{e} + ENS_{r,t}^{e}, \quad (14)$$

де: $G_{r,t}$ – обсяг традиційної генерації електроенергії; $RES_{r,t}$ – генерація ВДЕ; $E_{r,t}^{CHP}$ – виробництво електроенергії когенераційними установками; $NetImport_{r,t}$ – обсяг імпорту електроенергії з ІЕС; $Discharge_{r,t}$ – розряд накопичувачів електроенергії; $D_{r,t}^{e}$ – обсяг електроенергетичного сервісу; $Charge_{r,t}$ – заряд накопичувачів електроенергії; $E_{r,t}^{HP}$ – електроенергія, спожита тепловими насосами; $Loss_{r,t}^{e}$ – втрати електроенергії; $ENS_{r,t}^{e}$ – дефіцит електроенергетичного сервісу. Аналогічно представлені баланси регіонального теплоенергетичного та газового секторів; баланс міжсекторних перетворень енергії формалізовано у вигляді $E_{r,t}^{CHP} = \eta_{CHP}^{e} Gas_{r,t}^{CHP}$, $Q_{r,t}^{CHP} = \eta_{CHP}^{h} Gas_{r,t}^{CHP}$, $Q_{r,t}^{HP} = COP_{r,t}\, E_{r,t}^{HP}$, де: η_{CHP}^{e} – електричний ККД когенераційної установки; η_{CHP}^{h} – тепловий ККД когенераційної установки; $COP_{r,t}$ – коефіцієнт перетворення теплового насоса; баланс міжрегіональних перетоків електроенергії представлено як $0 \le P_{rs,t} \le A_{rs}\bar{P}_{rs}$, де: $P_{rs,t}$ – перетік електроенергії з регіону r до регіону s; $\bar{P}_{rs}$ – пропускна здатність міжрегіонального зв'язку; A_{rs} – елемент матриці суміжності (наявність ліній електропередачі), а баланс резервів потужності – як $Reserve_{r,t} = Cap_{r,t}^{avail} - Load_{r,t} \ge Reserve_{r,t}^{min}$, де: $Reserve_{r,t}$ – резерв потужності; $Cap_{r,t}^{avail}$ – доступна встановлена потужність; $Load_{r,t}$ – навантаження регіону; $Reserve_{r,t}^{min}$ – нормативний резерв. У цілому, розглянута модель сервіс-орієнтованого розвитку РЕС забезпечує відтворення базових структурно-функціональних зв'язків між виробництвом, перетворенням і споживанням енергії з урахуванням ВДЕ, накопичувачів, керованого попиту, розподіленої генерації та механізмів гнучкості, що дає змогу дослідити перспективні напрямки розвитку РЕС.

У четвертому розділі розроблено засади цілісно-узгодженого забезпечення ефективності, стійкості та самодостатності РЕС, формалізовано параметри моделі багаторівневої оптимізації як системи систем, встановлено взаємозв'язок енергоефективності та сервісу з її підвищення, формалізовано засади включення

сервісних послуг у цільову функцію РЕС в умовах SoS-взаємодії підсистем, розроблено модель екологічної компоненти сервіс-орієнтованого розвитку РЕС та модель цілісно-узгодженого забезпечення стійкості та самодостатності РЕС, показано, що результати сервісу охоплюють економію енергії, зміну пікового навантаження, резервів, незабезпеченого попиту, витрат і викидів.

З метою формалізації, кожну i-ту підсистему S_i РЕС, як системи систем, представлено вектором стану $\boldsymbol{x_i}(t) = [P_i(t), Q_i(t), E_i(t), R_i(t), C_i(t), Em_i(t)]$, де: $P_i(t)$ – активна потужність або відповідна характеристика потужності i-ї підсистеми, МВт; $Q_i(t)$ – теплова потужність або, для електричної підсистеми, реактивна потужність залежно від конкретної постановки, МВт або Мвар; $E_i(t)$ – запас чи обсяг енергетичного ресурсу i-ї підсистеми, МВт·год або в одиницях відповідного енергоносія; $R_i(t)$ – доступний резерв потужності i-ї підсистеми, МВт; $C_i(t)$ – витрати, пов'язані з функціонуванням i-ї підсистеми за інтервал t, грн або грош. од.; $Em_i(t)$ – обсяг викидів або інтегральний екологічний вплив i-ї підсистеми. Вектор керуючих змінних i-ї підсистеми визначено як $\boldsymbol{u}_i(t) = \left[P_i^{gen}, P_i^{ch}, P_i^{dis}, P_i^{DR}, P_i^{imp}, P_i^{exp}, u_i^{serv}\right]$, де: P_i^{gen} – керована потужність генерації, МВт; P_i^{ch} – потужність заряджання накопичувача, МВт; P_i^{dis} – потужність розряджання накопичувача, МВт; P_i^{DR} – потужність зміни навантаження внаслідок керування попитом, МВт; P_i^{imp} – потужність імпорту енергії до підсистеми/РЕС, МВт; P_i^{exp} – потужність експорту енергії з підсистеми/РЕС, МВт; u_i^{serv} – сукупність керуючих змінних, що характеризують активацію та масштаб сервісних рішень.

Задачу багаторівневої оптимізації РЕС формалізовано у вигляді

$$\mathbf{u}^* = \underset{\mathrm{u}}{\operatorname{argmax}}\, F_{SoS}(F_{IES}, F_{RES}, F_1, \dots, F_N), \tag{15}$$

де: u^* – оптимальний вектор керуючих рішень; F_{SoS} – цільова функція системи систем; F_{IES} – цільова функція ІЕС; F_{RES} – інтегрована цільова функція регіонального рівня; F_i – цільові функції окремих регіонів.

Повну економічну цінність сервісу для РЕС визначено як

$$V_{EE}^{sys} = V_{energy} + V_{peak} + V_{reserve} + V_{ENS} + V_{grid} + V_{env} - C_{serv}, \tag{16}$$

де: V_{energy} – вартість зекономленої енергії; V_{peak} – цінність зниження пікового навантаження; $V_{reserve}$ – цінність зменшення потреби в резерві; V_{ENS} – цінність скорочення незабезпеченої енергії; V_{grid} – ефект зменшення мережевого навантаження; V_{env} – екологічна цінність; C_{serv} – повна вартість реалізації сервісу; $V_{ENS} = VoLL \cdot \Delta ENS_{EE}$, де $VoLL$ – питома економічна оцінка вартості недопоставленої енергії.

Формалізовано процедуру моделювання екологічної компоненти SoS: $\mathrm{u}_s \rightarrow \Delta \mathrm{E}_s \rightarrow \Delta \mathrm{Em}_s \rightarrow \{I_{env,s}, V_{env,s}\} \rightarrow F_{SoS}$, де u_s – вектор рішень сервісу s; $\Delta \mathrm{E}_s = [\Delta E_{el}, \Delta E_{heat}, \Delta E_{gas}, \Delta E_{fuel}, \Delta E_{imp}]$ – зміна енергетичних потоків; $\Delta \mathrm{Em}_s$ – вектор змін викидів; $I_{env,s}$ – інтегральний індекс екологічної результативності сервісу s; $V_{env,s}$ – його екологічна цінність; F_{SoS} – цільова функція SoS.

Величину незабезпеченої енергії критичних споживачів визначено як $ENS^{crit} = \sum_t max\left(0, P_{crit,t} - P_{sup,t}^{crit}\right)\Delta t$, МВт·год, а для урахування диференціації наслідків порушення за категоріями споживачів залучено зважений показник $WENS = \sum_c \omega_c \, ENS_c$, де: $P_{crit,t}$ – потреба критичних споживачів у потужності у момент часу t, МВт; $P_{sup,t}^{crit}$ – фактично забезпечена потужність критичних споживачів у момент часу t, МВт; $(P_{crit,t} - P_{sup,t}^{crit})$ – дефіцит потужності для критичних споживачів, МВт; c – категорія споживачів; ω_c – коефіцієнт критичності. Новим у моделі є показник сервісно-забезпеченої самодостатності

$$SSR_t^{serv} = SSR_t^{op} A_t^{local} F_t^{local} N_t^{avail}, \tag{17}$$

де: SSR_t^{op} – оперативна самодостатність; A_t^{local} – коефіцієнт фактичної доступності локальних енергетичних ресурсів; F_t^{local} – коефіцієнт гнучкості та керованості локальних ресурсів; N_t^{avail} – коефіцієнт доступності мережевої інфраструктури, необхідної для передачі локально виробленої енергії споживачам; SSR^{serv} – інтегральна сервісно-забезпечена самодостатність РЕС за розрахунковий період. Через неадитивність сервісних ефектів внесок окремих ресурсів до стійкості та самодостатності визначено через показник Шеплі.

У п'ятому розділі наведено результати сценарно-оптимізаційного дослідження розвитку РЕС на репрезентативній моделі Хмельницької області, досліджено вплив зовнішніх збурень і зміни сервісно-технологічної конфігурації на системні витрати, незабезпечену енергію, самодостатність і стійкість, побудовано межу компромісних рішень «витрати–стійкість» та визначено підходи до оцінювання граничних витрат на посилення стійкості й внесків окремих ресурсів у спільний результат, розроблено методику оцінювання достовірності й стійкості результатів моделювання та забезпечення гарантованої результативності сервісно-інвестиційних рішень РЕС в умовах невизначеності.

Сценарний аналіз використано як базовий структуроутворюючий інструмент, придатний для урахування довгострокових структурних та інституційних невизначеностей, для яких визначення імовірностей не може бути достатньо обґрунтованим. Для заданого вектора керованих рішень x щодо структури, потужностей, режимів і сервісних засобів розвитку РЕС результат сценарного моделювання визначається як $Y_s = F(x, S_s)$, де: Y_s – вектор результуючих показників моделювання для *s*-го сценарію (витрати, енергоефективність, гнучкість, стійкість, самодостатність, ENS та інші системні й сервісні показники); S_s – множина можливих сценаріїв; $F(\cdot)$ – цільова або результуюча функція моделі, що встановлює залежність показника результативності від керованих рішень і невизначених умов.

Для кожного сформованого сценарію розвитку РЕС розв'язано оптимізаційну задачу $\mathrm{x}_s^* = \underset{\mathrm{x}\in X_s}{\operatorname{argmin}} F(\mathrm{x};\theta_s)$, де x_s^* – оптимальне рішення для сценарію s; X_s – множина допустимих рішень; F – цільова функція; θ_s – вектор сценарних параметрів. З урахуванням сервіс-орієнтованої концепції цільова функція відображає не лише прямі витрати на енергозабезпечення, але й вартісні наслідки дефіциту енергетичних сервісів, недостатньої гнучкості, порушення надійності та інших небажаних станів

$$F_s = C_s^{inv} + C_s^{op} + C_s^{fuel} + C_s^{grid} + C_s^{em} + C_s^{serv}, \tag{18}$$

де: C_s^{inv} – приведені інвестиційні витрати; C_s^{op} – експлуатаційні витрати; C_s^{fuel} – витрати на паливо; C_s^{grid} – витрати, пов'язані з обміном з ІЕС та використанням мереж; C_s^{em} – екологічні витрати; C_s^{serv} – вартісна оцінка незабезпечених або

недостатньо забезпечених сервісних потреб. Для кожного сценарію перевіряється виконання балансових, технічних, економічних, екологічних та сервісних обмежень: $\mathrm{h}(\mathrm{x}_s, \theta_s) = 0; \mathrm{g}(\mathrm{x}_s, \theta_s) \leq 0$, де h – система рівнянь енергетичних і сервісних балансів; g – система нерівностей, що визначають допустимі межі технологічних, ресурсних, економічних, екологічних та інфраструктурних параметрів, та формується множина сценарно-оптимальних рішень $\mathcal{X}^* = \{\mathrm{x}_0^*, \mathrm{x}_1^*, \dots, \mathrm{x}_N^*\}$. У процесі порівняння сценаріїв сервіс-орієнтованого розвитку РЕС для кожного сценарію s формується вектор результативності

$$\mathrm{K}_s = [TC_s, EE_s, Flex_s, Res_s, SSR_s, ENS_s, SI_s], \quad (19)$$

де: TC_s – сукупні системні витрати; EE_s – показник енергоефективності; $Flex_s$ – показник гнучкості; Res_s – показник стійкості; SSR_s – коефіцієнт самодостатності; ENS_s – обсяг незабезпеченої енергії; SI_s – інтегральна характеристика забезпечення сервісних потреб.

Цільову функцію репрезентативної моделі сформовано як сукупні приведені витрати функціонування РЕС з урахуванням витрат генерації, палива, зовнішнього обміну, використання сервісів гнучкості та економічної оцінки незабезпеченого попиту

$$\min\ \mathrm{TC} = \sum_{\mathrm{t}\in\mathcal{T}}\left(\mathrm{C}_{\mathrm{gen,t}} + \mathrm{C}_{\mathrm{RES,t}} + \mathrm{C}_{\mathrm{grid,t}} + \mathrm{C}_{\mathrm{BESS,t}} + \mathrm{C}_{\mathrm{DR,t}} + \mathrm{C}_{\mathrm{fuel,t}} + \mathrm{C}_{\mathrm{ENS,t}}\right), \quad (20)$$

де: TC – сукупні системні витрати; $\mathrm{C}_{\mathrm{gen}}$, $\mathrm{C}_{\mathrm{RES}}$, $\mathrm{C}_{\mathrm{grid}}$, $\mathrm{C}_{\mathrm{BESS}}$, C_{DR}, $\mathrm{C}_{\mathrm{fuel}}$, $\mathrm{C}_{\mathrm{ENS}}$ – складові системних витрат; вартісна складова незабезпеченого попиту $\mathrm{C}_{\mathrm{ENS,t}} = \mathrm{VoLL}_{\mathrm{E}}\mathrm{U}_{\mathrm{E,t}} + \mathrm{VoLL}_{\mathrm{H}}\mathrm{U}_{\mathrm{H,t}} + \mathrm{VoLL}_{\mathrm{G}}\mathrm{U}_{\mathrm{G,t}}$, де $\mathrm{VoLL}_{\mathrm{E}}$, $\mathrm{VoLL}_{\mathrm{H}}$, $\mathrm{VoLL}_{\mathrm{G}}$ – вартісна оцінка незабезпечення відповідного енергетичного сервісу.

Вихідні параметри репрезентативної моделі РЕС представлено в таблиці 2, де через відсутність повного набору офіційних статистичних рядів частина значень має розрахунковий характер, який визначає потенціал локальних ресурсів і сервісних технологій за результатами модельного експерименту, внаслідок чого модель не враховує специфіку РДН/ВДР/БР, обмеження конкретних генеруючих блоків, повний річний хронологічний ряд або ймовірнісну модель аварійності. Водночас вона дозволяє вирішувати сформульовані у дисертації задачі, методологічно важливі для

розвитку та функціонування РЕС, насамперед ефекти заміщення між локальними та зовнішніми ресурсами, роль накопичення і DR, міжсекторне перетворення E–H–G, економічну ціну дефіциту, зміну стійкості та формування сервісно-орієнтованої конфігурації РЕС.

Таблиця 2 – Вихідні параметри моделі

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Річне споживання електроенергії	D_E^{yr}	2 180 000	МВт·год
Середнє добове споживання електроенергії	D_E^{day}	6 000	МВт·год
Пікове електричне навантаження	P_{peak}	398	МВт
Річне споживання теплової енергії	D_H^{yr}	1 350 000	МВт·год
Річне споживання природного газу	D_G^{yr}	330	млн м³
Репрезентативна доступна традиційна генерація	P_G^{max}	580	МВт
Потенціал сонячної генерації	P_{PV}^{pot}	225	МВт
Потенціал вітрової генерації	P_W^{pot}	160	МВт
Потенціал біоенергетики	P_{Bio}^{pot}	80	МВт
Потенціал керування попитом	P_{DR}^{pot}	80	МВт
Потужність накопичувачів	P_{BESS}	130	МВт
Ємність накопичувачів	E_{BESS}	500	МВт·год
ККД накопичувачів	η_{BESS}	0,90	–
ККД котельних установок	η_{boil}	0,92	–
ККД когенерації, електричний	$\eta_{CHP,E}$	0,38	–
ККД когенерації, тепловий	$\eta_{CHP,H}$	0,45	–
Вартість втраченого навантаження	$VoLL_E$	6 000	€/МВт·год
Мінімально допустимий індекс стійкості	R_{min}	0,92	–

Примітка: Параметри таблиці сформовано на основі доступних даних Державної служби статистики України, Хмельницької обласної військової адміністрації, АТ «НАЕК «Енергоатом», НКРЕКП та зарубіжних публікацій із подальшою параметризацією відповідно до цілей модельного експерименту і не інтерпретуються як точне відтворення фактичного енергетичного балансу Хмельницької області.

Систематизований перелік сервісних ресурсів РЕС представлено у таблиці 3.

Таблиця 3 – Портфель сервісних ресурсів РЕС

Сервісний ресурс	Позначення	Основна функція	Потенціал
Відновлювана генерація	RES	декарбонізація та диверсифікація генерації	720 МВт
Керування попитом	DR	зменшення пікового навантаження	120 МВт
Накопичувачі енергії	BESS	балансування та резервування	200 МВт
Сервіси гнучкості	Flex	оперативне балансування	150 МВт
Когенерація	CHP	спільне виробництво електроенергії і тепла	300 МВт
Power-to-Heat	P2H	інтеграція електричної та теплової підсистем	80 МВт
Резервна генерація	RG	підвищення надійності та стійкості	250 МВт
Віртуальні електростанції	VPP	агрегування розподілених ресурсів	180 МВт

У таблиці 4 представлено результати розрахунку базового (S_0) стану РЕС.

Таблиця 4 – Результати розрахунку базового стану РЕС

Показник	Позначення	Значення	Одиниця
Сукупні системні витрати	TC	1,168	млрд €/рік
Генерація традиційних джерел	E_G	1 320 000	МВт·год
Генерація ВДЕ	E_{RES}	737 000	МВт·год
Частка ВДЕ	s_{RES}	33,8	%
Використання DR	P_{DR}	54,5	МВт
Використання BESS	$P_{BESS,use}$	89,8	МВт
Недопостачання електроенергії	ENS_E	2 890	МВт·год
Недопостачання тепла	ENS_H	1 160	МВт·год
Недопостачання газу	ENS_G	0	МВт·год
Загальний ENS	ENS	4 050*	МВт·год
Індекс стійкості електричної підсистеми	R_E	0,946	–
Індекс стійкості теплової підсистеми	R_H	0,992	–
Індекс стійкості газової підсистеми	R_G	1,000	–
Інтегральний індекс стійкості	R_{int}	0,946	–

Розподілення системних витрат РЕС у базовому стані наведено на рисунку 4.

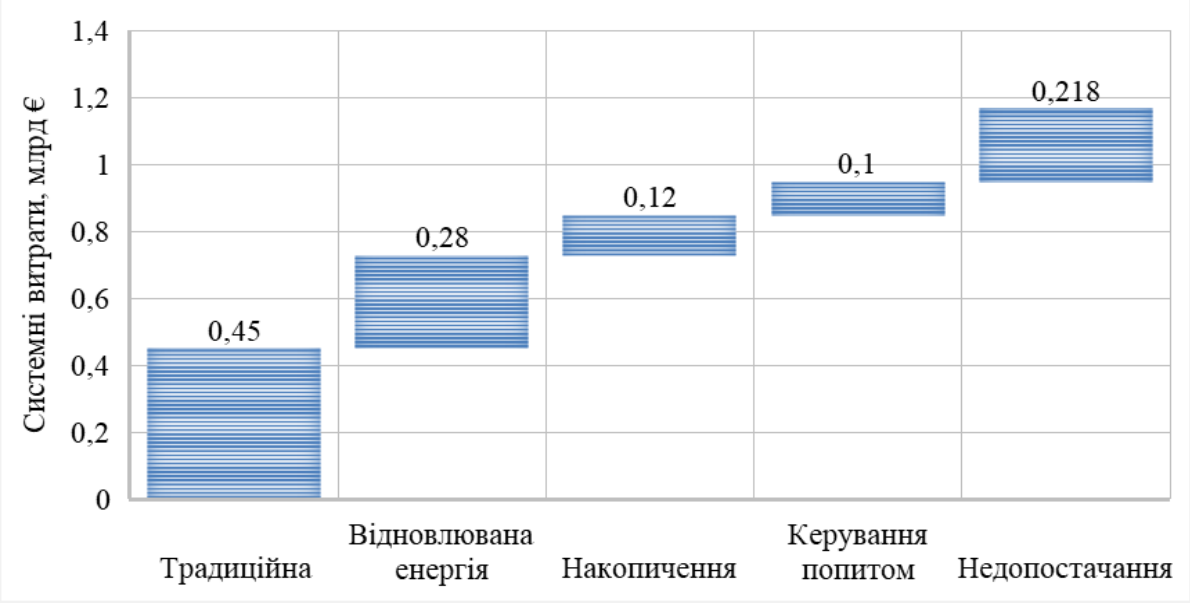


Рис. 4. Структура системних витрат репрезентативної РЕС у базовому стані

Здійснено розмежування двох вимірів модельного експерименту, де перший утворюють сценарії зовнішніх умов $S_0 - S_6$, які характеризують ризикові та кризові впливи, а другий – альтернативні сервісні конфігурації $A_0 - A_4$, що визначають ступінь насичення РЕС ВДЕ, накопиченням та керуванням попитом. Результати розрахунку альтернативних сервісних конфігурацій розвитку РЕС представлено в таблиці 5.

Значення $A_0 - A_4$ отримано з фронтір-розрахунку і описують послідовне розширення сервісних можливостей системи, що дає змогу надалі вирішити задачу «яка конфігурація A_i краще зберігає результативність за сценарію S_i».

Таблиця 5 – Альтернативні сервісні конфігурації

Альтернатива	Характеристика	ВДЕ, %	BESS, МВт	DR, МВт	Інтерпретація
A_0	Базова	34	89,8	54,5	референтна конфігурація
A_1	Підвищена частка ВДЕ	42	102,7	57,7	посилення диверсифікації
A_2	ВДЕ + накопичення	45	141,1	61,0	розширення балансування і резерву
A_3	Висока гнучкість	48	166,8	77,0	посилення BESS і DR
A_4	Максимальна стійкість	52	205,3	96,2	максимальне сервісне насичення

Результати моделювання за сценаріями $S_0 - S_6$ наведено у таблиці 6.

Таблиця 6 – Результати моделювання за сценаріями S_0-S_6

S	ТС, млрд €	ENS, МВт·год	ВДЕ, %	BESS, МВт	DR, МВт	R
S_0	1,168	4 042	34	89,8	54,5	0,946
S_1	1,245	7 186	32	109,1	70,6	0,931
S_2	1,264	8 854	31	115,5	73,8	0,924
S_3	1,219	6 159	22	102,7	61,0	0,938
S_4	1,277	9 752	33	121,9	83,4	0,919
S_5	1,206	5 710	34	99,4	57,7	0,941
S_6	1,450	15 719	30	134,7	96,2	0,894

Найбільш несприятливим очікувано є сценарій S_6, за яким порівняно з S_0 системні витрати зростають з 1,168 до 1,450 млрд €, ENS – з 4042 до 15719 МВт·год, а індекс стійкості знижується з 0,946 до 0,894. Одночасно використання BESS зростає до 134,7 МВт, а DR – до 96,2 МВт, що демонструє компенсуючу роль сервісів гнучкості та показує, що за комбінованої кризи наявного сервісного ресурсу недостатньо для утримання R на мінімально прийнятому рівні 0,92. Серед одиничних збурень найбільш суттєве погіршення за інтегральним критерієм спостерігається у S_4: R = 0,919 та ENS = 9752 МВт·год; S_2 дає R = 0,924 при ENS = 8854 МВт·год; низька генерація ВДЕ S_3 і мережеві обмеження S_5 мають відносно менший вплив на R, хоча також збільшують ENS і системні витрати.

Проведено аналіз та визначено межу ефективності (фронтір) сервісних конфігурацій РЕС, результати якого представлено у таблиці 7 та на рисунку 5.

Таблиця 7 – Фронтир сервісних конфігурацій РЕС

A	ВДЕ, %	BESS, МВт	DR, МВт	R	ТС, млрд €
A_0	34	89,8	54,5	0,946	1,168
A_1	42	102,7	57,7	0,952	1,213
A_2	45	141,1	61,0	0,958	1,258
A_3	48	166,8	77,0	0,965	1,315
A_4	52	205,3	96,2	0,973	1,424

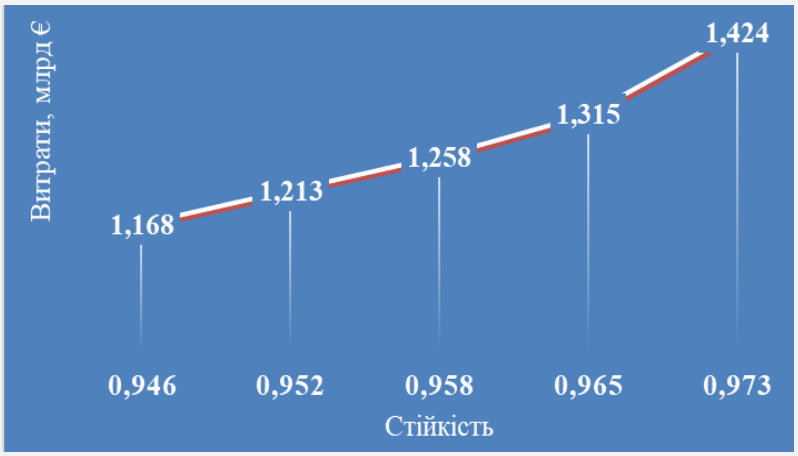


Рис. 5. Фронтир системних витрат і стійкості

Визначено, що перехід від A_0 до A_4 підвищує індекс стійкості з 0,946 до 0,973, але супроводжується зростанням системних витрат з 1,168 до 1,424 млрд €, водночас зростання R формується не одним ресурсом: частка ВДЕ збільшується до 52 %, BESS – до 205,3 МВт, а DR – до 96,2 МВт. Тривимірна поверхня системних витрат РЕС, представлена на рисунку 6, відображає характер взаємозв'язку між часткою ВДЕ, стійкістю та системними витратами.

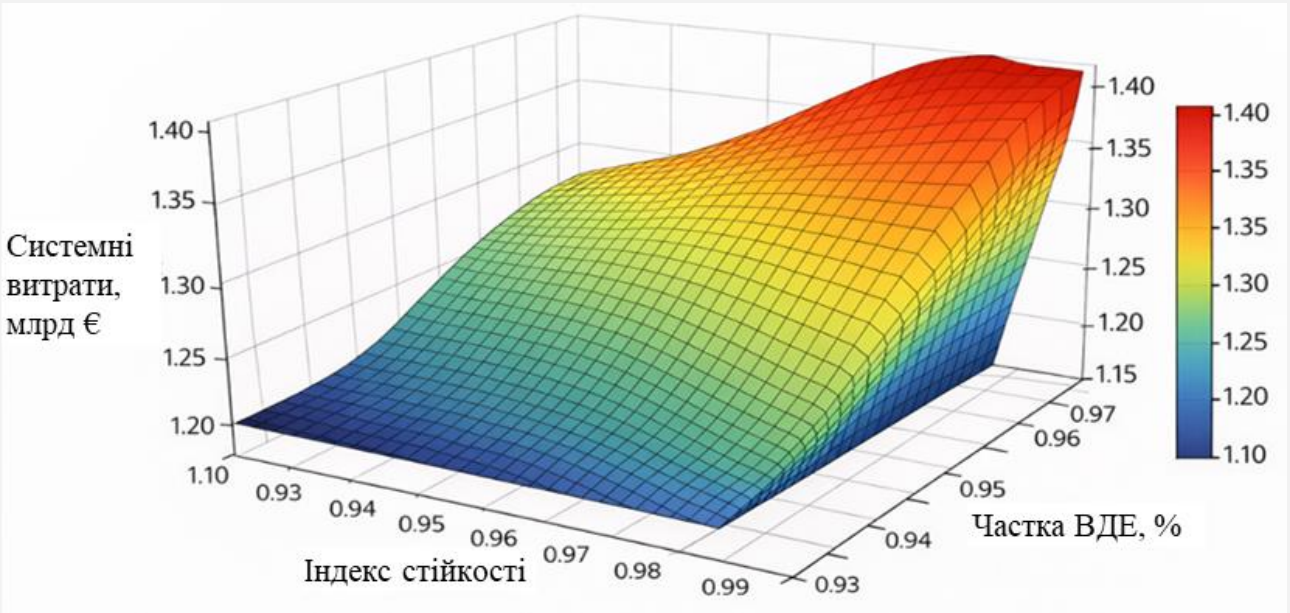


Рис. 6. Тривимірна поверхня системних витрат РЕС

Для декомпозиції сукупного приросту стійкості між окремими сервісними ресурсами застосовано метод Шеплі, який дає змогу визначити граничний внесок кожного елемента з урахуванням усіх можливих комбінацій його взаємодії з іншими елементами системи. Результати розрахунку представлено у таблиці 8.

Таблиця 8 – Внесок сервісів у стійкість за показником Шеплі

Сервіс	Значення Шеплі	Частка	Інтерпретація
ВДЕ	0,017	41 %	диверсифікація генерації
BESS	0,010	24 %	балансування та резерв
DR	0,007	17 %	зниження пікових навантажень
Сервіси гнучкості	0,005	12 %	оперативне балансування
CHP	0,002	6 %	стабілізація теплової підсистеми

Показано, що найбільший внесок у приріст стійкості належить ВДЕ (41 %) та BESS (24 %), DR забезпечує 17 %, сервіси гнучкості – 12 %, а CHP – 6 %.

Результати розрахунку економічних та екологічних показників сервіс-орієнтованого розвитку представлено у таблиці 9.

Таблиця 9 – Ефективність сервіс-орієнтованого розвитку РЕС

Показник	До трансформації	Після трансформації	Зміна
Частка ВДЕ	18 %	34 %	+16 в.п.*
Витрати на балансування	270 млн €	199 млн €	−26 %
Недопостачання енергії	9 300 МВт·год	4 040 МВт·год	−56 %
Викиди CO_2	3,340 млн т	2,310 млн т	−31 %
Системні витрати	1,130 млрд €	1,170 млрд €	+3,4 %
Індекс стійкості	0,905	0,946	+0,041

За отриманими оцінками сервісний розвиток репрезентативної РЕС супроводжується збільшенням системних витрат приблизно на 3,4 %, але одночасно зменшує на 26 % витрати на балансування, ENS – на 56 %, викиди CO_2 – на 31 % та підвищує R з 0,905 до 0,946, що ілюструє принципову відмінність сервісно-орієнтованого розвитку від мінімізації лише прямих витрат: економічно дещо дорожча конфігурація забезпечує суттєво кращі системні та сервісні характеристики. Проведено аналіз чутливості та виявлено критичні параметри розвитку РЕС, результати якого представлено у таблиці 10.

Таблиця 10 – Результати аналізу чутливості

Параметр	Варіація	ТС, млрд €	R	ENS, МВт·год
VoLL	−20 %	1,140	0,938	5200
VoLL	+20 %	1,200	0,953	2700
Частка ВДЕ	25 %	1,190	0,931	6160
Частка ВДЕ	45 %	1,210	0,958	2500
BESS	64,2 МВт	1,210	0,936	4750
BESS	193 МВт	1,240	0,964	1730
DR	38,5 МВт	1,190	0,939	4490
DR	116 МВт	1,220	0,961	1990
Доступність генерації	80 %	1,310	0,922	7960
Доступність генерації	60 %	1,450	0,894	1500

Графічна залежність системних витрат РЕС від потужності BESS та інтегрального індексу стійкості відображена на рисунку 7. Поверхня демонструє роль накопичення як керованого сервісного ресурсу. Так, зі збільшенням потужності BESS розширюються можливості покриття короткострокових дисбалансів, перенесення енергії між часовими інтервалами та підтримання стійкості, однак одночасно зростає вартісна складова системи. Показано, що потужність накопичення має визначатися не за принципом максимізації, а в комплексі з DR, структурою генерації та допустимим рівнем ENS.

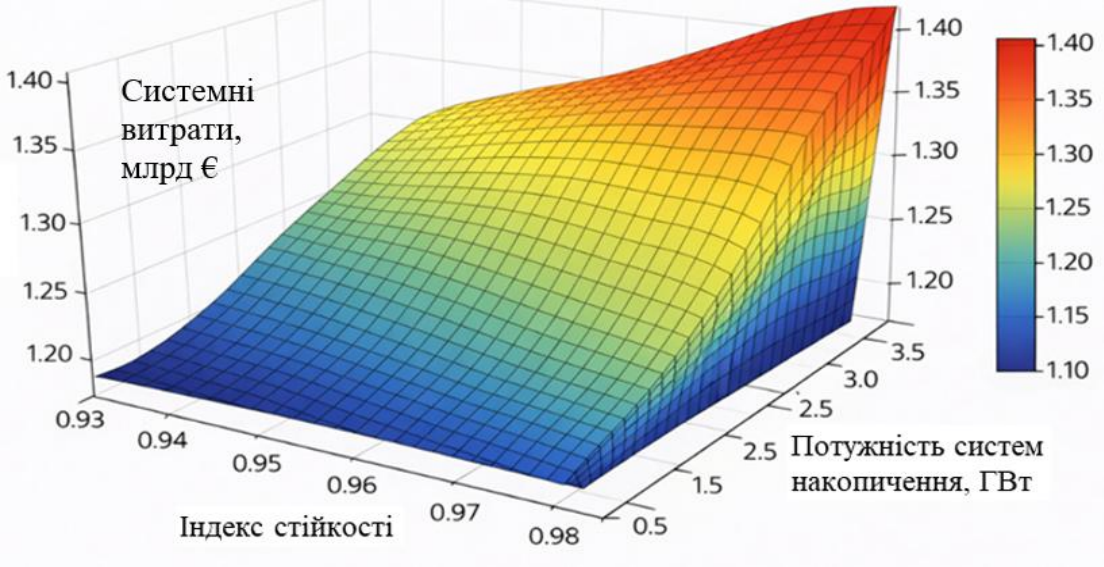


Рис. 7. Залежність системних витрат від потужності R та BESS

Проведено аналіз самодостатності РЕС в контексті сезонної динаміки достатності доступних локальних енергетичних ресурсів у часовому інтервалі, а для вибору рішення, стійкого до зміни сценарних умов, розраховано критерій minimax regret (мінімакс жаль), який на відміну від вибору, оптимального за одного сценарію, мінімізує найбільші можливі втрати ефективності рішення порівняно з найкращою альтернативою.

У цілому, проведене дослідження показує, що сервісні ресурси виконують подвійну функцію: за нормального режиму вони забезпечують структурну модернізацію, інтеграцію ВДЕ та зменшення дефіциту, а за кризових режимів – формують адаптивний ресурс, що частково компенсує втрату генерації, зростання попиту та інфраструктурні обмеження. Найбільш виражене залучення BESS і DR спостерігається у сценарії S_6, однак це не забезпечує підтримання R на рівні 0,92, що

обґрунтовує необхідність додаткового резервування або переходу до більш насичених конфігурацій A_i. Фронтир $A_0 - A_4$ підтверджує наявність закономірного компромісу «витрати–стійкість», але підвищення R з 0,946 до 0,973 потребує збільшення витрат з 1,168 до 1,424 млрд євро, отже, вибір конфігурації не може ґрунтуватися лише на максимізації стійкості; необхідно оцінювати граничну ціну її приросту, структуру сервісного внеску та стійкість рішення за альтернативних зовнішніх умов.

Вирішено задачу максимізації інтегрального показника ефективності енергозабезпечення F_r регіону r як функції енергоефективності, самодостатності та стійкості енергозабезпечення за наявності обмежень балансів енергетичних сервісів, міжсекторних перетворень енергії, накопичення та міжрегіональних перетоків

$$\max_{x \in \Omega} F_r = w_1 I_{E,r} + w_2 S_{int,r} + w_3 B_r, \tag{21}$$

де: $I_{E,r}$ – інтегральний показник енергоефективності регіону; $S_{int,r}$ – інтегральний показник енергетичної самодостатності регіону; B_r – інтегральний показник стійкості енергозабезпечення регіону; w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти критеріїв оптимізації; Ω – допустима область зміни керованих параметрів системи. Керованими змінними є обсяги локальної генерації за місяцями, частка ВДЕ в покритті попиту, обсяги заряду/розряду накопичувачів, обсяги імпорту електроенергії/газу, завантаження когенераційних установок, використання теплових насосів, обсяги сервісного резерву, частка покриття попиту через гнучкі ресурси, усе за обмежень балансів електроенергії, тепла і газу, обмежень генерації ВДЕ, пропускної здатності міжрегіональних зв’язків, меж їх потужності, меж ENS і стійкості та невід’ємності змінних.

Розрахунки проведено у діапазонах зміни вагових коефіцієнтів критеріїв оптимізації, а саме: ефективності 0,3-0,6; самодостатності 0,2-0,5; стійкості 0,2-0,4, обґрунтування яких визначалось обставинами воєнного часу. Деякі з результатів оптимізації представлено на рисунках 8 і 9 для: $w_1 = 0{,}5$; $w_2 = 0{,}3$; і $w_3 = 0{,}2$. Так, максимізація за критерієм $I_E \to \max$ забезпечила підвищення його значення з $0{,}07$ до $0{,}17$, тобто більш ніж у 2,4 раза, що свідчить про істотне покращення

структури енергоспоживання РЕС. При цьому первинне енергоспоживання системи зменшилось приблизно на 8-10 %. Оптимізація за критерієм $S_{int} \rightarrow \max$ дозволила підвищити інтегральний показник самодостатності з $0{,}63$ до $0{,}67$ за рахунок збільшення частки локальної генерації, підвищення ролі накопичувачів енергії, вирівнювання сезонної нерівномірності навантажень та підвищення стабільності режимів роботи системи. Максимізація за критерієм $B \rightarrow \max$ забезпечила його зростання з $0{,}42$ до $0{,}49$. Покращення обумовлено зменшенням частки ненаданих енергетичних сервісів, підвищенням стабільності теплопостачання, зростанням резерву енергетичних потужностей, покращенням балансування між видами енергоносіїв. Особливо суттєвим є скорочення дефіциту теплової енергії у зимовий період, що безпосередньо вплинуло на інтегральний індекс безпекової стійкості системи.

Застосування використаної у роботі сукупності цільових функцій сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, зокрема функцій системної корисності і стійкості на рівні локальної, регіональної, загальносистемної РЕС-ІЕС і підсистем-агентів з урахуванням екологічної компоненти, обумовлено потребою створення цілісно-узгодженої системи критеріїв розвитку РЕС, де мінімізація витрат є окремим випадком максимізації інтегральної сервісної корисності системи, як інструменту формування допустимих компромісів між ENS, стійкістю та самодостатністю. Результати порівняння інтегральних критеріїв оптимізації РЕС для чотирьох сценаріїв розвитку системи: базовий, оптимізації за енергоефективністю, самодостатністю і безпековою стійкістю, все у нормалізованих одиницях, представлено на рисунку 8.

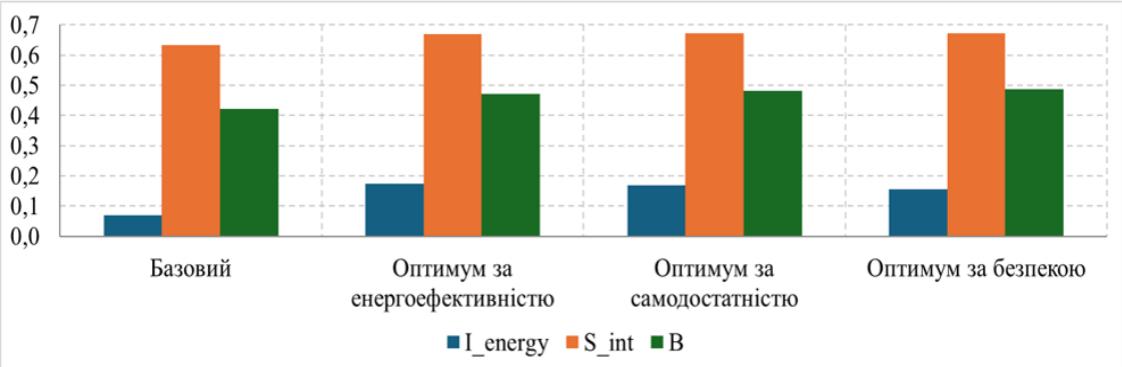


Рис. 8. Порівняння інтегральних критеріїв оптимізації

На рисунку 9 відображено порівняльний рівень недопостачання енергетичних ресурсів (електроенергії, тепла та газу) у різних сценаріях розвитку РЕС.

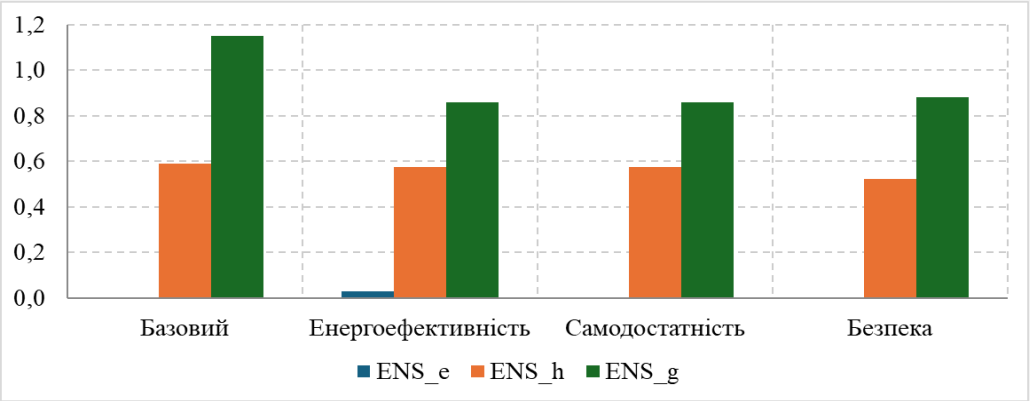


Рис. 9. Частка ENS за сценаріями оптимізації

Визначено регіональні профілі внеску енергетичних сервісів у сервіс-орієнтований розвиток РЕС за областями України (рисунок 10). Розрахунки проведено на основі даних за 2024 рік за нормалізованою шкалою сервісного впливу (індексом сервісної спроможності) з окремим відображенням частки накопичувачів енергії, ВДЕ, малої гідроенергетики, біо-ТЕЦ та заходів керування попитом.

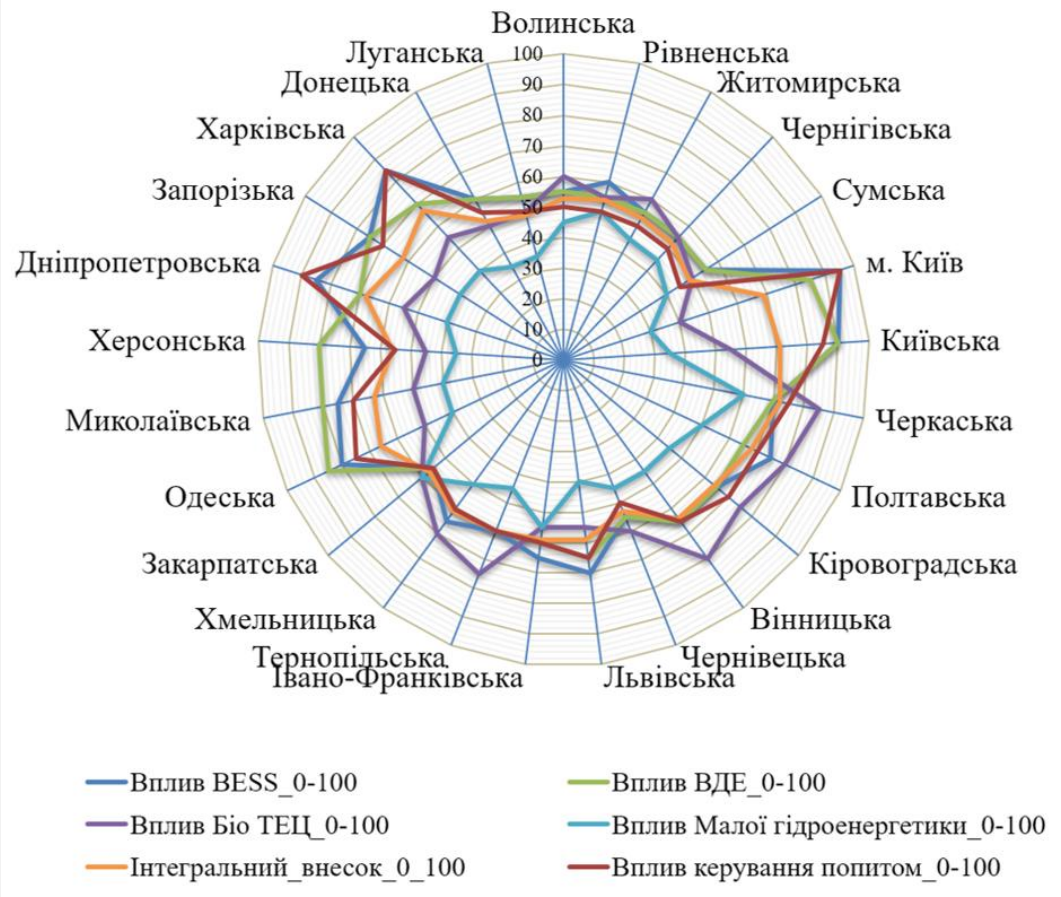


Рис. 10. Результати рейтингового оцінювання сервісного впливу РЕС

Результати свідчать про наявність чітко виражених груп регіонів із високою та низькою системною стійкістю. П’ять найкращих областей формують ядро сервісної спроможності енергосистеми країни та мають потенціал нетто-експорту сервісів гнучкості, тоді як п’ять найгірших областей характеризуються комплексними інфраструктурними й сервісними вузькими місцями, що обґрунтовує необхідність міжрегіональної кооперації та пріоритетного інвестування.

Регіональні профілі сценарного оцінювання стійкості РЕС за областями країні представлено на рисунку 11.

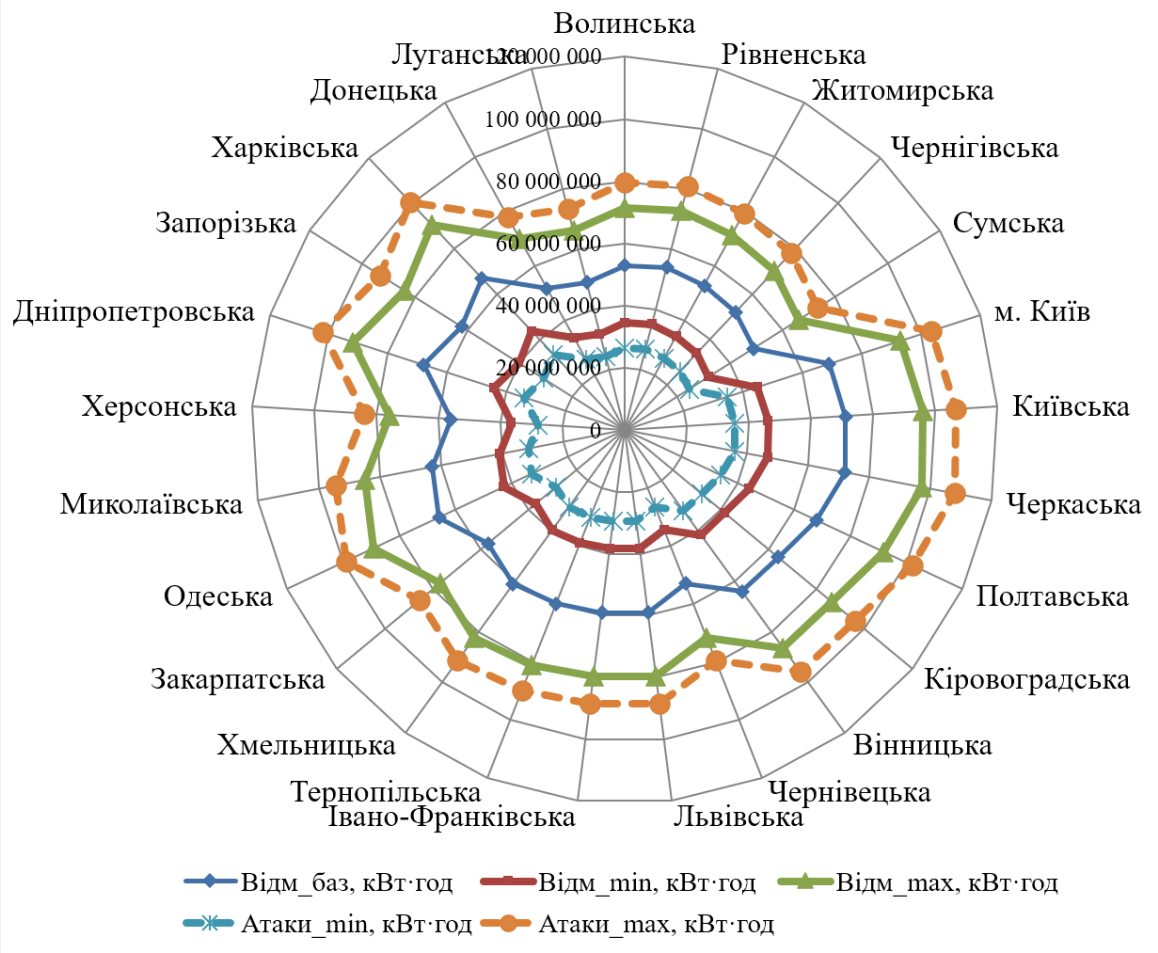


Рис. 11. Результати рейтингового оцінювання стійкості РЕС за областями Україні

У результатах розрахунку враховано зменшення ENS (енергія, яка раніше не постачалася через аварії/дефіцит, тепер фактично доставлена), зменшення втрат через керування попитом + накопиченням + локальні острови (уникнення аварійних відключень, повторних пусків, неефективної резервної дизельної генерації), оптимізація режимів (менші мережеві втрати, менше примусових обмежень ВДЕ), –

усе за трьома вимірами сервісних ефектів (базовий, мінімальний та максимальний) у двох сценаріях збурень: відмови елементів системи (Відм) та зовнішні атаки (Атаки).

Ключовими за внеском регіонами є м. Київ (320-380) та області: Київська (260-310), Дніпропетровська (280-330) та Харківська (240-290), обмежений, але критично важливий внесок (через безпеку) – Херсонська (45-65), Донецька (40-60), Луганська (35-55), Чернівецька (35-55) та Закарпатська (40-60), все у млн кВт·год/рік. Інтегральна оцінка за всіма областями – 3,2-3,8 ТВт·год/рік без урахування повного повоєнного відновлення. Це 2-3 ТЕС-блоки в річному балансі, або 8-10 % річної генерації ВДЕ виключно за рахунок гнучкості, резервування та керування. У грошовому вимірі, зваженому за попитом, це сягає 450-550 млн €/рік, тобто розглянуті сервіс-орієнтовані заходи генерують практично такий же грошовий потік, як і оцінки Держенергоефективності, що отримані за прогнозними обсягами реалізації в Україні заходів з енергоефективності та енергозбереження.

Представлені результати оптимізаційних розрахунків показують, що впровадження сервіс-орієнтованої моделі розвитку РЕС дозволяє зменшити залежність регіонів від зовнішніх енергетичних ресурсів, підвищити стійкість функціонування ІЕС, знизити частку ненаданих енергетичних сервісів, оптимізувати структуру використання первинної енергії та забезпечити баланс між економічними, екологічними та технічними параметрами функціонування системи РЕС-ІЕС.

Наголосимо, що результати моделювання сервіс-орієнтованого розвитку РЕС носять прогнозний характер і стосуються конфігурацій, які не мають повномасштабного фізичного аналога, тому для обґрунтування їх достовірності недостатньо прямого зіставлення із даними експлуатації реальних об'єктів РЕС, а потрібна сукупність взаємопов'язаних процедур, що підтверджують математичну коректність моделі, фізичну й економічну правдоподібність результатів, контроль впливу невизначеності та стійкість ключових висновків за зміни параметрів і сценаріїв. За цих умов існуючі міжнародні концепції забезпечують ефективне оцінювання моделей функціонуючих або експериментально доступних систем і не враховують специфіку прогнозних енергосистем. Унаслідок цього виникає наукова

проблема розроблення методики кількісного оцінювання обґрунтованості результатів моделювання прогнозних енергетичних систем за відсутності можливості проведення повної емпіричної валідації.



Рис. 12. Структурно-функціональна схема оцінювання

Структурно-функціональну схему проведення кількісного оцінювання обґрунтованості результатів моделювання представлено на рисунку 12. Для комплексного оцінювання достовірності результатів моделювання запропоновано інтегральний індекс довіри $Cred(M)$, який поєднує нормовані оцінки верифікації, валідації і робастності та розвиває положення VVUQ-підходу щодо комплексного оцінювання достовірності прогнозних моделей

$$Cred(M) = \sqrt[3]{V_{ver} \cdot \sqrt{V_{emp} \cdot V_{plaus}} \cdot V_{rob}} \quad (22),$$

де $V_{ver}, V_{emp}, V_{plaus}, V_{rob}$ – показники верифікації, часткової емпіричної валідації, критеріальної правдоподібності та робастної валідації.

На відміну від відомих підходів, у яких результати верифікації, валідації та аналізу робастності переважно розглядаються окремо, запропонований показник визначено як геометричне середнє верифікації, валідації та робастності, що забезпечує такі властивості: усі складові нормовані на інтервалі $[0; 1]$; складові є рівноправними; нульове значення будь-якої складової дає нульовий результат; низький рівень однієї складової не повністю компенсується високими значеннями інших; функція є монотонною за кожним аргументом.

Результати оцінювання показника правдоподібної валідації для репрезентативної моделі РЕС, виконані через функцію критеріальної відповідності ϕ_i, де i – номер контрольної перевірки, представлено у таблиці 11. Отримане значення $V_{plaus} = \phi_i/6 = 0{,}76$ показує, що результати моделювання перебувають у фізично допустимих межах, при цьому найбільш чутливими залишаються показники часу відновлення та самодостатності. Оцінювання SSR, технічної і безпекової стійкості та

інтегральної ефективності 3E, ENS і TTR для репрезентативної моделі дало $V_{val} = \sqrt{0{,}80 \cdot 0{,}76} = 0{,}78$, що характеризує достатність наявної валідаційної бази для сценарного порівняння, але не для оцінювання невизначеності результатів.

Таблиця 11 – Результати розрахунку показника правдоподібної валідації

№	Показник	X_i	X_{min}	X_{opt}	X_{max}	ϕ_i
1	Інтегральна самодостатність SSR	0,63	0,30	0,80	1,20	0,67
2	Технічна стійкість B_{tech}	0,98	0,70	1,00	1,00	0,92
3	Інтегральна безпекова стійкість B	0,42	0,20	0,50	0,80	0,74
4	Індекс 3E / інтегральна ефективність	0,83	0,50	0,90	1,00	0,81
5	ENS ratio	0,02	0,00	0,00	0,10	0,80
6	TTR	9,45	0,00	0,00	24,0	0,61

Результати комплексного оцінювання достовірності та стійкості результатів моделювання сервіс-орієнтованого розвитку РЕС наведено у таблиці 12.

Таблиця 12 – Підсумкова оцінка достовірності та стійкості результатів

Складова	Значення	Зміст результату	Обмеження інтерпретації
V_{ver}	1,00	Виконано баланси, обмеження та логічні умови	Не підтверджує адекватність припущень
V_{emp}	0,80	П’ять підмоделей мають незалежне доказове підтвердження	Потребує уточнення за рядами «факт–модель»
V_{plaus}	0,76	KPI перебувають у визначених допустимих межах	Залежить від обґрунтованості меж і цілей
V_{val}	0,78	Сукупна оцінка емпіричної та критеріальної валідації	Не є точністю прогнозу
V_{rob}	0,99	Ключові висновки зберігаються у сценаріях S_0–S_6	Характеризує лише сформовану множину сценаріїв
$Cred(M)$	0,92	Високий рівень довіри для сценарного порівняння і підтримки рішень	Чинний лише для заявленої області застосування

Отримане значення $Cred(M) = 0{,}92$ відповідає високому рівню довіри до результатів моделювання сервіс-орієнтованого розвитку РЕС і означає, що модель є математично коректною, усі основні баланси та обмеження виконуються, результати моделювання є фізично та економічно правдоподібними, часткова емпірична перевірка підтверджує узгодженість основних підмоделей та основні висновки щодо переваг сервіс-орієнтованого розвитку РЕС зберігаються у більшості досліджених сценаріїв.

Доведено, що результативність інвестиційних рішень на сервіс-орієнтованому ринку в умовах невизначеності не може оцінюватися лише за очікуваним NPV або одним базовим сценарієм, оскільки попит, ціни енергоносіїв, виробіток ВДЕ, доступність обладнання, вартість капіталу, аварійні впливи та тривалість відновлення

є невизначеними. Запропоновано гарантовану результативність визначати як нижню межу результативності, що гарантовано забезпечується для заданої множини сценаріїв і невизначених параметрів, розроблено методичне забезпечення, яке системно-узгоджено формує портфель сервісно-інвестиційних проєктів та виконує багатокритеріальну оцінку їх результативності з урахуванням робастних обмежень, minimax regret, стрес-тестування, адаптивного коригування рішень і розподілу системного ефекту між учасниками РЕС.

Для оцінювання гарантованої результативності перелік параметрів, крім NPV, доповнено аналізом чутливості ставки дисконтування, CAPEX, OPEX, ціни електроенергії й палива, виробітку ВДЕ, попиту, ресурсу BESS, доступного потенціалу DR, тривалості відмов, TTR і VoLL. Системне відображення складових процедури сервісно-інвестиційного рішення, яке розкриває його простежуваність від вихідних припущень до контрактних зобов'язань і управлінського вибору, представлено у таблиці 13.

Таблиця 13 – Складові прийнятності сервісно-інвестиційного рішення

Блок перевірки	Показник	Умова прийнятності	Управлінська реакція за невиконання
Фінансовий	NPV, IRR, PIA	NPV не нижчий за встановлений поріг	Зміна складу портфеля, фінансування або строків
Сервісний	ENS_e, ENS_h, TTR	Виконання обмежень	Додатковий резерв, BESS, DR або зміна контрактного рівня сервісу
Системний	SSR, Res, 3E	Виконання системних обмежень і $J \geq J^{min}$	Перехід до іншої точки Frontier
Робастний	$G(d)$, regret	Умови обмежень робастності	Зменшення вразливості або перегляд множини рішень
Адаптивний	відхилення «план–факт»	Відхилення в межах контрольного коридору	Активація наперед визначеної коригувальної дії
Розподільчий	платежі Pay_i	Учасники отримують не менше резервної альтернативи	Перегляд механізму компенсацій і сервісної винагороди

Це дало змогу обґрунтувати визначення гарантованої результативності сервісно-інвестиційного рішення у вигляді нижньої межі результату, який забезпечується в заданій множині сценаріїв і невизначених параметрів, і, як наслідок, оптимізувати вибір економічно прийнятного рівня ефективності РЕС, витрат на підвищення стійкості системи та взаємовигідного співробітництва виконавців проєктів і інвесторів.

У шостому розділі розглянуто концептуальні положення прикладних аспектів сервіс-орієнтованого розвитку РЕС у складі інтегрованої енергосистеми України,

формалізовано процедури визначення параметрів синергетичних ефектів та ефектів масштабу сервіс-орієнтованого розвитку, сформульовано методичні положення щодо створення регіональних систем енергетичного менеджменту (РСЕМ) та регіональних енергосервісних компаній (РЕСКО), сформовано концептуальну архітектуру системи підтримки прийняття сервіс-орієнтованих рішень.

Визначено складові логічної послідовності планування сервіс-орієнтованого розвитку РЕС у вигляді: потреби в енергетичному сервісі → аналіз альтернативних технологій та організаційних механізмів → оцінювання сервісного і системного результату → інвестиційне рішення → реалізація раціональної конфігурації «сервіси–технології», що замінює традиційну послідовність: прогноз попиту → визначення дефіциту потужності або пропускної спроможності → вибір енергетичного об'єкта → інвестиційне рішення → введення потужності. Принципова відмінність такої заміни полягає в тому, що технологія перестає бути вихідною точкою планування, а характерною ознакою стає технологічна варіативність забезпечення сервісу, коли один сервіс реалізується різними технологіями, а одна технологія забезпечується декількома сервісами.

Отже, фундаментальною вимогою реалізації сервіс-орієнтованого розвитку стає цілісне узгодження положень об'єктної, локальної, регіональної та загальносистемної ефективності планування, оцінювання та керування, насамперед: сервісної пріоритетності, яка передбачає, що первинним об'єктом планування є потреба та необхідний результат енергетичного сервісу, а вибір технології є похідним; системної інтегрованості, що вимагає врахування взаємозв'язків електричних, теплових, газових, накопичувальних, транспортних та споживчих підсистем; багаторівневої узгодженості, яка передбачає координації цілей і рішень об'єктного, локального, муніципального, регіонального та загальносистемного рівнів; технологічної нейтральності, що передбачає порівняння альтернативних способів забезпечення сервісу без апріорного надання переваги конкретній технології; гнучкості та адаптивності, які характеризують здатність РЕС змінювати конфігурацію ресурсів і режими їх використання відповідно до зміни попиту, зовнішніх умов та системних обмежень; стійкості та гарантованості сервісу, що передбачають оцінювання здатності

РЕС забезпечувати критично важливі функції в умовах несприятливих впливів та відновлювати необхідний рівень сервісу; децентралізації та субсидарності, які характеризують доцільність забезпечення сервісу на тому рівні системи, на якому це технічно можливо, економічно обґрунтовано та не погіршує функціонування систем вищого рівня; та достовірності результату, що передбачає встановлення кількісних або формалізованих KPI, які забезпечують можливість порівняння планового та фактичного рівнів сервісу.

Розроблено методичні рекомендації сервіс-орієнтованого розвитку РСЕМ та РЕСКО щодо визначення та реалізації синергетичних ефектів і ефектів масштабу на рівні регіонів, які системно розглядають: участь у розробленні регіональних енергетичних планів та планів стійкості з урахуванням ресурсів гнучкості, резервування, накопичення енергії, розподіленої генерації та керування попитом; формування моделей енергія-як-сервіс для комунальної, промислової та бюджетної сфери (балансування, резерви, потужність, тепловий комфорт тощо); реалізацію енергозберігаючих заходів для оперативного балансування; розвиток механізмів координації локальних сервісів гнучкості, балансування та резервування на основі принципів функціональної взаємодоповнюваності та порівняльної ефективності використання енергетичних ресурсів. Показники оцінювання синергії та масштабу представлено у таблиці 14, а основні функції РСЕМ та потенційні результати їх реалізації в РЕС – в таблиці 15.

Таблиця 14 – Система показників оцінювання синергії та масштабу

Група	Показник	Позначення	Напрям поліпшення	Економічний/технічний зміст
Економічна	Системні витрати	TC	↓	Вартість конфігурації та функціонування
Надійність	Незабезпечена енергія	ENS	↓	Дефіцит енергетичного сервісу
Стійкість	Інтегральний індекс стійкості	R	↑	Збереження/відновлення сервісу
Гнучкість	Індекс/обсяг гнучкості	Flex	↑	Можливість адаптації до небалансів
Самодостатність	Коефіцієнт самодостатності	SSR	↑	Зниження залежності від енергозабезпечення
Синергія	Нормований індекс синергії	I_{syn}	↑	Над-адитивний результат взаємодії
Масштаб	Економія масштабу	E_{scale}	↑	Зменшення питомих витрат
Інтегральна	Сервісно-синергетичний індекс	SI_{syn}	↑	Сукупний результат

Таблиця 15 – Основні функції РСЕМ та результати їх реалізації

Функція	Основний зміст	Інструменти	Результат
Моніторинг	Збір даних про попит, генерацію, мережі та сервіси	смарт-вимірювання, CEM/BEMS, SCADA, реєстри	Актуальний енергетичний профіль
Інвентаризація	Визначення DER, резервів і потенціалу гнучкості	GIS, реєстри, паспортизація	Реєстр ресурсів і сервісного потенціалу
Прогнозування	Оцінювання попиту, ВДЕ та гнучкості	прогнозні моделі	Прогнозні профілі
Сервісна діагностика	Визначення потреб, доступності та дефіциту сервісів	сервісні баланси, KPI	Карта сервісних дефіцитів
Сценарний аналіз	Перевірка РЕС за різних умов	S_0–S_6, стрес-тестування	Множина сценарних результатів
Оптимізація	Вибір портфеля ресурсів і сервісів	MILP/інші моделі, Frontier	Рекомендована конфігурація
Інвестиційне планування	Пріоритезація проєктів	CAPEX/OPEX, VoLL, тіньова ціна	Інвестиційний портфель
M&V	Підтвердження результату	базова лінія, KPI, IPMVP/FEMP	Верифікований сервісний ефект
Адаптація	Коригування за відхиленнями KPI	Зворотний зв'язок, цикли моделювання	Оновлений сервісний портфель

Розроблено функціональну модель взаємодії РСЕМ-РЕСКО, відображення якої представлено на рисунку 13.



Рис. 13. Функціональна модель РСЕМ-РЕСКО

Формалізовано теоретико-прикладні засади забезпечення гарантованого результату реалізації енергосервісних проєктів в умовах невизначеності та ризиків. Показано, що системне поєднання, зазвичай окремих підходів до РСЕМ та РЕСКО дозволяє шляхом проведення єдиної енергетичної політики з розробки та впровадження в регіоні проєктів з енергоефективності, самодостатності та стійкості більш ефективно вирішувати проблеми залучення внутрішніх і зовнішніх інвестицій у відновлення та інноваційний розвиток регіональної економіки.

Теоретико-прикладне обґрунтування виконано на основі методів теорії ігор, нечітких множин та теорії можливості. Перевагою є те, що на відміну від ймовірності, що потребує оцінювання частоти появи події в регулярному стохастичному експерименті, за теорією можливості визначається відносна оцінка

істинності стратегії, що аналізується, в порівнянні з будь-якою іншою стратегією за відносинами >, <, =. Достовірність отриманих результатів розв'язання портфельної задачі ранжирування 6-ти стратегій реалізації РЕСКО пакету інвестиційних енергосервісних проєктів на базі 5-ти різних енергозберігаючих технологій підтверджено шляхом порівняння з підходом, заснованим на критеріях, що відрізняються за ступенем оптимізму (консерватизму тощо) сторін, які приймають рішення (РЕСКО і Замовник проєктів).

Удосконалено архітектуру системи підтримки прийняття управлінських рішень (СППР-СОР) щодо сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, яка інтегрує сервісну діагностику, сценарне моделювання, багатокритеріальну оптимізацію, оцінювання невизначеності за методом можливостей, аналіз фронтіру «витрати–стійкість» та прихованої ціни стійкості, Shapley-декомпозицію, механізми РСЕМ і РЕСКО та контур M&V. Організаційну інфраструктуру СППР-СОР РЕС утворено на основі циклічного алгоритму, компоненти якого представлено на рисунку 14.



Рис. 14. Алгоритм функціонування СППР-СОР РЕС

Таким чином, сформовано цілісний організаційно-методичний механізм практичної реалізації методології сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, у якому в межах розробленої методологічної конструкції вперше взаємопов'язано концептуальну модель сервісного розвитку, оцінювання синергетичних ефектів та ефектів масштабу, РСЕМ як контур формування й координації сервісних потреб, РЕСКО як механізм фінансування та реалізації сервісних рішень, СППР-СОР як інструмент їх сценарно-оптимізаційного обґрунтування, M&V як механізм верифікації та адаптивного зворотного зв'язку.

Висновки

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему створення теоретико-методологічних засад сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем, що закладають наукову основу їх функціонування і трансформації, забезпечуючи системно узгоджене підвищення ефективності, самодостатності, гнучкості та стійкості енергозабезпечення регіонів в умовах децентралізації генерації, розвитку відновлюваних джерел енергії, систем накопичення, міжсекторних перетворень енергії та зростання ризиків і невизначеності.

Найбільш вагомі наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. На основі аналізу сучасного стану РЕС, що функціонують в умовах застарілої інфраструктури, зростання частки ВДЕ, підвищення вимог до гнучкості та невизначеності зовнішнього середовища, встановлено, що наявні методи організації їх структури й управління не забезпечують формування цілісної моделі сталого розвитку, не дають змоги достатньо повно врахувати взаємозв’язки між ефективністю, стійкістю і цінністю енергетичних сервісів та обмежують можливості реалізації стратегічних рішень щодо розвитку регіональної енергетики.

2. Розроблено і науково обґрунтовано методологічні засади сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, що базуються на системній парадигмі переходу від продуктової до сервіс-орієнтованої моделі функціонування енергетичної інфраструктури РЕС. Серед них: цілісний підхід до дослідження РЕС як складних

техніко-економічних систем; концепція багатовимірної цінності енергетичних сервісів; методологія сценарного моделювання розвитку РЕС з урахуванням ризику та невизначеності; трактування стійкості енергозабезпечення як інтегральної характеристики здатності системи забезпечувати необхідний рівень енергетичних сервісів в умовах збурень; принцип системно інтегрованої взаємодії учасників РЕС; методологія підтримки прийняття рішень в умовах децентралізації генерації, ризиків та загроз.

3. Розроблено концептуальний підхід до інтеграції енергетичних сервісів у РЕС, який формалізує процес створення цінності через багатовимірні характеристики ефективності та якості сервіс-орієнтованої взаємодії виробників енергії, споживачів, прос'юмерів, агрегаторів, операторів мереж і сервісних компаній, що дозволило систематизувати механізми взаємодії учасників енергосервісного ринку та сформувати основу для нових моделей управління РЕС.

4. Розроблено метод і модель оцінювання стійкості енергозабезпечення РЕС, що базуються на інтегральному показнику стійкості та дозволяють визначати економічну вартість його покращення, зокрема через показник прихованої вартості стійкості, що забезпечило можливість кількісного оцінювання впливу заходів трансформації енергетичної інфраструктури на рівень стійкості енергозабезпечення регіону та розширило теоретичні підходи до аналізу стійкості енергетичних систем.

5. Встановлено залежність між ефективністю функціонування РЕС і рівнем стійкості їх енергозабезпечення, що дало змогу визначити економічно доцільні межі підвищення стійкості та сформувати рекомендації щодо раціонального залучення інвестицій у модернізацію інфраструктури. Теоретичне значення цього результату полягає у розвитку підходів до дослідження взаємозв'язку ефективності та стійкості, а практичне – у можливості його використання під час формування регіональної енергетичної політики.

6. Розроблено економіко-математичні моделі та програмні засоби моделювання, які забезпечують оцінювання альтернативних траєкторій розвитку РЕС в умовах невизначеності через системне поєднання теорії можливості, нечітких множин та сценарної варіативності. Формалізовану основу моделей становлять

баланси енергетичних сервісів, баланси потужності, обмеження резервування, функції сервісної корисності, інтегральні KPI, моделі багатокритеріальної оптимізації та оцінювання невизначеності як можливості. Обґрунтовано достатність набору змінних, цільових функцій, обмежень та сценаріїв для визначення параметрів ефективності, самодостатності та стійкості сервіс-орієнтованого розвитку РЕС.

7. Отримано чисельні оцінки: фронтиру стійкості РЕС у базовому сценарії та сценаріях із підвищеною часткою ВДЕ, різними рівнями гнучкості та стійкості; внеску енергетичних сервісів у стійкість системи за показником Шеплі; а також економічних результатів сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, що дало змогу кількісно обґрунтувати оптимальні поєднання вартості, стійкості, гнучкості та енергоефективності.

8. Розроблено методологічні засади та проведено верифікацію та валідацію результатів моделювання сценаріїв сервіс-орієнтованого розвитку перспективних РЕС, що підтвердило адекватність розроблених моделей, достовірність отриманих результатів та можливість їх застосування для дослідження процесів розвитку регіональної енергетики й підтримки стратегічних рішень в умовах ризиків і невизначеності. Оцінювання достовірності результатів здійснено шляхом варіювання параметрів попиту, структури генерації, обсягів імпорту енергоресурсів та вагових коефіцієнтів цільових функцій оптимізації.

9. Показано, що результати оптимізації РЕС в Україні за критерієм енергоефективності демонструють зростання відповідного показника з 0,07 до 0,17, тобто більш ніж у 2,4 раза, що свідчить про суттєве покращення структури енергоспоживання РЕС. При цьому первинне енергоспоживання системи зменшується приблизно на 10 %. Оптимізація за критерієм енергетичної самодостатності надає змогу підвищити інтегральний показник самодостатності з 0,633 до 0,671, а за критерієм стійкості енергозабезпечення – з 0,42 до 0,49 за рахунок зменшення частки ненаданих енергетичних сервісів, скорочення дефіциту теплової енергії у зимовий період та покращення балансування між видами енергоносіїв.

10. Оцінювання інтегрального ефекту від реалізації запропонованих енергосервісних заходів за всіма областями України показало потенційну економію

3,2-3,8 ТВт·год на рік, що еквівалентно виробітку 2-3 енергоблоків ТЕС у річному балансі або близько 8-10 % річної генерації ВДЕ, досягнутих виключно за рахунок підвищення гнучкості, резервування та якості керування енергетичними сервісами. У грошовому вимірі, зваженому за попитом, відповідний ефект становить 450-550 млн євро на рік.

11. Сформовано методологічні засади та практичні рекомендації щодо підтримки прийняття рішень у процесах сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем, які інтегрують розроблені у дисертаційній роботі теоретико-методологічні положення, принципи, моделі, методи, критерії і процедури, забезпечуючи формування, оцінювання, порівняння й обґрунтований вибір стратегій розвитку РЕС на основі сценарного багатокритеріального моделювання, кількісного оцінювання впливу енергетичних сервісів, урахування ризиків і невизначеності, а також верифікації та валідації результатів моделювання.

12. Результати дисертаційної роботи використовуються органами державного управління, провідними науково-дослідними інститутами та у навчальному процесі вищих навчальних закладів, зокрема: у Національному інституті стратегічних досліджень використано методичні підходи до оцінювання стійкості РЕС як складової забезпечення життєво важливих функцій держави та підходи до інтегрованого аналізу впливу розвитку розподіленої генерації на функціонування енергетичної інфраструктури; у Державній інспекції енергетичного нагляду України під час підготовки аналітичних, інформаційних і методичних матеріалів щодо оцінювання рівня стійкості РЕС; в Інституті технічної теплофізики НАН України під час розроблення проєктів нормативно-правових актів, програмних документів та матеріалів науково-аналітичного характеру, що визначають концептуальні засади розвитку комунальної теплоенергетики та систем теплопостачання; використано: методичний підхід до обґрунтування пріоритетних напрямів розвитку РЕС, підхід до інтегрального оцінювання рівня енергетичної самодостатності регіонів та методичні положення щодо сервіс-орієнтованого розвитку РЕС; у ТОВ «Інститут промислової екології» при підготовці матеріалів і рекомендацій щодо розвитку системи централізованого теплопостачання м. Миколаєва та підвищення енергетичної

стійкості міста; у ТОВ «Сахара» – при обґрунтуванні проєктних рішень та виборі енергоефективного обладнання використовується метод оцінювання стійкості енергозабезпечення; у Навчально-науковому інституті енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України – методологія розвитку РЕС в умовах децентралізації та недопостачання енергії під впливом кризових явищ при викладанні дисципліни «Математичні методи моделювання в електроенергетиці» за освітніми програмами «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка» та «Інжиніринг електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами».

У сукупності, розроблені методологічні засади, концептуальні положення, методи та економіко-математичні моделі формують науково-методичну основу для дослідження процесів розвитку РЕС, оцінювання їх ефективності, самодостатності та стійкості енергозабезпечення регіонів, а також для підготовки обґрунтованих управлінських рішень у сфері розвитку енергетичної інфраструктури. Отримані результати можуть бути використані при розробленні стратегій енергетичного переходу, підвищенні енергоефективності регіональної економіки та забезпеченні стійкого розвитку енергетики в умовах невизначеності та ризиків.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. **Eutukhova, T.**, Kovalko, O., Novoseltsev, O., Woodroof, E. (2020). Energy Services: A Proposed Framework to Improve Results. *Energy Engineering*, *117(3)*, 99–110. https://doi.org/10.32604/EE.2020.010864. **(Scopus, Q4)**. ISSN:1546-0118

2. Kovalko, O., **Eutukhova, T.**, Novoseltsev, O. (2022). Energy-Related Services as a Business: Eco-Transformation Logic to Support the Low-Carbon Transition. *Energy Engineering*, *119(1)*, 103–121. https://doi.org/10.32604/EE.2022.017709. **(Scopus, Q4)**. ISSN:1546-0118

3. Bielokha, H., Chupryna, L., Denisyuk, S., **Eutukhova, T.**, Novoseltsev, O. (2023). Hybrid Energy Systems and the Logic of Their Service-Dominant Implementation: Screening the Pathway to Improve Results. Energy Engineering, 120(6), 1307–1323. https://doi.org/10.32604/ee.2023.025863 **(Scopus, Q4)**. ISSN:1546-0118

4. Eutukhova, T., Iliev, I., Novoseltsev, O., Nikitin, Ye., Shcherbyna, Ye. (2023). Methodological platform for determining energy efficiency indicators of a complex system. Системні дослідження в енергетиці, 2(73), 38-47. https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.038. **ISSN:** 2786-7102 (**фахове видання, кат. Б)**

5. Новосельцев, О., **Євтухова, Т.,** Чуприна, Л. (2023). Методи та моделі комплексно збалансованої системи віртуального енергоменеджменту. *Енергетика: економіка, технології, екологія,* 2, 46-51. https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279641. **ISSN:** 2786-7102 (**фахове видання, кат. Б**)

6. Denysov, V., **Eutukhova, T.** (2024). Dynamic Models for Developing Reference Scenarios of Energy System in the Low-Carbon Transition. *System Research in Energy*, 1 (76), 17–26., https://doi.org/10.15407/srenergy2024.01.017. **ISSN:** 2786-7102 (**фахове видання, кат. Б**)

7. Nikitin, Y., **Yevtukhova, T.**, Novoseltsev, O., & Komkov, I. (2024). Regional energy efficiency programs. Current status and development prospects. *Energy Technologies & Resource Saving*, *78*(1), 34–47. https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.03 **(Scopus, Q4)**. ISSN 2413-7723

8. Shcherbyna, Y., **Eutukhova, T**., Derii, V., Novoseltsev, O., Teslenko, O. (2024). Methodical Approaches for Modeling Power System Transformation Scenarios Based on Mixed Integer Linear Programming. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control, 561. Springer, Cham. 149-165. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_7 **(Scopus)**. ISSN 2198-4182.

9. Bilous, I., Biriukov, D., Karpenko, D., **Eutukhova, T**., Novoseltsev, O. et al. (2024). Reinforcement Learning Model for Energy System Management to Ensure Energy Efficiency and Comfort in Buildings. *Energy Engineering*, *121(12)*, 3617–3634. https://doi.org/10.32604/ee.2024.051684 **(Scopus, Q4)**. ISSN:1546-0118

10. **Eutukhova, T.**, Novoseltsev, O. (2024). Virtual energy management system for energy supply of regional infrastructure. *System Research in Energy*, 2a(78), 10–12. Retrieved from https://systemre.org/index.php/journal/article/view/840. ISSN: 2786-7102 (**фахове видання, кат. Б**)

11. Karpenko, D., **Yevtukhova, T**., Novoseltsev, O. (2024). Method for assessing the efficiency of the district heating system under market conditions. *Vidnovluvana Energetika* , (4(79), 6–16. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).6-16 **(Scopus 4)**. ISSN 2664-8172

12. Bilous, I., Biriukov, D., **Eutukhova, T.**, Novoseltsev, O, Voloshchuk, V., Prozuments, A. (2025). Energy efficiency and indoor climatic conditions in buildings: dynamic modeling for systemic improvement. Frontiers in Built Environment, 10:1502794. https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1502794 **(Scopus, Q1).** ISSN 22973362.

13. Karpenko, D., Deshko, V., **Eutukhova, T.**, Novoseltsev, O., Teslenko, O. (2025). Analysis of the Market Aspects in the Reform of District Heating Systems Under Wartime and Post-war Recovery Conditions. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VII. Studies in Systems, Decision and Control, 595. Springer, Cham. 229–274. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_9 **(Scopus)**. ISSN 2198-4182.

14. Karpenko, D., **Yevtukhova, T.**, Novoseltsev, O. (2025). An integrated AI-based approach to transforming energy systems for sustainability and efficiency. *System Research in Energy*, 3 (83), 41–55. https://doi.org/10.15407/srenergy2025.03.041. ISSN: 2786-7102 (**фахове видання, кат. Б**)

15. **Yevtukhova, T.,** Nikitin, E., Novoseltsev, O., Shemchuk, O. (2024). Regional energy management systems based on ESCOs: features of creation and application. *Енергетика: економіка, технології, екологія,* 1, 28–32. https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297512 . ISSN 2308-7382 (**фахове видання, кат. Б**)

16. **Yevtukhova, T.**, Novoseltsev, O., Kuznietsov, M., Karpenko, D. (2025). A two-sided business model for improving sustainable eco-development of territorial-administrative units. Vidnovluvana Energetika, 4(83), 112–125. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4(83).112-125 **(Scopus, Q4)** ISSN 2664-8172

17. **Yevtukhova, T.**, Novoseltsev, O., Zaporozhets, A. (2026). Program-Targeted Approach for Improving Energy Efficiency and Sustainability Through System-Integrated Services. In: Zagorodny, A., Bogdanov, V., Zaporozhets, A., Ermolieva, T. (eds) Nexus of

Sustainability. Studies in Systems, Decision and Control, 627. Springer, Cham. 197–217. https://doi.org/10.1007/978-3-032-03616-2_8 **(Scopus)**. ISSN 2198-4182.

18. **Yevtukhova, T.**, Novoseltsev, O. (2026). System analysis of service-oriented transformation methods and models of regional energy systems in the context of efficiency, profitability, and resilience. *System Research in Energy*, 1(85), 85–93. https://doi.org/10.15407/srenergy2026.01.085 ISSN: 2786-7102 (**фахове видання, кат. Б**)

19. Karpenko, D., **Yevtukhova, T.**, Novoseltsev, O. (2026). Energy service business models: organizational frameworks and market integration enabled by thermal energy storage. Energy Technologies & Resource Saving, 86(1), 42–62. https://doi.org/10.33070/etars.1.2026.04 **(Scopus, Q4).** ISSN 2413-7723

20. Чернявський, М., Дунаєвська, Н., Новосельцев, О., **Євтухова, Т.** (2024). Порівняльна оцінка собівартості відпуску електроенергії з різних джерел в базовому та регулювальному режимах. *Системні дослідження в енергетиці*, 2(77), 4–15. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.004. ISSN: 2786-7102 (**фахове видання, кат. Б**)

21. Маляренко, О., Майстренко, Н., **Євтухова, Т**. (2024). Фактори впливу на прогноз енергоспоживання країни в умовах війни та обсяги скорочення викидів парникових газів. *Системні дослідження в енергетиці*, 4(80), 65–76. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.065. ISSN: 2786-7102 (**фахове видання, кат. Б**)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

22. Shcherbyna, Y., Novoseltsev, O., **Evtukhova, T**. (2022). Overview of carbon capture, utilisation and storage technologies to ensure low-carbon development of energy systems. *System Research in Energy*, 2(71), 4–12. https://doi.org/10.15407/srenergy2022.02.004. ISSN: 2786-7102 (**фахове видання, кат. Б**)

23. Novoseltsev, O., **Eutukhova, T.**, Chuprina, L. (2023). Multicriteria optimization of municipal heat power systems with renewable energy sources. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXIV

міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 18-19 травня 2023р.). – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України,– С. 130–131. https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023.

24. Chernyavskyy, M., Makarov, V., Kaplin, M., Bilan, T., **Yevtukhova, T.** (2024). Prospects for coal-fired power plants fuel supply in Ukraine. In: Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control, part I: Energy Informatics and Transport. 561. Springer, Cham. 167–181. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_8 **(Scopus)**. ISSN 2198-4182.

25. Маляренко, О., **Євтухова, Т.**, Іваненко, Н., Горський, В., Коберник, В. (2024). Співставлення структури споживання палива та викидів забруднюючих речовин для визначення напрямів їхнього скорочення. *Системні дослідження в енергетиці*, 2а(78), 19–20. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02a. ISSN: 2786-7102 (**фахове видання, кат. Б**)

26. Маляренко, О., Горський, В., Іваненко, Н., **Євтухова, Т**., Матушкін, Д. (2025). Комплексна оцінка заходів зі зниження викидів забруднюючих речовин в атмосферу. *Системні дослідження в енергетиці*, 1(81), 100–110. https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.100. ISSN: 2786-7102 (**фахове видання, кат. Б**)

27. **Yevtukhova, T.**, Karpenko, D., Novoseltsev, O., Shcherbyna, Y. (2025). A holistic assessment of the sustainability, efficiency, and security of renewable energy systems. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXVI міжнародної науково-практичної конференції. (Київ, 21–23 травня 2025).– К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України,– С. 112–113. https://doi.org/10.36296/renewable.conf.21-23.05.2025

28. Novoseltsev, O., Kovalko, O., **Eutukhova, T**., Yevtukhova, M. (2022). Service-Oriented Logic of Using Information Technologies in the Circular Economy. Conference paper 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, 12-14 October 2022, 400–403, https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969328. (**Scopus**)

29. Lysenko, I., Stepenko, S., Novoseltsev, O., Verbytska, A., Dyvnych, H., **Yevtukhova T.** (2026). Challenges and Marketing Strategies of Renewable Energy Market Development, IEEE 9th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 1–6. https://doi.org/10.1109/ESS70338.2026.11536671 (**Scopus**).

30. Ковалко, О. М., Ковалко, Н. М., **Євтухова, Т. О.**, Новосельцев, О. В. (2023). Communal Heat Engineering: Energy Efficiency, Structure of Management, Energy Services (in Ukrainian-English). Monograph under general ed. of member-cor. of NAS of Ukraine O.V Novoseltsev. – Kyiv.: NAS of Ukraine, Institute of General Energy, 713 p., https://web.nlu.org.ua/object.html?id=2196. ISBN 978-966-02-9489-9.

31. Novoseltsev, O., Kovalko, O., **Eutukhova, T.**, Chupryna, L. (2022). Energy Efficiency as an Integral Component of the Service-Oriented Logic of Low-Carbon Transition/ Proc. of XXIII International Scientific-and-Practical Online Conference "Renewable energy and energy efficiency in the XXI century", Kyiv, May 19-20 2022. Kyiv: Interservice, pp. 30-32. https://www.ive.org.ua/language/uk/tezy-konferencziyi/

32. Ковалко, О. М., Новосельцев, О. В., **Євтухова, Т. О.** (2017). Вертикально-інтегровані структури управління ефективністю функціонування систем комунальної теплоенергетики. Київ: ІТТФ НАН України, 258 с. ISBN 978-966-02-8159-2.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

33. Карпенко, Д., **Євтухова, Т.,** Новосельцев, О., Ходаківський, В. (2025). Удосконалення конкурентної структури ринку централізованого теплопостачання через енергонакопичувачі. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 1, 126-132. https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2025.324272. ISSN 2308-7382 (**фахове видання, кат. Б**).

34. Нікітін, Є., Шпак, О., Маляренко, О., **Євтухова, Т**. (2025). Системний підхід до декарбонізації регіональної енергетики: від методології до практики. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 357(5.2), 332–346. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-5/2. ISSN 2307-5732

35. Ковалко, О. М., Новосельцев, О. В., **Євтухова, Т. О.** (2020). Структурно-функціональні особливості інтеграції ВДЕ в муніципальні системи теплопостачання.

Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті, Матер. XXI міжн. н.-п. конф., Київ, 14-15 травня 2020.– К.: Інтерсервіс, – 824 с., С. 310-313. ISBN 978-966-999-003-7.

36. Kuzminska, Y. M., **Yevtukhova, T. O.**, Vasylkonova, E. O., Bedrii, D. I., Riepnova, T. P., Zakharchenko, O. V. (2020). Economic and Parametric Approach to the Creation and Functioning of the Advertising Project. *Journal of Advanced Research in Law and Economics*, 11(2), 466–474. https://doi.org/10.14505/jarle.v11.2(48).19 **(Scopus, Q3)**. ISSN 2068696X

37. Odintsov, O., **Yevtukhova, T.**, Vasylkonova, E. (2020). Influence of tax burden on economic development of agricultural enterprises in Ukraine. *Journal of eastern European and central Asian research*, 7(1), 150–162. http://dx.doi.org/10.15549/jeecar.v7i1.328 **(Scopus, Q3)**. ISSN 23288272.

АНОТАЦІЯ

Євтухова Т. О. Методологічні засади сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.01 «Енергетичні системи та комплекси». – Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, Україна, 2026.

У роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему, яка полягає у створенні теоретико-методологічних засад сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем, що закладають наукову основу їх функціонування і трансформації, забезпечуючи системно узгоджене підвищення ефективності, самодостатності, гнучкості й стійкості енергозабезпечення регіонів в умовах децентралізації генерації, розвитку відновлюваних джерел енергії, систем накопичення, міжсекторних перетворень енергії та зростання ризиків і невизначеності.

Розроблено методологічні засади сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, які базуються на системному представленні регіональної енергосистеми як мультисекторної техніко-економічної системи, що функціонує у складі енергетичної

системи країни та забезпечує формування багатовимірної цінності енергетичних сервісів для споживачів і енергетичної інфраструктури.

Запропоновано концепцію інтеграції енергетичних сервісів у структуру РЕС, яка формалізує взаємодію виробників електричної і теплової енергії, операторів мереж, агрегаторів, споживачів і прос'юмерів як елементів єдиної сервісної екосистеми та дозволяє здійснювати оцінювання ефективності функціонування РЕС на основі показників цінності енергетичних сервісів.

Розроблено економіко-математичні моделі мультисекторного балансування РЕС, що враховують міжсекторні перетворення енергії, накопичення, резервування та міжрегіональні перетоки енергії та забезпечують можливість сценарного аналізу розвитку РЕС в умовах невизначеності.

Запропоновано метод оцінювання стійкості енергозабезпечення РЕС на основі інтегрального показника стійкості та показника прихованої вартості стійкості, що дозволяє визначати економічно обґрунтовані параметри модернізації енергетичної інфраструктури з урахуванням вимог до надійності, гнучкості та резервування.

Встановлено закономірності взаємозв'язку між ефективністю функціонування РЕС та рівнем стійкості їх енергозабезпечення, що створює основу для формування економічно доцільних стратегій розвитку енергетичної інфраструктури регіонів.

Розроблено метод сценарного аналізу сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, який дозволяє визначати фронтир стійкості енергосистеми та оцінювати внесок окремих енергетичних сервісів у забезпечення ефективності та стійкості РЕС з використанням інструментарію теорії ігор, зокрема показника Шеплі.

Розроблено методологічні засади оцінювання достовірності результатів моделювання сценаріїв сервіс-орієнтованого розвитку перспективних РЕС та підтримки прийняття управлінських рішень з урахуванням впливу енергетичних сервісів, ризиків і невизначеності.

Результати кількісної оптимізації структур РЕС за критеріями енергоефективності, енергетичної самодостатності та стійкості енергопостачання демонструють можливість скорочення споживання первинної енергії приблизно на

10%, збільшення індексу енергоефективності більш ніж у 2,4 раза, покращення індексу самодостатності та зменшення дефіциту енергетичних послуг.

Ключові слова: регіональна енергетична система, сервіс-орієнтований розвиток, стійкість енергозабезпечення, енергетична самодостатність, сценарне моделювання, міжсистемні перетоки, накопичення енергії, гнучкість енергосистем, показник Шеплі, фронтир стійкості.

ABSTRACT

YEVTUKHOVA T. O. Methodological Foundations of Service-Oriented Development of Regional Energy Systems. – A qualifying scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.14.01 “Energy Systems and Complexes”. – General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 2026.

The dissertation addresses an important scientific and applied problem consisting in the development of methodological foundations for the service-oriented transformation of regional energy systems through the formulation of theoretical provisions, methods, and models enabling the transition from a product-oriented to a service-oriented paradigm of energy system functioning. This transition ensures improved energy efficiency, enhanced regional energy self-sufficiency, and increased resilience of energy supply under conditions of generation decentralization, digitalization, and integration of distributed energy resources.

Methodological foundations for the service-oriented transformation of regional energy systems are developed based on representing regional energy systems as complex multi-sector technical-and-economic systems operating within the Unified Power System of Ukraine and forming multidimensional value of energy services for both consumers and energy infrastructure.

A conceptual framework for integrating energy services into the structure of regional energy systems is proposed. It formalizes the interaction among electricity and heat producers, network operators, aggregators, consumers, and prosumers as elements of a

unified service ecosystem and enables performance assessment based on multidimensional indicators of energy service value.

Economic and mathematical models of multi-sector balancing of regional energy systems are developed, taking into account cross-sector energy conversion, storage processes, reserve capacity formation, and intersystem power flows within the Unified Power System of Ukraine. These models enable scenario analysis of regional energy system transformation under uncertainty conditions.

A method for assessing the resilience of regional energy supply systems is proposed based on an integral resilience index and the shadow cost of resilience indicator, allowing determination of economically justified parameters for modernization of energy infrastructure considering requirements for reliability, flexibility, and reserve adequacy.

Regularities describing the relationship between operational efficiency and resilience of regional energy systems are established, forming the basis for economically justified strategies of regional energy infrastructure development.

A scenario-based analytical method for service-oriented transformation of regional energy systems is developed, enabling identification of resilience frontiers and evaluation of contributions of individual energy services to system performance using cooperative game theory tools, in particular the Shapley value.

Methodological principles are developed for assessing the reliability of the results of modeling scenarios for service-oriented development of promising RES and for supporting management decision-making taking into account the impact of energy services, risks, and uncertainty.

The results of quantitative optimization of regional energy system structures according to the criteria of energy efficiency, energy self-sufficiency and energy supply sustainability demonstrate the possibility of reducing primary energy consumption by approximately 10%, increasing the energy efficiency index by more than 2.4 times, improving the self-sufficiency index and reducing the deficit of energy services.

Keywords: regional energy system, service-oriented transformation, multi-sector energy system, energy-supply resilience, energy self-sufficiency, scenario modeling,

intersystem energy flows, energy storage, energy system flexibility, Shapley value, resilience frontier.

Декларація про використання технологій штучного інтелекту. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело. Технології штучного інтелекту, зокрема ChatGPT (OpenAI), використано виключно як допоміжний інструмент для структуризації матеріалів та технічної підтримки опрацювання результатів дослідження.