НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЄВТУХОВА ТЕТЯНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 621.311:697.34

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ СЕРВІС-ОРІЄНТОВАНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНАЛЬНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

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

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



_____ Тетяна ЄВТУХОВА

Науковий консультант: **Нікітін Євген Євгенович,** доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

Київ – 2026

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» (14 – електрична інженерія). – Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розвитку теоретико-методологічних засад сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем (РЕС), що визначають цілісно узгоджену сукупність взаємопов'язаних методів, моделей і механізмів та реалізують можливості підвищення ефективності, самодостатності і стійкості функціонування РЕС шляхом зміщення акценту з постачання енергії як товару на енергію як послугу. Це реалізовано в рамках існуючої моделі функціонування енергетичного сектору України за умови 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).

На відміну від існуючих методів, моделей і механізмів, які переважно реалізуються як окремі ринкові або диспетчерські інструменти балансування, резервування чи допоміжних послуг, основний науковий результат дисертації полягає у системній їх інтеграції, мультисекторному узгодженні та формалізації через категорії цінності енергетичних сервісів.

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. Оскільки у чинному законодавстві України поняття «регіональна енергетична система» та «інтегрована енергетична система» (ІЕС) на сьогодні не мають усталеного нормативного визначення, хоча і 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. Відповідно, в роботі ОЕС України розглядається як базовий електроенергетичний сектор ІЕС, 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. Напрями оптимального розвитку РЕС визначено шляхом мінімізації зважених втрат з урахуванням невизначеності (дефіцит потужності, погодні фактори, мережні обмеження тощо) та обмежень щодо не збільшення встановленої потужності / виробітку енергії в РЕС. Замість традиційної форми мінімізації обсягів споживання енергії запропоновано функцію максимізації цінності енергетичних сервісів. де поняття «цінності» формалізовано через еквіваленти технічно вимірюваних параметрів ключових показників ефективності (KPI) сервіс-орієнтованих послуг, що розглядаються як функціонали від вектору керування системою. Розв’язання задачі здійснено на основі положень теорії системи систем (SoS), більш конкретно – як «acknowledged» тип SoS, в межах якого РЕС відображається множиною інтегрованих підсистем (секторів), що мають власні цілі, зберігають операційну автономію, але координуються через спільні механізми балансування, резервування, сервісної взаємодії та міжсистемних перетоків.

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 важливої науково-прикладної проблеми 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.

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.

Формалізовано функцію інтегральної корисності портфеля сервіс-орієнтованих послуг РЕС, визначено складову інтегральної корисності, що виникає внаслідок синергії взаємодії сервісів, та умови реалізації ефектів масштабу від впровадження заходів, що реалізуються енергосервісними компаніями (ЕСКО) на множині об’єктів регіону з урахуванням ризик-орієнтованої процедури кількісного оцінювання очікуваних вигід, втрат та обмежень, сформовано цільову функцію системної корисності РЕС, що відображає техніко-економічний і екологічний ефекти та ефект стійкості за рахунок реалізації енергетичних і енергосервісних послуг на рівні системи.

На відміну від традиційної багатокритеріальної оптимізації енергосистеми, цільова функція включає параметри якості енергозабезпечення, враховує сервісну взаємодію між учасниками, інтегрує механізми керування попитом, резервування, накопичення та гнучкості та оцінює результати не лише через мінімізацію витрат, а через системну корисність енергетичних сервісів. Для обчислення системного

результату, сумування по множині сценаріїв здійснено на основі теорії нечітких множин та теорії можливості, що дозволило оптимізувати функціонування РЕС в умовах невизначеності зовнішніх впливів та режимів роботи.

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 системні задачі оптимізації критеріїв ефективності, самодостатності і ENS (недопостаченої електричної енергії) та на їх основі формалізовано вектор цільових результатів сервіс-орієнтованого розвитку РЕС. 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, узагальнену модель ІЕС представлено операторним рівнянням, у якому система взаємопов'язаних балансних співвідношень подається у вигляді відображення оператора від простору змінних стану системи. 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, що дозволило здійснити 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. 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 дало 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.

Кожну підсистему РЕС представлено як систему систем вектором стану, компонентами якого є: активна потужність або відповідна характеристика потужності і-ї підсистеми; теплова потужність або, для електричної підсистеми, реактивна потужність залежно від конкретної постановки; запас чи обсяг енергетичного ресурсу і-ї підсистеми; доступний резерв потужності і-ї підсистеми; витрати, пов'язані з функціонуванням і-ї підсистеми за інтервал t; обсяг викидів або інтегральний екологічний вплив і-ї підсистеми. Вектор керуючих змінних і-ї підсистеми включає: керовану потужність генерації; потужність заряджання та розряджання накопичувачів; потужність зміни навантаження внаслідок керування попитом; потужність імпорту / експорту енергії до / з підсистеми/РЕС; сукупність керуючих змінних, що характеризують активацію та масштаб сервісних рішень.

У п'ятому розділі наведено результати сценарно-оптимізаційного дослідження розвитку РЕС, проведеного 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.

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, що дозволило вирішувати методологічно важливі для розвитку та функціонування РЕС задачі, враховуючи ефекти заміщення між локальними та зовнішніми ресурсами, роль накопичення і керування попитом, міжсекторні перетворення енергії, економічну ціну дефіциту, зміну стійкості та формування сервісно-орієнтованої конфігурації РЕС.

Проведено аналіз та визначено межу ефективності (фронтир) сервісних конфігурацій РЕС, побудовано тривимірну поверхню, що відображає характер взаємозв'язку між часткою ВДЕ, стійкістю та системними витратами РЕС, для декомпозиції сукупного приросту стійкості між окремими сервісними ресурсами застосовано метод Шеплі (Shapley). 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.

Визначено регіональні профілі внеску енергетичних сервісів у сервіс-орієнтований розвиток РЕС за областями України. 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).

Вирішено задачу розроблення методики кількісного оцінювання обґрунтованості результатів моделювання прогнозних енергетичних систем за відсутності можливості проведення повної емпіричної валідації. Для комплексного

оцінювання достовірності результатів моделювання запропоновано інтегральний індекс довіри, який поєднує нормовані оцінки верифікації, валідації і робастності та розвиває положення VVUQ-підходу щодо комплексного оцінювання достовірності прогнозних моделей. Отримане значення індексу довіри 0,92 відповідає високому рівню довіри до результатів моделювання сервіс-орієнтованого розвитку РЕС і означає, що модель є математично коректною, оскільки усі основні баланси та обмеження виконуються, результати моделювання є фізично та економічно правдоподібними, часткова емпірична перевірка підтверджує узгодженість основних підмоделей, а основні висновки щодо переваг сервіс-орієнтованого розвитку РЕС зберігаються у більшості досліджених сценаріїв.

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. Показано, що 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 декілька сервісів.

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.

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.

Удосконалено архітектуру системи підтримки прийняття управлінських рішень (СППР-СОР) щодо сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, яка інтегрує сервісну діагностику, сценарне моделювання, багатокритеріальну оптимізацію, можливісне оцінювання невизначеності, аналіз фронтиру «витрати–стійкість» та прихованої ціни стійкості, Шеплі-декомпозицію, механізми РСЕМ і РЕСКО та контур M&V, і де організаційну інфраструктуру СППР-СОР РЕС утворено на основі циклічного алгоритму.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розвитку теоретичних, методологічних та прикладних засад сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергетичних систем, що забезпечують підвищення їх стійкості, самодостатності, адаптивності та ефективності функціонування в умовах невизначеності, кризових явищ і міжсекторальної 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.

Теоретична значимість результатів дослідження полягає у розвитку наукових засад сервіс-орієнтованого розвитку РЕС та формуванні концептуальної основи інтегрованих багатосекторних енергетичних систем:

1. Розвинуто теоретичні засади дослідження енергетичних систем на основі сервіс-домінантної парадигми функціонування енергетики.

2. Сформовано методологічний підхід до дослідження РЕС як складних багаторівневих соціально-економічних і техніко-технологічних систем, що функціонують в умовах міжсекторальної та міжсистемної взаємодії.

3. Розроблено концептуальні положення інтеграції енергетичних сервісів у структуру інтегрованих енергетичних систем, що розширюють теоретичні уявлення про механізми взаємодії виробників енергії, споживачів, прос'юмерів та операторів енергетичних сервісів.

4. Запропоновано новий клас балансів інтегрованих енергетичних систем, який забезпечує формалізований опис міжсекторальних енергетичних перетворень, енергетичних сервісів, резервів та дефіцитів енергопостачання.

5. Розвинуто економіко-математичний апарат дослідження розвитку РЕС в умовах невизначеності, що розширює методичний інструментарій системного аналізу енергетики та моделювання стійкості енергетичних систем.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні методів, моделей та програмно-аналітичного інструментарію для підтримки прийняття рішень

щодо розвитку регіональних енергетичних систем в умовах децентралізації, невизначеності та кризових впливів:

1. Розроблено інструментарій кількісного обґрунтування напрямів розвитку РЕС, який дозволяє визначати оптимальну структуру енергетичних сервісів для підвищення ефективності, самодостатності та стійкості енергозабезпечення регіонів.

2. Запропоновано метод мультисекторного балансування енергетичних сервісів, який може бути використаний для планування розвитку електроенергетичної, теплової та газової інфраструктури регіонів.

3. Розроблено підхід до інтегрального оцінювання стійкості енергозабезпечення регіонів, що забезпечує комплексне врахування технічних, економічних та організаційних факторів при прийнятті управлінських рішень.

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

5. 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.

6. На основі теорії нечітких множин і можливості 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.

7. Запропоновано методику V–C–V–R (верифікація–калібрування–валідація–робастність), що дозволяє оцінювати достовірність і стійкість результатів оптимізації режимів та сценаріїв розвитку перспективних енергетичних систем.

8. Створено програмно-аналітичний інструмент підтримки сценарного моделювання розвитку РЕС на базі Excel Solver, який забезпечує практичне

застосування розроблених методів і моделей для аналізу ефективності та стійкості енергетичних систем.

9. 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 і ефективності функціонування та у навчальному процесі вищих навчальних закладів.

Ключові слова: регіональна енергетична система, енергетичні сервіси, сервіс-орієнтована трансформація, мультисекторна енергосистема, стійкість енергозабезпечення, енергетична самодостатність, сценарне моделювання, міжсистемні перетоки, накопичення енергії, гнучкість енергосистем, показник Шеплі, Фронтир стійкості.

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)**.

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)**

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)**

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)**.

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.

ABSTRACT

YEVTUKHOVA T. O. Methodological Foundations for the 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” (14 – Electrical Engineering). – Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development of theoretical and methodological foundations for the service-oriented development of regional energy systems (RESs). These foundations constitute a coherent set of interrelated methods, models and mechanisms for improving the efficiency, self-sufficiency and resilience of RES by shifting the focus from the supply of energy as a commodity to energy as a service. This approach is implemented within the existing operating model of Ukraine’s energy sector through the systematic application, at the regional level, of integrated energy efficiency, demand management, balancing and other services, together with improvements to market components (business models, financial instruments and service multipliers), social components (consumers as active participants and local energy cooperatives), and digital and analytical components (demand forecasting, optimization and energy management).

In contrast to existing methods, models and mechanisms, which are predominantly implemented as separate market or dispatch tools for balancing, reserve provision or ancillary services, the main scientific contribution of the dissertation consists in their systemic integration, cross-sectoral coordination and formalization in terms of the value of energy services.

The introduction establishes the relevance of the research area and the rationale for selecting the dissertation topic. It defines the research aim and objectives, presents the scientific novelty and practical significance of the results, specifies the author’s personal contribution, and identifies links to research programs, projects and plans. It also describes the research methods, publications and dissemination of the findings, their implementation, and the structure of the dissertation.

Chapter 1 analyses current trends in energy system development and the characteristics of RES operation during energy sector transformation. Although the terms “regional energy system” and “integrated energy system” (IES) are widely used in international and Ukrainian research, they currently lack established statutory definitions in Ukrainian legislation. In this dissertation, a RES is defined as a regional “system of systems” within the national energy system. It uses balancing, demand response and energy consumption management mechanisms as a platform for service-oriented interaction among the electricity, gas and heat supply, transport, municipal infrastructure and consumption sectors located within a region (oblast). It also involves energy service companies, suppliers of energy-efficient equipment and materials, and investors as participants in projects aimed at improving energy efficiency, self-sufficiency and resilient energy supply in the region.

The IES is defined as a national “system of systems” that integrates the country’s energy sectors (electricity, heat, gas and others) through physical, information and service links to coordinate and balance flows of energy resources and energy services. It thereby enables the achievement of energy efficiency, self-sufficiency and resilience objectives for national energy development that cannot be achieved by individual sectors alone. Accordingly, Ukraine’s interconnected power system is treated as the core electricity sector of the IES, interacting with the heat, gas, energy storage and service sectors of RES through balancing, reserve provision, digital coordination and energy service management mechanisms.

In this dissertation, service-oriented development is understood as the purposeful formation of the structure, functions and management mechanisms of a RES. Within this process, the configuration of generation, network, storage and controllable demand-side resources, as well as the optimization of their operating modes, is determined by consumers’ needs for specific energy services and the prescribed parameters of service provision: utility, quality, reliability, accessibility, flexibility and resilience. Energy resources and technologies are regarded as means of delivering these parameters.

The service-oriented development model for RES energy infrastructure is based on a systems paradigm of transition from a product-oriented to a service-oriented model of infrastructure development. Optimal directions for RES development are determined by

minimizing weighted losses under uncertainty (capacity shortages, weather conditions, network constraints and other factors), subject to constraints preventing an increase in installed capacity or energy output within the RES. A function that maximizes the value of energy services is proposed in place of the conventional minimization of energy consumption. The concept of "value" is formalized through the equivalents of technically measurable parameters of key performance indicators (KPIs) for service-oriented provision, treated as functionals of the system control vector. The problem is solved using system-of-systems (SoS) theory, specifically the "acknowledged" SoS type. In this representation, the RES comprises integrated subsystems (sectors) that have their own objectives and retain operational autonomy, while being coordinated through shared mechanisms for balancing, reserve provision, service interaction and intersystem energy exchanges.

Contemporary methods, models and mechanisms for service-oriented development and RES–IES interaction are analyzed. The theoretical and methodological foundations for addressing existing problems are established, and opportunities for their systemic coordination and service-oriented synthesis in energy systems are organized. The principal drivers and systemic contradictions of RES development are identified. These findings motivate the formulation and comprehensive resolution of the important scientific and applied problem of establishing theoretical and methodological foundations for service-oriented development of regional energy systems. Such foundations underpin their operation and transformation, enabling coordinated improvements in the efficiency, self-sufficiency, flexibility and resilience of regional energy supply amid decentralized generation, the expansion of renewable energy sources and storage systems, cross-sectoral energy conversion, and increasing risks and uncertainty.

Chapter 2 systematizes the basic concepts and resolves terminological ambiguity in the conceptual interpretation of "energy services" and "energy performance services". It establishes the main principles of their integration and proposes treating them as systemically integrated activities encompassing energy production, conversion, distribution, supply and consumption. These activities create measurable added value for providers and consumers by integrating energy resources, technologies, organizational solutions and service actions. The components of integrated service provision are identified: energy

efficiency; flexibility; balancing and reserve provision with regional prioritization and aggregation; reliability and islanding capability; coordinated mobilization of financing for service-oriented projects; monitoring and verification of investment project results; and services supporting the structural and operational resilience of RES. A coherent classification of services is developed according to technological, functional and economic, and environmental characteristics.

The aggregate utility function of a RES service-oriented portfolio is formalized. The component of aggregate utility arising from synergies between services and the conditions for achieving economies of scale through the implementation of ESCO measures across multiple facilities within a region are identified. This incorporates a risk-oriented procedure for quantitatively assessing anticipated benefits, losses and constraints. A RES system utility objective function is formulated to reflect the techno-economic, environmental and resilience effects of implementing energy services and energy performance services at the system level.

Unlike conventional multi-objective optimization of energy systems, the objective function includes energy supply quality parameters, accounts for service interaction among participants, and integrates demand management, reserve provision, storage and flexibility mechanisms. It evaluates results through the system utility of energy services as well as cost minimization. To calculate the system-level outcome, aggregation over the set of scenarios is performed using fuzzy set theory and possibility theory. This enables optimization of RES operation under uncertainty concerning external influences and operating conditions.

RES resilience is formalized as an emergent outcome of interaction among service subsystems, delivered through the energy-as-a-service mechanism. It is demonstrated that RES resilience cannot be ensured without the service integration of energy efficiency, flexibility and digital control, coordinated through contractual and information mechanisms. System-level optimization problems are formulated for efficiency, self-sufficiency and energy not supplied (ENS), and used to formalize the vector of target outcomes for service-oriented RES development. RES development optimization problems are solved within the class of mixed-integer nonlinear programming (MINLP) problems, accounting for both the individual utility of energy services and the synergistic effects of their interaction.

Chapter 3 develops the methodological principles of the balance-based optimization approach to modelling RES as components of the national IES, taking into account the specific features of integrated energy and energy service balances. It defines their structural and logical architecture and functional purpose, establishes an algorithmic sequence for their construction and application, and formalizes the balance-based optimization equations governing RES–IES interaction. Given the difficulties of directly solving this problem, the service-dominant paradigm and SoS theory are adopted. The generalized IES model is expressed as an operator equation in which the system of interrelated balance relationships is represented by an operator mapping defined on the space of system state variables. Unlike the conventional approach, which describes energy system development through fuel and energy resource balances, the dissertation uses an integrated balancing system combining conventional electricity, heat and gas supply balances with energy service balances. This allows assessment of both physical energy flows and the outcomes of energy use in the form of services that deliver the target efficiency, self-sufficiency and resilience parameters of RES. Overall, the service-oriented RES development model reproduces the basic structural and functional relationships among energy production, conversion and consumption, accounting for renewable energy sources, storage systems, controllable demand, distributed generation and flexibility mechanisms. This enables the investigation of promising directions for RES development.

Chapter 4 develops the foundations for the coherent, coordinated provision of RES efficiency, resilience and self-sufficiency. It formalizes the parameters of the multilevel optimization model within the SoS framework, establishes the relationship between energy efficiency and the service that improves it, and formalizes the inclusion of services in the RES objective function under SoS interaction among subsystems. Models are developed for the environmental component of service-oriented RES development and for the coordinated provision of resilience and self-sufficiency. Service outcomes are shown to include energy savings and changes in peak load, reserves, unmet demand, costs and emissions.

Each RES subsystem is represented within the SoS framework by a state vector whose components comprise: active power or the corresponding power characteristic of subsystem *i*; thermal power or, for an electrical subsystem, reactive power, depending on the specific

problem formulation; the stock or quantity of the energy resource of subsystem *i*; the available reserve capacity of subsystem *i*; the costs associated with the operation of subsystem *i* over interval t; and emissions or the aggregate environmental impact of subsystem *i*. The control vector of subsystem *i* includes controllable generation power; storage charging and discharging power; the change in load due to demand management; the power associated with energy imports to and exports from the subsystem or RES; and the set of control variables describing the activation and scale of service solutions.

Chapter 5 presents the results of a scenario-based optimization study of RES development using a representative model of Khmelnytskyi Oblast. It examines the effects of external disturbances and changes in the service and technology configuration on system costs, energy not supplied, self-sufficiency and resilience. A frontier of compromise solutions between costs and resilience is constructed, and approaches are established for assessing the marginal costs of improving resilience and the contributions of individual resources to the combined outcome. A methodology is developed for assessing the credibility and robustness of modelling results and ensuring guaranteed performance of RES service and investment decisions under uncertainty.

The representative model's objective function is formulated as the total discounted costs of RES operation, including generation, fuel, external energy exchanges, flexibility services and the economic valuation of unmet demand. This makes it possible to address problems of methodological importance for RES development and operation by considering substitution between local and external resources, the roles of storage and demand management, cross-sectoral energy conversion, the economic cost of shortages, changes in resilience, and the formation of a service-oriented RES configuration.

The efficient frontier of RES service configurations is analyzed and identified. A three-dimensional surface is constructed to describe the relationships among the share of renewables, resilience and RES system costs. The Shapley method is used to decompose the total increase in resilience among individual service resources. The resulting estimates indicate that service-oriented development of the representative RES increases system costs by approximately 3.4 %, while reducing balancing costs by 26 %, ENS by 56% and CO_2 emissions by 31 %, and increasing R from 0.905 to 0.946. This illustrates the fundamental

distinction between service-oriented development and the minimization of direct costs alone.

Regional profiles of the contribution of energy services to service-oriented RES development are determined for Ukraine's oblasts. Calculations use 2024 data and a normalized scale of service impact (the service capability index), with the contributions of energy storage systems, renewable energy sources, small hydropower, biomass-fired combined heat and power plants, and demand management measures represented separately.

A methodology is developed for quantitatively assessing the substantiation of modelling results for prospective energy systems when full empirical validation is not possible. An integrated confidence index is proposed for the comprehensive assessment of modelling credibility. It combines normalized assessments of verification, validation and robustness, extending the VVUQ approach to the comprehensive evaluation of the credibility of predictive models. The resulting confidence index of 0.92 corresponds to a high level of confidence in the modelling results for service-oriented RES development. It indicates that the model is mathematically correct, with all major balances and constraints satisfied; the modelling results are physically and economically plausible; partial empirical testing confirms the consistency of the main sub-models; and the principal conclusions concerning the advantages of service-oriented RES development hold in most of the scenarios examined.

Chapter 6 examines the conceptual principles underlying the practical aspects of service-oriented RES development within Ukraine's integrated energy system. It formalizes procedures for determining the parameters of synergistic effects and economies of scale in service-oriented development, establishes methodological principles for creating regional energy management systems (REMS) and regional energy service companies (RESCO), and develops the conceptual architecture of a decision support system for service-oriented decision-making.

The logical sequence for planning service-oriented RES development is defined as follows: energy service needs → analysis of alternative technologies and organizational mechanisms → assessment of service and system-level outcomes → investment decision → implementation of a rational "services–technologies" configuration. This replaces the

conventional sequence: demand forecast → identification of capacity or network transfer capability shortages → selection of an energy facility → investment decision → capacity commissioning. The fundamental distinction is that technology ceases to be the starting point of planning. Instead, the defining feature is the availability of alternative technological means of delivering a service: one service can be delivered through different technologies, while one technology can provide several services.

Methodological recommendations are developed for the service-oriented development of REMS and RESCO to identify and realize synergistic effects and economies of scale at the regional level. They systematically address participation in the preparation of regional energy and resilience plans that account for flexibility, reserve provision, energy storage, distributed generation and demand management resources; the development of energy-as-a-service models for the municipal, industrial and public sectors (balancing, reserves, capacity, thermal comfort and other services); the implementation of energy-saving measures for operational balancing; and the development of mechanisms for coordinating local flexibility, balancing and reserve services based on functional complementarity and the comparative efficiency of energy resource use.

The theoretical and applied foundations for ensuring guaranteed outcomes of energy service projects under uncertainty and risk are formalized. It is shown that integrating approaches to REMS and RESCO, which are usually considered separately, enables more effective mobilization of domestic and external investment for the recovery and innovative development of the regional economy through a common energy policy for developing and implementing regional energy efficiency, self-sufficiency and resilience projects. The theoretical and applied justification is based on game theory, fuzzy set theory and possibility theory.

The architecture of the decision support system for service-oriented RES development (DSS-SOD) is improved. It integrates service diagnostics, scenario modelling, multi-objective optimization, possibility-based uncertainty assessment, analysis of the cost–resilience frontier and the shadow price of resilience, Shapley decomposition, REMS and RESCO mechanisms, and a measurement and verification (M&V) feedback loop. The

organizational infrastructure of the DSS-SOD for RES is established on the basis of a cyclic algorithm.

The scientific novelty of the results lies in advancing the theoretical, methodological, and applied foundations for the service-oriented development of regional energy systems, thereby improving their resilience, self-sufficiency, adaptability, and operating efficiency under uncertainty, crises, and intersectoral integration.

1. For the first time, methodological foundations are developed for the service-oriented development of RESs as components of the country's integrated energy system. They are based on the transition from a resource-based to a service-based model for balancing energy flows; an integrated assessment of RES energy efficiency, self-sufficiency, and resilience; and multicriteria optimization of RES structure with account taken of intersystem electricity flows and energy storage.

2. For the first time, a conceptual approach is proposed for integrating energy services into RES structure. It formalizes value creation through the multidimensional characteristics of service-oriented interaction among energy producers, consumers, prosumers, aggregators, and energy-service operators and allows an RES to be considered a multilevel system of systems.

3. For the first time, theoretical provisions are formulated for a service-oriented RES operating model in which the primary objects of balancing are energy services rather than energy resources. This enables the formation of a new class of multisector energy-system balances – including energy-service balances, intersectoral energy-conversion balances, energy-loss balances, and energy-supply deficit balances – as a superstructure over conventional fuel and energy balances, thereby supporting the transition from balancing energy to balancing the useful outcomes of its use through target energy-supply indicators.

4. For the first time, an original interpretation of energy services is formulated as the integrated outcome of energy generation, transmission, distribution, storage, transformation, and management, and is embodied in a multidimensional classification of energy services for service-oriented energy-system development tasks.

5. The method for comprehensive assessment of RES resilience is advanced. Unlike existing methods, it accounts for the system's ability to operate under disturbances, adapt to

changing operating modes, balance loads, provide capacity reserves, and recover from accidents, thereby making it possible to determine the marginal cost of improving energy-system resilience.

6. The multicriteria method for optimizing RES structure is advanced to account simultaneously for energy efficiency, energy self-sufficiency, structural and operational resilience, and intersystem interaction of RESs within Ukraine's integrated energy system.

7. An economic-mathematical model and software and analytical toolkit for scenario modelling of RES development are developed. Unlike existing approaches, they account for service-oriented interaction among energy-system participants and enable the synergistic effects of energy-service integration to be assessed.

8. Methods for scenario analysis of energy-system operation under crisis impacts and uncertainty, as well as a methodological approach to the verification and validation of RES development models, are further developed.

The theoretical significance of the research results lies in advancing the scientific foundations for service-oriented RES development and forming a conceptual basis for integrated multisector energy systems:

1. The theoretical foundations for studying energy systems on the basis of the service-dominant paradigm of energy-sector operation are advanced.

2. A methodological approach is developed for studying RESs as complex, multilevel socioeconomic and technical-technological systems operating under intersectoral and intersystem interaction.

3. Conceptual provisions are developed for integrating energy services into the structure of integrated energy systems, broadening theoretical understanding of the interaction mechanisms among energy producers, consumers, prosumers, and energy-service operators.

4. A new class of integrated energy-system balances is proposed, providing a formalized description of intersectoral energy conversions, energy services, reserves, and energy-supply deficits.

5. The economic-mathematical apparatus for studying RES development under uncertainty is advanced, expanding the methodological toolkit for systemic energy analysis and energy-system resilience modelling.

The practical significance of the results lies in the creation of methods, models, and software and analytical tools to support decision-making on regional energy-system development under decentralization, uncertainty, and crisis impacts:

1. A toolkit is developed for quantitatively substantiating RES development pathways and determining the optimal energy-service structure for improving the efficiency, self-sufficiency, and resilience of regional energy supply.

2. A method of multisectoral balancing of energy services is proposed for use in planning the development of regional electricity, heat, and gas infrastructure.

3. An approach is developed for the integrated assessment of regional energy-supply resilience, enabling technical, economic, and organizational factors to be considered comprehensively in management decision-making.

4. Scenario analysis of the RES resilience frontier is implemented, making it possible in practice to determine the trade-off among costs, energy resilience, self-sufficiency, and system operating efficiency when selecting options for energy-infrastructure modernization.

5. A method is proposed for assessing the contribution of energy services to RES resilience using the Shapley value. It enables technologies and services to be ranked by their impact on system resilience and can be used to set investment priorities for renewable energy sources, energy storage, cogeneration, and demand-management systems.

6. Based on fuzzy-set and possibility theory, an approach is developed for assessing uncertainty in RES development modelling results under limited statistical information and data scarcity, which is especially relevant to Ukraine’s post-war recovery and crisis conditions in the energy sector.

7. A V-C-V-R (verification–calibration–validation–robustness) methodology is proposed for assessing the reliability and stability of optimization results for operating modes and development scenarios of future energy systems.

8. A software and analytical tool based on Excel Solver is created to support scenario modelling of RES development and facilitate the practical application of the developed methods and models to the analysis of energy-system efficiency and resilience.

9. The research results have been used by public authorities, organizations, and leading national research institutes in formulating pathways for regional energy-system development, improving energy self-sufficiency, resilience, and operating efficiency, and in the educational process of higher education institutions.

Keywords: regional energy system, energy services, service-oriented transformation, multisector energy system, energy-supply resilience, energy self-sufficiency, scenario modelling, intersystem energy flows, energy storage, energy-system flexibility, Shapley value, resilience frontier.

List of publications

Scientific works in which the main scientific results of the thesis were published:

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. *System Research in Energy*, 2(73), 38-47. https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.038. **ISSN:** 2786-7102

5. Novoseltsev, O., Eutukhova, T., Chupryna, L. (2023). Methods and models of a comprehensively balanced virtual energy management system. *Energy: economics,*

technology, ecology, 2, 46-51. https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279641. **ISSN:** 2786-7102

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

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)**.

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

11. Karpenko, D., **Yevtukhova, T**., Novoseltsev, O. (2024). Method for assessing the efficiency of the district heating system under market conditions. *Vidnovliuvana energetyka* , (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)**

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

15. **Yevtukhova, T.,** Nikitin, E., Novoseltsev, O., Shemchuk, O. (2024). Regional energy management systems based on ESCOs: features of creation and application. *Energy: economics, technologies, ecology,* 1, 28–32. https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297512 . ISSN 2308-7382

16. **Yevtukhova, T.**, Novoseltsev, O., Kuznietsov, M., Karpenko, D. (2025). A two-sided business model for improving sustainable eco-development of territorial-administrative units. *Vidnovliuvana energetyka*, 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)**

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

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. Chernyavsky, M., Dunayevska, N., Novoseltsev, O., **Yevtukhova, T.** (2024). Comparative assessment of the cost of electricity supply from different sources in the basic and regulatory regimes. *System Research in Energy*, 2(77), 4–15. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.004. ISSN: 2786-7102

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

Scientific works certifying the approval of the thesis materials:

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

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)**.

25. Malyarenko, O., **Yevtukhova, T.,** Ivanenko, N., Horsky, V., Kobernyk, V. (2024). Comparison of the structure of fuel consumption and pollutant emissions to determine the directions of their reduction. *System Research in Energy*, 2a(78), 19–20. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02a. ISSN: 2786-7102

26. Malyarenko, O., Gorsky, V., Ivanenko, N., **Yevtukhova, T.,** Matushkin, D. (2025). Comprehensive assessment of measures to reduce emissions of pollutants into the

atmosphere. *System Research in Energy*, 1(81), 100–110. https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.100. ISSN: 2786-7102

27. **Yevtukhova, T.**, Karpenko, D., Novoseltsev, O., Shcherbyna, Y. (2025). A holistic assessment of the sustainability, efficiency, and security of renewable energy systems. Renewable energy and energy efficiency in the 21st century: materials of the XXVI international scientific and practical conference. (Kyiv, May 21–23, 2025). – K.: Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine, – 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. Kovalko, O. M., Kovalko, N. M., Yevtukhova, T. O., Novoseltsev, O. V. (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-konferenczіyi/

32. Kovalko, O. M., Novoseltsev, O. V., **Yevtukhova, T. O.** (2017). Vertically integrated management structures for the efficiency of municipal heat and power systems. Kyiv: ITTF NAS of Ukraine, 258 p. ISBN 978-966-02-8159-2.

Scientific works that additionally reflect the scientific results of the thesis:

33. Karpenko, D., **Yevtukhova, T.,** Novoseltsev, O., Khodakivskyi, V. (2025). Improving the competitive structure of the district heating market through energy storage devices. Energy: economics, technologies, ecology, 1, 126-132. https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2025.324272. ISSN 2308-7382

34. Nikitin, E., Shpak, O., Malyarenko, O., Yevtukhova, T. (2025). A Systemic Approach to Decarbonization of Regional Energy: From Methodology to Practice. 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. Kovalko, O. M., Novoseltsev, O. V., **Yevtukhova, T. O.** (2020). Structural and functional features of the integration of renewable energy into municipal heating systems. Renewable energy and energy efficiency in the 21st century, Mater. XXI int. n.-p. conf., Kyiv, May 14-15, 2020.– K.: Interservice, – 824 p., 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.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 41

ВСТУП 43

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ, ТЕНДЕНЦІЇ ТА ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ РЕС В УМОВАХ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ КРАЇНИ 56

1.1. Концептуальні положення трансформації енергетичного сектору країни 56

1.2. Системна архітектури та проблеми функціонування регіональної енергетики 62

1.3. Системний аналіз базових методів і моделей сервіс-орієнтованого розвитку РЕС 72

1.4. Методологічні засади сервіс-орієнтованої парадигми розвитку РЕС ... 79

1.5. Принципи адаптації концептуальних положень теорії системи систем та теорії можливості 82

1.6. Формулювання науково-прикладної проблеми та постановка завдань дослідження 90

1.7. Висновки до розділу 93

РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ІНТЕГРОВАНИХ СЕРВІСНИХ ПОСЛУГ РЕС 96

2.1. Еволюція розвитку інтегрованих сервісних послуг 96

2.2. Методологічні засади формування ринку сервісних послуг 104

2.3. Базові принципи оцінювання системно-інтегрованої ефективності сервісних послуг РЕС 111

2.4. Математична модель оцінювання системно-інтегрованої ефективності сервісних рішень РЕС 119

2.5. Формалізація цільових показників сервіс-орієнтованого розвитку РЕС 124

2.6. Висновки до розділу 129

РОЗДІЛ 3. МЕТОДОЛОГІЧНІ ПОЛОЖЕННЯ БАЛАНСОВО-ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ПІДХОДУ ДО МОДЕЛЮВАННЯ РЕС ЯК СКЛАДОВИХ ІЕС КРАЇНИ 131

3.1. Обґрунтування балансово-оптимізаційного підходу до моделювання сервіс-орієнтованого розвитку РЕС 131

3.2. Методологічні засади формування інтегрованого енергетичного та енергосервісного балансів РЕС 137

3.3. Структурно-логічна архітектура балансово-оптимізаційної моделі сервіс-орієнтованого розвитку РЕС у взаємодії з ІЕС 142

3.4. Функціональне призначення інтегрованих енергетичних та енергосервісних балансів регіональних енергосистем 148
3.5. Алгоритмічна послідовність побудови та застосування балансово-оптимізаційної моделі розвитку РЕС 153
3.6. Формалізація цілісно-узгодженої системи балансово-оптимізаційних рівнянь взаємодії РЕС-ІЕС 159
3.7. Висновки до розділу 165
РОЗДІЛ 4. ЗАСАДИ ЦІЛІСНО-УЗГОДЖЕНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ, СТІЙКОСТІ ТА САМОДОСТАТНОСТІ РЕС 168
4.1. Формалізація моделі системи систем як задачі багаторівневої оптимізації168
4.2. Формалізація взаємозв'язку енергоефективності та сервісу з підвищення ефективності 176
4.3. Засади включення сервісу енергоефективності у цільову функцію РЕС в умовах SoS-взаємодії підсистем 183
4.4. Модель екологічної компоненти сервіс-орієнтованого розвитку РЕС ... 187
4.5. Цілісно-узгоджена модель забезпечення стійкості та самодостатності РЕС191
4.6. Висновки до розділу 197
РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ РОЗВИТКУ РЕС В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ 200
5.1. Методичний інструментарій моделювання розвитку РЕС в умовах невизначеності 200
5.2. Базові положення сценарного моделювання розвитку РЕС в умовах невизначеності 208
5.3. Репрезентативна модель РЕС та її параметризація 217
5.4. Сценарно-оптимізаційне дослідження сервіс-орієнтованого розвитку РЕС226
5.5. Методика кількісного оцінювання достовірності та стійкості результатів моделювання РЕС 242
5.6. Методичне забезпечення гарантованої результативності сервісно-інвестиційних рішень РЕС в умовах невизначеності 254
5.7. Висновки до розділу 267
РОЗДІЛ 6. ПРИКЛАДНІ ЗАСАДИ СЕРВІС-ОРІЄНТОВАНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНАЛЬНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ 270
6.1. Концептуальні положення сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем у складі інтегрованої енергосистеми України 270

6.2. Синергетичні ефекти та ефекти масштабу сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем 280
6.3. Практичні рекомендації щодо створення та сервіс-орієнтованого розвитку регіональних систем енергетичного менеджменту 288
6.4. Концептуальні положення щодо створення та сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосервісних компаній 296
6.5. Система підтримки прийняття управлінських рішень щодо сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем 303
6.6. Висновки до розділу 310
Загальні висновки 314
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 320
ДОДАТОК А. Копії актів впровадження результатів роботи 347
ДОДАТОК Б. Список публікацій здобувача 356
ДОДАТОК В. Відомості про апробацію результатів дисертації 362

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

РЕС – регіональна енергетична система;

СЕМ – система енергетичного менеджменту;

IEC – сервіс-інтегрована енергетична система;

BEMS – система енергетичного менеджменту будівлі;

BESS – система накопичення енергії в акумуляторах;

CAPEX – капітальні витрати;

CHP – система одночасного виробництва електричної енергії та корисного тепла в єдиному процесі (когенерація);

CI – критична інфраструктура;

CI-backup – резервне енергозабезпечення

об'єктів критичної інфраструктури;

COP – коефіцієнт продуктивності;

Datahub – інформаційно-комунікаційна платформа для керування даними на ринку електроенергії шляхом збору й оброблення даних;

DER – розподілені енергетичні ресурси;

DERMS – система управління розподіленими енергетичними ресурсами;

DR – механізм керування попитом;

Gap – дефіцит енергетичного сервісу;

EaaS – концепція «енергія як сервіс»;

ENS – недопостачена електрична енергія;

EPC – енергосервісний контракт;

EV – агрегований парк електромобілів;

FEMP – Федеральна програма енергетичного менеджменту США;

Flex – гнучкість системи;

KPI – ключові показники ефективності;

OPEX – операційні витрати;

P2H – перетворення (перетворювач) електричної енергії у тепло;

P2P – модель взаємодії «рівний з рівним»;

PPP – державно-приватне партнерство;

PV – розподілена фотоелектрична генерація;

R – стійкість системи;

SAIDI –середня тривалість перерв енергопостачання;

SAIDI* – адаптований показник SAIDI для аналізу за обмежених даних;

SAIFI – середній індекс частоти переривань енергопостачання;

SCADA – система диспетчерського контролю та збору даних;

Smart Grid – інтелектуальна електроенергетична мережа;

SOC – ступінь зарядженості накопичувача енергії;

SP – прихована (тіньова) ціна;

SSR – коефіцієнт енергетичного самозабезпечення;

SoS – система систем;

TC – сукупні витрати;

TES – накопичувач теплової енергії;

TTR – час відновлення робочого стану системи;

V&V – вимірювання та верифікація;

VPP – віртуальна електростанція;

VoLL – вартість втраченого навантаження.

ВСТУП

Актуальність теми. Стан об’єктів регіональних енергетичних систем (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 місцева промисловість не залучені до системного регулювання навантаження, локальні СЕС, ВЕС, накопичувачі, когенераційні установки не інтегровані у загальну архітектуру управління. Існуюча система управління не забезпечує достатньої швидкості 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 гнучкість РЕС та підвищує потребу в дорогих резервних потужностях.

Вирішення цих проблем виявилось складним соціо-технологічним викликом, подолання якого потребувало комплексного розв’язання науково-теоретичних та прикладних завдань, серед яких, окрім техніко-технологічних (керування переривчастим виробництвом і стабільністю, децентралізація), існують економічні (нові форми ведення бізнесу, інвестування тощо), управлінські (енергетична політика, ринковий дизайн, координація учасників) і людино-центричні (поведінка споживачів, суспільне сприйняття) тощо.

Вагомий внесок у розв’язання цих науково-теоретичних та прикладних завдань зробили українські та зарубіжні вчені: В. П. Бабак, І. В. Блінов, С. П.Денисюк, Д. Г. Дерев’янко, М. М. Кулик, В. Р. Купчак, Є. Є. П. Д. Лежнюк, 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.

Серед провідних науково-дослідних інститутів та організацій у світі та в Україні, які активно працюють у сфері розв’язання проблем сервіс-орієнтованого розвитку енергетичних систем відзначимо Електроенергетичний науково-дослідний

інститут (EPRI) та Національну лабораторію відновлюваної енергії (NREL) у США, Європейський інститут досліджень в енергетиці (EIFER), Інститут енергетичної економіки та енергетичних систем Фраунгофера (IEE), Вуппертальський інститут клімату, довкілля та енергетики (Німеччина), Дослідницький інститут Швеції (RISE), Центр енергетичних досліджень Великої Британії (UKERC), Центр енергетичних досліджень Нідерландів (ECN), Інститут системних досліджень ПАН у Польщі. В Україні – це Інститут загальної енергетики НАН Україні, Інститут електродинаміки НАН Україні, Інститут технічної теплофізики НАН Україні, Інститут енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Національний університет «Львівська політехніка», Вінницький національний технічний університет, Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України тощо.

Разом з тим, не вирішеними залишилися теоретико-методологічні та прикладні завдання з врахування синергетичних ефектів міжгалузевої 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.

Серед ключових напрямків їх вирішення у провідних країнах світу визначилась спрямованість США на підтримку регіональних енергосистем через фонди та законодавчі стимули (On the Path to 100 % Clean Electricity, DOE, 2023; Federal Sustainability Plan, 2021), Energy Efficiency/Renewable Energy Roadmap, EPA). У ЄС – спрямованість Energy Efficiency Directive 2023/1791 та Directive 2018/2002 на встановлення обов'язкових норм щодо скорочення споживання енергії на національному та регіональному рівнях. У Японії – сфокусованість стратегічного енергетичного плану (Strategic Energy Plan, 2021) на реалізації системи «3E+S» (безпека, економічність, екологічність та стійкість). В Україні відмітимо Державну стратегію регіонального розвитку (2021–2027), План відновлення України,

спрямовані на розв’язання проблем децентралізації, енергоефективності в громадах, зеленого відновлення економіки та Стратегію НКРЕКП Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, до 2030 року, яка зосереджена на подальшому забезпеченні стійкої та безпечної інфраструктури, розвитку конкурентних ринків, впровадженні цифрових й інноваційних рішень у регулюванні, підтримці зеленого переходу, інтеграції до енергетичного простору ЄС тощо.

Сучасні глобальні виклики, пов'язані з децентралізацією генерації, масштабним впровадженням відновлюваних джерел енергії, цифровізацією енергетики, інтеграцією секторів електро-, тепло- та газопостачання, а також суттєвим зростанням природних, техногенних, кібернетичних і воєнних ризиків, зумовили формування нової системи вимог до розвитку енергетичних систем.

У доповіді МЕА 2026 року підкреслюється, що забезпечення стійкості має розглядатися як один із базових принципів розвитку сучасної енергетики поряд із надійністю, ефективністю та безпекою [1]. Документ визначає необхідність переходу до децентралізованих енергетичних систем, широкого використання розподілених енергетичних ресурсів, накопичувачів енергії, цифрових платформ управління, сервісів гнучкості та механізмів керування попитом. Практичне підтвердження зазначених положень наведено у дослідженні DiXi Group, яке на основі досвіду функціонування енергетичної системи України демонструє, що забезпечення стійкості досягається не окремими технічними рішеннями, а інтегрованою взаємодією розподіленої генерації, накопичувачів енергії, мережевої інфраструктури, цифрових платформ, механізмів керування попитом та сервісів оперативного відновлення [2].

Вирішення цих проблемних завдань потребувало використання нових підходів, насамперед у сфері системно-узгодженої сервісної діяльності. Для цього, у США активно застосовують модель «енергія як сервіс» у державному та приватному секторах та механізми публічно-приватного партнерства, де компанії надають енергетичні послуги з оплатою за результатами економії. ЄС є лідером у впровадженні моделей енергосервісних компаній (ЕСКО), які працюють за контрактами з

гарантованою економією та дозволяють інтегрувати енергетичні сервіси у муніципальні бюджети, балансування попиту та цифрові платформи моніторингу. Японія застосовує сервісний підхід у формі розумних енергетичних спільнот, де місцева влада та/або бізнес отримують енергію як послугу з інтеграцією IoT-рішень, автоматизації та накопичувачів енергії. В Україні діє ProZorro (Прозоро) – механізм ЕСКО-договорів, що надає змогу залучати приватні інвестиції для підвищення енергоефективності бюджетної сфери та у розвиток енергетичних кооперативів на основі моделі «енергія як сервіс».

Сфера енергосервісу є достатньо поширеним напрямом бізнес діяльності у розвинених країнах світу. Так, за оцінками Євростату, ESCO-компанії та суміжні сервіс-орієнтовані послуги вже створюють понад 1,5 % ВВП ЄС (2022 р.) у вигляді інтелектуальних послуг у сфері енергетики та енергоефективності, а у деяких країнах (Німеччина, Нідерланди, Данія, Франція) їх частка перевищує 2-2,5 %. Відмічається висока мультиплікативність інвестицій (1 євро, вкладений в енергосервіс, приносить 2-4 євро ефективності в суміжних секторах виробництва, IT технологій, експлуатації тощо) та створення >1 млн робочих місць у ЄС (EU Energy Services Market Report, 2023). В Україні сфера надання сервісних послуг це недооцінений, але критично важливий сектор, потенціал якого до повномасштабної війни оцінювався в понад 25 млрд грн. щороку (за оцінками Держенергоефективності). Було реалізовано понад 500 ЕСКО-контрактів у бюджетній сфері, але це лише ~5 % наявного потенціалу. Частка енергосервісу у ВВП України не перевищує 0,2-0,3 %, але може зрости до 1-1.5 % протягом 5 повоєнних років за умов впровадження новітніх технологій, енергоменеджменту та інвестиційної підтримки.

У підсумку слід констатувати, що досягнуті науково-прикладні результати у сфері енергосервісної діяльності не є прийнятними ні для світового співтовариства, ні для України, особливо в умовах гострої потреби забезпечення безпеки функціонування та сталого розвитку енергетики як визначальної складової життєдіяльності економіки та соціальної сфери. Значною мірою це є наслідком невизначеності концептуальних положень та обґрунтованості інструментів і методів

системно-інтегрованого розвитку РЕС, у тому числі прикладних аспектів застосування енергосервісу.

Тому створення, розроблення та практичне застосування методологічних засад сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, як системоутворюючих складових енергосистеми України, що характеризуються різноманітністю типів і форм енергетичних сервісів у секторальному й територіальному вимірах, 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 обґрунтовані 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 логіки 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.

Інформаційну базу дисертаційного дослідження становили наукові праці вітчизняних і зарубіжних учених у галузях енергетики, системного аналізу та управління енергетичними системами, а також нормативно-правові документи та аналітичні матеріали, що регламентують функціонування та розвиток енергетичного сектору. Інформаційною основою для проведення моделювання стали джерела відкритих даних щодо генерації та споживання паливно-енергетичних ресурсів, параметрів функціонування енергетичних підсистем та сценарних умов функціонування РЕС.

У процесі дослідження перевірено наступні гіпотези:

- **Гіпотеза 1**: Сервіс-домінантна логіка, перенесена з економіки послуг, є релевантною й ефективною методологічною платформою для формування регіональних енергосистем нового покоління в умовах децентралізації, цифровізації та мультиагентної взаємодії.

- **Гіпотеза 2**: Цінність у сучасних системах енергозабезпечення створюється не лише через виробництво електричної та теплової енергії, а й у процесі взаємодії учасників енергосервісного ланцюга, включаючи споживачів, постачальників енергоефективного обладнання, інвесторів і надавачів сервісних послуг (енергосервісних компаній).

- **Гіпотеза 3**: Переходу до сервіс-орієнтованої енергетики притаманні об'єктивні закономірності, які можуть бути формалізовані та використані для прогнозування сценаріїв розвитку регіональних енергосистем.

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.

Теоретична значимість результатів дослідження полягає у розвитку наукових засад сервіс-орієнтованого розвитку РЕС та формуванні концептуальної основи інтегрованих мультисекторних енергетичних систем:

1. Розвинуто теоретичні засади дослідження енергетичних систем на основі сервіс-домінантної парадигми функціонування енергетики.

2. Сформовано методологічний підхід до дослідження РЕС як складних багаторівневих соціально-економічних і техніко-технологічних систем, що функціонують в умовах міжсекторальної та міжсистемної взаємодії.

3. Розроблено концептуальні положення інтеграції енергетичних сервісів у структуру інтегрованих енергетичних систем, що розширюють теоретичні уявлення про механізми взаємодії виробників енергії, споживачів, прос'юмерів та операторів енергетичних сервісів.

4. Запропоновано новий клас балансів інтегрованих енергетичних систем, який забезпечує формалізований опис міжсекторних енергетичних перетворень, енергетичних сервісів, резервів та дефіцитів енергопостачання.

5. Розвинуто економіко-математичний апарат дослідження розвитку РЕС в умовах невизначеності, що розширює методичний інструментарій системного аналізу енергетики та моделювання стійкості енергетичних систем.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні методів, моделей та програмно-аналітичного інструментарію для підтримки прийняття рішень щодо розвитку регіональних енергосистем в умовах децентралізації, невизначеності та кризових явищ:

1. Розроблено методологічні засади сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, що призначені для використання органами державного та регіонального управління, операторами енергетичної інфраструктури й територіальними громадами для кількісного обґрунтування стратегій розвитку РЕС, формування програм підвищення енергетичної самодостатності та оцінювання ефективності інвестиційних рішень.

2. Запропоновано метод мультисекторного балансування енергетичних сервісів та систему інтегральних критеріїв, які забезпечують можливість практичного оцінювання стану РЕС під час планування структури генерації, накопичення енергії, розвитку локальних джерел енергії, систем теплопостачання та механізмів керування попитом.

3. Розроблено підхід до інтегрального оцінювання стійкості енергозабезпечення регіонів, що забезпечує комплексне врахування технічних, економічних та організаційних факторів при прийнятті управлінських рішень та може використовуватися для підвищення захищеності критичної інфраструктури та підготовки енергетичних планів.

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

5. Запропоновано метод оцінювання внеску енергетичних сервісів у забезпечення стійкості РЕС на основі показника Shapley, 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.

6. На основі теорії нечітких множин і можливості 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.

7. Запропоновано методику V-C-V-R (верифікація–калібрування–валідація–робастність), що дозволяє оцінювати достовірність і стійкість результатів оптимізації режимів та сценаріїв розвитку перспективних енергетичних систем.

8. Створено програмно-аналітичний інструмент підтримки сценарного моделювання розвитку РЕС на базі Excel Solver, який забезпечує практичне застосування розроблених методів і моделей для аналізу ефективності та стійкості енергетичних систем.

9. 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 і 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. В 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. Зміст дисертаційної роботи відображено в 37 друкованих наукових працях, зокрема 21 публікація, в яких розкривається основний зміст дисертації, з яких 9 у періодичних виданнях та 3 у розділах монографій (Springer), що індексуються наукометричними базами Scopus і Web of Science, 9 у фахових виданнях України; одна з публікації надрукована у виданні з квартилем Q1, що відповідно п.2 наказу МОН від 23.09.2019 № 1220 «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», кількісно у сукупності із зазначеними вище публікаціями прирівнюються до 23 публікацій, які розкривають основні наукові результати дисертації. Крім того, наявні 2 монографії, 1 публікація у виданні, що індексується наукометричними базами Scopus і Web of Science та 3 публікації у фахових виданнях України, 6 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій, з яких 2 у виданнях, що індексуються наукометричними

базами Scopus та Web of Science, а також 5 публікацій, які додатково розкривають зміст дисертаційної роботи, з яких 2 у періодичних виданнях, що індексуються наукометричними базами Scopus і Web of Science з квартилем Q3.

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

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ, ТЕНДЕНЦІЇ ТА ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ РЕС В УМОВАХ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ КРАЇНИ

1.1. Концептуальні положення трансформації енергетичного сектору країни

Сучасний розвиток енергетики характеризується глибокою трансформацією технологічних, економічних, організаційних та інституційних засад функціонування енергетичного сектору. Глобальні тенденції декарбонізації, децентралізації генерації, цифровізації, інтеграції відновлюваних джерел енергії, розвитку систем накопичення енергії та інтелектуальних мереж, механізмів керування попитом і розподіленими енергетичними ресурсами обумовлюють перехід від традиційної централізованої моделі енергетики до інтегрованих багаторівневих енергетичних систем, орієнтованих на забезпечення гнучкості, стійкості, адаптивності та безперервності енергетичного сервісу [3-6].

Традиційно енергетичні системи розглядалися як великомасштабні централізовані інфраструктурні комплекси, головною функцією яких є забезпечення безперервного постачання енергетичних ресурсів споживачам. Основою таких систем виступали вертикально інтегровані структури генерації, передачі та розподілу енергії, орієнтовані на забезпечення стабільності режимів функціонування та мінімізацію витрат виробництва [7-10].

Класична модель розвитку енергетики сформувалася у XX столітті в умовах домінування великих централізованих електростанцій, жорсткої ієрархії управління та прогнозованого характеру навантажень. Енергетичні системи цього періоду характеризувалися централізованою генерацією, односпрямованими потоками енергії, пасивною роллю споживача, орієнтацією на забезпечення балансу потужності та домінуванням техніко-економічних критеріїв розвитку [10]. У межах традиційної концепції енергетика розглядалася переважно як технологічна галузь, а енергія – як товар або фізичний ресурс. Основними критеріями ефективності були надійність електропостачання, мінімізація витрат. забезпечення резервів потужності та пропускна здатність мереж.

Однак наприкінці XX – на початку XXI століття відбулися фундаментальні зміни у структурі енергетики, пов’язані з розвитком відновлюваної енергетики, децентралізацією генерації, цифровізацією, формуванням конкурентних енергетичних ринків, підвищенням ролі споживача, розвитком систем накопичення енергії, появою технологій розумних мереж та необхідністю декарбонізації економіки. Ці зміни зумовили трансформацію підходів до розвитку енергетичних систем, які поступово почали розглядатися як складні багаторівневі соціо-технічні системи, що поєднують технологічні, економічні, інформаційні, інституційні і соціальні компоненти до планування розвитку енергетики та передбачають інтегроване управління декарбонізацією, енергоефективністю, безпекою постачання, розвитком ринку та інноваційної інфраструктури, що свідчить про перехід від галузевої до сервісно-орієнтованої моделі функціонування енергетичних систем [11-13].

За цих умов особливого значення для України набуває розвиток регіональних енергетичних систем (РЕС), які забезпечують інтеграцію локальних енергетичних ресурсів, споживачів, розподіленої генерації, систем накопичення енергії та сервісної інфраструктури. Водночас у чинному законодавстві країни поняття «регіональна енергетична система» на сьогодні не має усталеного нормативного визначення та використовується переважно у науковій, аналітичній і прикладній площині для опису енергетичних комплексів регіонального рівня [14].

У 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.

Це відповідає сучасним тенденціям розвитку світової енергетики, орієнтованим на перехід до інтегрованої багатосекторної моделі, що охоплює електроенергетичний, тепловий, газовий, накопичувальний та сервісний сектори. Так, Європейська Комісія у межах концепції «Інтеграція енергетичних систем» визначає енергетичну систему як інтегроване середовище взаємодії електроенергетичного, газового, теплового, транспортного, інфраструктурного і споживчого секторів [15] і де функціонування енергетичної системи розглядається «як єдине ціле» через взаємодію різних енергетичних носіїв, інфраструктур і секторів споживання [16].

Під системою систем (SoS) у роботі розуміється загальновизнаний (acknowledged) тип системи систем, в межах якого енергетична система відображається множиною інтегрованих підсистем (секторів), що мають власні цілі, зберігають операційну автономію, але координуються через спільні механізми балансування, резервування, сервісної взаємодії та міжсистемних перетоків [17].

Наявна концепція інтегрованих енергетичних систем передбачає інтеграцію електроенергетичного, теплового, газового, транспортного та накопичувального секторів у єдиному енергетичному середовищі. Водночас, більшість існуючих підходів до трансформації енергетичних систем зосереджена переважно на техніко-технологічних аспектах їх інтеграції. Недостатньо дослідженими залишається сервісна природа енергетичних процесів, механізми створення цінності в енергетичних системах, міжсистемна взаємодія секторів та інтеграція стійкості і гнучкості у сервісну архітектуру енергетики.

Енергетичне законодавство України також залишається переважно секторним, де електроенергетика, тепловий і нафтогазовий сектори, ВДЕ, енергоефективність тощо регулюються окремими законами, окремими ринками та окремими регуляторними механізмами. Інтеграція передбачає посилення взаємозв’язків між різними видами енергетичних ресурсів і носіїв енергії, зокрема електроенергією, газоподібним, рідким і твердим паливом, а також системами тепло- та холодопостачання, енергетичною інфраструктурою та секторами кінцевого споживання. Це забезпечує узгоджене функціонування енергетичного середовища, сприяє підвищенню ефективності використання ресурсів, підтримує процеси

декарбонізації та дозволяє забезпечувати надійне й економічно обґрунтоване надання енергетичних сервісів. Тому, у роботі аналізуються теоретико-методологічні можливості розвитку сервіс-інтегрованої енергетичної системи (ІЕС) країни як системи систем національного рівня, що 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.

У межах ІЕС, ОЕС України розглядається як базова електроенергетична підсистема, що взаємодіє з тепловими, газовими, накопичувальними та сервісними підсистемами РЕС через механізми балансування, резервування, цифрової координації та управління енергетичними сервісами. Архітектура ІЕС охоплює ОЕС України, тепловий та газовий сектори, накопичення, ВДЕ, керування попитом, послуги стійкості, цифрові платформи, а РЕС розглядаються як територіально та функціонально локалізовані підсистеми ІЕС.

Це дозволяє перейти від вузького розгляду ОЕС України як переважно електроенергетичної системи до інтегрованого мультисекторного підходу, у межах якого електричні, теплові, газові, накопичувальні та сервісні підсистеми координуються через механізми енергетичних сервісів, гнучкості, резервування та цифрового керування, а взаємодія ІЕС-РЕС розглядається як багаторівнева ієрархія: енергетичний сектор України (економіка + ринки + регулювання + інституції) – сервіс-інтегрована енергетична система – регіональні енергетичні системи – розумні мережі / мікромережі / системи управління розподіленими енергоресурсами тощо.

З метою виявлення конкретних напрямків розв’язання проблем сервіс-орієнтованого розвитку РЕС як невід’ємної складової ІЕС України у роботі проаналізовано моделі організації енергетичних систем США (ISO/RTO, LMP, ORDC, ринки резервів), ЄС (SDAC/SIDC, PICASSO/MARI/TERRE, CfD/PPA) і України та сформульовано перелік пріоритетних завдань розвитку:

- перенесення частини функцій планування, адекватності та гнучкості на регіональний рівень (у зв’язці з НЕК «Укренерго» та НКРЕКП);
- збереження архітектури РДД (ринок двосторонніх договорів) / РДН (ринок «на добу наперед») / ВДР (внутрішньодобовий ринок) / БР (балансуючий ринок) / РДП (ринок допоміжних послуг), але з додаванням регіонального шару сервісів й інструментів;
- оптимізацію вартісного міксу генерації, накопичувачів, управління енергоспоживанням, ВДЕ, МіікроГЕС та ТЕЦ у регіоні;
- запровадження острівних режимів (мікромережа) і механізмів швидкого відновлення (black start) на регіональному рівні;
- створення Регіональних енергетичних координаційних центрів (РЕКЦ) у зв’язці з ОСП (оператор системи передачі) / ОСР (оператор системи розподілу, обленерго) з функціями:
  - регіонального планування мереж/потужностей (довгострокові сценарії на 5-10 років);
  - адміністрування регіональних ринків гнучкості та закупівля/активація послуг розподіленої генерації;
  - встановлення «гнучких» тарифів для регіональних споживачів з добровільним підключенням до програм управління енергоспоживанням;
  - залучення мультиджерельного фінансування (гранти, кредити, воєнні фонди ЄС, «зелені» облігації, місцеві «гнучкі» аукціони);
  - формування пакету енергосервісних проєктів для першочергового впровадження.

Перехід від централізованої ресурсно-виробничої моделі паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) до гнучкої, сервісно-орієнтованої та клієнтоцентричної архітектури РЕС змінює як структурну, так і функціональну організацію енергетичної системи України. Так, якщо за існуючою моделлю Міненерго здійснює вертикально інтегроване управління всіма секторами ПЕК, фокусуючись на управлінні виробництвом та забезпеченні паливом, формуванні міжгалузевих балансів тощо, а регіони залишаються лише пасивними споживачами

та не мають інструментів для управління енергетичними потоками, то за умов трансформації Міненерго переходить до ролі архітектора та регулятора сервісно-інтегрованої системи, координуючи цифрові платформи, стандарти DataHub та ринки гнучкості. З'являються регіональні оператори енергетичної стійкості, громади й області отримують повноваження формувати локальні енергетичні баланси та закуповувати енергетичні сервіси (потужність, тепло, баланс, гнучкість). Сервісні послуги, а не ресурси виходять на перший план: електрика як сервіс; тепло як сервіс; гнучкість як сервіс; акумулювання як сервіс, які забезпечують локальний баланс і безпеку. Якщо взаємодія між секторами відбувалася через фізичні потоки палива (вугілля, газу) в умовах низької горизонтальної координації між регіонами та відсутності швидкої реакції на локальні кризи, то замість ресурсних зв'язків починають домінувати функціональні та сервісні зв'язки на ринках гнучкості, регіони обмінюються послугами холодного/гарячого резерву та аварійної підтримки і стають самодостатніми енерговузлами, здатними працювати автономно. У новій архітектурі змінюються ролі ключових гравців: Міненерго стає архітектором стандартів, координатором цифрового середовища та агрегатором національних балансів; НЕК "Укренерго" – оператором макрорівневого балансування та інтегратором регіональних ринків гнучкості; Оператори систем розподілу (ОСР) – адміністраторами цих ринків: ОВА / громади – замовниками енергетичних сервісів (тепло, гнучкість, резерв); бізнес / промисловість – постачальниками послуг гнучкості та резервів; домогосподарства – активними споживачами, учасники програм керування попитом, власниками розподілених енергетичних ресурсів. НКРЕКП стає центральною інституцією, що забезпечує узгодженість між секторами ПЕК, розвитком регіональних енергосистем, енергосервісних ринків та інвестиційною привабливістю енергетики України. Включення НКРЕКП у системну архітектуру гнучкої та клієнтоцентричної енергосистеми є критично важливим, оскільки саме регулятор визначає економічні стимули, доступ до мереж, правила функціонування ринків і тарифи на електричну та теплову енергію. До функцій регіональних ринків гнучкості входять аукціони зменшення/збільшення навантаження (керування попитом), купівля/продаж резервної потужності, інтеграція розподілених

енергетичних ресурсів та накопичення, надання допоміжних послуг на рівні регіону. Функції енергетичних кластерів (промислових, муніципальних, житлових) охоплюють локальне балансування виробництва і споживання, формування мікромереж та острівних режимів, надання послуг гнучкості та резерву.

Таким чином, внаслідок розвитку гнучкої та клієнтоцентричної архітектури РЕС відбувається перехід від жорсткої централізованої структури ПЕК України до інтелектуальної, сервісно-орієнтованої та децентралізованої екосистеми, у якій області й громади отримують реальні інструменти енергетичної безпеки та розвитку [18]. Це підвищує стійкість, гнучкість, ефективність та інвестиційну привабливість енергетики України, забезпечуючи її адаптивність до воєнних та післявоєнних ризиків і загроз та відповідність європейським стандартам інтегрованої енергосистеми.

1.2. Системна архітектури та проблеми функціонування регіональної енергетики

Функціонування сучасних систем регіональної енергетики значною мірою ґрунтуються на концепції централізованої моделі вертикально інтегрованого управління та товаро-центричної логікі участі у функціонуванні енергетичних ринків [7, 19]. В цих рамках вони традиційно розглядаються як вертикально підпорядковані складові інтегрованої енергосистеми країни, з обмеженими правами забезпечення енергетичної самодостатності регіонів, а складнощі їх трансформації обумовлюються тим, що існуючі системи регіональної енергетики виконують функції надання кінцевим споживачам суто енергетичних послуг, спрямованих, перш за все, на максимізацію власного прибутку енергетичних компаній [20]. При цьому потреби споживачів та ефективність використання ними енергії грають для них вторинну роль або ж зовсім ігноруються [21]., що особливо гостро проявляється у сфері комунальної теплоенергетики [22-24]. Такого роду дистанціювання призводить до суттєвого звуження сфери застосування сервісних послуг, скорочення обсягів їх фінансування і реалізації та, як наслідок, до низької енергоефективності регіональної економіки та відповідних РЕС (парадокс організаційного роз'єднання систем, decoupling) [25, 26]. Такий стан речей є класичним атрибутом продукт-орієнтованої парадигми існуючої

структурно-функціональної організації архітектури РЕС, де потреби однієї зі сторін (енергосистеми) грають домінуючу роль.

Системна архітектура РЕС як складової ІЕС відображена на рисунку 1.1, де у межах концепції системи систем РЕС розглядається як інтегроване поєднання організаційно та функціонально самостійних галузевих підсистем, розташованих на території певного регіону (області), територіальних громад або їх об'єднання.



Рис. 1.1. Системна архітектура РЕС як складової ІЕС країни

На верхньому рівні архітектури відображено зовнішні енергопостачальні організації, які забезпечують взаємодію регіональної енергосистеми з ІЕС.

До них належать атомні електростанції, теплові електростанції та теплоелектроцентралі, оператори систем передачі й розподілу електроенергії, виробники енергії з відновлюваних джерел, а також постачальники природного газу, вугілля, торфу, біопалива та інших енергетичних ресурсів, які забезпечують базову і маневрову генерацію, формування резервів потужності, підтримання частоти, аварійне покриття навантаження, диспетчеризацію, балансування, прогнозування виробництва та споживання, функціонування локальних ринків і оперативне управління постачанням ресурсів.

Регіони не лише отримують електроенергію, природний газ, паливо та інші ресурси, але й можуть передавати до зовнішньої системи надлишки електроенергії, виробленої об’єктами розподіленої та відновлюваної генерації, надавати послуги гнучкості, регулювання навантаження і балансування. Така взаємодія дає змогу поєднувати централізоване енергопостачання з розвитком локальних джерел енергії, накопичувачів, мікромереж та активної участі споживачів.

Внутрішню структуру РЕС формують вісім взаємопов’язаних секторальних систем. Електроенергетичний сектор охоплює об’єкти генерації, електричні мережі, відновлювані джерела енергії, резервні потужності та системи накопичення, а його основними функціями є виробництво і постачання електроенергії, резервування потужності, регулювання частоти й напруги, а також забезпечення гнучкості шляхом керування генерацією, накопиченням і споживанням.

Сектор теплопостачання включає системи централізованого теплопостачання, котельні, теплоелектроцентралі, когенераційні установки, теплові насоси та накопичувачі теплової енергії. Сектор газопостачання охоплює магістральні й розподільні мережі, постачання, резервування та балансування природного газу, а також механізми керування попитом. За умов дефіциту ресурсів або аварійних обмежень управління газовим попитом має координуватися з режимами роботи суміжних секторів.

Водопостачання та водовідведення представлені як окремі інфраструктурні системи, що водночас є значними споживачами електроенергії. Використання гнучкого керування насосними станціями дає змогу переносити частину електричного навантаження на години з нижчим попитом або більшим виробництвом електроенергії з відновлюваних джерел. Система водопостачання також повинна забезпечувати аварійне водозабезпечення критичних об'єктів, тоді як у секторі водовідведення можуть реалізовуватися технології використання скидного тепла та енергетичного потенціалу стічних вод.

Сектор поводження з відходами включає полігони, комплекси сортування і перероблення відходів, біогазові установки та об'єкти виробництва енергії з відходів. Він виконує подвійну функцію: забезпечує розв'язання екологічних завдань і водночас створює додаткові локальні джерела електричної й теплової енергії.

До супутньої інфраструктури належать об'єкти аварійного, резервного й автономного енергозабезпечення, енергетичні кластери, захисні споруди та інші критично важливі об'єкти. У ширшому трактуванні цей складник охоплює також транспортну інфраструктуру, зокрема електротранспорт, зарядні станції, паливозаправні комплекси та системи керування транспортними енергетичними потоками. Електромобілі й зарядна інфраструктура можуть розглядатися не лише як додаткове навантаження, а й як потенційний ресурс гнучкості та розподіленого накопичення енергії.

Наявна системна архітектура РЕС сформована переважно за галузевим і централізованим принципами, за яких електро-, газо- і теплопостачання, комунальна інфраструктура та споживачі функціонують як відносно відокремлені підсистеми. Взаємодія між ними здебільшого обмежується фізичним постачанням енергоресурсів і не забезпечує належної координації енергетичних, інформаційних та сервісних потоків. Унаслідок цього РЕС неповною мірою реалізує потенціал системи систем регіонального рівня, здатної інтегрувати розподілені ресурси, узгоджувати режими роботи різних секторів та адаптуватися до дефіцитів, аварійних порушень і змін умов енергозабезпечення.

Проблеми такої архітектури (рисунок 1.2) насамперед зумовлені фізичним руйнуванням генеруючих і мережевих об’єктів, високим рівнем зношеності обладнання, дефіцитом резервних і маневрових потужностей [27, 28], а також руйнуваннями внаслідок військової агресії [29].

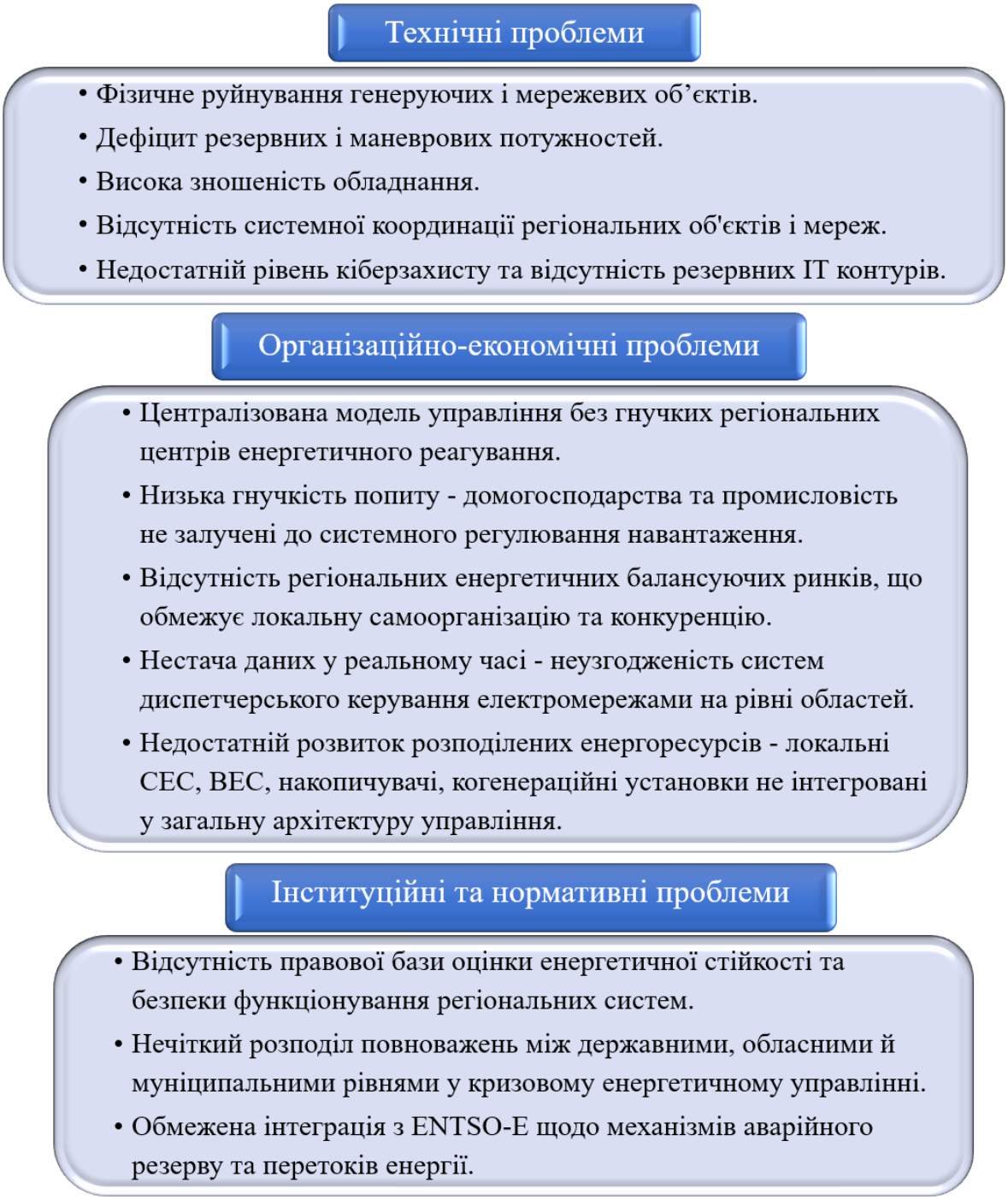


Рис. 1.2. Проблеми наявної системної архітектури РЕС

Сукупна дія цих чинників призводить до зниження пропускної спроможності мереж, зростання ймовірності локальних дефіцитів, обмеження можливостей оперативного балансування та збільшення тривалості відновлення енергопостачання.

За таких умов навіть локальне пошкодження окремого об’єкта може спричиняти каскадне порушення роботи взаємопов’язаних систем електро-, тепло-, газо- і водопостачання та критичної інфраструктури. Водночас відсутність системної координації регіональних генеруючих об’єктів, мереж, накопичувачів і споживачів не дає змоги своєчасно перерозподіляти навантаження, залучати доступні резерви та використовувати міжсекторальне заміщення енергоресурсів. Додатковим чинником вразливості є недостатній рівень кіберзахисту та відсутність резервних інформаційно-технологічних контурів, що підвищує ризик втрати керованості РЕС у разі пошкодження або компрометації цифрової інфраструктури.

Технічні обмеження посилюються організаційно-економічними проблемами. Домінування централізованої моделі управління не супроводжується формуванням гнучких регіональних центрів енергетичного реагування, здатних консолідувати інформацію про стан різних секторів, координувати учасників і приймати рішення з урахуванням локальних умов. У результаті регіональні органи управління, оператори інфраструктури, виробники та споживачі не об’єднані єдиною системою прогнозування, моніторингу і балансування. Нестача даних у реальному часі та неузгодженість систем диспетчерського керування обмежують можливості оцінювання поточного стану РЕС, прогнозування дефіцитів і оперативного вибору найбільш ефективних заходів реагування.

Низькою залишається і гнучкість попиту: домогосподарства, промислові підприємства та об’єкти комунальної сфери переважно виступають пасивними споживачами й недостатньо залучені до системного регулювання навантаження. Не сформовані належні економічні стимули та організаційні механізми для перенесення споживання, обмеження пікових навантажень, використання власної генерації й накопичувачів або надання послуг гнучкості. Відсутність регіональних енергетичних балансуючих ринків обмежує локальну самоорганізацію, конкуренцію та економічну мотивацію учасників до підтримання балансу. Водночас розподілені енергетичні ресурси (сонячні й вітрові електростанції, системи накопичення, когенераційні установки та керовані навантаження) функціонують фрагментарно і не інтегровані в загальну архітектуру управління. Тому їхній потенціал використовується переважно

для локального енергозабезпечення, а не як системний ресурс балансування, резервування та відновлення.

Інституційні й нормативні проблеми визначають межі розв'язання як технічних, так і організаційно-економічних завдань. Відсутність цілісної правової бази оцінювання енергетичної стійкості та безпеки функціонування РЕС ускладнює встановлення єдиних критеріїв, показників і нормативних рівнів їх надійності, самодостатності та готовності до кризових ситуацій. Нечіткий розподіл повноважень між державним, обласним і муніципальним рівнями породжує дублювання або, навпаки, прогалини у відповідальності за прогнозування ризиків, створення резервів, координацію аварійного реагування та відновлення енергопостачання. Обмежена інтеграція регіонального рівня з механізмами ENTSO-E щодо використання аварійних резервів, управління перетоками й координації режимів також звужує можливості залучення зовнішніх ресурсів у кризових умовах.

Сукупним наслідком є недостатня спроможність РЕС підтримувати енергетичний баланс, локалізувати порушення, адаптуватися до дефіцитів і швидко відновлювати функціонування, що зумовлює необхідність переходу до сервіс-орієнтованої архітектури РЕС, заснованої на міжсекторній координації, цифровому управлінні, активній участі споживачів, інтеграції розподілених енергоресурсів та узгодженні технічних, економічних й інституційних механізмів забезпечення ефективності, самодостатності, гнучкості та стійкості регіонального енергозабезпечення.

Сутність сервіс-орієнтованої РЕС визначається оптимальним поєднанням використання місцевих ПЕР і децентралізованого виробництва електричної і теплової енергії з централізованим виробництвом, накопиченням енергії та енергоефективністю, що підвищує цінність енергосистеми для всіх споживачів.

Відмітимо, що сервіс-орієнтована орієнтація відповідає законодавчим ініціативам ЄС стосовно інтеграції заходів з енергоефективності та модернізації структури енергосистем з урахуванням питань безпеки та соціального спрямування і де підкреслюється визначальний вклад регіональних енергосистем. Узагальнену

організаційно-функціональну схему сервіс-орієнтованої РЕС, наведено на рисунку 1.3.

Провідну роль в процесі сервіс-орієнтованого розвитку РЕС відіграє Регіональний енергетичний координаційний центр (РЕКЦ) – енергосервісний маркетплейс – цифрова багатостороння платформа, що забезпечує формування,

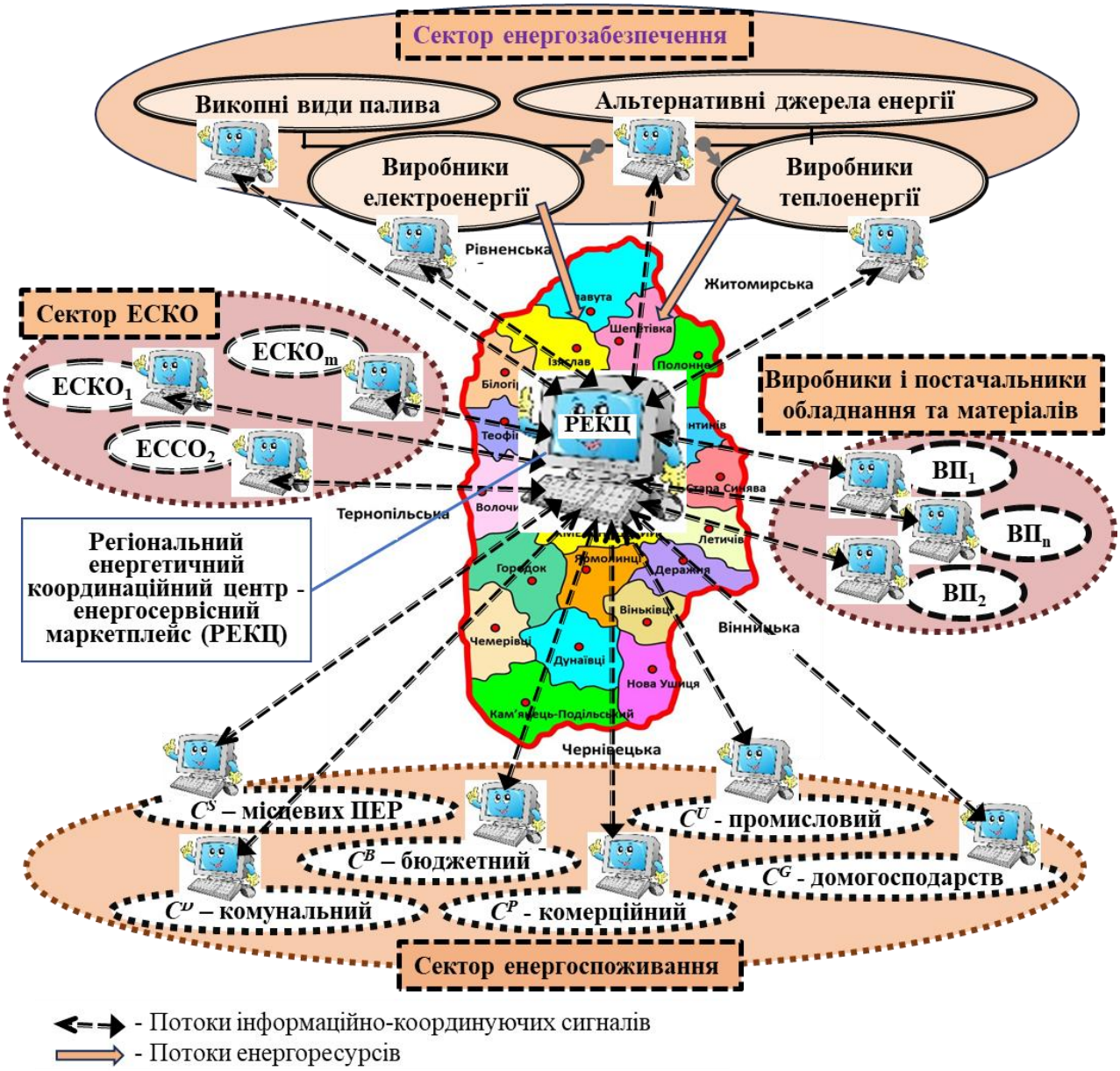


Рис. 1.3. Організаційно-функціональна схема сервіс-орієнтованої РЕС

агрегування та зіставлення попиту і пропозиції на енергетичні сервіси, їх контрактування, активацію, облік, верифікацію та економічні розрахунки між учасниками. На відміну від традиційного енергетичного ринку, де основним об'єктом операцій є енергія або потужність, на енергосервісному маркетплейсі предметом

взаємодії виступає функціональний результат: балансування, резервування, накопичення, керування попитом, підтримання критичного навантаження, аварійне енергопостачання, скорочення часу відновлення та інші сервіси, що підвищують ефективність, самодостатність, гнучкість і стійкість РЕС.

Запровадження енергосервісного маркетплейсу створює передумови для перетворення розосереджених ресурсів РЕС на керований портфель сервісних спроможностей та забезпечує оперативну мобілізацію локальних ресурсів для підтримання критичних споживачів, зменшення незабезпеченого попиту та скорочення часу відновлення у кризових ситуаціях, а в нормальних умовах – оптимізацію витрат, підвищення енергоефективності та участь розподілених ресурсів у ринках гнучкості й допоміжних послуг. РЕКЦ не обов’язково має бути фізичним органом. Насамперед, це функціонально-цифрова платформа, яка забезпечує інформаційну, технологічну, економічну та організаційну координацію учасників РЕС та створює організаційне середовище для участі енергосервісних компаній, постачальників енергоефективного обладнання і матеріалів, фінансових установ та інвесторів. Енергосервісні компанії мають здійснювати енергетичні обстеження, модернізацію будівель та інфраструктури, упровадження систем енергоменеджменту, локальної генерації й накопичення з оплатою за фактично досягнутий результат. Постачальники забезпечують технологічну основу проєктів, а інвестори – необхідні фінансові ресурси та механізми розподілу ризиків.

Таким чином, представлена архітектура відображає РЕС як багаторівневу, відкриту й адаптивну систему систем, у якій поєднуються електроенергетична, теплова, газова, водна, транспортна, комунальна та споживча інфраструктури. Системний ефект досягається не лише завдяки розвитку окремих секторів, а передусім завдяки їх узгодженій взаємодії, використанню спільних резервів, керуванню попитом, цифровій координації та залученню постачальників енергетичних сервісів. Реалізація такої архітектури спрямована на підвищення енергоефективності, гнучкості, самодостатності та стійкості енергозабезпечення регіону, зменшення залежності від зовнішніх ресурсів і забезпечення безперервного функціонування критичної інфраструктури в умовах ризиків та невизначеності, а

прибутковість досягається завдяки енергосервісним договорам (контрактам), участі у ринках допоміжних послуг, зменшенню втрат енергії, а також залученню системно-інтегрованих інвестицій у регіональні енергопроєкти.

Сервіс-орієнтований розвиток робить РЕС інвестиційно привабливими, оскільки замість капітальних витрат (CAPEX) з'являється ринок операційних послуг (OPEX), який можна системно-збалансовано фінансувати за моделями ЕСКО і Державно-приватного партнерства. За сервіс-орієнтованим підходом дохід формується не тільки від обсягів наданої/спожитої енергії, а й від сервісів гнучкості, енергоефективності, стійкості та безпеки, а РЕКЦ стає організатором цих сервісів і системно-узгодженим координатором витрат і доходів. Створюється регіональна сервіс-орієнтована система, інтегрована в енергетичну систему України, де кожна область:

- функціонує як регіональний центр стійкості;
- формує власний портфель сервісів відповідно до локальних потреб;
- взаємодіє з національною системою через ринок сервісів;
- забезпечує підвищення інвестиційної привабливості регіону.

Ключовими послугами РЕС у вигляді надбудови до РДД/РДН/ВДР/БР/РДП стають:

- Гнучкість як послуга (аукціони на зниження пікових навантажень і ліквідацію локальних «вузьких місць»);
- Балансування/Резервування як послуга з регіональною пріоритизацією та агрегуванням у РЕКЦ;
- Надійність/острівність як послуга (організація готовності до автономної роботи для кластерів критичної інфраструктури);
- Мережа як сервіс – такі послуги дешевші за капітальні інвестиції у мережі;
- Послуги у розробці планів розвитку регіональної енергосистеми та їх узгодження з національними планами та ENTSO-E;
- Системно-узгоджене залучення джерел фінансування енергосервісних проєктів (кредити, гарантії, фонди ЄС, EBRD, Світовий банк, муніципальні «зелені» облігації, ЕСКО, державно-приватне партнерство);

- Моніторинг і верифікація результатів реалізації інвестиційних проєктів;
- Послуги з безпеки та стійкості РЕС (захист критичної інфраструктури та кіберзахист);
- Послуги з удосконалення нормативно-правової бази (повноваження, дані, відповідальність та взаємодія РЕКЦ з ОСП/ОСР та регулятором; правила проведення регіональних аукціонів сервісів: продукти, гарантії виконання, M&V, прозорість; допуск агрегаторів на регіональні та національні ринки через стандартизований інтерфейс).

1.3. Системний аналіз базових методів і моделей сервіс-орієнтованого розвитку РЕС

Теоретико-методологічну платформу сервіс-орієнтованого розвитку РЕС складають аксіоми і положення сервіс-домінантної логіки (Service-Dominant Logic, SDL), які постулюють створення цінності в економіці і соціальній сфері не тільки за рахунок обміну товарами і послугами між взаємодіючими акторами (учасниками РЕС), а й у процесі їх взаємодії, сприяючи переходу від одноразових економічних транзакцій до встановлення довгострокових відносин зі споживачами [30-33].

Провідна ідея SDL полягає у тому, що актори (економічні та соціальні суб'єкти трансформації), застосовуючи свої компетенції на благо інших, отримують вигоду від взаємного використання ресурсів через обмін послугами за послугу, що розкриває перспективи розвитку системних послуг та розширює можливості взаємодії акторів з навколишнім середовищем і потоками енергії, зокрема з особливим видом критичного потоку – взаємним обміном послуг, та дозволяють будувати більш динамічні та системно-узгоджені моделі створення цінності з акцентом на механізми координації взаємодії акторів. Це дозволяє спрямовувати зусилля акторів на процеси, закономірності та вигоди обміну, а не тільки на виробництво продукції.

В якості базових у роботі розглянуто 11 відомих передумов SDL, п'ять з яких є аксіоми. Їх адаптований до умов функціонування РЕС вигляд, розширений автором передумовами 12 і 13, представлено на рисунку 1.4, де аксіоми виділено помаранчевим кольором.

За даним підходом актори розвитку РЕС (компанії, організації, підприємці, населення) розглядаються як інтегратори, що поєднують різні типи ресурсів для створення цінності – матеріальні (обладнання, сировина, земля) і нематеріальні (знання, навички, організаційні процеси). Жоден ресурс окремо, як правило, не створює цінність – потрібна їх комбінація, яку актори отримують, поєднуючи ресурси інших акторів зі своїми. Це перетворює їх взаємодію на «вузол» у мережі обміну ресурсами, які вони адаптують і трансформують під конкретний контекст для задоволення потреб споживача [34, 35].

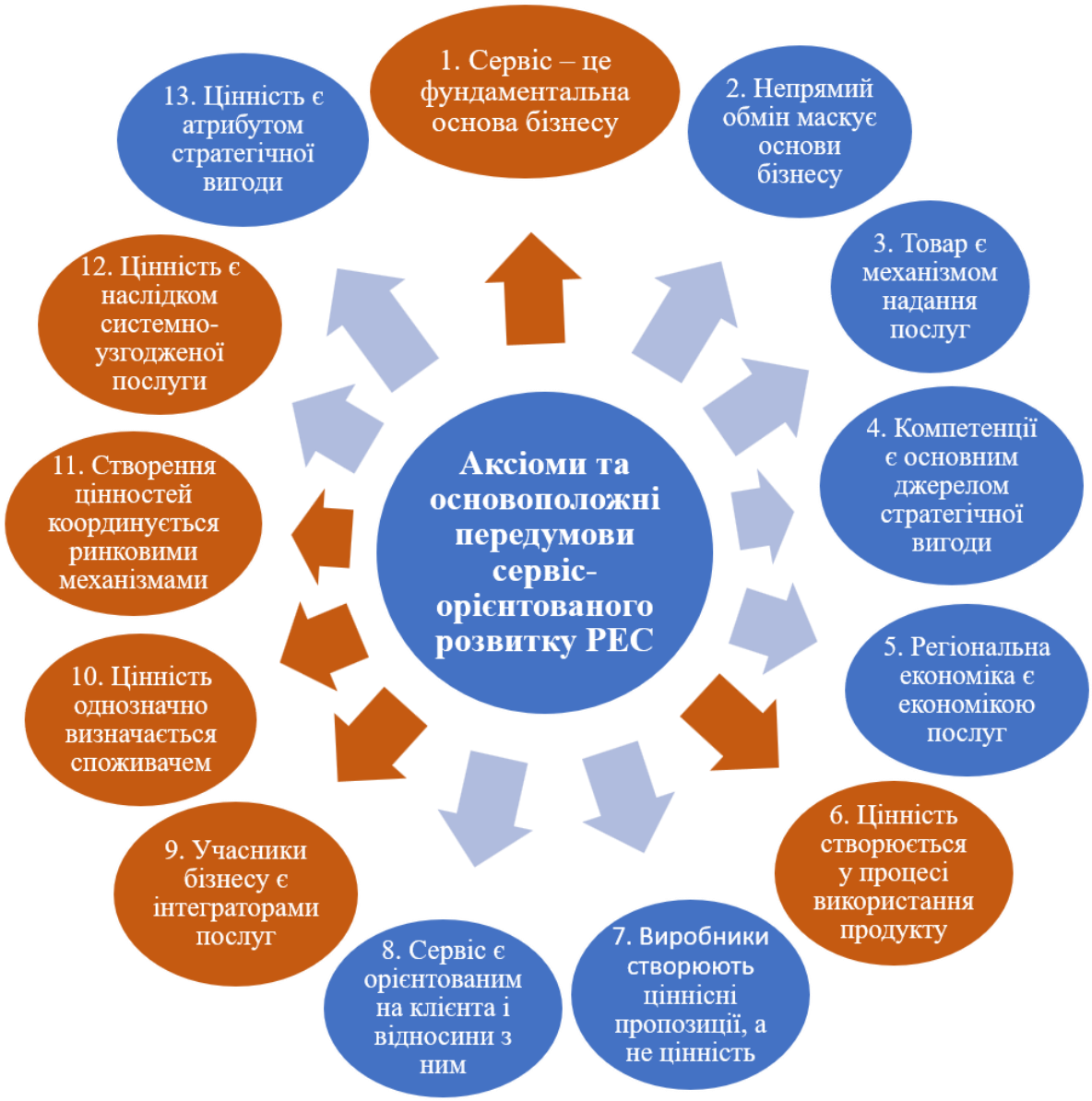


Рис.1.4. Логічні аксіоми та основоположні передумови сервіс-орієнтованого розвитку РЕС

Джерело: адаптовано автором на основі публікацій Стівена Варго та Роберта Люша

Актори не можуть створити цінність у відриві від споживача, бо цінність існує лише в досвіді того, хто її споживає, – актори формують ціннісні пропозиції – набір можливостей, умов і ресурсів, з яких користувач разом із ними створює власну цінність. Тобто, актори створюють можливості для цінності (продукт, сервіс, технологію або інфраструктуру), а остаточне рішення, чи є це цінним, приймає користувач, виходячи з власних потреб, контексту та досвіду. Проблемним є те, що акторам енергетичного сектору традиційно вигідно вимірювати результати своєї діяльності у грошових одиницях, максимізуючи фінансові метрики (оборот, прибуток, маржу) замість якості, інновацій чи задоволення потреб їх клієнтів – споживачів. Прикладів багато, і найбільш яскравий з них, окрім електропостачання – системи централізованого теплопостачання, де пріоритетним завданням виробників є максимізація обсягів продажу теплової енергії без урахування реальних потреб споживачів у різні періоди року.

При цьому зрозуміло, що до виробництва будь-якого товару, як правило, залучено декілька посередників (акторів). І якщо кожен з них буде орієнтуватися на власний грошовий виграш, то це спотворить суть бізнесу – створення та обмін цінністю [36,37]. Саме на актуальність вирішення цього питання вказують передумови 12 і 13 (рисунок 1.4), які констатують, що цінність є наслідком системно-узгодженої послуги, що створює стратегічну вигоду. Це об’єктивно, оскільки максимізація власного прибутку кожним актором окремо далеко не завжди забезпечує стратегічну вигоду для системи у цілому.

Теоретичне й прикладне підґрунтя сервіс-орієнтованого переходу крім SDL утворюють продуктово-сервісні системи (Product-Service Systems, PSS) та концепція «енергія як сервіс» (Energy-as-a-Service, EaaS). Їх поєднання дає змогу конструювати бізнес-моделі та прикладні механізми, в яких постачальники, споживачі та посередники спільно формують цінність у межах динамічної мережі взаємодій. Важливе місце в цій архітектурі посідають моделі «Кожен з кожним» (peer-to-peer, P2P) й енергетичної кооперації, що сприяють скороченню трансакційних витрат, посиленню адаптивності локальних систем і становленню децентралізованих ринків гнучкості [6, 25, 38, 39].

Концепція PSS охоплює спектр бізнес-моделей від продукт-орієнтованих до орієнтованих на результат і спрямована на ефективніше використання ресурсів [40-46]. Застосування PSS у сфері ВДЕ зменшує інвестиційне навантаження і посилює керованість попиту, а EaaS-контрактів з оплатою за досягнутий результат – розрахунок за корисний ефект (опалення, охолодження чи освітлення), а не за кількість спожитої енергії.

Моделі P2P надають споживачеві функції прос'юмера, спроможного безпосередньо обмінюватися енергією з іншими учасниками без традиційного централізованого посередництва. Розподілена координація та активна участь користувачів скорочують трансакційні витрати, підвищують локальну ефективність і зміцнюють стійкість енергозабезпечення [47-52]. Водночас P2P-механізми сприяють справедливому розподілу ресурсів, знижують уразливість до зовнішніх впливів та підтримують прозорість і адаптивність систем за наявності кібернетичних загроз, а ієрархічні й мультиагентні оптимізаційні схеми забезпечують масштабування таких рішень від локальних платформ до мікромереж і регіональних енергетичних кластерів. Потенціал цілісного розгляду електроенергетики, централізованого теплопостачання і комунальної інфраструктури з координацією рішень на місцевому, регіональному та загальнодержавному рівнях обґрунтовано у роботі [16, 53].

Узагальнення проаналізованих праць дає підстави визначити основні напрями сервіс-орієнтованої діяльності енергетичних систем на макро-, мезо- та мікрорівнях. До національного рівня (макрорівень) належать підприємства та мережі загальнодержавного значення, зокрема НАЕК «Енергоатом», НАК «Нафтогаз України», НЕК «Укренерго», АТ «Укргазвидобування» і ПАТ «Центренерго», діяльність яких охоплює нафтовий, газовий, вугільний, електроенергетичний і теплоенергетичний сектори. Основні напрями енергосервісної діяльності на цьому рівні: стратегічний енергетичний аудит і системний моніторинг; функціонування цифрових платформ EaaS; системна інтеграція ВДЕ до національних мереж; керування енергетичною ефективністю та балансуванням.

Регіональний рівень (мезорівень) утворюють регіональні підприємства та мережі – оператори систем розподілу, газорозподільні й теплопостачальні

підприємства, локальні ТЕЦ. Їхні ключові функції охоплюють розподіл та облік енергії, а також узгодження попиту і пропозиції. Пріоритетні напрями енергосервісної діяльності на цьому рівні: підготовка регіональних енергетичних планів і програм розвитку; запровадження систем енергетичного менеджменту; організація регіональних ринків енергетичних послуг; використання механізмів керування попитом; укладання ЕСКО-контрактів із муніципалітетами; розгортання технологій Smart Grid і Smart Heat.

На рівні кінцевих споживачів (мікрорівень) діють індивідуальні та кооперативні системи енергозабезпечення, які об’єднують виробництво, накопичення і споживання енергії в розподілених мікромережах. До них належать домогосподарства з сонячними, вітровими чи біоенергетичними установками, малі підприємства й комунальні об’єкти з локальними джерелами, а також громади, організовані як енергетичні кооперативи або мікромережі. Цільовими результатами є підвищення ефективності, продуктивності, безпеки та комфорту. До характерних енергосервісних рішень на цьому рівні належать: енергетичні аудити об’єктів і процесів; локальне енергетичне планування та програмування розвитку; формування інституту активного споживача; P2P-торгівля на локальних енергетичних маркетплейсах; керування попитом засобами керування попитом; енергосервісні договори у сфері ЖКГ та ОСББ; локальні системи енергетичного менеджменту за ISO 50001; технології Smart Grid, Smart Heat і Smart Home.

Енергосервісний маркетплейс виконує інтеграційну функцію, поєднуючи всі рівні енергетичної системи в єдиному середовищі взаємодії, де впровадження інновацій не зводиться до розповсюдження готового продукту, а набуває ознак інституційного процесу: компанії, споживачі та громади адаптують запропоновані рішення до власних ресурсів, потреб і ціннісних орієнтирів.

Реалізація сервіс-орієнтованого розвитку потребує створення цілісної узгодженої системи методів, моделей і механізмів, а саме:

- регіональних ринків гнучкості – аукціони послуг зі зниження/підвищення навантаження, гнучка резервна потужність, локальне балансування, режим острову;

- гнучкості як сервісу (Flexibility-as-a-Service) – агрегатори портфелів розподілених енергетичних ресурсів та керованих навантажень (водоканали, котельні, дата-центри, промисловість) для покриття піків та аварій;
- теплопостачання як сервісу для СЦТ – контракти на пікову теплову потужність, теплові акумулятори, гібридні схеми (ТЕЦ + теплові насоси + електричні котли), аварійне тепло для критичних об'єктів.
- енергії як сервісу (Energy-as-a-Service) – пакети «безперервність електроживлення» (сонячна, вітрова, гідро-, біо- та геотермальна енергія, накопичувачі), угоди про рівень та якість сервісу, проєкти та заходи з енергоефективності та енергозбереження;
- потужності як сервісу (Capacity-as-a-Service) – закупівля «пакетів потужності» у приватних мікро-ТЕЦ і газотурбінних установок (/ГТУ) систем зберігання енергії за готовність працювати у надзвичайній ситуації;
- підтримки мережі як послуга (Grid-support-as-a-Service) – допоміжні послуги, що пропонуються для балансування та підтримки стабільності локальних електро-, тепло-, та газорозподільних мереж.

Необхідність впровадження вищезазначених методів, моделей та механізмів розвитку системної архітектури РЕС в Україні обумовлюється недостатньою координацією між підсистемами, відсутністю регіональних центрів управління та обмеженим використанням цифрових інструментів аналізу й прогнозування, тобто мають комплексний, міждисциплінарний характер, який формується під впливом технічних, організаційно-економічних та інституційно-нормативних чинників.

Кількісне оцінювання їх впливу потребувало використання показників, що забезпечують вимірювані оцінки продуктивності та відображають здатність РЕС забезпечувати надійне та безперебійне енергозабезпечення споживачів за умов внутрішніх і зовнішніх збурень, серед яких:

- Коефіцієнт енергетичної незалежності, який визначається як відсоток попиту на енергію, що задовольняється внутрішніми джерелами (ВДЕ + традиційні) порівняно з імпортом, %;

- Індекс доступності постачання – кількість годин на рік, коли система задовольняє попит без перерв (наприклад, відключень), години/рік (максимум 8760);
- Вартість залежності від імпорту – визначається річною вартістю імпортованого палива як частки від загальних витрат на енергію, USD/МВт·год або % від бюджету;
- Середній час відновлення – середній час для відновлення повноцінної роботи після збою, годин;
- Доступність системи – відсоток часу, коли система працює на рівні або вище мінімально необхідної потужності, %;
- Індекс стійкості до збоїв – відсоток потужності, що зберігається після одиничної відмови, %;
- Час підготовки до виробництва – час від замовлення до введення в експлуатацію енергетичних одиниць;
- Регіональна виробнича потужність – відсоток компонентів від вироблених у країні, %;
- Оцінка складності встановлення – зважений індекс праці, обладнання та експертизи, необхідних для встановлення, (1 = просто, 10 = складно);
- Нормована або приведена вартість енергії (LCOE) – загальна вартість за весь термін служби (капітал, експлуатація, обслуговування) на одиницю виробленої енергії, USD/МВт·год;
- Капітальні витрати (CAPEX) – початкові інвестиції на одиницю потужності, USD/кВт;
- Період окупності – час, необхідний для повернення початкових інвестицій через продаж енергії або економію, роки;
- Інтенсивність викидів CO_2 – кількість викидів CO_2 на одиницю виробленої енергії, кг CO_2/МВт·год;
- Площа земельного використання – площа, необхідна на одиницю потужності, м²/кВт;
- Індекс забруднення повітря – викиди дрібних часток (PM2.5, SO_2, NOx) на МВт·год, г/МВт·год.

1.4. Методологічні засади сервіс-орієнтованої парадигми розвитку РЕС

Доцільність реалізації сервіс-орієнтованої парадигми розвитку РЕС зумовлена тим, що традиційна модель, орієнтована переважно на виробництво і постачання певних обсягів енергії, недостатньо враховує потреби регіонів у надійності, гнучкості, самодостатності та стійкості енергозабезпечення, тоді як сервіс-орієнтована парадигма за рахунок зміщення акценту з енергії як товару на корисний результат її використання цілеспрямована на забезпечення гарантованого енергозабезпечення, підвищення енергоефективності, резервування, керування попитом та адаптивність.

Базові положення концептуальної платформи сервіс-орієнтованої парадигми розвитку РЕС представлено на рисунку 1.5 у порівнянні з існуючою продукт-орієнтованою парадигмою та оцінкою науково-прикладної значущості сервіс-орієнтованих рішень.

Базова продукт-орієнтована парадигма ґрунтується переважно на централізованій моделі енергозабезпечення з вертикально інтегрованим управлінням та обмеженою участю регіонів і територіальних громад у визначенні структури, режимів і пріоритетів енергетичного розвитку, у межах якої регіон здебільшого розглядається як територіальний споживач паливно-енергетичних ресурсів, а не як активний суб’єкт, здатний формувати власні енергетичні баланси, залучати місцеві ресурси, управляти попитом і координувати розподілені джерела енергії. Відображеним на рисунку 1.5 напрямом розв’язання цієї проблеми є сервіс-орієнтована децентралізація, яка передбачає розширення повноважень і функціональних можливостей регіональних та місцевих учасників, розвиток кооперації споживачів і перетворення територіальної громади на активного суб’єкта енергетичного управління, а практичним результатом – модернізація та підвищення ефективності енергетичного обладнання, активніше використання місцевих енергоресурсів, розподіленої генерації й накопичення, а також зменшення залежності регіону від зовнішнього енергопостачання.

Іншим обмеженням застосування продукт-орієнтованої парадигми є товароцентрична логіка функціонування ринку паливно-енергетичних ресурсів,

відповідно до якої енергія сприймається переважно як товар, а її ціна як основний параметр економічної взаємодії. Такий підхід недостатньо враховує цінність надійності, гнучкості, стійкості, резервування, екологічності, інформаційної прозорості та керованості споживання.

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. 1.5. Концептуальна платформа сервіс-орієнтованого розвитку РЕС

Сервіс-орієнтована парадигма розширює зміст кінцевого результату енергозабезпечення: споживач отримує не лише певну кількість енергії, а гарантований корисний ефект у вигляді комфортних умов, безперервності

технологічних процесів, доступності резервного живлення, зниження витрат або можливості управляти власним навантаженням. Енергія в цьому разі виступає складовою комплексного сервісу. Реалізація такого підходу створює передумови для агент-орієнтованої взаємодії виробників, постачальників, операторів, агрегаторів і споживачів, а також для впровадження гнучкого тарифоутворення, що враховує час, умови, якість і системний ефект надання послуг.

Недоліком наявного підходу до функціонування енергоринку є також відсутність системно узгодженої методології децентралізації структури та сервісів РЕС, оскільки сам факт збільшення кількості розподілених джерел або накопичувачів не гарантує підвищення ефективності і стійкості системи, – результати залежать від розміщення джерел, структури попиту, режимів використання, взаємодії з мережами і доступності сервісів та мають враховувати не лише економічні витрати, а й рівні самодостатності, гнучкості, стійкості, надійності та якості енергетичних послуг. Розв’язання цієї проблеми доцільно здійснювати в межах теорії системи систем на основі принципу порівняної переваги, що дає змогу визначати, які енергетичні ресурси, технології та сервіси доцільно використовувати на рівні окремого об’єкта, громади, регіону або інтегрованої енергетичної системи країни. Очікуваним результатом стане підвищення стійкості функціонування РЕС і формування нових організаційно-технологічних структур надання енергосервісних послуг, здатних координувати ресурси різних учасників і секторів [5, 35, 36, 38, 54-56].

Ще однією проблемою продукт-орієнтованої моделі є збереження високих витрат і втрат енергії на стороні кінцевого споживання, де традиційні механізми здебільшого стимулюють постачання більшого обсягу енергії, а не досягнення корисного результату з мінімальними ресурсними витратами. Сервіс-орієнтований підхід передбачає застосування системно інтегрованих енергетичних послуг, зокрема енергоменеджменту, реагування на попит, керування попитом, енергосервісної модернізації, локальної генерації, накопичення та резервування, комплексне застосування яких дає змогу зменшити споживання і втрати енергії, узгодити режими роботи різних секторів та врахувати специфічні пріоритети регіону – економічні, технологічні, соціальні, безпекові та екологічні [6, 9, 20, 26, 37].

У цілому, представлені на рисунку 1.5 теоретико-прикладні положення сервіс-орієнтованого розвитку РЕС демонструють отримання суттєвих переваг внаслідок проведення цілісно узгодженої децентралізації, міжсекторальної координації, активної участі громад і споживачів, інтегрованого оцінювання та врахування соціальних чинників для підвищення ефективності, самодостатності, гнучкості та стійкості регіональних енергосистем, а перелік цих положень визначає напрями розв'язання проблем розвитку РЕС.

1.5. Принципи адаптації концептуальних положень теорії системи систем та теорії можливості

Доцільність застосування теорії системи систем (SoS) до дослідження розвитку РЕС зумовлена потребами системно узгодженого відображення складної архітектури функціонально самостійних складових їх структури в умовах децентралізації генерації, поширення ВДЕ і накопичувачів, активізації споживачів, міжсекторальної інтеграції і цифровізації процесів управління. За таких умов РЕС уже не може розвиватися лише як територіальний фрагмент централізованої енергосистеми або сукупність локальних енергетичних об’єктів, бо набуває ознак гібридної системи систем «acknowledged» типу, яка поєднує організаційно та функціонально самостійні, географічно розподілені підсистеми, які зберігають власні цілі й механізми управління, але взаємодіють для досягнення спільних результатів регіонального енергозабезпечення через спільні механізми балансування, резервування, сервісної взаємодії та міжсистемних перетоків.

Як наслідок, архітектура сучасної РЕС буде відповідати основним ознакам системи систем:

- операційної самостійності – кожна галузева або локальна система здатна виконувати власні функції незалежно від інших складових;
- управлінської самостійності – підсистеми мають різних власників, операторів, регуляторів і суб’єктів прийняття рішень;
- географічної розподіленості – джерела генерації, накопичувачі, мережі та споживачі розташовані на значній території та взаємодіють через фізичні й цифрові зв’язки;

- системності – дозволяє виявити та оцінити сукупний ефект міжсекторальної взаємодії, оскільки оптимізація одного сектору без урахування інших не забезпечує найкращого результату для регіону;
- емерджентності – у результаті узгодженої міжсекторальної взаємодії виникають властивості, яких не має жодна з них окремо, зокрема регіональна гнучкість, самодостатність, стійкість і здатність до адаптації;
- еволюційному розвитку – склад, конфігурація і функції РЕС системно змінюються внаслідок упровадження нових технологій, сервісів, ринкових механізмів та інституційних правил.

Особливої значущості підхід системи систем набуває в умовах децентралізації, коли поява великої кількості розподілених енергетичних ресурсів змінює традиційну односпрямовану структуру енергопостачання, споживачі перетворюються на активних учасників, які можуть виробляти, накопичувати, споживати і продавати енергію, регулювати навантаження та надавати послуги гнучкості, а інтеграція ВДЕ посилює мінливість режимів роботи й невизначеність енергетичних балансів РЕС [25, 38, 39].

Важливою перевагою застосування теорії системи систем за цих умов є розвинута платформа системного узгодження локальних цілей учасників РЕС, які, як правило, прагнуть максимізувати прибуток або забезпечити автономність, тоді як на рівні регіону необхідно підтримувати баланс, доступність енергетичних послуг, стійкість критичної інфраструктури та прийнятний рівень залежності від зовнішніх поставок.

Застосування SoS-підходу є доцільним і для забезпечення стійкості енергозабезпечення регіону, де відмова одного елемента може поширюватися на суміжні сектори та спричиняти каскадні наслідки для РЕС. Водночас системно розподілена структура створює додаткові можливості для резервування, острівного функціонування мікромереж, перерозподілу навантажень і міжсекторального заміщення ресурсів. Це дає змогу аналізувати не лише надійність окремих об’єктів, а й здатність усієї РЕС поглинати зовнішні впливи, адаптуватися, зберігати критичні функції та відновлюватися після порушень.

У контексті сервіс-орієнтованого розвитку методологія системи систем забезпечує перехід від координації фізичних об’єктів до управління сукупністю взаємопов’язаних енергетичних сервісів: балансування, реагування на попит, накопичення, резервування, енергоменеджмент, підвищення енергоефективності та відновлення енергопостачання, які розглядаються як функціональні результати взаємодії різних підсистем, що дає змогу оцінювати внесок кожного сервісу й технології у досягнення інтегральних цілей РЕС та формувати їх раціональне поєднання.

Тобто, теорія системи систем слугує методологічною основою цілісного представлення РЕС та обґрунтування її сервіс-орієнтованого розвитку, застосування якого дає змогу перейти від фрагментарної оптимізації окремих об’єктів і секторів до системно узгодженого формування регіонального енергетичного середовища, у якому автономні учасники та розподілені ресурси взаємодіють для підвищення ефективності, самодостатності, гнучкості й стійкості енергозабезпечення регіону:

- Структурна цілісність досягається без втрати автономії – SoS дозволяє зберегти операційну незалежність локальних енергетичних підсистем, водночас інтегруючи їх у єдину метасистему з узгодженими цілями та правилами взаємодії;
- Замість жорсткої ієрархії застосовується багаторівнева координація – управління реалізується не через вертикальне підпорядкування, а через координаційні механізми, сервісні контракти та правила взаємодії, що зменшує затримки управління та ризик системних збоїв;
- Досягається підвищена стійкість та живучість системи – відмова окремих компонентів не призводить до колапсу всієї РЕС;
- Локальна оптимальність узгоджується з глобальною раціональністю – локальні агенти оптимізують власні процеси, але в межах мета-правил, що гарантують узгодженість із глобальними цілями регіону (енергобезпека, декарбонізація, надійність, доступність);
- Інституційна сумісність узгоджується із ринковими та регуляторними моделями – SoS природно поєднується з сервіс-орієнтованими ринками, де

централізований регулятор задає правила гри, а децентралізовані учасники діють автономно в межах цих правил;

- РЕС у парадигмі SoS здатна еволюціонувати: нові енергетичні сервіси, джерела, накопичувачі або споживачі можуть інтегруватися без руйнування існуючої структури;
- На відміну від хаотичної регіональної децентралізації, SoS забезпечує наявність метарівня управління, який формує довгострокові цілі розвитку регіональної енергетики та синхронізує дії автономних підсистем.

Це дозволяє розглядати теорію SoS-підходу як парадигму розвитку РЕС, у якій централізація та децентралізація перестають бути взаємовиключними альтернативами і перетворюються на комплементарні елементи створення адаптивної та стійкої РЕС, здатної долати проблемні фактори розвитку $\mathcal{P}$ в умовах ризиків та невизначеності

$$\mathcal{P} = \{P^{tech}, P^{org}, P^{inst}\}, \tag{1.1}$$

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

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

$$\min \mathbb{E}[\mathbb{L}] = f(\text{ENS, SAIDI, CI}), \tag{1.2}$$

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

переви 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.

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

$$\sum_{i,s} V_{i,s}\,(E, I, T) \rightarrow max, \tag{1.3}$$

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 1.1), що розглядаються як функції від керуючих параметрів системи та визначаються через результати функціонування системи і залежать від структури генерації, резервів, накопичення, балансування, параметрів попиту та сервісних рішень.

Таблиця 1.1 – 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.

Класичні підходи розв'язання проблемних завдань (1.1) - (1.3) за рахунок нарощування встановленої потужності та/або збільшення обсягів виробітку енергії, не зменшують загальносистемних витрат і втрат у системі РЕС-ІЕС, оскільки не змінюють принципи побудови та архітектуру їх взаємодії. Розв'язання цих завдань пропонується здійснювати як цілісно узгоджену сукупність на основі теорії системи систем, в межах якої РЕС відображається множиною $\mathcal{R}$ підсистем S_k, що мають власні цілі, обмеження і механізми управління, інтегровані у складі ІЕС

$$\mathcal{R} = \bigcup_{i=1}^{N} S_i. \quad (1.4)$$

Це дозволяє мінімізувати складнощі досягнення глобального екстремуму системі без втрати автономії її підсистем

$$\nexists x^*: \arg\min_x \sum_i J_i\,(x) \quad (1.5)$$

де: x – вектор керуючих рішень (диспетчерські команди, графіки генерації, перетоки, заряд/розряд накопичувачів, обмеження навантаження, резерви тощо); $J_i(x)$ – ціль / "вартість" i-ї підсистеми (витрати, ризики, штрафи за недопостачання, технічні втрати, деградація накопичувачів, порушення режимів тощо); $\sum_i J_i\,(x)$ – загальносистемна ціль мінімізації; $\nexists x^*$ означає, що рішення x^* забезпечення мінімуму цієї задачі може не існувати в межах обмежень автономії / прав власності / операційних правил тощо її підсистем.

Тобто, для РЕС не існує єдиного централізованого керування, яке забезпечує глобальний мінімум функції загальносистемних витрат і втрат системи РЕС-ІЕС, оскільки рішення, що базуються на централізованому диспетчерському управлінні та пасивному резервуванні, не здатні забезпечити стійке зменшення втрат за умов невизначеності поведінки РЕС через те, що проблема стійкості тут вирішується шляхом посилення та дублювання мереж, створення пасивних резервів (резервні лінії, резервні трансформатори, резервні блоки), централізованого диспетчерського управління, планування «зверху вниз» та будівництва централізованих генеруючих потужностей.

Пошук глобального екстремуму системи РЕС-ІЕС за виразом (1.5) має базуватися на компромісних рішеннях з координації та децентралізації управління, що підтверджує доцільність залучення сервіс-орієнтованих механізмів для координування діяльності РЕС у складі ІЕС на принципах взаємовигідного співробітництва, а не жорсткого централізованого управління.

Спираючись на результати проведеного аналізу можна констатувати, що:

- Проблеми наявної архітектури РЕС мають переважно архітектурний, а не локально-технічний характер;

- Сервіс-орієнтовані механізми управління є ефективнішими за центр-орієнтовані рішення з точки зору зниження ENS і SAIDI та урахування синергії взаємодії між регіонами;
- Ефекти сервіс-орієнтованого розвитку РЕС є кумулятивними при переході від локального до регіонального та національного рівнів.

Доцільність застосування теорії можливості до дослідження розвитку РЕС зумовлена потребами системно узгодженого відображення процесів розвитку їх складної архітектури в умовах невизначеності, коли значення майбутнього попиту на енергетичні послуги, обсягів генерації з відновлюваних джерел, вартості ресурсів, інвестицій і тривалості порушень можуть бути визначені лише наближено, а для частини таких параметрів немає достатніх однорідних спостережень, щоб обґрунтовано задати розподіли ймовірностей, тому у цій роботі невизначеність описується засобами теорії можливостей, заснованої на нечітких множинах [57-59].

Нехай $x \in X$ – можливе значення невизначеного параметра, а $\pi(x) \in [0,1]$ – розподіл можливості. де значення $\pi(x)$ характеризує ступінь сумісності x з наявними відомостями або прийнятими експертними оцінками. За умови нормування $\sup_{x \in X} \pi(x) = 1$ принаймні одне значення є повністю можливим. При цьому, оцінка $\pi(x) = 1$ не означає, що це значення обов'язково реалізується, а $\pi(x) = 0$ – його несумісність із заданим описом.

Для події $A \subseteq X$ міра можливості визначається як $\Pi(A) = \sup_{x \in A} \pi(x)$, яка показує, наскільки подія A узгоджується з наявною інформацією, а відповідна міра необхідності визначається через доповнення події $N(A) = 1 - \Pi(X \setminus A)$.

Таким чином, $\Pi(A)$ характеризує можливість здійснення події, а $N(A)$ – ступінь, з яким наявний опис виключає її нездійснення. Якщо $\Pi(A) = 1$, подія цілком можлива, але може залишатися не необхідною; якщо $N(A) = 1$, усі значення, сумісні з прийнятим описом, належать A. Для об'єднання подій виконується $\Pi(A \cup B) = \max\{\Pi, (A)\Pi(B)\}$, а для їх перетину – $N(A \cap B) = \min\{N, (A)N(B)\}$.

У прикладних моделях невизначений параметр доцільно задавати нечітким числом. Наприклад, трапецієподібне число $\tilde{x} = (a, b, c, d)$, де $a \le b \le c \le d$, задає

інтервал допустимих значень $[a, d]$ та ядро найбільш можливих значень $[b, c]$. Його функція належності має вигляд

$$\mu_{\tilde{x}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a \text{ або } x > d, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \le x < b, \\ 1, & b \le x \le c, \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \le d. \end{cases} .$$

Для вироджених крайніх інтервалів ($a = b$ або $c = d$) відповідну лінійну ділянку опускають. Якщо $b = c$, нечітке число є трикутним. У межах цієї роботи такі числа можуть описувати, зокрема, прогнозне навантаження, доступну потужність ВДЕ, капітальні витрати та тривалість відновлення енергетичного сервісу.

Для переходу від нечіткого опису до розрахункових сценаріїв використовуються α-зрізи $[\tilde{x}]_\alpha = \{x \in X : \mu_{\tilde{x}}(x) \ge \alpha\}$, $\alpha \in (0, 1]$. Для трапецієподібного числа вони утворюють інтервал $[\tilde{x}]_\alpha = [a, +\alpha(b-a)\ d - \alpha(d-c)]$. Зі збільшенням α інтервал звужується до значень, які сильніше узгоджуються з вихідними відомостями, що дає змогу послідовно перевіряти рішення за різних рівнів визначеності параметрів без приписування сценаріям частот або ймовірностей.

Поєднання теорії можливостей із концепцією «система систем» полягає у врахуванні неоднакової визначеності параметрів взаємопов'язаних підсистем, коли для електро-, тепло-, газопостачання, накопичення енергії та управління попитом можна задавати окремі розподіли можливості або нечіткі параметри. При цьому, під час їх спільного розгляду необхідно окремо визначати правила узгодження залежних параметрів, оскільки застосування операції $\min$ до ступенів можливості спільного сценарію є вибором конкретної моделі зв'язку, а не універсальною властивістю будь-яких залежностей.

Отже, теорія можливостей 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.

1.6. Формулювання науково-прикладної проблеми та постановка завдань дослідження

Попри очевидні феноменологічні переваги та концептуальну привабливість, застосування сервіс-домінантної логіки в задачах сервіс-орієнтованого розвитку РЕС супроводжується принциповими і досі нерозв'язаними проблемами, обумовленими потребою науково-прикладної адаптації логічних аксіом, розроблених для фірмо-центричних екосистем (Firm-Centric Service Ecosystems), для їх застосування в системах суспільного забезпечення (Provisioning Systems), які забезпечують суспільство критичними для життя і безпеки благами з електро- та теплоенергії, питної води, харчування, транспорту та зв'язку тощо. Надання цих благ має інфраструктурну природу (мережі, диспетчерські центри, аварійні служби), а пріоритетна мета – гарантоване забезпечення надійності, доступності, стійкості та базової справедливості незалежно від платоспроможності, погодних умов чи поведінки окремих акторів. У той же час, фірмо-центричні сервісні екосистеми SDL – це класичний об'єкт маркетингу, метою якої є максимізація прибутку, лояльності та частки ринку.

Це не задовольняє РЕС, яка не може оптимізуватись лише за прибутком, оскільки її призначення – забезпечення ефективності, самодостатності, стійкості, доступності та екологічної безпеки надання послуг, а держава, регулятори, громада для неї – не сфера ринкових взаємовідносин з ними, а частина системи керування, об'єктом якої є цілісно узгоджена мережа акторів, ресурсів, сервісів і правил.

За цих умов, реалізація сервіс-орієнтованого розвитку РЕС потребує розроблення нового концептуального підґрунтя, яке включає авторське розуміння РЕС, сервіс-орієнтовану парадигму її розвитку, структуру об'єктів, ресурсів, технологій і сервісів, принципи взаємодії між елементами системи і цільові характеристики розвитку, та нового теоретико-методологічного підґрунтя, яке визначає систему наукових підходів і принципів, формалізоване представлення РЕС, систему математичних моделей, сценарне багатокритеріальне моделювання, методи оптимізації, систему критеріїв і показників, оцінювання внеску сервісів, аналіз

ризиків і невизначеності, верифікацію, валідацію та оцінювання робастності, методологію підтримки прийняття рішень.

Реалізація такого підходу передбачатиме перехід від продажу енергії та енергоефективного обладнання і матеріалів як товарів до продажу послуг на енергосервісному ринку, де споживач може обирати набір сервісів. На цьому ринку мають бути реалізовані нові ролі агрегаторів, провайдерів енергосервісів, ЕСКО-компаній, локальних операторів мікромереж, нові форми інтеграції споживачів як активних учасників енергоринку та нові функції регіональних органів влади як модераторів розвитку. Як наслідок, має змінитися архітектура сервіс-орієнтованої моделі регіональної енергетики, обумовлена інтеграцією децентралізованих джерел енергії (ВДЕ, мікрогенерація), використанням цифрових платформ для моніторингу, прогнозування і управління та потребами у гнучких механізмах розподілу енергії.

У сукупності, це визначає потребу комплексного розв’язання взаємопов’язаних теоретико-методологічних 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 врахування 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.

У сукупності це обумовило потребу цілісно узгодженого розв’язання важливої науково-прикладної проблеми, пов’язаної з необхідністю 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. Системні домінанти та протиріччя розв'язання цієї проблеми представлено на рисунку 5.

Для вирішення проблеми в роботі сформульовані такі завдання:

1. Розробити та науково обґрунтувати 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. Розробити 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. Розробити метод оцінювання стійкості РЕС, визначити параметри інтегрального показника стійкості та провести оцінювання економічної вартості підвищення стійкості РЕС через показник прихованої вартості стійкості.

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

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

6. Розробити 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.

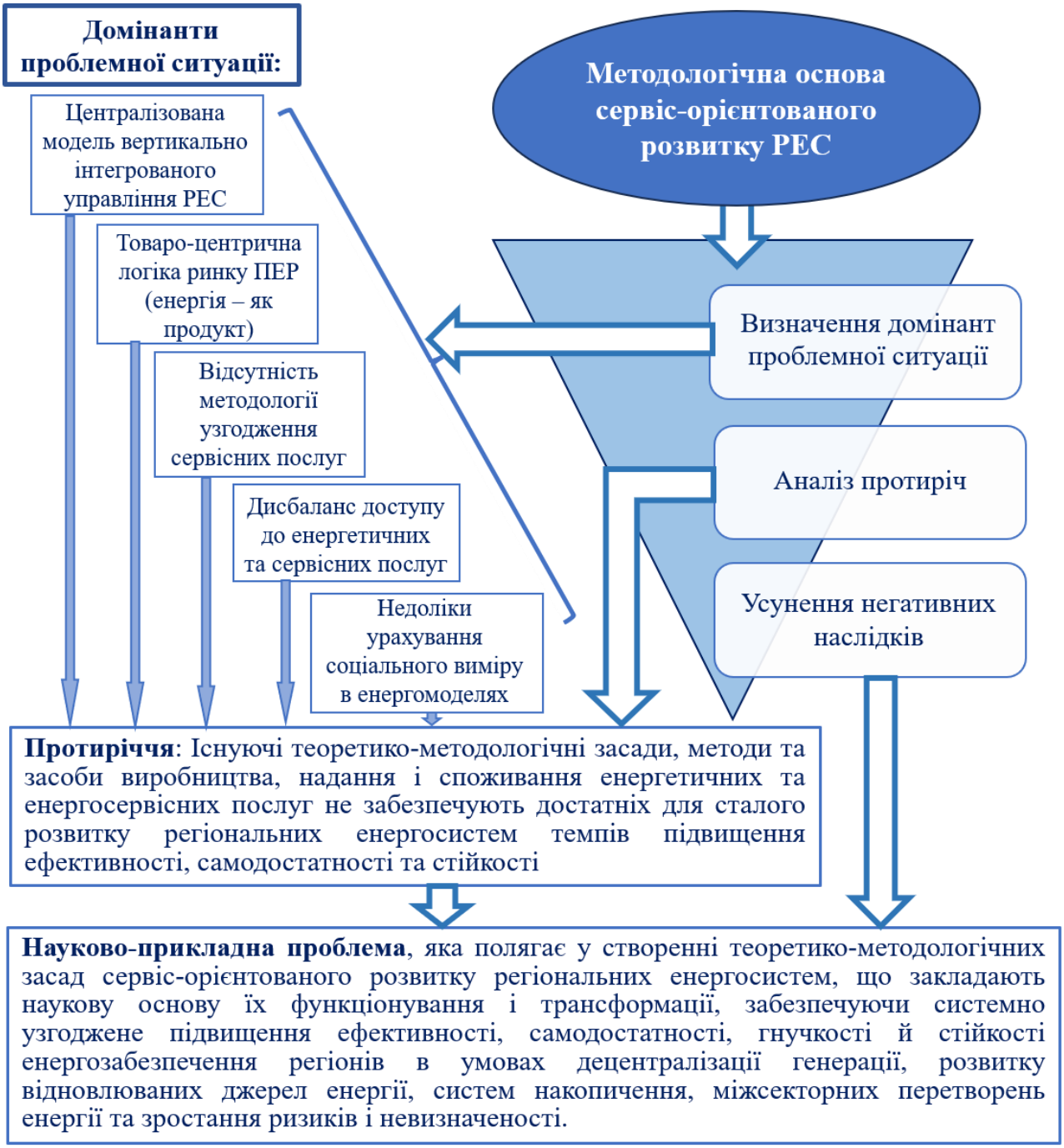


Рис. 5. Методологічна платформа формулювання науково-прикладної проблеми

1.7. Висновки до розділу

1. Проведено аналіз сучасних проблем, тенденцій та особливостей розвитку регіональної енергосистеми в умовах трансформації енергетичного сектору країни під

впливом децентралізації енергопостачання, декарбонізації, цифровізації, розвитку відновлюваних джерел енергії та систем накопичення, міжсекторальної інтеграції, активізації споживачів і підвищення вимог до енергетичної безпеки. Показано, що наявна архітектура регіональної енергетики не повною мірою відповідає сучасним умовам функціонування енергетичного сектору. Її технічними проблемами є фізичне руйнування і висока зношеність генеруючих та мережевих об'єктів, дефіцит резервних і маневрових потужностей, недостатня системна координація регіональних об'єктів і мереж та відсутність резервних інформаційно-технологічних контурів. Організаційно-економічні обмеження пов'язані з домінуванням централізованої моделі управління, недостатньою гнучкістю попиту, відсутністю регіональних механізмів балансування, нестачею оперативних даних і неузгодженістю диспетчерських систем. Технічні та організаційно-економічні проблеми посилюються недосконалістю правових засад оцінювання енергетичної стійкості регіонів та нечіткім розподілом повноважень і відповідальності між державним, регіональним та муніципальним рівнями.

2. Обґрунтовано доцільність розв'язання проблем РЕС у складі інтегрованої енергетичної системи країни як відкритої, багаторівневої та динамічної системи систем, до структури якої належать організаційно й функціонально самостійні, але взаємопов'язані підсистеми електро-, газо- і теплопостачання, водопостачання та водовідведення, транспорту, поводження з відходами, комунальної інфраструктури, розподіленої генерації, накопичення та споживання енергії. Їх взаємодія здійснюється через фізичні потоки енергії і ресурсів, інформаційний обмін, економічні механізми й енергетичні сервіси, а системний ефект визначається не лише характеристиками окремих складових, а передусім узгодженістю їх взаємодії, здатністю використовувати спільні резерви, здійснювати міжсекторальне заміщення ресурсів і підтримувати безперервність енергозабезпечення.

3. За результатами системного аналізу концепцій сервіс-домінантної логіки (SDL), продуктово-сервісних систем (PSS) та моделі «енергія як послуга» (EaaS) установлено можливість їх використання як теоретичного підґрунтя сервіс-орієнтованого розвитку РЕС. SDL дає змогу розглядати цінність як результат спільної

діяльності виробників, операторів, постачальників сервісів, органів управління та споживачів, PSS забезпечує поєднання енергетичного обладнання, цифрових технологій і супровідних послуг у цілісні рішення, орієнтовані на досягнення визначеного результату, а EaaS передбачає перехід від оплати переважно за обсяг поставленої енергії до оплати за корисний ефект – гарантований рівень енергозабезпечення, економію ресурсів, резервування, гнучкість, комфорт або стійкість функціонування.

4. Застосування методологічних положень теорії системи систем до розвитку РЕС дозволяє адекватно відображати багаторівневу й розподілену архітектуру регіональної енергетики, враховувати самостійність та різноспрямовані інтереси учасників, узгоджувати локальні, регіональні й загальнодержавні цілі, інтегрувати ВДЕ, накопичувачі, мікромережі та керовані навантаження, формалізувати міжсекторальні взаємозв’язки та сервісні потоки, оцінювати емерджентні властивості ефективності, самодостатності, гнучкості та стійкості та обґрунтовувати конфігурацію, режими функціонування і напрями розвитку РЕС в умовах ризиків та невизначеності.

5. На підставі виявлених суперечностей сформульовано науково-прикладну проблему, що підлягає вирішенню в межах дисертаційної роботи, яка полягає у необхідності створення теоретико-методологічних засад сервіс-орієнтованого розвитку РЕС для підвищення їх ефективності, самодостатності, гнучкості та стійкості в умовах децентралізації, поширення відновлюваних джерел енергії і систем накопичення, міжсекторальної інтеграції, цифровізації, ризиків та невизначеності. Показано, що розв’язання цієї проблеми потребуватиме формування системного уявлення про РЕС як об’єкт сервіс-орієнтованого розвитку; визначення принципів, критеріїв і показників його оцінювання; розроблення моделей енергетичних та сервісних потоків; методів багатокритеріального вибору технологій і сервісів; процедур урахування ризиків, сценарної невизначеності, верифікації та валідації результатів; а також засобів підтримки прийняття рішень щодо формування раціональних траєкторій розвитку РЕС.

РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ІНТЕГРОВАНИХ СЕРВІСНИХ ПОСЛУГ РЕС

2.1. Еволюція розвитку інтегрованих сервісних послуг

Історично, сервісні послуги у сфери виробництва і споживання енергії як загальносистемна категорія розвивались у двох напрямах – енергетичні послуги, що надаються енергопостачальними організаціями та енергосервісні послуги у сфері використання енергії [34, 35, 54]. Перше посилання на поняття «енергосервісні послуги» згідно з базою даних Scopus було у 1955 році [60], однак і досі в науковому середовищі ще не склалося однозначного його визначення. У багаточисельних наукових публікаціях [61] відмічається, що це комплекс професійних дій з енергоаудиту, проєктування, фінансування, модернізації, експлуатації, моніторингу та верифікації результатів, корисність, яку споживач отримує завдяки використанню енергії (тепловий комфорт, освітлення, мобільність, ефективність технологічного процесу), бізнес-модель, у якій винагорода постачальника пов’язана з досягненням установлених показників результативності [62-67].

Директива (ЄС) 2023/1791 визначає енергетичну послугу як фізичну вигоду, корисність або благо, отримані від поєднання енергії з енергоефективною технологією чи дією, що може включати операції, технічне обслуговування і контроль, необхідні для надання послуги, та забезпечує перевірюване й вимірюване або оцінюване підвищення енергоефективності чи економію первинної енергії [68].

Однак, навіть це визначення не охоплює специфіку та можливості енергетичних послуг, необхідних для підвищення результативності (продуктивності, якості тощо) процесів виробництва, передачі, розподілу, постачання та кінцевого споживання енергії [54, 69]), які забезпечують створення додаткової доданої вартості (прибутковість, вигоду, корисність, тощо) [70-74].

Звернемо увагу до пояснень, зроблених Секретаріатом СОТ [69, 77]: «На лібералізованих ринках основні енергетичні послуги (energy services), такі як транспортування, передача та розподіл в умовах конкуренції все більше надають незалежні оператори. Інші послуги включають консалтинг (у різних сферах,

охоплюючи енергоефективність, енергозбереження та відновлювані джерела енергіє), будівельно-монтажні роботи, обслуговування мережі та послуги, пов'язані з розподілом, такі як вимірювання та виставлення рахунків» і далі – «велику складність у визначенні енергетичних послуг представляє факт, що галузь традиційно не розрізняє енергетичні товари та енергетичні послуги» і, як висновок – «інші допоміжні послуги, що включені у ланцюжок доданої вартості (від виробництва енергії до продажу споживачам), такі як будівельно-монтажні роботи, інжинірингові та консалтингові послуги ..., краще визначати як супутні енергосервісні послуги (energy-related services) та відрізняти їх від енергетичних послуг (energy services)».

Пропонується енергетичний сервіс РЕС, який інтегрує розглянуті вище підходи, визначати як організаційно, технологічно та економічно забезпечений комплекс дій, ресурсів і цифрових функцій, спрямований на досягнення, підтримання та верифікацію погодженого рівня енергоефективності, гнучкості, стійкості та/або енергетичної самодостатності регіональної енергосистеми або її окремих підсистем, за якого відповідальність і винагорода постачальника повністю чи частково пов’язуються з фактично отриманим результатом.

Таке визначення інтегрованих сервісних послуг має декілька принципових ознак. По-перше, об’єктом сервісу є не окрема одиниця обладнання, а функція або стан енергосистеми. По-друге, очікуваний результат задається системою вимірюваних показників і базовою лінією порівняння. По-третє, надання сервісу охоплює весь життєвий цикл рішення – від діагностики потреб до експлуатації та верифікації. По-четверте, технологічні ресурси різних секторів – електроенергетики, теплопостачання, газопостачання, накопичення та керованого попиту – можуть агрегуватися для отримання інтегрованого системного ефекту. По-п’яте, споживач, прос’юмер, агрегатор, оператор мережі, орган регіонального управління й постачальник сервісу виступають співучасниками створення цінності [36, 38, 39,53].

Еволюція розвитку сервісних послуг у світі та в Україні представлена у таблиці 2.1 у вигляді систематизованої послідовності стадій розвитку від обслуговування окремого технічного обладнання до формування цілісного сервісного середовища РЕС, де кожна наступна стадія не заперечує попередню, а охоплює її

результати та доповнює їх новими функціями координації, балансування й системного управління.

Таблиця 2.1 – Стадії розвитку сервісних послуг у світі та в Україні

Стадія розвитку	Рівень інтеграції	Основний об'єкт управління	Основна мета	Типові сервіси
I. Обслуговування обладнання	Окремий технічний об'єкт	Енергетичне обладнання	Забезпечення працездатності	Моніторинг, діагностика, технічне обслуговування
II. Управління енерго-споживанням	Окремий споживач	Будівля, підприємство	Підвищення енерго-ефективності	EMS, BEMS, ESCO
III. Управління локальними енергетичними ресурсами	Локальна енерго-система	Розподілені енергетичні ресурси, мікромережі, накопичувачі енергії	Оптимізація локального балансу	Мікромережі, накопичення енергії, енергетичний менеджмент
IV. Координація розподілених ресурсів	Група локальних систем	Віртуальні енергетичні об'єднання	Гнучкість та балансування	VPP, DR, FS
V. Інтеграція розподілених ресурсів і сервісних послуг	Регіональна енерго-система як система систем	Цілісно-узгоджена регіональна система енергетичних ресурсів і сервісів	Формування єдиного енерго-сервісного середовища РЕС	Регіональний енерго-менеджмент, енерго-ефективність, самодостатність та стійкість РЕС

На першій стадії розвитку сервісні послуги зосереджувалися на окремому технічному об’єкті, основним об’єктом управління було енергетичне обладнання, а метою – забезпечення його працездатності, надійності та дотримання нормативних режимів експлуатації. Типовими сервісами виступали моніторинг технічного стану, діагностика, профілактичне і ремонтне обслуговування. На цьому рівні сервіс має переважно технічний характер і не охоплює управління енергоспоживанням або координацію кількох енергетичних ресурсів.

Друга стадія характеризується переходом від окремого обладнання до комплексного управління будівлею, підприємством або іншим споживачем, а основною метою стає підвищення енергоефективності шляхом моніторингу, обліку, аналізу й оптимізації режимів споживання. До типових інструментів належать

системи енергетичного менеджменту (EMS), у тому числі в будівлях (BEMS) та механізми діяльності енергосервісних компаній (ESCO). На цій стадії формується орієнтація не лише на технічний стан обладнання, а й на кінцевий результат – зниження енергоспоживання та витрат споживача.

Третя стадія, пов’язана з управлінням локальними енергетичними ресурсами, обумовлена розвитком розподіленої генерації, систем накопичення енергії та мікромереж. Рівень інтеграції тут розширюється до локальної енергетичної системи, у межах якої взаємодіють виробництво, накопичення і споживання енергії, а основною метою стає оптимізація локального енергетичного балансу, зменшення пікових навантажень, підвищення використання власної генерації та скорочення залежності від зовнішнього енергопостачання. Енергетичний менеджмент на цьому рівні забезпечує узгоджене керування локальними джерелами, накопичувачами й навантаженнями.

На четвертій стадії об’єктом управління стає група локальних систем, об’єднаних у віртуальні енергетичні структури. Для цього використовуються віртуальні електростанції (VPP), механізми реагування попитом (DR) та послуги забезпечення гнучкості (FS). Розподілені ресурси різних власників агрегуються та координуються для участі в балансуванні, регулюванні навантаження і наданні системних послуг. Отже, локальні ресурси починають функціонувати не лише в інтересах окремих споживачів, а й як керований сукупний ресурс енергетичної системи. Водночас така координація була переважно спрямована на розв’язання окремих режимних завдань, насамперед в електроенергетичному секторі, і не утворювала цілісного міжсекторального сервісного середовища регіону.

Особливе місце у представленій послідовності належить запропонованій у роботі п’ятій стадії розвитку сервісних послуг – інтеграції розподілених ресурсів і сервісів, де забезпечується координація групи локальних систем для виконання визначених функцій гнучкості і балансування та передбачається системне поєднання розподілених ресурсів, технологій, учасників і сервісів на рівні регіональної енергосистеми, розглянутої як система систем.

Рівнем інтеграції тут є вся РЕС, до складу якої входять взаємопов’язані системи електро-, тепло- і газопостачання, розподілена генерація, накопичувачі енергії, мікромережі, комунальна і транспортна інфраструктура, промислові та побутові споживачі, а основним об’єктом управління виступає цілісно узгоджена система енергетичних сервісів регіону, а не окреме обладнання, споживач, локальна система чи агрегована група ресурсів, що означає перехід від локальної оптимізації до координації енергетичних, інформаційних, економічних і сервісних потоків у масштабі регіону. Основною метою стає формування єдиного сервісного середовища РЕС, у межах якого виробники, оператори мереж, агрегатори, енергосервісні компанії, органи регіонального управління, територіальні громади, інвестори та споживачі взаємодіють для спільного створення цінності, якою є не лише постачання певного обсягу енергії, а й забезпечення енергоефективності, локального балансування, резервування, керованості попиту, самодостатності, гнучкості та стійкості енергозабезпечення регіону.

Принципова відмінність полягає у переході від переважно технологічної координації ресурсів до системно узгодженого управління результатами їх використання, де ефективність інтеграції оцінюється не тільки за обсягами виробленої енергії або економією витрат, а за комплексом критеріїв, які характеризують ефективність, самодостатність, гнучкість і стійкість РЕС, що дає змогу порівнювати альтернативні конфігурації ресурсів і сервісів, визначати їх внесок у досягнення регіональних цілей та обґрунтовувати рішення щодо напрямів розвитку енергосистеми [19, 75].

Сервіс-орієнтована спрямованість дослідження передбачає виділення чотирьох взаємопов’язаних груп послуг, представлених у таблиці 2.2, де захід, спрямований на енергоефективність, може одночасно створювати ресурс гнучкості, підвищувати стійкість і збільшувати самодостатність.

Послуги з підвищення енергоефективності формують базовий сегмент енергосервісу. Їх результатом є перевірюване зменшення споживання енергії або витрат щодо нормалізованої базової лінії. Проте для РЕС важливо враховувати не лише обсяг зекономленої енергії, а й часовий профіль економії, її вплив на пікові

навантаження, мережеві обмеження та потребу в резерві. Відтак класичний енергосервісний контракт доцільно доповнювати системними показниками.

Таблиця 2.2 – Базові сервісні послуги РЕС

Група сервісів	Зміст гарантованого результату	Типові засоби реалізації	Основні показники
Енерго-ефективність	Зменшення питомого або абсолютного споживання енергії та сукупних витрат без погіршення корисного результату	Енергоаудит, модернізація обладнання, EMS/BEMS, когенерація, теплові насоси, оптимізація режимів	Економія енергії; зниження питомого споживання; CAPEX/OPEX; NPV; строк окупності; скорочення викидів
Гнучкість	Керована зміна споживання, генерації або накопичення у відповідь на сигнал системи чи ринку	Управління попитом, BESS, VPP, агрегування DER, кероване заряджання EV, Power-to-Heat	доступна потужність; тривалість та швидкість активації; час реакції; обсяг перенесеної енергії; частка успішних активацій
Стійкість	Здатність запобігати порушенням, зберігати критичні функції, адаптуватися та відновлюватися	Мікрогрід, острівний режим, резервування, BESS, CHP, секціонування мереж, аварійне керування	ENS; SAIDI/SAIFI; TTR; частка критичного навантаження з резервом; індекс стабільності; вартість незабезпеченої енергії
Само-достатність	Збільшення частки регіонального попиту, покритої місцевими джерелами та ресурсами керування	ВДЕ, локальна когенерація, накопичення, енергетичні спільноти, секторне сполучення, прос'юмери	SSR; частка локальної генерації; імпортозалежність; самоспоживання; автономність; баланс локальних ресурсів

Послуги гнучкості полягають у забезпеченні готовності розподілених ресурсів змінювати режим роботи за командою або ціновим сигналом. Їх цінність утворюється не лише фактом наявності DER, BESS чи керованого навантаження, а гарантованою доступністю, тривалістю, локалізацією і повторюваністю активації. Дослідження 2025-2026 років засвідчують доцільність інтеграції гнучкості в енергосервісні контракти як додаткового потоку доходів і засобу скорочення строку окупності модернізації [76, 80].

Послуги стійкості орієнтовані на зниження наслідків аварій, дефіцитів, пошкоджень інфраструктури та інших збурень. На відміну від надійності, яка здебільшого характеризує здатність системи працювати без відмов у штатних умовах, стійкість охоплює підготовку, поглинання впливу, адаптацію та відновлення. Предметом сервісного зобов'язання може бути гарантована частка резервованого

критичного навантаження, максимальний допустимий ENS, час переходу в острівний режим або граничний час відновлення.

Послуги самодостатності спрямовані на зменшення залежності регіону від зовнішнього постачання шляхом розвитку локальної генерації, накопичення, керованого попиту та міжсекторної інтеграції. Самодостатність не означає повну ізоляцію РЕС: її економічно обґрунтований рівень визначається співвідношенням локальних можливостей, вартості імпорту, резервування та ризиків. Сервісний контракт може встановлювати цільове значення SSR, частки самоспоживання або тривалості автономного живлення критичних споживачів.

На платформі розглянутого концептуального підходу розроблено класифікацію інтегрованих енергетичних сервісів РЕС (рисунок 2.1), яка охоплює: базові (електро- та теплопостачання, газопостачання, баланс регіонального попиту і пропозиції); системні (гнучкість, резервування, балансування, аварійна стійкість), децентралізовані та ВДЕ-послуги (локальна генерація, мікромережі, накопичувачі енергії, енергетичні кооперативи); енергосервісні (ЕСКО, термомодернізація будівель, оптимізація споживання, енергоменеджмент); цифрові та управлінські (смарт-вимірювання, прогнозування навантаження); стійкості енергозабезпечення; екологічні та кліматичні (облік CO_2) [54].



Рис. 2.1. Класифікація інтегрованих сервісних послуг РЕС

Наукова новизна запропонованої класифікації полягає у формуванні цілісної багатовимірної системи сервісів, що відображає перехід від продуктової до сервіс-орієнтованої логіки функціонування РЕС, дозволяє формалізувати енергетичні послуги як економічно вимірювані, керовані та інтегровані елементи системи створення цінності і де кожна група сервісів виконує чітко визначену системну функцію – від фізичного постачання енергії до підтримки стійкості, оптимізації режимів та формування екологічних, соціальних та управлінських аспектів цінності (ESG). На відміну від описових підходів, запропонована класифікація створює підґрунтя для побудови портфелів енергетичних сервісів та їх інтеграції в моделі типу EaaS та SoS.

Енергосервісні компанії (ЕСКО) слугують основним інструментом реалізації енергетичних сервісів, який приймає безпосередню участь у підготовці, фінансуванні, впровадженні та/або експлуатації проєктів і бере на себе визначену частину технічних та економічних ризиків. У класичних моделях ЕСКО основою розрахунків є економія енергії або витрат, а винагорода залежить від досягнення погоджених з замовником показників. Найпоширенішими є модель гарантованої економії, за якої замовник фінансує проєкт, а ЕСКО гарантує результат, і модель розподіленої економії, за якої ЕСКО фінансує або організовує фінансування та отримує погоджену частку економії [77, 78].

Для сервіс-орієнтованого розвитку РЕС ЕСКО-модель доцільно розширити до багатосервісного контракту, за яким єдиний комплекс ресурсів може створювати кілька потоків цінності: економію енергії, зменшення пікової потужності, доходи від гнучкості, скорочення очікуваного збитку від переривань, підвищення самоспоживання та зменшення імпортозалежності. Актуальні дані підтверджують стале зростання світових інвестицій у сектор ЕСКО, водночас указуючи на значну нерівномірність розвитку національних ринків, зумовлену відмінностями інституційних і фінансових умов [79].

2.2. Методологічні засади формування ринку сервісних послуг

Ринок сервісних послуг (ESs ринок) РЕС за своїм призначенням та складом учасників з методологічної точки зору є системним поняттям, що відображається багаторівневою матричною структурою з вертикальними і горизонтальними зв’язками інтеграції учасників. Тому дослідження закономірностей створення, функціонування та розвитку цього ринку має базуватися на методології системного аналізу, який дозволяє провести структуризацію ESs ринку РЕС у вигляді багаторівневої ієрархії його підсистем та відповідної ієрархії моделей з урахуванням взаємозв'язків між ними [28, 34, 54]

Відповідно до загальної теорії ринків під поняттям ESs ринку будемо розуміти сферу відносин, місце та/або механізм взаємодії учасників ринку, що визначається інжиніринговими [80], фінансово-кредитними (інвестиційними) та організаційними формами діяльності, внаслідок здійснення яких формуються попит, пропозиція і ринкова ціна на продукти енергосервісу. У цьому контексті ESs ринок може бути класифікований як інвестиційно-інжиніринговий, і навіть як інвестиційно-реінжиніринговий.

За наведеним визначенням інфраструктура ESs ринку РЕС може розглядатися у вигляді організаційно-технологічної структури відкритої бізнес-екосистеми, у тому числі віртуальної, яка перебуває в стані постійної взаємодії (обміну) з навколишнім середовищем та забезпечує підвищення ефективності використання енергії на всіх стадіях її перетворення – від виробництва до кінцевого споживання та утилізації [23, 37, 53]. Конфігурацію такої структури, що поєднує ринки енергетичних ресурсів (природного газу, вугілля, відновлюваних джерел енергії, електроенергії, опалення та охолодження) та енергосервісних послуг, ринки виробників (постачальників) енергоефективного обладнання і відновлюваних джерел енергії та ринки споживачів енергії різних форм власності (приватної, державної, муніципальної, кооперативної тощо), запропоновано у роботі [54].

Діяльність на ESs ринку РЕС здійснюють його учасники (суб'єкти ринку), насамперед, представники бізнесу та органів влади (замовники), виконавці енергосервісу (підрядники тощо), постачальники ПЕР, енергоефективного

обладнання і матеріалів, фінансові посередники (інвестори тощо), представники торговельних майданчиків (бірж, аукціонів) тощо, які забезпечують баланс потреб платоспроможного попиту споживачів пропозицією ESs послуг. Тобто учасники ESs ринку представляють практично всі сфери економічної діяльності, де використовуються ПЕР – підприємства і організації енергетики, промисловості, сільського господарства, житлово-комунального сектора, а також індивідуальних і колективних споживачів – домогосподарства і населення. В енергетиці – це підприємства і організації з видобутку й переробки ПЕР, виробники електричної і теплової енергії, підприємства і організації з перетворення, транспортування й розподілу енергії, органи управління енергоринком. Головною метою їх діяльності на ESs ринку є забезпечення сталого підвищення конкурентоздатності своєї продукції шляхом комплексного удосконалення систем організаційно-технологічного управління енерговиробництвом, що досягається за рахунок: зниження витрат і втрат, раціонального використання ресурсів та підвищення якості послуг; впровадження сучасних енергоефективних технологій, обладнання та матеріалів; підвищення в енергетичному балансі частки альтернативних та відновлюваних джерел енергії, використання когенерації, теплових насосів, накопичувачів енергії, ефективного централізованого опалення та охолодження; залучення ресурсів розподілених генераторів та розподілених споживачів (агрегатори, прос'юмери, енергокооперативи тощо); забезпечення прозорої конкуренції між учасниками ринку та незалежного вибору ділових партнерів. Перелік основних учасників та їх функції на ринку сервісних послуг РЕС представлені у таблиці 2.3.

Ключовим інфраструктурним елементом регіонального ESs ринку має стати енергосервісний маркетплейс – цифрова організаційна платформа, що забезпечує визначення потреб у сервісах, стандартизований опис пропозицій, попередню кваліфікацію постачальників, конкурентний відбір, укладання контрактів, обмін даними, моніторинг KPI, верифікацію результатів і проведення розрахунків. Маркетплейс не підміняє оператора енергосистеми або регулятора; він виконує функції координації, зниження трансакційних витрат і підвищення прозорості.

Таблиця 2.3 – Учасники та їх рольові функції на ринку сервісних послуг

Учасники	Рольові функції на ESs ринку
Споживачі та прос'юмери	Формують попит, надають керовані ресурси, беруть участь у співтворенні результату
ESCO та інтегратори EaaS	Проєктують, фінансують, упроваджують і експлуатують рішення, гарантують KPI
Агрегатори / VPP	Об'єднують DER, BESS і керований попит та перетворюють їх на стандартизований ресурс
Оператори мереж і мікромереж	Визначають технічні потреби, обмеження доступу, сигнали активації та правила безпечної роботи
Органи регіонального управління	Визначають суспільні пріоритети, критичні навантаження, програми розвитку та критерії відбору
Фінансові установи й інвестори	Надають капітал, оцінюють ризик, структурують гарантії та страхування
Незалежні енергоаудитори	Перевіряють базові лінії, дані, методики M&V і фактичне досягнення результату
Цифрова платформа / маркетплейс	Забезпечує каталогізацію, торги, керування даними, моніторинг і розрахунки

Теоретичною основою ESs ринку слугує сервіс-домінантна логіка, відповідно до якої цінність не закладається виробником у товар остаточно, а формується в процесі його використання та взаємодії учасників [81, 82]. Для РЕС це означає, що сонячна електростанція, накопичувач або система керування самі по собі не є завершеним сервісом. Цінність виникає, коли ці ресурси забезпечують конкретну функцію: покривають навантаження, знижують пік, підтримують критичного споживача під час збурення або скорочують зовнішню залежність.

Тому результат енергосервісу доцільно характеризувати не лише збереженою енергією і вартісною економією. Багатовимірна сервісна цінність (корисність) має охоплювати ресурсно-енергетичний, економічний та екологічний ефект, цінність гнучкості, стійкості та самодостатності, а також кооперaційний ефект від агрегування ресурсів і взаємодії учасників, інтегральна оцінка яких має формуватися з урахуванням пріоритетів регіону та ризиків і невизначеності.

Інтегральна оцінка вартості у використанні (value-in-use) за таким підходом відображатиме корисність, отриману під час фактичного споживання або застосування сервісу, вартість у взаємодії (value-in-context / value co-creation) – ефект, що виникає завдяки координації дій постачальника, клієнта, оператора і агрегатора, а вартість результату (performance value) – визначатися грошовим або негрошовим ефектом досягнутих KPI. Такий підхід є методологічно точнішим, ніж алгебраїчне додавання окремої «вартості сервісної послуги», оскільки уникає подвійного рахунку

та пов’язує оцінювання з реальною функцією PEC. «Результат-орієнтований» принцип оплати реалізується, зокрема, у програмах pay-for-performance, де винагорода пов’язується з виміряним ефектом, а не з фактом постачання обладнання [83].

Зміст сервіс-орієнтованої логіки, яка надає можливість виробничим (постачальним тощо) компаніям залучати до процесів створення вартості своїх клієнтів (споживачів), тим самим розширюючи межі ринку, детально проаналізований у роботі [84]. Прийнявши цю логіку за базову, кожен з учасників ESs ринку має стати співтворцем вартості, що, на наш погляд, потребуватиме урахування, як мінімум, двох нових компонент вартісної складової, формулюючи їх зміст в наступному вигляді: (3) вартість співпраці (кооперації) (value-in-cooperation), яка розраховується як вартість, створена внаслідок співпраці учасників ринку (див. компоненти цієї вартості у роботі [85]); (4) вартість сервісних послуг (value-in-service), яка розраховується як вартість, обумовлена наданням сервіс-орієнтованих послуг.

Останні дві пропозиції зроблено, спираючись на результати роботи [84], де пропонується розрізняти щонайменше три компоненти поняття послуги, а саме: як вид діяльності, як бізнес-логіка створення вартості клієнтом (споживачем) та як бізнес-логіка діяльності виробника (постачальника). При цьому, виробник може приймати безпосередню участь, створювати можливості або виконувати функції сприяння у задоволенні потреб клієнтів та створенні ними вартості. Відмічається, що фундаментом сервіс-орієнтованої логіки стає взаємодія, а не обмін, орієнтований лише на трансакції і сприяння вартості, а не на спільне її створення з клієнтами.

Відмітимо, що сучасний ESs ринок в розвинутих країнах за своєю спрямованістю є ринком покупців [86, 87], на якому пропозиція виробників послуг перевищує попит споживачів, що стимулює виробників шукати джерела своїх прибутків насамперед у сфері виробництва, а не у сфері купівлі-продажу. Характерною ознакою цього ринку є його конкурентний характер, де кожний суб'єкт ринку виступає як конкуруюча сторона по відношенню до всіх інших суб'єктів і де кожному суб'єкту гарантований його суверенітет, який досягається шляхом протидії монополізації сфери послуг та стабілізації відносин між суб'єктами ринку [74, 88].

Серед традиційних типів ринків, достатньо повний перелік яких представлений у роботі [89], виділимо наступні, принципи побудови та функціонування яких відповідають специфіці ESs послуг:

- Ринок з дискримінацією цін (Price discrimination market), який застосовується в умовах істотних відмінностей між покупцями (споживачами) щодо їх платоспроможності та можливостей вибору продавців (постачальників), що стимулює останніх до встановлення різних цін (тарифів) для різних груп покупців;
- Ринок гарантійного та післягарантійного технічного обслуговування (Aftermarket);
- Ринок комплексного обслуговування (Cluster market), який приносить користь споживачам за рахунок економії від масштабу на стороні продавців;
- Ринок конкурентних торгів, тендерів, аукціонів (Bidding markets);
- Мережевий ринок (Market-as-network), призначений для обмеженого кола взаємозалежних покупців і продавців [90, 91];
- Ринок з домінантною роллю сервісу (Service-dominant market) – сучасна концепція формування ринку, де обслуговування потреб клієнтів створює основну додану вартість, а товари (продукти) при цьому відіграють вторинну, підтримуючу роль [92-94].
- Ринок ЕСКО, орієнтований на фінансування та зменшення ризику реалізації ESs проєктів «під ключ» з повним пакетом надання послуг з експлуатації та обслуговування [95, 96]. Серед різних типів цього ринку найчастіше розглядаються: моделі державно-приватного партнерства (Public-private partnership) у формі будівництво-володіння-експлуатація-передача (Build-own-operate-transfer) або ж будівництво-володіння-експлуатація (Build-own-operate) та будівництво-володіння-передача (Build-own-transfer); модель пайової власності (Multiparty ownership); моделі лізингу або придбання в оренду (Lease or Hire purchase); та моделі кредитування постачальниками (Dealer Credit);
- Ринок «мета-послуг» та роль посередників (постачальників) у каталізації ESs ринку описані в [74, 88], де мета-послуги визначаються як такі, що формуються

не лише за рахунок управління об’єктами енерговикористання, а й охоплюють цілий ряд інших, у тому числі й неенергетичних учасників ринку.

Крім розглянутої, можуть бути запропоновані і інші варіанти побудови ESs ринку, насамперед, у вигляді вертикально інтегрованих на ринкових принципах взаємоузгодженої організаційно-технологічної взаємодії учасників ринку, конкурентних торгів виробників (постачальників) ESs послуг на базі єдиної площадки (за аналогією з оптовим ринком електричної енергії), проміжні і змішані варіанти. При цьому, як відмічалось вище, координаторам ринку потрібно враховувати, що різні групи учасників мають свої, багато в чому незбіжні інтереси. Зокрема, виробники і постачальники зацікавлені в максимізації прибутку, споживачі – в мінімізації витрат та забезпеченні якості і надійності постачання ESs послуг, органи влади – в максимізації надходжень до бюджетів, забезпеченні енергетичної безпеки та мінімізації екологічного впливу, інвестори – в мінімізації термінів повернення вкладеного капіталу та максимізації дивідендів.

Результативність ESs послуг визначається порівнянням фактичного стану з базовою лінією та цільовим рівнем. Для послуг енергоефективності базовим є обсяг нормалізованої економії, для гнучкості оцінюються готовність, активована потужність, тривалість і точність виконання команди, для стійкості – скорочення ENS, тривалості перерв, часу відновлення та очікуваного збитку, а для самодостатності – зміна SSR, частки локальної генерації й самоспоживання. У загальному вигляді сервісний ефект визначає нормоване відхилення фактичного значення від базового з урахуванням напряму бажаної зміни.

Оскільки показники мають різну розмірність і можуть конфліктувати, вибір стратегії розвитку РЕС потребує багатокритеріального сценарного оцінювання, де для кожної альтернативи визначається вектор результатів за чотирма цільовими групами, сукупна вартість життєвого циклу, ризик невиконання гарантій та робастність рішення. Це дає змогу будувати множину Парето-ефективних конфігурацій і обґрунтовувати компроміс між витратами, ефективністю, гнучкістю, стійкістю та самодостатністю.

Верифікація має підтверджувати правильність реалізації розрахункових процедур і коректність даних; валідація – відповідність моделі реальній системі та меті застосування; аналіз невизначеності – діапазон можливих результатів; аналіз робастності – стійкість рішення до зміни припущень. Цифрові журнали даних і автоматизований M&V підвищують прозорість контрактів, але не усувають потреби в незалежному контролі методики та вихідних припущень [97].

Українська модель ESs ринку історично формувалася переважно навколо підвищення енергетичної ефективності будівель бюджетної сфери. Її нормативну основу становлять Закон України «Про енергетичну ефективність», законодавство щодо масштабної енергомодернізації та спеціальні положення про закупівлю енергосервісу [98-100]. Цей сегмент залишається важливим, однак сервіс-орієнтована трансформація РЕС потребує розширення предмета контрактів, складу постачальників та джерел доходу. До основних груп бар'єрів належать:

- нормативно-правові – недостатня визначеність процедур закупівлі та оплати сервісів гнучкості, стійкості й самодостатності, а також правил агрегування різнорідних результатів в одному контракті;
- інституційні – фрагментація відповідальності між органами влади, операторами інфраструктури, власниками об'єктів і постачальниками сервісів;
- фінансові – висока вартість капіталу, тривалі строки окупності, обмежені гарантійні інструменти та складність монетизації уникнених збитків від переривань;
- інформаційні – дефіцит якісних часових даних, стандартизованих базових ліній, каталогів типових сервісів і відкритих результатів реалізованих проєктів;
- методичні – недостатня уніфікація KPI, процедур M&V та правил оцінювання додатковості, подвійного рахунку і невизначеності;
- організаційно-кадрові – нестача компетентностей у підготовці багатосервісних контрактів, моделюванні РЕС та управлінні даними;
- поведінкові – недовіра між сторонами, орієнтація замовника на мінімальну початкову ціну обладнання замість вартості життєвого циклу й гарантованого результату.

Подолання цих бар'єрів потребує стандартизації сервісних продуктів і контрактів, створення регіональних портфелів проєктів, розвитку незалежної верифікації, гарантійних і страхових механізмів, відкритих реєстрів результативності, а також пілотування енергосервісного маркетплейсу. Сучасні дослідження ESs ринків підтверджують, що головними стримувальними чинниками залишаються складність бізнес-моделей, дефіцит довіри, інформаційна асиметрія та нестабільність інституційної підтримки [101-103].

2.3. Базові принципи оцінювання системно-інтегрованої ефективності сервісних послуг РЕС

У традиційній моделі енергосервісу основний результат підвищення ефективності функціонування РЕС пов'язаний зі скороченням обсягів споживання паливно-енергетичних ресурсів або витрат на енергопостачання внаслідок реалізації технічних та організаційних заходів, у той же час, в умовах розвитку розподіленої генерації та міжсекторальної інтеграції цього недостатньо, оскільки скорочення споживання енергії саме по собі не гарантує здатності РЕС адаптуватися до змін режимів генерації і навантаження, реагувати на зовнішні збурення, підтримувати критично важливі функції під час кризових ситуацій або забезпечувати прийнятний рівень локального енергозабезпечення [28, 34, 104, 105]. Тому сучасний енергосервіс набуває системоутворюючого характеру та охоплює системно-інтегровані послуги, спрямовані одночасно на підвищення енергоефективності, гнучкості, стійкості й самодостатності РЕС з урахуванням взаємодії її підсистем, ресурсних обмежень, ризиків і невизначеності [106-109].

У публікаціях ідентифіковано чотири ключові групи ризиків: технічні (недосягнення заявленої ефективності, інтеграція обладнання); фінансові (вартість капіталу, дострокове розірвання контракту, кредитоспроможність); регуляторні та інституційні (закупівельні процедури, бюджетні обмеження, правові колізії); методологічні (невизначеність вимірювання економії, маніпуляції базовою лінією) [36, 38, 53]. Окремо підкреслюється, що в мультисервісних моделях (EFF + DIG + SYS) виникає проблема однозначного визначення, яка саме послуга згенерувала результат, що ускладнює справедливий розподіл доходів і ризиків.

Проведений аналіз підтверджує, що потенціал ефективності складних соціотехнічних систем реалізується не стільки через окремі технології, скільки через системну інтеграцію сервісних моделей, контрактних механізмів та інституційної довіри. Як наслідок, системно-інтегрована ефективність такої системи буде визначатися, як мінімум, чотирма взаємопов'язаними складовими: 1) енергоефективністю, що забезпечує необхідний обсяг енергетичних послуг за мінімально обґрунтованого споживання первинних і кінцевих енергетичних ресурсів; 2) гнучкістю для здатності своєчасно змінювати режими генерації, споживання, накопичення та обміну енергією відповідно до коливань попиту, обсягів виробництва з відновлюваних джерел, цінових сигналів і мережевих обмежень; 3) стійкістю протистояти зовнішнім і внутрішнім збуренням, обмежувати їх негативні наслідки, зберігати критично важливі функції та відновлювати нормативні або прийнятні режими роботи; та 4) самодостатністю. що забезпечує здатність регіону або його окремих територіальних підсистем покривати визначену частку енергетичних потреб за рахунок локальних ресурсів, розподіленої генерації, накопичення, керування попитом і міжсекторального перетворення енергії.

Одночасно, матеріальні активи перестають бути кінцевим продуктом енергосервісу. Генеруюче обладнання, когенераційні установки, сонячні електростанції, теплові насоси, акумуляторні системи, мікромережі, прилади обліку та автоматизовані системи керування виступають ресурсами і технічними засобами надання відповідної послуги. Аналогічну роль виконують цифрові технології: системи енергетичного менеджменту, цифрові платформи, засоби прогнозування, аналітики й оптимізації, цифрові двійники, інтелектуальні лічильники та автоматизовані алгоритми керування. Організаційні процедури, зокрема енергетичний аудит, планування режимів, агрегування розподілених ресурсів, диспетчеризація, моніторинг, технічне обслуговування, верифікація результатів і керування ризиками, також є складовими ресурсного забезпечення сервісу. Вони створюють умови, за яких технічні та цифрові рішення перетворюються на гарантований функціональний результат для замовника й РЕС загалом.

Отже, предметом системно-інтегрованих послуг має бути не передача обладнання або виконання окремого комплексу робіт, а досягнення визначеного замовником рівня їх кількості та якості. Таким результатом може бути гарантоване скорочення споживання енергії, забезпечення заданого діапазону керованого навантаження, зменшення тривалості перерв енергопостачання, підтримання критичного навантаження протягом установленого часу, скорочення обсягу недовідпущеної енергії, підвищення частки локального енергозабезпечення або забезпечення необхідного рівня готовності до кризових ситуацій.

У складі інтегрованих сервісних послуг РЕС розглянуто: базові (електро- та теплопостачання, газопостачання, баланс регіонального попиту і пропозиції); системні (гнучкість, резервування, балансування, аварійна стійкість, підтримка частоти), децентралізовані та ВДЕ-послуги (локальна генерація, мікромережі, накопичувачі енергії, енергетичні кооперативи); енергосервісні (ЕСКО, оптимізація споживання, енергоменеджмент); управлінські (прогнозування навантаження); стійкості енергозабезпечення; екологічні (облік CO_2).

Проведено формалізацію їх системно інтегрованої множини

$$\mathcal{S} = \mathcal{S}^{base} \cup \mathcal{S}^{sys} \cup \mathcal{S}^{eff} \cup \mathcal{S}^{dig} \cup \mathcal{S}^{eco} \cup \mathcal{S}^{sec} \tag{2.1}$$

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

Формалізовано функцію інтегральної корисності портфеля сервіс-орієнтованих послуг РЕС:

$$\mathcal{V}_{sys} = \sum_{i \in \mathcal{S}} w_i \; U_i(x_i), \tag{2.2}$$

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, $\sum w_i = 1$.

Використання вагових коефіцієнтів обумовлено багатокритеріальним характером задач, неповнотою статистичної інформації, невизначеністю зовнішніх умов та необхідністю інтеграції кількісних і якісних характеристик функціонування РЕС. Процедура визначення коефіцієнтів включає стадії нормування, приведення до порівнюваного вигляду та оцінювання значущості з урахуванням регіональної специфіки, що забезпечують фізичну та економічну узгодженість результатів дослідження, стійкість моделей до зміни вихідних параметрів та адекватність реальним умовам функціонування РЕС.

Формалізовано складову інтегральної корисності, що виникає внаслідок синергії взаємодії сервісів $\mathcal{V}_{syn} = \sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{j>i} \gamma_{ij}\ x_i\, x_j$, де: $\mathcal{V}_{syn}$ – синергетична складова інтегральної корисності сервісів; γ_{ij} – коефіцієнт синергії між сервісами i та j; $x_i x_j$ – синергетичний ефект, що виникає за одночасного надання обох сервісів. Якщо $\gamma_{ij} > 0$, то сервіси взаємно підсилюють один одного, якщо $\gamma_{ij} < 0$ – виникає конфлікт або конкуренція, якщо $\gamma_{ij} = 0$ – взаємозв'язок відсутній.

Системну корисність сервіс-орієнтованих послуг РЕС визначено як:

$$\mathcal{V} = \mathcal{V}_{sys} + \mathcal{V}_{syn} \tag{2.3}$$

Розширено сферу діяльності ЕСКО як інтеграторів і координаторів міжсекторної взаємодії (рисунок 2.2), що дозволило забезпечити формування, підсилення та монетизацію синергій між різними надавачами і споживачами сервіс-орієнтованих послуг та агрегувати розпорошені ресурси гнучкості на рівні регіону.

Крім виявлення та реалізації синергії взаємодії місцевих ЕСКО, 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

$$V_{\mathrm{SYS}}^{R} = \sum_{i=1}^{N} V_{ES_i} - \sum_{j=1}^{M} \mathbb{E}(L_j) \tag{2.4}$$

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



Рис. 2.2. Архітектура сервісних послуг ЕСКО
у системі регіонального енергетичного менеджменту

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

$$W = \sum_{\omega} \pi_{\omega} \sum_{n,t} [\, w^{sys} \hat{S}_{n,t,\omega}^{sys} + w^{eff} \hat{S}_{n,t,\omega}^{eff} + w^{dig} \hat{S}_{n,t,\omega}^{dig} + w^{eco} \hat{S}_{n,t,\omega}^{eco} + + w^{sec} \hat{S}_{n,t,\omega}^{sec} - $$
$$- C_{n,t,\omega}^{\text{PEC}} - \lambda_{n,t,\omega} \mathcal{R}_{n,t,\omega}^{risk}] \to opt, \qquad (2.5)$$

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 та оцінює результати не лише через мінімізацію витрат, а через системну корисність енергетичних сервісів.

Для обчислення системного результату, сумування по множині сценаріїв у (2.5) здійснено на основі теорії нечітких множин та теорії можливості, що дозволило оптимізувати функціонування РЕС в умовах невизначеності зовнішніх впливів та режимів роботи.

Граничну корисність складових W визначено похідною $dW/d\hat{S}^{(\cdot)}_{n,t,\omega}$. Так, для складової енергоефективності

$$dW/d\hat{S}^{eff}_{n,t,\omega} = w^{eff} - \frac{\partial C^{\text{PEC}}_{n,t,\omega}}{\partial \hat{S}^{eff}_{n,t,\omega}} + w^{sys}\frac{\partial \hat{S}^{sys}_{n,t,\omega}}{\partial \hat{S}^{eff}_{n,t,\omega}} + w^{dig}\frac{\partial \hat{S}^{dig}_{n,t,\omega}}{\partial \hat{S}^{eff}_{n,t,\omega}} + w^{eco}\frac{\partial \hat{S}^{eco}_{n,t,\omega}}{\partial \hat{S}^{eff}_{n,t,\omega}} +$$

$$+w^{sec}\frac{\partial \hat{S}^{sec}_{n,t,\omega}}{\partial \hat{S}^{eff}_{n,t,\omega}} - \lambda_{n,t,\omega}\frac{\partial \mathcal{R}^{risk}_{n,t,\omega}}{\partial \hat{S}^{eff}_{n,t,\omega}}, \qquad (2.6)$$

де: w^{eff} відображає фізичну корисність "не виробленої" за рахунок заходів з енергоефективності енергії, відповідного зменшення обсягів використаного палива, зниження теплових втрат і навантаження на силові компоненти системи тощо; друга складова відображає зменшення економічних витрат; інші – вплив на надійність, стійкість, екологію та системний ризик.

Включення енергоефективності у цільову функцію (2.5) 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. Тобто, енергоефективність у сервіс-орієнтованій моделі виступає не лише інструментом економії ресурсів, а системним механізмом розвантаження інфраструктури, підвищення стійкості, зниження ризику та зменшення екологічного впливу.

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

$$\max_{x,u,y}\{\mathcal{R}^{\text{PEC}} - \sum_{\omega\in\Omega}\pi_\omega \cdot C^{\text{PEC}}_{n,t,\omega} - \lambda_{n,t,\omega}\,\mathcal{R}V^{risk}_{n,t,\omega}\}, \tag{2.7}$$

де: $\mathcal{R}^{\text{PEC}}$ – інтегрований показник системної стійкості РЕС, що відображає сукупний ефект енергоефективних сервісів, зниження ENS, 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.

Розв'язання задач (2.5) і (2.7) оптимізації розвитку РЕС, обумовлених наявністю синергетичних членів $x_i x_j$, нелінійними функціями корисності сервісів $U_i(x_i)$ та взаємозалежністю критеріїв самодостатності, стійкості та ENS, здійснено у класі задач нелінійного програмування з цілочисельними змінними (MINLP), що дозволило врахувати як індивідуальну корисність енергетичних сервісів, так і синергетичні ефекти їх взаємодії.

Оцінювання системно-інтегрованої ефективності здійснено в межах багатокритеріального підходу, який охоплює енергетичні, технічні, економічні, екологічні, сервісні та соціальні показники, а також враховує синергетичні ефекти взаємодії різних послуг. Важливо, що оцінюється не лише величина досягнутого результату, а і його стабільність у часі, стійкість до зміни вихідних параметрів, доступність для різних категорій споживачів і внесок у досягнення стратегічних цілей розвитку регіону.

Базовими принципами цілеспрямованого оцінювання системно-інтегрованої ефективності сервісних послуг РЕС визначено:

- результативність – спрямованість сервісу на досягнення визначених системних властивостей;
- інтегрованість – узгодження технологічних, цифрових, економічних та організаційних рішень;
- багатофункціональність – здатність одного сервісного рішення створювати декілька взаємопов'язаних ефектів;
- вимірюваність і верифікованість – підтвердження результатів на основі достовірних даних і встановлених процедур;
- економічна обґрунтованість – співвідношення вартості сервісу та сукупного створеного ефекту;
- адаптивність – можливість коригування параметрів послуги залежно від зміни умов функціонування РЕС;
- розподіл ризиків – закріплення відповідальності за технічні, ринкові, фінансові та операційні ризики;
- орієнтація на життєвий цикл – оцінювання результатів упродовж усього періоду створення, надання та використання сервісу;
- синергетичність – забезпечення ефекту, який не міг би бути повною мірою отриманий унаслідок ізольованого застосування окремих технічних заходів.

Як наслідок, системно-інтегрована ефективність буде відображати сервіс-орієнтовану логіку забезпечення цільового результату, за якою обладнання, цифрові платформи, фінансові механізми та організаційні процедури утворюють єдину систему надання послуг, а кінцевою цінністю є гарантоване поліпшення функціональних властивостей РЕС.

Отже, сучасний енергосервіс слугує як організаційно-економічний і технологічний механізм формування та підтримання необхідних системних властивостей РЕС шляхом інтегрованого використання матеріальних активів, цифрових технологій, фінансових інструментів і організаційних процедур, результатом дії якого є вимірюваний, верифікований та економічно оцінений рівень енергетичних послуг. Саме така інтерпретація енергосервісу відповідає завданням

сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем і створює основу для подальшого розроблення критеріїв, моделей та методів оцінювання ефективності відповідних сервісних рішень.

2.4. Математична модель оцінювання системно-інтегрованої ефективності сервісних рішень РЕС

Розроблена модель призначена для кількісного оцінювання результативності як окремої сервісної послуги, так і системно-інтегрованого портфеля взаємопов'язаних сервісних послуг РЕС за їх сукупним впливом на енергоефективність, гнучкість, стійкість і самодостатність [7, 25, 53, 54]. На відміну від оцінювання лише економії енергії або строку окупності, модель враховує багатовимірність результату, взаємодію сервісів, сценарну невизначеність, верифікованість досягнутого ефекту, його економічну цінність та складається з наступних блоків.

1. Базові позначення: $J = \{1, \dots, n\}$ – множина системно-інтегрованих сервісних послуг; $D = \{EE, FL, RE, SS\}$ – множина їх системних властивостей, де EE – енергоефективність, FL – гнучкість, RE – стійкість, SS – самодостатність; $k \in K_d$ – індекс показника властивості d; K_d – множина показників цієї властивості; $s \in S$ – індекс сценарію; $S = \{1, \dots, m\}$ – множина сценаріїв; m – кількість сценаріїв; $S_{crit} \subseteq S$ – множина критичних сценаріїв; $t \in T$ – індекс часового інтервалу; $T = \{1, \dots, H\}$ – множина часових інтервалів; H – їх кількість; $\tau \in \{0, \dots, N\}$ – рік життєвого циклу; N – горизонт економічного оцінювання; $\mathrm{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n),\ 0 \le x_j \le \overline{x}_j,\ j \in J$ – вектор керованих рішень щодо складу та масштабу сервісного портфеля, де x_j – рівень залучення або потужність j-ї сервісної послуги; $\overline{x}_j$ – максимально допустимий рівень її залучення; $y_j \in \{0,1\}$ – бінарна змінна за умови $0 \le x_j \le \overline{x}_j y_j$.

2. Блок формування первинних показників системних властивостей РЕС.

- Енергоефективність: скорочення кінцевого споживання енергії за сценарієм s будемо визначати за формулою $\Delta E_s = \sum_{t \in T}(E^0_{t,s} - E^1_{t,s}(x))$, а відносний рівень економії енергії як $ES_s = \left(\sum_{t \in T}\left(E^0_{t,s} - E^1_{t,s}(x)\right)\right) / \sum_{t \in T} E^0_{t,s}$, де

$E^0_{t,s}$ і $E^1_{t,s}(\mathrm{x})$ – відповідно базове та фактичне (модельне) споживання енергії в інтервалі t за сценарієм s до і після впровадження сервісного портфеля.

- Гнучкість: Доступний діапазон регулювання активної потужності визначається як $F_s^P = \frac{1}{H}\sum_{t\in T}\left(P_{t,s}^{\uparrow} + P_{t,s}^{\downarrow}\right)$, де $P_{t,s}^{\uparrow}$ і $P_{t,s}^{\downarrow}$ – доступні обсяги збільшення та зменшення потужності завдяки керуванню попитом, накопиченню, маневровій генерації та іншим сервісам гнучкості. Частка покриття потреби РЕС у гнучкості становить $FC_s = (\sum_{t\in T}\min\{F_{t,s}^{avail}, F_{t,s}^{req}\})/\sum_{t\in T}F_{t,s}^{req}$, де $F_{t,s}^{avail}$ – фактично доступна гнучкість; $F_{t,s}^{req}$ – потреба РЕС у гнучкості.
- Стійкість: Коефіцієнт зниження недовідпуску енергії визначається як $R_s^{ENS} = (ENS_s^0 - ENS_s^1(\text{x}))/ENS_s^0$, де ENS_s^0 і $ENS_s^1(\text{x})$ – обсяг недовідпущеної енергії відповідно до та після впровадження сервісного портфеля. Коефіцієнт забезпечення критичного навантаження має вигляд $CI_s^{backup} = \sum_{t\in T}(L_{t,s}^{crit,sup}/\sum_{t\in T}L_{t,s}^{crit})$, де $L_{t,s}^{crit}$ – критичне навантаження; $L_{t,s}^{crit,sup}$ – забезпечена частина критичного навантаження. Скорочення часу відновлення визначається як $R_s^{TTR} = (TTR_s^0 - TTR_s^1(\text{x}))/TTR_s^0$, де TTR_s^0 і $TTR_s^1(\text{x})$ – час відновлення енергопостачання до та після впровадження сервісів.
- Самодостатність: Коефіцієнт енергетичної самодостатності РЕС за сценарієм s визначається як $SSR_s = \sum_{t\in T}(E_{t,s}^{loc,dir} + E_{t,s}^{dis,loc,use})/\sum_{t\in T}E_{t,s}^{dem}$, де $E_{t,s}^{loc,dir}$ – локально вироблена та безпосередньо використана енергія без проміжного накопичення; $E_{t,s}^{dis,loc,use}$ – корисно використана споживачами енергія, відпущена з накопичувача, походження якої підтверджено як локальне; $E_{t,s}^{dem}$ – сукупний попит на енергію. Для недопущення подвійного рахунку локальна енергія, спрямована до накопичувача, не включається до $E_{t,s}^{loc,dir}$ і враховується лише один раз, – у момент її корисного відпуску як $E_{t,s}^{dis,loc,use}$ з урахуванням втрат заряджання, зберігання та розряджання. Коефіцієнт зниження залежності від зовнішнього постачання дорівнює $R_s^{IMP} = (IMP_s^0 - IMP_s^1(\text{x}))/IMP_s^0$, де IMP_s^0 і $IMP_s^1(\text{x})$ – обсяги імпорту енергії до регіону до та після реалізації портфеля послуг.

3. Блок нормування показників. Оскільки первинні показники мають різну розмірність і різну спрямованість, їх необхідно привести до безрозмірної шкали $[0; 1]$. Для показника, збільшення якого є позитивним результатом, нормоване значення

визначається як $z_{d,k,s} = \min\left\{1, \max\left\{0, \frac{q_{d,k,s}(\text{x}) - q^0_{d,k,s}}{q^{tar}_{d,k,s} - q^0_{d,k,s}}\right\}\right\}$, а для показника, зменшення якого є бажаним – $z_{d,k,s} = \min\left\{1, \max\left\{0, \frac{q^0_{d,k,s} - q_{d,k,s}(\text{x})}{q^0_{d,k,s} - q^{tar}_{d,k,s}}\right\}\right\}$, де: $q_{d,k,s}(\text{x})$ – отримане значення k-го показника властивості d; $q^0_{d,k,s}$ – його базове значення; $q^{tar}_{d,k,s}$ – цільове значення. Значення $z_{d,k,s} = 0$ означає відсутність поліпшення порівняно з базовим станом, а $z_{d,k,s} = 1$ – досягнення або перевищення цільового рівня. Якщо показник уже є безрозмірним коефіцієнтом у межах $[0; 1]$ і має природну цільову інтерпретацію, допускається пряме використання $z_{d,k,s} = q_{d,k,s}$.

4. Блок визначення складових вторинних системних властивостей

Показник кожної системної властивості для сценарію s визначається зваженим агрегуванням нормованих показників: $I_{d,s}(\text{x}) = \sum_{k \in K_d} w_{d,k} z_{d,k,s}(x)$, $\sum_{k \in K_d} w_{d,k} = 1$, $w_{d,k} \geq 0$, де $w_{d,k}$ – підсумкова вага показника, а $z_{d,k,s}$ його нормоване значення. Відповідно формуються часткові показники $I_{EE,s}, I_{FL,s}, I_{RE,s}, I_{SS,s}$ системних властивостей.

5. Блок визначення базового показника системної збалансованості

Для недопущення повної компенсації критично низького значення однієї властивості високими значеннями інших застосовується об’єднання кількох показників в один інтегральний індекс шляхом їх зваженого перемноження:

$G_s(\text{x}) = \prod_{d \in D}(I_{d,s}(x) + \varepsilon)^{\propto_d} + \varepsilon) - \varepsilon$, $\sum_{d \in D} \propto_d = 1$, $\propto_d \geq 0$, $0 < \varepsilon \ll 1$, де $\propto_d$ – стратегічна вага відповідної системної властивості; ε – малий регульований параметр, який забезпечує обчислювальну стійкість при нульових значеннях індексів. Для гарантування мінімально допустимого рівня кожної властивості, вводяться порогові обмеження: $I_{d,s}(\text{x}) \geq I_d^{min}$, $d \in D$, $s \in S_{crit}$, де S_{crit} – множина критичних сценаріїв, для яких порушення нормативних або стратегічних вимог є неприпустимим.

6. Блок оцінювання синергетичного ефекту портфеля послуг

Синергія виникає, якщо спільне застосування сервісів створює більший системний результат, ніж сума їх ізольованих результатів. Для кожної системної

властивості d (енергоефективність, гнучкість, стійкість або самодостатність)та сценарію s множина фактично залучених сервісних послуг визначається як $J_x = \{j \in J: x_j > 0\}$, а приріст системної властивості $\Delta I_{d,s}(J_x)$, забезпечений портфелем сервісних послуг, як $\Delta I_{d,s}(J_x) = I_{d,s}(J_x) - I_{d,s}(\varnothing)$, де: J_x – портфель фактично залучених сервісних послуг; j – окрема сервісна послуга; J – множина всіх можливих сервісних послуг; x_j – рівень або масштаб залучення j-ї послуги; $I_{d,s}(J_x)$ – значення показника властивості d за сценарієм s після застосування портфеля послуг; $I_{d,s}(\varnothing)$ – значення цього показника в базовому стані без застосування сервісних послуг; $\varnothing$ – порожній портфель сервісних послуг. Отже, показник $\Delta I_{d,s}(J_x)$ характеризує, наскільки застосування портфеля сервісів поліпшує відповідну системну властивість РЕС порівняно з базовим станом.

7. Блок урахування сценарної невизначеності

Для кожного сценарію задається ступінь можливості його реалізації p_s, де $p_s \geq 0$, $\max\limits_{s\in S} p_s = 1$. Тоді, очікуване значення системно-інтегрованої ефективності дорівнює $\bar{I}^{SI}(x) = \sum_{s\in S} p_s I_s^{SI}(x)$, де I_s^{SI} – системно-інтегрований показник сценарію s. Для оцінювання ризику недосягнення цільового рівня I^{tar} визначається сценарний дефіцит результативності $L_s(x) = \max\{0, I^{tar} - I_s^{SI}(x)\}$.

8. Блок визначення коефіцієнта верифікованості результату

Оскільки предметом сервісного контракту є підтверджений результат, до моделі вводиться інтегральний коефіцієнт верифікованості

$$K_{ver} = k_{meas}^{\nu_1} k_{base}^{\nu_2} k_{add}^{\nu_3} k_{unc}^{\nu_4},\ 0 \leq k_{meas}, k_{base}, k_{add}, k_{unc} \leq 1, \sum_{r=1}^{4} \nu_r = 1,$$

де k_{meas} характеризує повноту та достовірність вимірювань; k_{base} – якість формування базового рівня; k_{add} – доведеність причинного зв'язку між сервісом і результатом; k_{unc} – урахування невизначеності вимірювання та моделювання; $\nu_1, \dots, \nu_4$ – ваги складових верифікації. Таке визначення означає, що результат моделювання не визнається повною мірою достовірним, якщо він не підтверджений даними та процедурами верифікації.

9. Блок економічного оцінювання системного результату

Сукупна приведена вигода від портфеля сервісів визначається як $PV(B) = \sum_{\tau=0}^{N} \frac{B_\tau^{EE}+B_\tau^{FL}+B_\tau^{RE}+B_\tau^{SS}+B_\tau^{syn}}{(1+r)^\tau}$, де B_τ^{EE} – вигоди від економії енергії та зниження експлуатаційних витрат; B_τ^{FL} – вигоди від надання гнучкості й уникнення пікових витрат; B_τ^{RE} – уникненні збитки від перерв енергопостачання; B_τ^{SS} – вигоди від зменшення залежності від зовнішнього постачання; B_τ^{syn} – залишкова вигода від взаємодії сервісів, яка не включена до B_τ^{EE}, B_τ^{FL}, B_τ^{RE} або B_τ^{SS}; r – ставка дисконту; N – горизонт оцінювання. Така умова виключає подвійний облік синергетичних вигід. Приведені витрати становлять $PV(C) = \sum_{\tau=0}^{N} \frac{CAPEX_\tau+OPEX_\tau+C_\tau^{dig}+C_\tau^{org}+C_\tau^{risk}}{(1+r)^\tau}$, де $CAPEX_\tau$ і $OPEX_\tau$ – капітальні та операційні витрати; C_τ^{dig} – витрати на цифрову інфраструктуру; C_τ^{org} – організаційні й трансакційні витрати; C_τ^{risk} – вартісна оцінка залишкових ризиків. Коефіцієнт економічної ефективності визначається як $BCR = PV(B)/PV(C), PV(C) > 0,$ а чиста приведена системна цінність – як $NPSV = PV(B) - PV(C)$. Для поєднання техніко-системної результативності з економічною доцільністю вводиться нормований економічний коефіцієнт $K_{econ} = \min\{1, BCR/BCR^{tar}\}$, де $BCR^{tar} \geq 1$ – цільове співвідношення вигід і витрат.

10. Блок визначення підсумкового критерію системно-інтегрованої ефективності $\eta_{SI}(\text{x}) = I_{SI}^{ver}(\text{x})\, K_{econ}$. Тут: x – вектор керованих рішень, що задає склад, масштаби та параметри сервісів, обладнання, режимів керування, інвестиційних і організаційних заходів; $I_{SI}^{ver}(\text{x})$ – верифікований безрозмірний інтегральний індекс системного результату, який відображає підтверджене вимірюваннями поліпшення енергоефективності, гнучкості, стійкості та самодостатності РЕС; $K_{econ}(\text{x})$ – безрозмірний коефіцієнт економічної доцільності, який коригує системний результат з урахуванням співвідношення економічних вигід і витрат на реалізацію сервісних рішень. Для нормованих складових приймаються обмеження: $0 \leq I_{SI}^{ver}(\text{x}) \leq 1, \quad 0 \leq K_{econ}(\text{x}) \leq 1,$ звідки випливає $0 \leq \eta_{SI}(\text{x}) \leq 1$. Фізичний зміст критерію системно-інтегрованої ефективності полягає в тому, що досягнутий і верифікований системний результат набуває повної цінності лише за умови його економічної доцільності. Якщо $K_{econ}(\text{x}) = 1$, системний результат у

підсумковому критерії враховується повністю. Якщо $0 < K_{econ}(\text{x}) < 1$, його значення зменшується пропорційно економічній доцільності. За $K_{econ}(\text{x}) = 0$ рішення не визнається системно-інтегровано ефективним незалежно від величини техніко-системного результату.

11. Блок оптимізаційної постановки задачі. Задача вибору оптимального портфеля сервісних послуг сформульована як максимізація системно-інтегрованої ефективності $\max\limits_{\text{x,y}} \eta_{SI}(\text{x})$, за умов ресурсного обмеження $\sum_{j\in J} C_J(x_j) \le C^{max}$, обмежень вибору та масштабу послуг $0 \le x_j \le \overline{x}_j y_j,\ y_j \in \{0,1\},\ j \in J$, мінімальних рівнів системних властивостей $I_{d,s}(\text{x}) \ge I_d^{min},\ d \in D, s \in S_{crit}$, технологічних та енергетичних балансів РЕС

Алгоритм застосування моделі складається з наступних етапів:

- Визначення складу сервісного портфеля, межі РЕС, розрахунковий період і сценарії;
- Формування базових, цільових та фактичних значень первинних показників;
- Нормування показників та розрахунок показників I_{EE}, I_{FL}, I_{RE} і I_{SS};
- Визначення базового показника і перевірка порогових умов;
- Оцінювання синергетичного ефекту спільного використання послуг;
- Розрахунок сценарних значень, очікуваного результату і ризику недосягнення цілей;
- Визначення коефіцієнта верифікованості;
- Розрахунок прямих, системних та уникнених вигід;
- Визначення підсумкового показника та перевірка критерію прийнятності;
- Розв’язання оптимізаційної задачі вибору складу і масштабу сервісів.

2.5. Формалізація цільових показників сервіс-орієнтованого розвитку РЕС

Сервіс-орієнтований розвиток регіональної енергосистеми передбачає перехід від оцінювання окремих технічних заходів до цілеспрямованого забезпечення вимірюваних системних результатів. За такого підходу технічні заходи розглядаються не як самостійна мета, а як ресурс надання відповідних енергетичних сервісів,

результативність використання якого визначається тим, якою мірою ці сервіси забезпечують досягнення взаємопов'язаних цільових результатів розвитку РЕС: ефективності → гнучкості → самодостатності → покриття попиту. Сукупний приріст системної цінності порівнюється з витратами на реалізацію відповідного напряму розвитку, що дає змогу оцінити його практичну доцільність.

Ефективність сервіс-орієнтованого розвитку визначається співвідношенням приросту інтегральної цінності РЕС і витрат на реалізацію відповідного напряму: $E_t^{dev} = \Delta\mathcal{V}_t / C_t^{dev}$, а приріст інтегральної цінності становить $\Delta\mathcal{V}_t = \mathcal{V}_t^{new} - \mathcal{V}_t^{base}$, де $\mathcal{V}_t^{new}$ – інтегральна цінність або корисність РЕС після реалізації заходів сервіс-орієнтованого розвитку; $\mathcal{V}_t^{base}$ – відповідна цінність у базовому стані; C_t^{dev} – витрати на реалізацію напряму розвитку. Інтегральна цінність визначається через сукупність прямих і системних витрат і втрат: $\mathcal{V}_t = B_t^{en} + B_t^{flex} + B_t^{res} + B_t^{self} + B_t^{env} + B_t^{soc}$, де B_t^{en} – вигода від енергозбереження та зниження втрат; B_t^{flex} – цінність гнучкості; B_t^{res} – уникненні збитки від перерв енергопостачання; B_t^{self} – вигоди від підвищення самодостатності; B_t^{env} – екологічний ефект; B_t^{soc} – соціальна цінність забезпечення критичних і суспільно важливих потреб. Якщо $\mathcal{V}$ і C^{dev} визначено в однакових грошових одиницях, E_t^{dev} є безрозмірним коефіцієнтом і показує величину створеної додаткової цінності на одиницю витрат. Якщо $\mathcal{V}$ представлено у балах корисності, показник має розмірність «одиниць корисності на одиницю витрат» і використовується лише для порівняння альтернатив за однакової методики оцінювання. Для багаторічного горизонту застосовуються дисконтовані величини:

$$E^{dev} = \frac{PV(\Delta\mathcal{V})}{PV(C^{dev})} = \sum_{\tau=0}^{N} \frac{\Delta\mathcal{V}_\tau}{(1+r)^\tau} \Big/ \sum_{\tau=0}^{N} \frac{C_\tau^{dev}}{(1+r)^\tau}, \tag{2.8}$$

де r – ставка дисконту; τ – рік життєвого циклу; N – горизонт оцінювання; $PV(\cdot)$ – приведена вартість відповідного заходу. Критерієм економічної прийнятності визначеного напряму розвитку є $E^{dev} \geq 1$.

Гнучкість характеризує здатність РЕС змінювати режими генерації, споживання, накопичення та міжсистемного обміну відповідно до зміни попиту,

виробітку ВДЕ, цінових сигналів і мережевих обмежень. Інтегральний часовий показник гнучкості формалізується як

$$F_{t,\omega} = \gamma_1 \frac{P_{t,\omega}^{flex}}{P_{t,\omega}^{load}} + \gamma_2 \frac{E_{t,\omega}^{stor,avail}}{E_{t,\omega}^{load}} + \gamma_3 DR_{t,\omega}^{n} + \gamma_4 \frac{P_{t,\omega}^{flow,ctrl}}{P_{t,\omega}^{load}}, \quad (2.9)$$

де: $P_{t,\omega}^{flex}$ – доступна маневрова потужність; $P_{t,\omega}^{load}$ – потужність навантаження РЕС; $E_{t,\omega}^{stor,avail}$ – доступний для використання запас енергії в накопичувачах; $E_{t,\omega}^{load}$ – енергетична потреба протягом установленого інтервалу; $DR_{t,\omega}^{n}$ – нормований ефект керування попитом; $P_{t,\omega}^{flow,ctrl}$ – доступна величина керованих міжсистемних перетоків; $\gamma_1, \dots, \gamma_4$ – вагові коефіцієнти складових гнучкості. Щоб усі доданки були безрозмірними та зіставними, ефект керування попитом визначено як $DR_{t,\omega}^{n} = P_{t,\omega}^{DR}/P_{t,\omega}^{load}$, де $P_{t,\omega}^{DR}$ – потужність навантаження, яка може бути зменшена, збільшена або перенесена в часі відповідно до сигналу керування. Для інтервалу тривалістю Δt енергетичну складову накопичення подано як $P_{t,\omega}^{stor,eq} = E_{t,\omega}^{stor,avail}/\Delta t$, після чого другий доданок показника гнучкості може бути записаний у вигляді $P_{t,\omega}^{stor,eq}/P_{t,\omega}^{load}$. Обидві форми є коректними за умови однакового розрахункового інтервалу в чисельнику та знаменнику. Вагові коефіцієнти мають задовольняти умови $\gamma_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^{4} \gamma_i = 1$. Значення $F_{t,\omega} = 0$ означає відсутність доступних ресурсів гнучкості, а наближення показника до одиниці – здатність РЕС покрити встановлену потребу в маневруванні за рахунок узгодженого використання генерації, накопичення, керування попитом і контрольованого міжсистемного обміну.

Самодостатність характеризує здатність РЕС покривати потребу в енергетичних сервісах за рахунок локальних джерел, накопичувачів, керування попитом і координованої взаємодії енергетичних підсистем, для кожної з яких показник визначається як

$$S_{t,\omega}^{c} = (E_{t,\omega}^{loc,c} + E_{t,\omega}^{stor,c} + E_{t,\omega}^{dem,c} + E_{t,\omega}^{ctrl,c})/E_{t,\omega}^{load,c}, \quad (2.10)$$

де: $E_{t,\omega}^{loc,c}$ – обсяг енергетичного сервісу, забезпечений локальними джерелами; $E_{t,\omega}^{stor,c}$ – корисний внесок накопичувачів; $E_{t,\omega}^{dem,c}$ – еквівалентний внесок керування попитом; $E_{t,\omega}^{ctrl,c}$ – внесок міжсистемної координації та сервісів гнучкості; $E_{t,\omega}^{load,c}$ – базова

потреба в енергетичному сервісі відповідного виду до активації керування попитом та інших сервісних впливів. Для дотримання енергетичної узгодженості всі складові чисельника мають бути приведені до однакової одиниці вимірювання і відповідати одному часовому інтервалу, а ефект керування попитом $E_{t,\omega}^{dem,c}$ враховано як підтверджене скорочення або перенесення потреби відносно базового профілю, а не як фізично вироблена енергія. Саме тому знаменник має відповідати базовій, тобто некерованій, потребі. Щоб уникнути подвійного обліку, енергія локального походження, спрямована до накопичувача, не повинна одночасно враховуватися у $E_{t,\omega}^{loc,c}$ та $E_{t,\omega}^{stor,c}$. У першій складовій враховується лише безпосередньо використана локальна енергія, а в другій – корисно відпущена енергія з накопичувача з урахуванням втрат заряджання, зберігання та розряджання. Для інтерпретації показника як частки покриття локальними й керованими ресурсами застосовується обмеження $0 \le S_{t,\omega}^{c} \le 1$. Інтегральний показник самодостатності багатосекторної РЕС за період T визначається як

$$S_{\omega}^{RES} = \left(\sum_{t\in T}\sum_{c\in \mathcal{C}} \xi_c \, E_{t,\omega}^{serv,c}\right) / \sum_{t\in T}\sum_{c\in \mathcal{C}} \xi_c \, E_{t,\omega}^{load,c}, \qquad (2.11)$$

де: $E_{t,\omega}^{serv,c} = \min\left\{E_{t,\omega}^{load,c}, (E_{t,\omega}^{loc,c} + E_{t,\omega}^{stor,c} + E_{t,\omega}^{dem,c} + E_{t,\omega}^{ctrl,c})\right\}$, ξ_c – коефіцієнт приведення до спільної бази оцінювання результативності енергетичного сервісу в межах відповідної підсистеми $c \in \mathcal{C} = \{el, ht, gs\}$. Якщо показники електричної, теплової та газової підсистем виражено в однакових енергетичних одиницях і їх проста сума є методично допустимою, приймається $\xi_c = 1$. За відмінності якості або цінності енергетичних сервісів, ξ_c установлюється на основі коефіцієнтів економічної чи пріоритетної вагомості.

Покриття попиту характеризує здатність РЕС забезпечувати споживачів необхідним обсягом енергії або енергетичних послуг з урахуванням можливого недопостачання. Відповідний показник визначається як $k_{cov,t,\omega}^{c} = 1 - ENS_{t,\omega}^{c}/E_{t,\omega}^{load,c}$, де $ENS_{t,\omega}^{c}$ – обсяг недопостачання енергії в підсистемі c; $E_{t,\omega}^{load,c}$ – повна потреба в енергії або відповідному енергетичному сервісі. За умов $0 \le ENS_{t,\omega}^{c} \le E_{t,\omega}^{load,c}$ показник належить інтервалу $0 \le k_{cov,t,\omega}^{c} \le 1$. Значення $k_{cov,t,\omega}^{c} = 1$ відповідає

повному покриттю попиту, а $k^{c}_{cov,t,\omega} = 0$ – повному недопостачанню в межах відповідного інтервалу. Для критичних споживачів доцільно окремо визначати $k^{crit,c}_{cov,t,\omega} = 1 - ENS^{crit,c}_{t,\omega}/E^{crit,c}_{load,t,\omega}$, де $ENS^{crit,c}_{t,\omega}$ – недопостачання критичного навантаження; $E^{crit,c}_{load,t,\omega}$ – потреба критичних споживачів. Такий показник безпосередньо відображає внесок сервісів резервування, накопичення, мікромереж, керування попитом і відновлення енергопостачання у стійкість РЕС. Інтегральний коефіцієнт покриття попиту за розрахунковий період визначається як відношення сумарно забезпеченого попиту до загальної потреби: $k^{c}_{cov,\omega} = 1 - \sum_{t\in T} ENS^{c}_{t,\omega}/\sum_{t\in T} E^{load,c}_{t,\omega}$. Така форма автоматично враховує різну величину навантаження в окремих часових інтервалах і запобігає викривленню результату, яке може виникати при застосуванні незваженого середнього.

Встановлення цільових значень показників здійснюється у вигляді системи взаємопов'язаних вимог до результату сервіс-орієнтованого розвитку, де для кожного сценарію ω та, за потреби, кожної енергетичної підсистеми c установлюються цільові рівні: $F_{t,\omega} \geq F^{tar}_{t,\omega}$, $S^{c}_{t,\omega} \geq S^{tar,c}_{t,\omega}$, $k^{c}_{cov,t,\omega} \geq k^{tar,c}_{cov,t,\omega}$, $E^{dev} \geq E^{tar}_{dev}$. Ступінь досягнення кожного цільового показника визначається як $\mu_{i,\omega} = \min\{1, q_{i,\omega}/q^{tar}_{i,\omega}\}, \quad i \in \mathcal{I}$, де $q_{i,\omega}$ – фактичне або модельне значення показника; $q^{tar}_{i,\omega}$ – його цільове значення; $\mathcal{I} = \{F, S, k_{cov}, E_{dev}\}$ – множина цільових показників. Для показників, у яких бажаним є зменшення, застосовується обернене нормування. Вектор цільових результатів сервіс-орієнтованого розвитку має вигляд $\mathrm{q}_{t,c,\omega} = \left(F_{t,\omega}, S^{c}_{t,\omega}, k^{c}_{cov,t,\omega}, E^{dev}\right)$, де для узагальненого оцінювання ступеня досягнення цілей застосовується зважена геометрична згортка $I^{tar}_{\omega} = \prod_{i\in\mathcal{I}}(\mu_{i,\omega} + \varepsilon)^{\alpha_i} - \varepsilon, \alpha_i \geq 0, \sum_{i\in\mathcal{I}} \alpha_i = 1, 0 < \varepsilon \ll 1$, де α_i – вагомість відповідної цілі; ε – малий регулювальний параметр. Для критичних сценаріїв доцільно додатково встановлювати жорсткі порогові умови $\mu_{i,\omega} \geq \mu^{min}_{i}, \quad i \in \mathcal{I}, \quad \omega \in \Omega_{crit}$, де Ω_{crit} – множина аварійних, дефіцитних або кризових сценаріїв; μ^{min}_{i} – мінімально допустимий рівень досягнення відповідної цілі.

Використання показників у задачі вибору сервісних рішень

Нехай x_j – масштаб залучення j-ї сервісної послуги, а x – вектор сервісних рішень. Практична задача розвитку РЕС полягає у виборі такого портфеля послуг, який максимізує ступінь досягнення цільових показників $\max_{\text{x}} I^{tar}(\text{x})$ за наявних ресурсних і технологічних обмежень: $\sum_{j=J} C_j(x_j) \leq C^{max}$; $F_{t,\omega}(\text{x}) \geq F_{t,\omega}^{tar}$; $S_{t,\omega}^{c}(\text{x}) \geq S_{t,\omega}^{tar,c}$; $k_{cov,t,\omega}^{c}(\text{x}) \geq k_{cov,t,\omega}^{tar,c}$; $E^{dev}(\text{x}) \geq E_{dev}^{tar}$, а також балансів виробництва, перетворення, накопичення, транспортування і споживання енергії; $C_j(x_j)$ – витрати на j-ту послугу; C^{max} – доступний бюджет; J – множина сервісних послуг.

Практичне значення запропонованої системи полягає в можливості встановлювати цільові рівні сервісного результату, порівнювати альтернативні портфелі послуг, оцінювати їх результативність у різних сценаріях і включати відповідні показники до оптимізаційних моделей та умов енергосервісних контрактів.

2.6. Висновки до розділу

1. На основі системного аналізу еволюційного розвитку сервісних послуг встановлено поступовий перехід від традиційного підходу до енергосервісу, зосередженого переважно на енергозбереженні, підвищенні енергоефективності та модернізації обладнання, до інтегрованої сервісної моделі, за якою предметом надання послуги є не окремий технічний чи/або організаційний захід, а гарантований результат, що виявляється у підвищенні енергоефективності, гнучкості, стійкості та самодостатності РЕС.

2. Обґрунтовано, що розвиток ринку сервісних послуг РЕС має ґрунтуватися на результат-орієнтованій моделі взаємодії замовників, постачальників, операторів енергетичної інфраструктури, агрегаторів, інвесторів і регуляторних органів, де основними засадами є економічна обґрунтованість, договірна відповідальність, розподіл ризиків, верифікованість і можливість поєднання різних сервісів у межах одного портфеля послуг.

3. Розроблено базові принципи оцінювання системно-інтегрованої ефективності сервісних послуг РЕС, які передбачають системність, багатовимірність, порівнянність, нормування, вимірюваність, верифікованість, урахування взаємодії сервісів, економічну доцільність, сценарність і робастність, спрямовані на

забезпечення узгодженого поліпшення енергоефективності, гнучкості, стійкості та самодостатності РЕС відповідно до технологічних, ресурсних, економічних і контрактних обмежень.

4. Розроблено математичну модель оцінювання системно-інтегрованої ефективності сервісних рішень РЕС, що охоплює формування вектору керованих рішень, визначення часткових показників системних властивостей, їх нормування та агрегування, урахування синергетичних ефектів портфеля сервісів, верифікацію досягнутих результатів і коригування інтегрального індексу за критерієм економічної доцільності, що у підсумку дозволило отримати економічно скоригований і верифікований системний результат оцінювання сервісних рішень.

5. Формалізовано цільові показники сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, які відображають досягнення встановлених рівнів енергоефективності, гнучкості, стійкості та самодостатності, що дозволило для кожного показника визначити їх базове й цільове значення, напрям бажаної зміни, допустимі межі, часовий горизонт і сценарні умови оцінювання, тим самим дозволяючи трансформувати загальні стратегічні орієнтири розвитку ВДЕ у кількісно визначені вимоги до результатів надання послуг.

6. Науково-прикладне значення одержаних результатів полягає у створенні інструментарію, який пов’язує цілі розвитку РЕС із вибором портфеля сервісних рішень, оцінюванням їхнього системного впливу, перевіркою фактично досягнутих результатів та економічним обґрунтуванням управлінських рішень, призначених для використання органами регіонального управління, операторами енергетичної інфраструктури, енергосервісними компаніями, агрегаторами та інвесторами під час розроблення програм сервіс-орієнтованого розвитку РЕС.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДОЛОГІЧНІ ПОЛОЖЕННЯ БАЛАНСОВО-ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ПІДХОДУ ДО МОДЕЛЮВАННЯ РЕС ЯК СКЛАДОВИХ ІЕС КРАЇНИ

3.1. Обґрунтування балансово-оптимізаційного підходу до моделювання сервіс-орієнтованого розвитку РЕС

Моделювання регіональних енергосистем як складових інтегрованої енергетичної системи країни потребує вибору такого методологічного підходу, який одночасно забезпечуватиме системність дослідження, фізичну узгодженість отриманих результатів, можливість міжсекторної інтеграції та придатність моделей для обґрунтування стратегічних управлінських рішень [7, 35, 38]. Особливого значення це набуває за умов децентралізації енергопостачання, зростання частки відновлюваних джерел енергії, розвитку розподіленої генерації, систем накопичення, керованого попиту, локальних енергетичних спільнот і цифрових платформ управління енергетичними потоками.

У межах цього дослідження РЕС розглядається як територіальна сукупність об’єктів генерації та споживання у складі інтегрованої енергетичної системи країни, що охоплюють регіональні підсистеми електро- тепло- і газопостачання, розподілені енергетичні ресурси, накопичувачі енергії, інфраструктуру керування попитом, локальні та муніципальні енергетичні системи, а також сукупність технологічних, цифрових, організаційних і фінансово-економічних сервісів, за допомогою яких формуються необхідні властивості її функціонування.

Регіональна енергосистема взаємодіє з інтегрованою енергетичною системою країни через обмін електричною енергією, природним газом, паливом, резервами потужності, послугами балансування, регулювання та гнучкості. Відповідно, під час моделювання необхідно враховувати як внутрішньо регіональні процеси виробництва, перетворення, накопичення, розподілу та споживання енергії, так і зовнішні міжсистемні зв’язки. Це дає змогу визначати роль регіону у формуванні загальнонаціональних енергетичних балансів, оцінювати рівень його залежності від зовнішнього постачання, встановлювати потенціал енергетичної самодостатності, а

також досліджувати можливості надання регіональними ресурсами системних послуг на рівні країни.

Проведено аналіз, який показав, що пряме розв'язання цієї задачі потребує створення системно узгодженої сукупності математичних моделей, що в умовах нестабільної генерації відновлюваних джерел енергії, потреб урахування сучасних тенденцій децентралізації, посилення ролі міжрегіональних енергетичних перетоків та забезпечення самодостатності критичної інфраструктури РЕС стає проблематичним і призводить до невизначеності та неузгодженості результатів моделювання.

Для свого вирішення ця проблема потребує нового методологічного підходу. Запропоновано використання теоретико-методологічних положень сервіс-домінантної логіки та теорії системи систем, формалізованих на платформі методу декомпозиції. За таким підходом РЕС розглядаються як відносно автономні підсистеми, що мають власну структуру генерації, передачі, розподілу, споживання та локального управління, але водночас функціонують в межах єдиного національного балансу електричної енергії, палива та потужності.

Проведено порівняльну оцінку основних класів моделей, які можуть застосовуватися для дослідження розвитку регіональних енергосистем: динамічних, моделей системної динаміки, агентних, стохастичних і балансових. Їхню придатність оцінено за критеріями стратегічного розвитку РЕС, міжсекторної інтеграції, оптимізації структури, потреби у великих масивах даних, фізичної реалізованості рішень і можливості формування балансів енергетичних сервісів (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Оцінка придатності методів моделювання розвитку РЕС

Критерій	Динамічні	Системної динаміки	Агентні	Стохастичні	Балансові
Стратегічний розвиток РЕС	△	✓	△	✓	✓✓
Міжсекторна інтеграція	△	✓	△	✓	✓✓
Оптимізація структури	△	△	✗	✓	✓✓
Потреба у великих масивах даних	✗	△	✗	✗	✓
Фізична реалізованість рішень	△	✗	✗	△	✓✓
Баланси енергетичних сервісів	△	△	△	△	✓✓

Позначення: ✓✓ - Найкраща відповідність критерію; ✓ - Добра відповідність; △ - Часткова або обмежена відповідність; ✗ - Низька відповідність або практична непридатність для даного критерію.

Так, перевагою динамічних моделей, які відтворюють зміну технічних, економічних або енергетичних параметрів системи в часі, є можливість досліджувати перехідні процеси, часові залежності та реакцію системи на зміну навантаження або керуючих впливів. Водночас їх застосування для середньо- і довгострокового прогнозування обмежується значною потребою в достовірних часових рядах, технологічних характеристиках обладнання та деталізованих профілях споживання.

Моделі системної динаміки дають змогу відтворювати причинно-наслідкові зв'язки, контури зворотного зв'язку, часові затримки, інерційність інвестиційних процесів та взаємний вплив економічних, соціальних, технологічних й інституційних чинників, проте їх агрегований характер ускладнює забезпечення точного виконання фізичних балансів енергії та визначення технологічно реалізованої структури РЕС.

Агентні моделі, що орієнтовані на відтворення поведінки споживачів, виробників, агрегаторів, операторів мереж, енергосервісних компаній, територіальних громад та інвесторів, є корисними для дослідження децентралізованої взаємодії учасників, але потребують значного обсягу інформації про правила їх поведінки й самі по собі не гарантують оптимальності та фізичної реалізованості сформованих рішень.

Стохастичні моделі доцільні для врахування невизначеності виробітку ВДЕ, коливань попиту, цін на енергоресурси, аварійності обладнання та інших випадкових факторів, однак їх якість залежить від репрезентативності статистичних вибірок і достовірності законів розподілу параметрів, тому стохастичний підхід доцільно застосовувати як надбудову над базовою детермінованою моделлю.

За результатами порівняльної оцінки найбільшу відповідність установленим критеріям показали балансові моделі, методологічною основою яких слугує закон збереження енергії, відповідно до якого для кожного енергетичного носія, територіального рівня та часового інтервалу встановлюється рівність між надходженням, виробництвом і вивільненням енергії, з одного боку, та її споживанням, перетворенням, накопиченням, втратами й передаванням за межі системи з іншого.

Узагальнений енергетичний баланс РЕС для енергетичного носія *e* у часовому інтервалі *t* представлено у вигляді

$$P_{e,t}^{reg} + P_{e,t}^{imp} + P_{e,t}^{dis} + P_{e,t}^{conv} = D_{e,t} + P_{e,t}^{exp} + P_{e,t}^{ch} + L_{e,t} + ENS_{e,t}, \quad (3.1)$$

де: $P_{e,t}^{reg}$ – виробництво відповідного виду енергії в межах регіону; $P_{e,t}^{imp}$ – надходження енергії із зовнішніх щодо РЕС систем; $P_{e,t}^{dis}$ – відпуск енергії з накопичувачів; $P_{e,t}^{conv}$ – обсяг енергії, отриманий унаслідок міжсекторального перетворення; $D_{e,t}$ – кінцевий попит на енергію; $P_{e,t}^{exp}$ – передавання енергії за межі регіону; $P_{e,t}^{ch}$ – енергія, спрямована до накопичувачів; $L_{e,t}$ – технологічні втрати; $ENS_{e,t}$ – обсяг попиту, не забезпеченого відповідним видом енергії.

Рівняння (3.1) формує фізичну основу моделі, яку у сервіс-орієнтованій постановці доповнено змінними, що характеризують вплив енергетичних сервісів на складові балансу, де послуги з енергоефективності зменшують кінцевий попит, керування попитом змінює часовий профіль навантаження, накопичення забезпечує перенесення споживання між часовими інтервалами, послуги резервування знижують обсяг незабезпеченого попиту, мікромережі підвищують автономність критичних споживачів, а цифрові сервіси покращують прогнозування, диспетчеризацію й координацію розподілених ресурсів.

Отже, моделюється не лише рух енергетичних ресурсів, а й формування корисних системних результатів, які створюються відповідними сервісними рішеннями, що потребувало введення поряд з енергетичними балансами додаткових балансів енергетичних сервісів. У загальному вигляді такий баланс для послуги *s* можна записати як

$$Q_{s,t}^{req} = Q_{s,t}^{base} + \sum_{k \in K} Q_{s,k,t}^{serv} - Q_{s,t}^{def}, \quad (3.2)$$

де: $Q_{s,t}^{req}$ – необхідний обсяг або нормативний рівень послуги; $Q_{s,t}^{base}$ – базова спроможність РЕС забезпечувати відповідну послугу без додаткових сервісних рішень; $Q_{s,k,t}^{serv}$ – внесок k-го сервісного рішення у формування необхідного результату; $Q_{s,t}^{def}$ – дефіцит відповідної послуги.

Тут і далі під поняттям «енергосервісний баланс» будемо розуміти систему взаємопов'язаних співвідношень, що узгоджує потреби споживачів в енергетичних послугах із ресурсними й технологічними можливостями РЕС надавати енергосервісні послуги із заданими параметрами якості, надійності та стійкості.

Об'єктами такого узгодження (балансування) можуть бути не лише кількісно вимірювані обсяги енергії, а й резерв доступної потужності, регулювальний діапазон керованого попиту, потенціал перенесення навантаження, гарантована потужність резервного живлення, скорочення незабезпеченого попиту, тривалість автономної роботи критичної інфраструктури та інші показники гнучкості, стійкості й самодостатності РЕС.

Таким чином, першим аргументом на користь використання балансово-оптимізаційного підходу є необхідність середньострокового прогнозування розвитку регіональних енергосистем, який відповідає потребам стратегічного планування, розроблення регіональних енергетичних планів, визначення пріоритетів модернізації інфраструктури та обґрунтування інвестиційних рішень. Балансовий підхід при цьому не заперечує часової динаміки: період може поділятися на роки, сезони, типові доби або характерні інтервали.

Другим аргументом є те, що балансові моделі допускають використання агрегованих статистичних показників, паливно-енергетичних балансів, даних операторів систем, регіональних програм і результатів енергоаудитів, для яких відсутні параметри можуть задаватися як сценарні діапазони з подальшим аналізом чутливості та невизначеності, що особливо важливо в умовах обмеженості регіональної енергетичної статистики України.

Третім аргументом є прозорість постановки та розв'язання оптимізаційної задачі, де балансові рівняння, технологічні обмеження, цільові функції та параметри сервісних рішень можуть бути чітко формалізовані й інтерпретовані, що дозволяє простежити зв'язок між вихідними даними, припущеннями, обмеженнями та результатами.

Четвертим аргументом є можливість надбудови над класичними енергетичними балансами системи балансів енергетичних сервісів, що у сервіс-орієнтованій

постановці надає можливість оцінювання кінцевого корисного результату розвитку РЕС: скорочення споживання, забезпечення гнучкості, гарантований резерв, зменшення незабезпеченого попиту, тривалість автономної роботи, швидкість відновлення та підвищення самодостатності.

Результати аналізу аргументів відображено на рисунку 3.1.

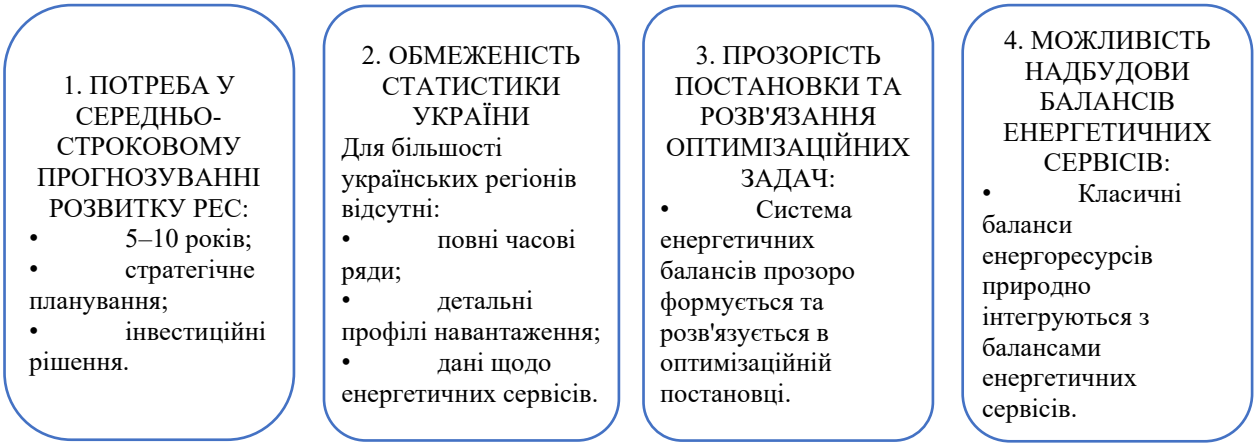


Рис. 3.1. Ключові аргументи використання балансових моделей

Перевага балансово-оптимізаційного підходу не означає відмови від інших методів. Він виконує функцію базового модельного ядра, яке може бути доповнене сценарним аналізом, стохастичними й нечіткими моделями, імітаційним та агентним моделюванням, методами системної динаміки, а також процедурами верифікації, валідації та кількісного оцінювання невизначеності.

Таким чином, для моделювання РЕС як складових інтегрованої енергетичної системи країни прийнято комбінований балансово-оптимізаційний підхід, основу якого становить система фізично узгоджених балансів енергетичних ресурсів, доповнена балансами енергетичних сервісів, технологічними, інфраструктурними, екологічними, фінансово-економічними та інституційними обмеженнями. За цих умов, оптимізаційна надбудова забезпечує вибір раціональної структури РЕС та складу сервісних рішень, а сценарні, стохастичні й робастні процедури дають змогу врахувати ризики та невизначеність.

Застосування такого підходу створює методологічну основу для переходу від традиційного ресурсно-технологічного опису РЕС до моделювання гарантованих функціональних результатів її розвитку – енергоефективності, гнучкості, стійкості, надійності та самодостатності, на основі яких формалізуються структура моделі РЕС,

система енергетичних і сервісних балансів, цільові функції, обмеження та критерії оцінювання альтернативних сценаріїв сервіс-орієнтованої трансформації.

3.2. Методологічні засади формування інтегрованого енергетичного та енергосервісного балансів РЕС

Розвиток регіональних енергосистем як складових інтегрованої енергетичної системи країни зумовлює необхідність розширення традиційного розуміння енергетичного балансу. У класичному підході балансування зосереджується переважно на кількісному узгодженні надходження, виробництва, перетворення, передавання, розподілу та кінцевого споживання енергоресурсів, результатом моделювання якого є система фізичних балансів електричної енергії, теплової енергії, природного газу й інших енергоносіїв, виражених відповідно у МВт·год, Гкал, м³ або інших натуральних одиницях.

Традиційний енергетичний баланс є необхідною, проте недостатньою передумовою обґрунтування сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, де сам факт рівності між обсягами надходження і використання енергії не дає відповіді на питання, якою мірою система забезпечує необхідну якість енергопостачання, гнучкість, резервування, автономність, комфорт споживачів, швидкість відновлення після порушень і спроможність адаптуватися до зміни зовнішніх умов, оскільки однаковий за обсягом енергетичний баланс може бути сформований за принципово різних рівнів витрат, викидів, залежності від зовнішнього постачання, незабезпеченого попиту та вразливості критичної інфраструктури.

Тому пропонується інтегрований дворівневий підхід, за якого фізичне балансування енергоресурсів доповнюється балансуванням енергосервісних результатів, а концептуальна логіка визначається співвідношенням «енергія як вхід – сервіс як вихід». За цих умов, енергія, потужність, технологічне обладнання, цифрова інфраструктура та організаційно-фінансові механізми розглядаються як ресурси, тоді як кінцевим результатом є не лише поставлений обсяг енергії, а сформована корисність для споживача, регіональної енергосистеми та інтегрованої енергетичної системи країни.

Перший рівень інтегрованої моделі охоплює класичні баланси паливно-енергетичних ресурсів. де для кожного енергетичного носія, територіального вузла та часового інтервалу встановлюється відповідність між виробництвом, імпортом, перетворенням і відпуском із накопичувачів, з одного боку, та кінцевим споживанням, експортом, заряджанням накопичувачів, технологічними втратами й незабезпеченим попитом з іншого.

Узагальнена умова фізичного балансування енергетичного носія *e* у часовому інтервалі *t,* записана у вигляді (3.1), охоплює не ізольовані енергетичні ланцюги, а взаємопов'язані підсистеми електро-, тепло- і газопостачання, міжсекторні зв'язки яких формуються через когенерацію, електричне опалення, теплові насоси, виробництво газоподібних палив з електроенергії, заряджання електромобілів та інші технології перетворення. Вихід одного сектора при цьому стає входом іншого, тому коефіцієнти перетворення, межі потужності та втрати мають бути узгоджені в єдиній системі обмежень.

Другий рівень, призначений для оцінювання результатів, створюється енергетичними, технологічними, цифровими, організаційними та фінансовими сервісами, до яких належать скорочення споживання, зміщення або обмеження навантаження, надання резерву, підтримання якості енергопостачання, автономне живлення критичних споживачів, зниження незабезпеченого попиту, скорочення часу відновлення, зменшення викидів і підвищення комфорту.

Енергосервісний баланс (3.2) для властивості або корисного результату *s* у часовому інтервалі *t*, який відображає співвідношення між необхідним рівнем послуги, базовою спроможністю РЕС, внесками обраних сервісних рішень і залишковим дефіцитом, може бути деталізований складовою $Q_{s,k,t}^{serv} = \alpha_{s,k} x_{k,t}$, де: $x_{k,t}$ – масштаб, потужність або інтенсивність застосування *k*-го сервісного рішення; $\alpha_{s,k}$ – коефіцієнт впливу *k*-го рішення на результат *s*.

Введення коефіцієнта $\alpha_{s,k}$ дає можливість відобразити багатофункціональність сервісних рішень. Наприклад, система накопичення одночасно може забезпечувати перенесення навантаження, резерв потужності, аварійне живлення, інтеграцію ВДЕ та зменшення пікових витрат, а керування попитом – впливати на витрати, гнучкість,

надійність і потребу в зовнішньому постачанні. Отже, між сервісним рішенням і системним результатом зазвичай існує не однозначна, а множинна матриця впливів.

Принципово важливим є розмежування фізичних і функціональних показників енергетичного і енергосервісного балансів. І якщо енергетичні баланси безпосередньо вимірюються у МВт·год, Гкал, м³ та інших одиницях енергії або енергоресурсів, то частина енергосервісних результатів також допускає енергетичне вираження: заощаджена енергія – у МВт·год або Гкал; зміщене навантаження – у МВт·год; резерв – у МВт; незабезпечений попит – у МВт·год; автономне живлення – у МВт і годинах. Водночас стійкість, гнучкість, якість, комфорт і самодостатність не можуть у загальному випадку бути коректно представлені лише в одиницях енергії. Для них застосовуються спеціальні показники: тривалість і частота перерв, час відновлення, регулювальний діапазон, швидкість зміни потужності, частка локально забезпеченого попиту, тривалість автономної роботи, відхилення параметрів якості, індекси комфорту та інтегральні нормовані оцінки. Основні типи та характеристики енергосервісних балансів РЕС представлено на рисунку 3.2.



Рис.3.2. Типи інтегрованих енергосервісних балансів РЕС

У загальному випадку поняття «енергосервісний баланс» у роботі використовується як узгодження попиту на певну функціональну властивість РЕС із доступною спроможністю сервісних рішень її сформувати, де для об’єднання різнорозмірні показники нормуються відносно базових, нормативних або цільових значень.

Нормований рівень досягнення результату визначається як

$$z_{s,t} \;=\; Q_{s,t}^{ach} \,/\, Q_{s,t}^{req},\;\; 0 \;\le\; z_{s,t} \;\le\; 1, \tag{3.3}$$

де: $Q_{s,t}^{ach}$ характеризує фактично досягнутий рівень результату, а $z_{s,t}$ – ступінь виконання цільової вимоги. Значення $z_{s,t} = 1$ означає повне досягнення встановленої цілі; менші значення свідчать про дефіцит функціональної спроможності. За показниками, для яких менше значення є кращим, зокрема ENS або час відновлення, застосовується відповідне обернене нормування.

Два рівні інтегрованого балансу не є незалежними. Зміна структури фізичних потоків впливає на доступність сервісів, а вимоги до стійкості, гнучкості або автономності, своєю чергою, визначають необхідну структуру генеруючих потужностей, накопичувачів, резервів, мережевої інфраструктури й керованого попиту, тому у моделі формується двосторонній зв’язок між енергетичними змінними та показниками системної цінності.

Узагальнену взаємозалежність двох рівнів представлено системою

$$B_{e,t}^{E} \;=\; 0, \quad B_{s,t}^{S} \;\ge\; 0, \quad Q_{s,t} \;=\; F_s\big(X_{e,t}, U_{k,t}\big), \tag{3.4}$$

де: $B_{e,t}^{E}$ – залишок фізичного балансу енергоносія, який для реалізованого рішення має дорівнювати нулю; $B_{s,t}^{S}$ – запас або дефіцит спроможності забезпечити сервісний результат; $X_{e,t}$ – сукупність змінних фізичних енергетичних потоків; $U_{k,t}$ – сукупність керувальних і сервісних впливів; F_s – функціональна залежність між конфігурацією РЕС, сервісними рішеннями та досягнутим результатом.

Таким чином, допустимим визнається лише рішення, яке одночасно задовольняє фізичні закони збереження енергії, технологічні й мережеві обмеження, а також установлені вимоги до сервісних властивостей, що запобігає ситуації, коли економічно приваблива конфігурація виявляється нездатною забезпечити резерв,

автономність або відновлення критичних споживачів, і навпаки – коли формально надійне рішення є надмірно витратним чи екологічно неприйнятним.

Результативність сервіс-орієнтованого розвитку РЕС оцінено за системою взаємопов'язаних критеріїв, де до базових належать економічна й енергетична ефективність, самодостатність, гнучкість, стійкість, надійність, екологічність і якість обслуговування споживачів. Для їх узгодження використано інтегральний індекс системно-інтегрованої ефективності

$$I_t = \sum_{s \in S} w_s z_{s,t}, \quad \sum_{s \in S} w_s = 1, \tag{3.5}$$

де: w_s є ваговим коефіцієнтом відповідного критерію, а $z_{s,t}$ – його нормованим значенням. Вагові коефіцієнти установлюються на основі стратегічних пріоритетів регіону, експертного оцінювання, аналізу ієрархій або процедур багатокритеріального прийняття рішень. Разом із тим інтегральний індекс замінює аналіз окремих показників: критичні вимоги до безпеки, стійкості чи якості доцільно задавати як обов'язкові обмеження, які не можуть компенсуватися високими значеннями інших критеріїв.

Ключові методологічні переваги інтегрованого підходу полягають у наступному:

- забезпечується взаємоузгоджене балансування енергетичних та енергосервісних потоків, а вибір технологій перевіряється одночасно за фізичними балансами та здатністю формувати необхідні системні властивості;
- створюються передумови для інтегрованого оцінювання ефективності, самодостатності, гнучкості та стійкості РЕС з урахуванням економічних, енергетичних, екологічних і соціально орієнтованих результатів;
- розвиток РЕС орієнтується на показники цінності послуг, а не лише на введення нових потужностей або нарощування обсягів виробництва і де пріоритет отримують рішення, що забезпечують вимірюваний і верифікований корисний результат;
- удосконалюється система підтримки управлінських рішень, за якою органи регіонального управління, оператори інфраструктури та інвестори можуть

порівнювати альтернативні сценарії не лише за витратами, а й за внеском у досягнення цільових властивостей РЕС.

Отже, інтегрований баланс РЕС є не просто розширеним набором рівнянь збереження енергії, а методологічним механізмом поєднання ресурсного, технологічного та сервісного вимірів розвитку регіональної енергосистеми, де перший рівень гарантує фізичну реалізованість рішень, а другий – їх функціональну достатність і споживчу та системну корисність, що формує основу для постановки багатокритеріальної оптимізаційної задачі сервіс-орієнтованого розвитку РЕС як складової інтегрованої енергетичної системи країни.

3.3. Структурно-логічна архітектура балансово-оптимізаційної моделі сервіс-орієнтованого розвитку РЕС у взаємодії з ІЕС

Формалізація сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем потребує переходу від концептуального представлення інтегрованих енергетичних та енергосервісних балансів до математичної моделі вибору рішень, що має визначати раціональну структуру генерувальних, мережевих, накопичувальних і сервісних ресурсів РЕС, режими їх використання та параметри взаємодії з інтегрованою енергетичною системою країни.

Запропонована балансово-оптимізаційна модель поєднує шість взаємопов’язаних компонентів: цільову функцію розвитку, систему фізичних балансових рівнянь, систему енергосервісних балансів, сукупність технічних, економічних, екологічних та інфраструктурних обмежень, оптимізаційну процедуру і блок взаємодії РЕС-ІЕС, узгоджених за послідовністю «цільова функція – балансові рівняння – сервісні баланси – обмеження – оптимізація – взаємодія РЕС–ІЕС», яка відображає логіку переходу від цілей розвитку до допустимого й обґрунтованого управлінського рішення.

На відміну від традиційних моделей мінімізації витрат, у запропонованій постановці результативність визначається системою критеріїв, що характеризують не лише економічні наслідки, а й енергетичну самодостатність, гнучкість, робастність, екологічність і корисність енергетичних сервісів, що надає змогу оцінювати

технологічні рішення за їх внеском у формування необхідних властивостей РЕС як складової ІЕС країни.

У загальному вигляді модель розвитку РЕС представлено як задачу максимізації (або мінімізації) цільової функції за системи рівностей, нерівностей та умов належності змінних множині допустимих рішень:

$$\max / \min \ \ F(x), \ \ B(x) = 0, \ G(x) \leq 0, \ x \in X, \tag{3.6}$$

де: *F(x)* – цільова функція розвитку РЕС, яка відображає обрані стратегічні пріоритети; *x* – вектор керованих змінних моделі; *B(x)* = 0 – система балансових рівнянь фізичних і сервісних потоків; *G(x)* ≤ 0 – система технічних, економічних, екологічних, мережевих та інфраструктурних обмежень; *X* – множина допустимих значень безперервних, цілочислових і бінарних змінних.

Вектор керованих змінних *x* розрізняє інвестиційні та операційні складові, де інвестиційні змінні визначають встановлення або модернізацію генеруючих установок, ВДЕ, накопичувачів, теплових насосів, когенерації, мікромереж, цифрових платформ і засобів керування попитом, а операційні змінні характеризують виробництво, імпорт і експорт енергії, заряджання та розряджання накопичувачів, міжсекторне перетворення, активізацію попиту, надання резервів і сервісний обмін з ІЕС

$$x = (x^I, x^O, x^S, x^Z), \tag{3.7}$$

де: x^I охоплює структурно-інвестиційні рішення; x^O – режими експлуатації; x^S – обсяги й параметри енергетичних сервісів; x^Z – змінні міжсистемної взаємодії РЕС-ІЕС, що дає змогу пов’язати довгостроковий вибір конфігурації системи з її функціонуванням у характерних часових інтервалах і сценаріях.

Сервіс-орієнтований розвиток РЕС визначається багатокритеріальною цільовою функцією, що поєднує інтегральний показник енергетичних сервісів, самодостатність, робастність, гнучкість, витрати та викиди, математично коректне адитивне поєднання критеріїв яких потребувало попереднього приведення їх до єдиної безрозмірної шкали. Після нормування відображення максимуму цільової функції записано як

$$\max \ \ F(x) = \alpha_1 ES + \alpha_2 SSR + \alpha_3 R_{rob} + \alpha_4 Flex - \alpha_5 Cost - \alpha_6 Em, \tag{3.8}$$

де: ES – нормований інтегральний показник результативності енергетичних сервісів; SSR – коефіцієнт енергетичної самодостатності РЕС; R_{rob} – показник робастності рішення щодо сценарних і параметричних змін; $Flex$ – показник гнучкості системи; $Cost$ – нормовані сукупні приведені витрати на розвиток і функціонування РЕС; Em – нормований обсяг викидів парникових газів; α_i – невід'ємні вагові коефіцієнти критеріїв; $\sum_{i=1,\dots,6}\alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0$.

Додатні знаки мають критерії, зростання яких є бажаним, а від'ємні – витрати та викиди, що підлягають мінімізації. Для уникнення компенсації критично низької стійкості чи самодостатності високим значенням іншого критерію частина показників задається не лише у цільовій функції, а й як порогові обмеження. Наприклад, ENS не має перевищувати встановленого рівня, автономність критичної інфраструктури має бути не меншою за нормативну тривалість, а викиди – не більшими за цільову траєкторію.

Коефіцієнт енергетичної самодостатності визначено як частку попиту, забезпечену власними ресурсами РЕС, з урахуванням локального виробництва та корисного відпуску накопичувачів

$$SSR = 1 - E_r^{imp} / D_r^{tot}, \quad 0 \leq SSR \leq 1, \tag{3.9}$$

де: E_r^{imp} є обсягом зовнішнього нетто-надходження енергії до регіону, а D_r^{tot} – сукупним попитом. Для багатосекторної системи показник обчислюється окремо за енергоносіями або після приведення потоків до узгодженої енергетичної основи з уникненням подвійного врахування міжсекторальних перетворень.

Балансове ядро забезпечує фізичну та функціональну реалізованість оптимізаційного рішення, яке для кожного регіону *r* і часового інтервалу *t* включає баланси електричної енергії, теплової енергії, природного газу та енергетичних сервісів

$$B(x) = \begin{bmatrix} B_{r,t}^{el} \\ B_{r,t}^{heat} \\ B_{r,t}^{gas} \\ B_{r,t}^{ES} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{3.10}$$

де: $B_{r,t}^{el}$ – баланс електричної енергії; $B_{r,t}^{heat}$ – баланс теплової енергії; $B_{r,t}^{gas}$ – баланс природного газу; $B_{r,t}^{ES}$ – вектор балансів енергосервісних результатів.

Енергосервісна складова фактично є не одним скалярним рівнянням, а системою балансів за видами послуг s, що надає змогу окремо враховувати енергоефективність, резервування, гнучкість, автономність, відновлюваність, якість та інші функціональні результати $B_{r,t}^{ES} = \{ B_{r,t,s} : s \in S \}$. Балансові рівняння доповнюються умовами міжсекторального перетворення, динамікою стану заряду накопичувачів, межами керованого попиту та обліком незабезпеченого попиту.

Так, для накопичувача j типовим є рекурентне рівняння стану

$$SOC_{j,t} = SOC_{j,t-1} + \eta_j^{ch} P_{j,t}^{ch} \Delta t - P_{j,t}^{dis} \Delta t / \eta_j^{dis}, \quad (3.11)$$

де:$SOC_{j,t}$ – запас енергії, або абсолютний стан заряду j-го накопичувача наприкінці часового інтервалу t, МВт·год; $SOC_{j,t-1}$ – запас енергії j-го накопичувача наприкінці попереднього часового інтервалу $t-1$, МВт·год; $P_{j,t}^{ch}$ – потужність заряджання j-го накопичувача протягом часового інтервалу t, МВт; $P_{j,t}^{dis}$ – потужність розряджання j-го накопичувача протягом часового інтервалу t, МВт; η_j^{ch} – коефіцієнт корисної дії процесу заряджання j-го накопичувача, в. о.; $0 < \eta_j^{ch} \leq 1$; η_j^{dis} – коефіцієнт корисної дії процесу розряджання j-го накопичувача, в. о.; $0 < \eta_j^{dis} \leq 1$. Енергія, яка фактично надходить до накопичувача під час заряджання, визначається як $E_{j,t}^{ch} = \eta_j^{ch} P_{j,t}^{ch} \Delta t$, а енергія, що вилучається із запасу накопичувача для забезпечення заданої потужності на виході як $E_{j,t}^{dis} = P_{j,t}^{dis} \Delta t / \eta_j^{dis}$. Множення зарядної потужності на коефіцієнт η_j^{ch} враховує втрати під час перетворення та накопичення енергії, а ділення розрядної потужності на η_j^{dis} означає, що для віддавання споживачеві енергії $P_{j,t}^{dis} \Delta t$ із накопичувача необхідно вилучити більший обсяг енергії. Рівняння динаміки доповнюється обмеженням допустимого стану заряду: $SOC_j^{min} \leq SOC_{j,t} \leq SOC_j^{max}$, де SOC_j^{min} – мінімально допустимий запас енергії j-го накопичувача, МВт·год; SOC_j^{max} – максимально допустимий запас енергії j-го накопичувача, МВт·год. Граничні значення визначаються через номінальну енергомісткість: $SOC_j^{min} =$

$s_j^{min} E_j^{nom}$, $SOC_j^{max} = s_j^{max} E_j^{nom}$, де E_j^{nom} – номінальна енергомісткість j-го накопичувача, МВт·год; s_j^{min} і s_j^{max} – мінімальний та максимальний відносні рівні заряду, в. о. Допустима потужність заряджання обмежується умовою $0 \le P_{j,t}^{ch} \le P_j^{ch,max}$, де $P_j^{ch,max}$ – максимальна потужність заряджання j-го накопичувача, МВт, а допустима потужність розряджання $0 \le P_{j,t}^{dis} \le P_j^{dis,max}$, де $P_j^{dis,max}$ – максимальна потужність розряджання j-го накопичувача, МВт. Для виключення фізично суперечливого режиму одночасного заряджання та розряджання вводяться бінарні змінні режиму: $u_{j,t}^{ch} + u_{j,t}^{dis} \le 1$; $P_{j,t}^{ch} \le u_{j,t}^{ch} P_j^{ch,max}$; $P_{j,t}^{dis} \le u_{j,t}^{dis} P_j^{dis,max}$; $u_{j,t}^{ch}, u_{j,t}^{dis} \in \{0,1\}$,

де $u_{j,t}^{ch}$ – бінарна змінна режиму заряджання, яка дорівнює 1, якщо накопичувач заряджається, і 0 в іншому випадку; $u_{j,t}^{dis}$ – бінарна змінна режиму розряджання, яка дорівнює 1, якщо накопичувач розряджається, і 0 в іншому випадку. Для добового або іншого замкненого розрахункового циклу встановлюється умова рівності кінцевого та початкового станів заряду $SOC_{j,T} = SOC_{j,0}$, де: $SOC_{j,0}$ – стан заряду на початку розрахункового періоду; $SOC_{j,T}$ - стан заряду наприкінці розрахункового періоду; T – останній часовий інтервал розрахункового горизонту.

Система обмежень моделі G(x) ≤ 0 визначає межі технічно, економічно та інституційно допустимих рішень, до яких входять:

- ресурсні – потенціал місцевих палив, ВДЕ, земельні й водні ресурси;
- технологічні – установлені потужності, коефіцієнти корисної дії, мінімальні й максимальні режими, швидкість зміни навантаження;
- мережеві – пропускна спроможність ліній, трубопроводів і трансформаторів, допустимі втрати й параметри якості;
- інвестиційні – бюджет, послідовність введення потужностей, строки реалізації та строк служби;
- екологічні – граничні викиди, частка ВДЕ, вимоги декарбонізації;
- сервісні – мінімальний резерв, гнучкість, автономність, допустимий ENS і максимальний час відновлення;

- міжсистемні – ліміти імпорту, експорту й надання допоміжних послуг.

Принциповою складовою моделі є представлення РЕС як відкритої системи, що не лише отримує енергетичні ресурси та системні послуги від ІЕС, а й може надавати їх. Взаємодія охоплює резервування, балансування, регулювання навантаження, аварійну підтримку, гнучкість агрегованих ресурсів і відновлення після порушень, де для кожного виду сервісу s баланс взаємодії регіону r з ІЕС у часовому інтервалі t представлений як

$$ES_{r,t,s}^{prod} + ES_{r,t,s}^{in} = ES_{r,t,s}^{cons} + ES_{r,t,s}^{out} + ES_{r,t,s}^{loss}, \quad (3.12)$$

де: $ES_{r,t,s}^{prod}$ – обсяг сервісу відповідного типу, сформований ресурсами всередині РЕС r у часовому інтервалі t за сценарієм s; $ES_{r,t,s}^{in}$ – обсяг відповідного сервісу, отриманий РЕС r від ІЕС або інших зовнішніх систем у часовому інтервалі t за сценарієм s; $ES_{r,t,s}^{cons}$ – обсяг сервісу, використаний для забезпечення внутрішніх потреб РЕС r у часовому інтервалі t за сценарієм s; $ES_{r,t,s}^{out}$ – обсяг сервісу, наданий РЕС r зовнішнім системам, зокрема ІЕС, у часовому інтервалі t за сценарієм s; $ES_{r,t,s}^{loss}$ – незабезпечений, недоотриманий або невиконаний обсяг сервісного результату в РЕС r у часовому інтервалі t за сценарієм s; ES – кількісна характеристика відповідного виду енергетичної або системної послуги. Ліва частина рівняння відображає загальний обсяг сервісу, доступний РЕС за рахунок внутрішнього формування та зовнішнього надходження, а права – характеризує розподіл цього сервісу між внутрішнім використанням, зовнішнім наданням та незабезпеченим сервісним результатом. Для всіх r, t і s змінні сервісних потоків повинні бути невід'ємними. Термін «втрачені сервіси» у цьому контексті доцільно трактувати не як фізичні втрати енергії, а як невиконану функціональну вимогу: ненаданий резерв, недоступний діапазон гнучкості, незабезпечену автономність або інший дефіцит. Для різних сервісів використовуються властиві їм одиниці вимірювання, а для інтегрального порівняння – нормовані або вартісні еквіваленти.

Щоб запобігти одночасному зарахуванню однієї і тієї самої потужності ресурсу до декількох несумісних сервісних функцій, для ресурсу j у часовому інтервалі t встановлюється обмеження $P_{j,t}^{arb} + P_{j,t}^{res} + P_{j,t}^{back} \leq P_{j,t}^{avail}$, де: $P_{j,t}^{arb}$ – потужність j-го

енергетичного ресурсу, залучена до енергетичного арбітражу в часовому інтервалі t, МВт; $P_{j,t}^{res}$ – потужність j-го ресурсу, зарезервована для надання послуг резервування в часовому інтервалі t, МВт; $P_{j,t}^{back}$ – потужність j-го ресурсу, зарезервована для резервного або аварійного енергопостачання в часовому інтервалі t, МВт; $P_{j,t}^{avail}$ – загальна доступна потужність j-го ресурсу в часовому інтервалі t, яка може бути розподілена між сервісними функціями, МВт. Це обмеження означає, що сумарна потужність, розподілена між енергетичним арбітражем, резервуванням та резервним або аварійним енергопостачанням, не може перевищувати фактично доступну потужність відповідного ресурсу в цей часовий інтервал.

Оскільки розвиток РЕС відбувається в умовах невизначеності попиту, цін, виробітку ВДЕ, доступності обладнання та зовнішньої підтримки ІЕС, модель розв'язується для множини сценаріїв ω, де визначається робастність, яка характеризує здатність обраної конфігурації зберігати допустимість і прийнятну результативність за відхилення параметрів від базових значень $R_{rob} = 1 - \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega V_\omega$, де: p(ω) – вага або можливість реалізації сценарію, а V(ω) – нормована міра порушення цільових чи обмежувальних умов. Чим меншим є очікуване порушення, тим вищою є робастність.

Розглянута у цілому балансово-оптимізаційна модель пов'язує стратегічні цілі з керованими змінними, фізичні та сервісні баланси – з технологічними обмеженнями, а регіональні рішення – з потребами ІЕС країни, що дозволяє формувати та порівнювати сценарії розвитку РЕС за критеріями ефективності, самодостатності, гнучкості, стійкості, екологічності й вартості.

3.4. Функціональне призначення інтегрованих енергетичних та енергосервісних балансів регіональних енергосистем

Сервіс-орієнтований розвиток РЕС потребує створення цілісно інтегрованої системи балансів, що на відміну від класичних балансів електричної, теплової енергії та природного газу, охоплює енергосервісні баланси, які відображають співвідношення між потребою та доступною спроможністю технологічних,

цифрових, організаційних і фінансових рішень сформувати необхідні на рівні регіону послуги.

Баланс інтегрованих енергетичних сервісів не замінює класичних енергетичних балансів, а є функціональною надбудовою над ними, що пов'язує фізичну конфігурацію РЕС із досягнутими показниками енергоефективності, гнучкості, резервування, стійкості, якості, автономності та корисності для споживачів й енергосистеми. У цьому контексті інтегрований енергетичний баланс для фізичних потоків означає рівність надходжень і використання енергії з урахуванням втрат та накопичення, а для сервісних властивостей – умову достатності за якою доступний обсяг або рівень послуги має бути не меншим за потребу, а невиконаний фіксується як дефіцит.

Баланс забезпечення сервісу для виду сервісу *s*, регіону *r* і часового інтервалу *t* розподіляється на забезпечену та незабезпечену частини

$$D_{s,r,t} = S_{s,r,t} + Def_{s,r,t}, \quad (3.13)$$

де: $D_{s,r,t}$ – потреба у сервісі s у регіоні r протягом інтервалу t; $S_{s,r,t}$ – фактично забезпечений обсяг або рівень сервісу; $Def_{s,r,t}$ – дефіцит, тобто невиконана частина потреби.

Забезпечений сервіс формується сукупністю локальних і зовнішніх ресурсів, де до локальних можуть належати ВДЕ, накопичувачі, керований попит, когенерація, мікромережі, енергоменеджмент та енергоефективні заходи, а до зовнішніх – резерви, балансувальні та аварійні послуги ІЕС. Загальний обсяг забезпечення може бути деталізований за постачальниками або технологіями $S_{s,r,t} = \sum_{k \in K} S_{s,r,t,k}$. Одиниця вимірювання визначається природою результату: заощадження чи забезпечення енергії вимірюється у МВт·год, Гкал або тис. м³; послуга для показників потужності – у МВт; частка виконання потреби – у відсотках. Для порівняння різнорозмірних сервісів використовується коефіцієнт покриття $k_{cov,s,r,t} = S_{s,r,t} / D_{s,r,t}, \quad 0 \leq k_{cov,s,r,t} \leq 1$, значення якого, що дорівнює одиниці, означає повне забезпечення потреби.

Умова достатності гнучкості $(Flex)$, яка характеризує здатність РЕС змінювати виробництво, споживання, накопичення або міжсистемний обмін у відповідь на керуючий сигнал, не порушуючи встановлених технічних і сервісних вимог, має вигляд

$$Flex_{r,t}^{R} \leq Flex_{r,t}^{A}, \tag{3.14}$$

де: верхній індекс *R* позначає необхідну, а *A* – доступну гнучкість. Доступна гнучкість формується з висхідної та низхідної складових генерування, керованого попиту, накопичувачів і міжсекторних технологій, які доцільно оцінювати окремо, оскільки можливість збільшити відпуск не тотожна можливості його зменшити $Flex_{r,t}^{A} = \sum_{k \in K} Flex_{k,r,t}$.

Гнучкість є багатовимірною характеристикою. Крім обсягу регулювання у МВт, мають ураховуватися тривалість доступності, швидкість реакції, допустима кількість активацій, енергетична місткість і час підтримання, тому умова щодо потужності доповнюється обмеженнями за часом та енергією $T_{r,t}^{A} \geq T_{r,t}^{R}, \quad v_{r,t}^{A} \geq v_{r,t}^{R}$, де T характеризує тривалість доступності, а v – швидкість реакції. Отже, однаковий обсяг потужності не означає однакової сервісної якості, оскільки ресурс із повільною активацією не може автоматично замінити швидкодіючий резерв або послугу балансування.

Баланс резервування (R) визначає достатність потужності, яка може бути активована у разі відхилення попиту, втрати генерації, аварії мережевого елемента або іншого порушення. Потреба у системному резерві РЕС покривається локальними ресурсами та резервом, доступним з боку ІЕС

$$R_{r,t}^{S} \leq R_{r,t}^{L} + R_{r,t}^{I}, \tag{3.15}$$

де: $R_{r,t}^{S}$ – потреба РЕС у системному резерві; $R_{r,t}^{L}$ – локальний резерв, сформований ресурсами регіону; $R_{r,t}^{L}$ – резерв, гарантовано доступний з боку ІЕС.

Для кожного ресурсу, крім номінальної потужності, враховуються час готовності, тривалість підтримки, імовірність доступності, стан заряду накопичувача, запас палива та мережеві обмеження на доставку потужності до місця виникнення дефіциту. Ефективний доступний резерв визначається як $R_{r,t}^{eff} = \sum_{k \in K} a_{k,t} R_{k,r,t}$,, де

коефіцієнт $a_{k,t}$ відображає фактичну доступність k-го ресурсу і набуває значень від нуля до одиниці, що запобігає формальному зарахуванню до резерву потужності, яка технічно існує, але не може бути активована в необхідний час або доставлена через мережу.

Стійкість РЕС (Res) відображає її здатність підготуватися до порушення, витримати його вплив, зберегти пріоритетні функції, адаптуватися та відновитися до прийнятного стану. Через багатовимірність цієї властивості баланс стійкості є системою умов достатності, а не одним енергетичним рівнянням $Res_{r,t}^{R} \leq Res_{r,t}^{A}$.

Необхідний рівень стійкості визначається критичністю навантаження, сценарієм порушення, нормативами автономності та допустимими наслідками, а доступний рівень – резервами, мікромережами, розподіленою генерацією, накопичувачами, запасами палива, керованим попитом, взаємодопомогою з ІЕС і процедурами відновлення.

Для практичного моделювання умова стійкості розкладається на обмеження, що допускають вимірювання: $ENS_{r,\omega} \leq ENS_{max,r}$ – незабезпечений попит у сценарії ω не перевищує допустимого рівня; $TTR_{r,\omega} \leq TTR_{max,r}$ – час відновлення, що не перевищує граничного; $Taut_{r,\omega} \geq Taut_{min,r}$ – автономність критичних споживачів не менша за встановлену; $k_{stab,r,\omega} \geq k_{stab,r}$ – інтегральний індекс стійкості, що відповідає цільовому рівню $k_{stab,r,\omega} = 1 - ENS_{r,\omega} / D_{crit,r,\omega}$. Індекс показує частку критичного попиту, забезпечену у сценарії порушення. Він має прозору фізичну інтерпретацію, але не охоплює швидкість відновлення й адаптивність, тому використовується разом з TTR, тривалістю автономності та іншими показниками.

Баланс корисності призначений для інтегрування різнорідних сервісних результатів відповідно до їх значущості для споживача, регіону та ІЕС. Після нормування рівнів забезпечення сервісів інтегральна корисність визначається як зважена сума часткових функцій корисності $W = \sum_{s \in S} w_s U_s(x_s)$, де: w_s – вага важливості сервісу s; $U_s(x_s)$ – часткова функція корисності; x_s – нормований рівень забезпечення сервісу; $\sum_{s \in S} w_s = 1,\ w_s \geq 0,\ 0 \leq U_s(x_s) \leq 1$. Функція корисності може бути лінійною, пороговою або нелінійною. Для критичних сервісів доцільна

порогова форма за якою корисність різко знижується, якщо мінімальний рівень не досягнуто, а для сервісів комфорту або економії можливе поступове насичення, коли подальше збільшення результату створює дедалі менший додатковий ефект. Інтегральний показник W є інструментом ранжування альтернатив, але не повинен дозволяти компенсацію дефіциту критичної послуги надлишковим комфортом чи економічною вигодою, тому обов'язкові вимоги до резервування, стійкості, якості та безпеки задаються окремими обмеженнями.

Міжсекторний баланс відображає узгодження енергетичних потоків і сервісів між електричним, тепловим та газовим секторами. Його основою є технології перетворення, насамперед, когенерація, теплові насоси, електричні котли, газові турбіни, накопичення тепла та інші засоби стиковки секторів. Для технології k, яка перетворює енергоносій a в енергоносій b, зв'язок між вхідним і вихідним потоками задається коефіцієнтом перетворення $E_{k,b,t}^{out} = \eta_{k,a\to b} E_{k,a,t}^{in}$, де коефіцієнт $\eta_{k,a\to b}$ відображає енергетичну ефективність перетворення: для теплових насосів замість звичайного ККД використовується COP; для когенерації окремо задаються електричний і тепловий виходи; для накопичення – ефективність заряджання, зберігання та розряджання; вихідний потік включається до балансу сектора b, а вхідний – до балансу сектора a, що унеможливлює подвійне врахування енергії. Сервісна роль міжсекторної інтеграції полягає не лише у виробництві іншого енергоносія, оскільки може забезпечувати гнучкість електроенергетичної системи, використання надлишкової генерації ВДЕ, резервне теплопостачання, зменшення пікових навантажень і підвищення самодостатності. Тому кожна технологія одночасно бере участь у фізичних балансах і в балансах відповідних сервісів.

Один ресурс може створювати кілька сервісних ефектів, але не завжди здатний надавати їх одночасно, тому модель має містити обмеження спільного використання потужності, енергії, пропускної спроможності та часу, що запобігає подвійному зарахуванню накопичувача, керованого попиту або міжсекторної технології до кількох несумісних послуг.

Методологічне значення складових інтегрованих балансів полягає у наступному:

- баланс забезпечення сервісу фіксує співвідношення між потребою, фактичним результатом і дефіцитом.
- баланси гнучкості й резервування встановлюють достатність швидкодіючих та гарантовано доступних ресурсів.
- баланс стійкості переводить комплексну властивість системи у набір вимірюваних вимог щодо ENS, автономності, відновлення та збереження критичного попиту.
- баланс корисності забезпечує багатокритеріальне зіставлення різнорідних сервісів без втрати інформації про критичні обмеження.
- міжсекторний баланс формалізує фізичну й сервісну взаємодію електричного, теплового та газового секторів.

Отже, система інтегрованих енергетичних та енергосервісних балансів, формуючи багаторівневе ядро моделювання сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, забезпечує одночасне дотримання законів збереження енергії, технологічної реалізованості та вимог до функціональної корисності, гнучкості, резервування, стійкості й якості енергозабезпечення, а запропонована типологія створює основу для формування системи обмежень і критеріїв балансово-оптимізаційної моделі РЕС у взаємодії з ІЕС країни.

3.5. Алгоритмічна послідовність побудови та застосування балансово-оптимізаційної моделі розвитку РЕС

Адаптація сформованих методологічних положень для розв’язання науково-прикладних завдань розвитку РЕС потребує впорядкованої послідовності переходу від первинних даних до обґрунтованих показників розвитку, що поєднують інформаційний, балансовий, технологічний, критеріальний, сценарний та оптимізаційний блоки в єдиному ітераційному контурі. Його результатом є не лише розрахунок режиму роботи окремих енергетичних об’єктів, а формування сервіс-орієнтованої структури РЕС, узгодженої з можливостями інтегрованої енергетичної системи країни.

Відповідно до цієї послідовності, балансово-оптимізаційна модель розвитку РЕС розглядається як формалізована система підтримки рішень, у якій фізичні закони збереження енергії доповнюються міжсекторними перетвореннями, обмеженнями потужності й резервів, показниками якості енергозабезпечення та критеріями стійкості. При цьому, на відміну від одноразового прогнозного розрахунку, запропонований підхід передбачає перевірку результатів, коригування припущень і повторне проходження етапів доти, доки отримане рішення не задовольнить технічні, економічні та сервісні вимоги.

Логіку моделювання РЕС організовано за етапами методичної послідовності «дані – баланси – зв'язки – калібрування – критерії – сценарії – оптимізація – рішення», а саме:

- Формування та просторово-часове узгодження інформаційної бази;
- Побудова замкнених балансів електричної, теплової та газової підсистем;
- Інтеграція міжсекторних зв'язків, накопичення та керованого попиту;
- Калібрування й незалежна валідація параметрів моделі;
- Формування математичного ядра, системи критеріїв та обов'язкових обмежень;
- Аналіз сценаріїв (базового, розвитку, кризових тощо) з урахуванням невизначеності;
- Оптимізація структури та режимів роботи з дослідженням компромісу між вартістю і стійкістю;
- Оцінювання, перевірка прийнятності та формування показників розвитку й інвестиційних пріоритетів.

Послідовність є методичною, але не жорстко лінійною, оскільки виявлені невідповідності балансу, нестійкість рішення або надмірна чутливість до параметрів повертає дослідника до уточнення інформаційної бази, структури технологій чи обмежень моделі.

Вихідним етапом є формування узгодженої інформаційної бази. До неї включаються офіційні статистичні дані Державної служби статистики України, регуляторні та ринкові дані НКРЕКП, оперативна й ретроспективна інформація НЕК

«Укренерго», регіональні паливно-енергетичні баланси, відомості операторів систем розподілу, теплопостачальних і газорозподільних підприємств, а також дані щодо потенціалу ВДЕ, профілів попиту, стану мереж і наявних резервів. Дані мають бути приведені до єдиного просторового і часового базису, де просторова узгодженість означає відповідність адміністративних меж, зон мережевого обслуговування та вузлів розрахункової схеми, а часова узгодженість передбачає перехід до однакової дискретності (річної, місячної, добової або погодинної) залежно від досліджуваного завдання. Дані мають охоплювати не лише середні умови, а й критичні поєднання низького виробітку, пікового навантаження, температурних екстремумів та обмеженої пропускної спроможності, інакше оптимізована структура може виявитися економічно привабливою для типового року, але неприйнятною з погляду достатності та стійкості.

Після верифікації даних формується система взаємопов’язаних балансів електроенергетичного, теплового та газового секторів. Для електричного сектору в кожному часовому інтервалі баланс подається з окремим урахуванням генерації, імпорту з ІЕС, розряджання і заряджання накопичувачів, споживання, експорту, втрат та незабезпеченого попиту. Для теплового сектору враховуються котельні, когенераційні установки, теплові насоси, накопичувачі тепла, корисне теплове навантаження та втрати мережі. Газовий баланс відображає місцеве надходження, імпорт, кінцеве споживання, використання газу для перетворення, втрати та дефіцит. Секторні баланси мають бути замкненими для кожного часового кроку. Річна рівність без погодинної узгодженості не гарантує покриття піків і не відображає потреби в маневреності, резерві чи накопиченні, тому часовий масштаб обирається за найшвидшим процесом, істотним для мети дослідження, а агреговані показники формуються лише після розрахунку режимів.

Наступний етап полягає в об’єднанні секторних балансів через технології перетворення та накопичення: теплові насоси перетворюють електричне споживання на тепловий вихід, когенерація одночасно формує електричний і тепловий потоки, електричні й теплові накопичувачі передають енергію в часі, а керований попит

змінює профіль навантаження, завдяки цьому РЕС моделюється не як сума ізольованих підсистем, а як інтегрований енергокомплекс.

На основі міжсекторних зв'язків формується сервіс-орієнтована структура РЕС, яка охоплює ВДЕ, когенерацію, накопичувачі енергії (BESS і теплові сховища), керований попит (DR), засоби секціонування та автоматизації, резервне живлення, мікромережі й доступні системні послуги ІЕС. Вибір елементів РЕС визначається не лише їхньою вартістю або виробітком, а внеском у покриття енергетичних послуг: забезпечення попиту, гнучкість, резервування, автономність, відновлення та стійкість.

Параметри моделі калібрують шляхом зіставлення розрахованих і фактичних рядів виробництва, споживання, імпорту, втрат, цін, станів накопичувачів та аварійних відключень. Коригуванню підлягають коефіцієнти втрат, доступність потужностей, профілі навантаження, ефективність перетворення, технічні мінімуми, швидкості зміни навантаження та інші параметри, які неможливо безпосередньо встановити з первинних даних. Формально вектор параметрів θ може визначатися мінімізацією зваженої суми квадратів відхилень між спостережуваними та модельними значеннями $\theta^* = \arg\min \sum_{t\in T} w_t (y_t^O - y_t^M(\theta))^2$, де: y_t^O – спостережуване значення, $y_t^M(\theta)$ – модельний результат, w_t – вага, що відображає надійність даних або важливість періоду. Калібрування має виконуватися на одному наборі даних, а валідація – на іншому, щоб уникнути пристосування моделі до випадкових особливостей конкретного року. Нечіткі або неповні параметри (майбутня вартість палива, темпи попиту, доступність пошкоджених об'єктів, швидкість відновлення, капітальні витрати, потенціал керованого попиту тощо) задаються інтервалами, сценаріями чи нечіткими числами. Рішення оцінюється не лише в центральній точці прогнозу, а в множині можливих умов, – якщо невелика зміна припущення різко змінює оптимальну структуру, це є сигналом для додаткового аналізу стійкості рішення.

Математичне ядро моделі поєднує детерміновані алгебраїчні рівняння балансів, обмеження потужності, енергії, стану заряду, пропускної спроможності й резервів із критеріями ефективності, самодостатності та стійкості, а змінні рішення – установлені потужності, обсяги інвестицій, режими виробництва й накопичення,

імпортно-експортні потоки, активацію керованого попиту та величину незабезпеченого попиту.

Самодостатність у часовому інтервалі *t* може бути визначена як частка попиту E_t^{dem}, забезпечена локальними джерелами: $S_t = E_t^{loc}/E_t^{dem},\ 0 \le S_t \le 1$. Показник потребує єдиного правила обліку: локальна енергія, спрямована на заряджання або міжсекторне перетворення, не повинна повторно зараховуватися у вихідному секторі. Для системи з експортом надлишкове локальне виробництво не збільшує S_t понад одиницю, а аналізується окремо як експортний або резервний потенціал.

Недопостачання енергії визначається як невід'ємна різниця між попитом E_t^{dem} та фактично забезпеченим обсягом A_t: $ENS_t = \max(0, E_t^{dem} - A_t)$. ENS розраховується окремо за видами енергії та групами споживачів, де для критичних навантажень доцільно застосовувати підвищену вартість втраченого навантаження або жорстке обмеження на допустимий ENS, що не дозволить компенсувати неприйнятне відключення соціально важливого об'єкта низькими витратами в інших частинах системи.

Робастність (стійкість до порушення) оцінюється співвідношенням обсягу забезпечених енергетичних сервісів після впливу та до нього в одному й тому самому сценарії ω: $R_{rob,\omega} = ES_\omega^{after}/ES_\omega^{before}$. Показник має зміст за умови однакової нормалізації набору сервісів і додатного знаменника, де його доцільно аналізувати разом із ENS, тривалістю автономної роботи, часом відновлення та часткою збереженого критичного навантаження, оскільки один коефіцієнт не описує всі фази стійкості.

Цільова функція може мати багатокритеріальну форму, що відображає компроміс між витратами, недопостачанням і стійкістю:

$$\min \mathrm{Z} = \alpha C_N + \beta ENS_N - \gamma R_N, \quad \alpha + \beta + \gamma = 1, \tag{3.16}$$

де індекс *N* означає нормування критеріїв до порівняльного масштабу, а коефіцієнти α, β і γ відображають пріоритети суб'єкта ухвалення рішення. Для критичних вимог доцільно не покладатися лише на ваги, а встановлювати окремі обмеження щодо максимально допустимого ENS, мінімального резерву, автономності й робастності.

Альтернативою зваженій згортці є побудова множини Парето, яка наочно показує ціну підвищення стійкості та дає змогу уникнути прихованого суб'єктивізму єдиного набору ваг.

Сценарний блок охоплює базовий розвиток, підвищення енергоефективності, посилення самодостатності, пріоритет стійкості, атаки або технічні відмови, дефіцит палива й інших ресурсів, а також невизначеність попиту, цін, погоди та доступності обладнання. Базовий сценарій виконує роль точки порівняння; інші сценарії змінюють вхідні параметри, доступні технології, конфігурацію мережі або цільові обмеження. Сценарії порушень мають описувати не лише сам факт втрати елемента, а момент виникнення, тривалість, послідовність відмов, можливість острівної роботи, темп відновлення та доступність зовнішньої допомоги від IEC. Для дефіциту ресурсів задаються обмеження на паливо, імпорт, ремонтні бригади, запасні частини й пропускну спроможність. Таким чином перевіряється не формальна наявність потужності, а її реальна спроможність забезпечити енергетичні сервіси.

У кожному сценарії оптимізаційний розрахунок визначає структуру технологій і режими їх роботи, які мінімізують сукупні приведені витрати та ENS за заданих вимог до стійкості, де до витрат включаються капітальні вкладення, постійні й змінні експлуатаційні витрати, паливо, імпорт, обслуговування резерву, деградація накопичувачів, вартість керування попитом і монетизовані наслідки недопостачання. Компроміс «вартість – стійкість» досліджується шляхом послідовної зміни цільового рівня ENS, резерву або робастності. Отримана крива дозволяє визначати ділянки, де невелике додаткове фінансування дає значний приріст надійності, та ділянки спадної віддачі. Це є важливішим для інвестиційного вибору, ніж єдине «оптимальне» число без аналізу альтернатив.

Результати моделювання оцінюються за системою взаємодоповнюючих критеріїв: енергетичною та економічною ефективністю, самодостатністю, ENS, робастністю, резервами потужності, системними втратами, використанням ВДЕ, вуглецевою інтенсивністю, автономністю критичних споживачів і швидкістю відновлення, де кожний показник має бути прив'язаний до одиниці вимірювання, часового горизонту, сценарію та бази порівняння. На основі оцінювання формуються

три групи показників розвитку РЕС. Перша характеризує оптимальну структуру енергетичних сервісів і технологій: потужності ВДЕ, когенерації, накопичення, керованого попиту, резерву та міжсекторного перетворення. Друга містить параметри сценаріїв розвитку – строки введення, етапність модернізації, допустимі рівні імпортозалежності й цільові значення стійкості, а третя визначає пріоритети інвестування з урахуванням питомого ефекту, критичності об'єкта, часу реалізації та внеску в системні послуги. Рішення визнається прийнятним, якщо воно одночасно задовольняє балансові рівняння, технічні й мережеві обмеження, критерії якості та встановлені пороги стійкості в релевантних сценаріях. Якщо хоча б одна обов'язкова умова порушується, модельний цикл повторюється: уточняється структура РЕС, коригуються параметри, додаються резервні або міжсекторні рішення, переглядаються сценарії та знову виконуються оптимізаційні розрахунки.

Підсумкові результати мають не тільки набір чисел, а прозорий пакет рішень: рекомендована конфігурація, режими використання ресурсів, ризики, чутливість до ключових припущень, діапазон витрат, очікуваний сервісний ефект і черговість інвестицій, що забезпечує можливість перевірки висновків та їх адаптації до змін зовнішнього середовища.

Таким чином, балансово-оптимізаційна модель розвитку РЕС перетворює різнорідні статистичні, технічні та сценарні дані на послідовно обґрунтовані рішення щодо структури енергетичних сервісів, режимів функціонування та інвестицій. Її методологічна цінність полягає у поєднанні фізичної коректності балансів, міжсекторної інтеграції, багатокритеріального оцінювання та ітераційної перевірки стійкості, що забезпечує узгодження регіональних рішень із системними можливостями ІЕС країни й завершує формування методологічних положень моделювання РЕС як складових національної інтегрованої енергетичної системи.

3.6. Формалізація цілісно-узгодженої системи балансово-оптимізаційних рівнянь взаємодії РЕС-ІЕС

Завершальним елементом методологічних положень моделювання системи енергетичних та енергосервісних балансів РЕС у складі ІЕС країни є їх математична формалізація, типологія яких визначає функціональне призначення балансів, а

пропонований балансово-оптимізаційний підхід – послідовність побудови й застосування моделі, встановлюючи числові співвідношення між генерацією, імпортом, накопиченням, міжсекторним перетворенням, корисним енергетичним сервісом, втратами та дефіцитом.

Необхідність формалізованого блоку балансів зумовлена тим, що РЕС є складною системою, що охоплює електричну, теплову та газову підсистеми, які мають різні фізичні одиниці, часову динаміку й технологічні обмеження, і де кожний енергоносій балансується окремо, а взаємодія секторів описується рівняннями технологічного перетворення.

У межах моделі, що розглядається, індекс *r* буде позначати регіон, *s* – суміжний регіон, *t* – часовий інтервал, верхні індекси *e*, *h* і *g* – відповідно електричний, тепловий та газовий сектори, де усі енергетичні величини належать до одного часового інтервалу – при розрахунках потужності вони виражаються у МВт, а для енергетичної – у МВт·год або інших узгоджених одиницях.

Деталізований електроенергетичний баланс моделі, що розглядається, відображає рівність усіх надходжень і напрямів використання електроенергії в регіоні, де до надходжень віднесено традиційну генерацію, ВДЕ, електричний вихід когенерації, розряд накопичувачів і чистий імпорт з ІЕС, а використання охоплює корисний електроенергетичний сервіс, заряд накопичувачів, споживання теплових насосів, мережеві втрати та незабезпечений сервіс:

$$G_{r,t} + RES_{r,t} + E^{C}_{r,t} + Dis_{r,t} + NI_{r,t} = D^{e}_{r,t} + Ch_{r,t} + E^{H}_{r,t} + Ls^{e}_{r,t} + ENS^{e}_{r,t}, \quad (3.17)$$

де: $G_{r,t}$ – обсяг виробництва електроенергії традиційними установками, за винятком ВДЕ та когенерації, виділених окремими складовими; $RES_{r,t}$ – генерація електроенергії з відновлюваних джерел; $E^{C}_{r,t}$ – електричний вихід когенераційних установок; $Dis_{r,t}$ і $Ch_{r,t}$ – відповідно розряд та заряд електричних накопичувачів; $NI_{r,t}$ – чистий імпорт електроенергії; $D^{e}_{r,t}$ – фактично забезпечений обсяг електроенергетичного сервісу; $E^{H}_{r,t}$ – електроенергія, спожита тепловими насосами; $Ls^{e}_{r,t}$ – технологічні втрати; $ENS^{e}_{r,t}$ – дефіцит електроенергетичного сервісу; чистий імпорт визначається як різниця між імпортом і експортом, при цьому, якщо

оптимізаційний алгоритм потребує лише невід'ємних змінних, ці потоки задаються окремо $NI_{r,t} = Imp_{r,t} - Exp_{r,t},\ Imp_{r,t}, Exp_{r,t} \geq 0$, де виділення $D^e_{r,t}$ як сервісної складової є принциповим. На фізичному рівні це відпущена споживачам електроенергія, а на функціональному – енергетичний результат, необхідний для освітлення, приводу, охолодження, цифрових процесів та інших кінцевих функцій. Попит на сервіс пов'язується з фактично забезпеченим обсягом і дефіцитом $Req^e_{r,t} = D^e_{r,t} + ENS^e_{r,t}$. Таке рівняння не створює додаткової енергії, так як ENS вводиться як змінна невиконання вимоги і має бути штрафована в цільовій функції або обмежена нормативним рівнем. Неприпустимо одночасно включати повний попит до правої частини фізичного балансу та ще раз додавати ENS, оскільки це призводить до подвійного врахування дефіциту.

Статичний баланс накопичення електроенергії доповнюється міжчасовим рівнянням стану заряду накопичувача, без якого накопичувач міг би розряджатися незалежно від попередньо накопиченої енергії

$$SOC_{r,t} = (1 - \sigma_r)SOC_{r,t-1} + \eta_{c,r}Ch_{r,t} - Dis_{r,t}/\eta_{d,r}, \qquad (3.18)$$

де: $SOC_{r,t-1}$ – запас енергії наприкінці інтервалу t; σ_r – частка саморозряду; $\eta_{c,r}$ та $\eta_{d,r}$ – ефективності заряджання і розряджання; $Ch_{r,t}$, $Dis_{r,t}$ – енергія заряджання та розряджання; $SOC^{min}_r \leq SOC_{r,t} \leq SOC^{max}_r,\ 0 \leq Ch_{r,t} \leq P^{max}_{c,r},\ 0 \leq Dis_{r,t} \leq P^{max}_{d,r}$. Для циклічного розрахункового періоду доцільно встановлювати рівність початкового й кінцевого запасу, що не дозволяє штучно поліпшувати результат шляхом безповоротного використання енергії, накопиченої до початку горизонту.

У тепловому секторі надходження формують котельні, тепловий вихід когенерації, теплові насоси, розряд теплових накопичувачів і зовнішнє постачання тепла, які покривають корисний тепловий сервіс, заряд теплового накопичувача, втрати та дефіцит

$$Q^B_{r,t} + Q^C_{r,t} + Q^H_{r,t} + Dis^T_{r,t} + Imp^h_{r,t} = D^h_{r,t} + Ch^T_{r,t} + Ls^h_{r,t} + ENS^h_{r,t}, \qquad (3.19)$$

де: $Q^B_{r,t}$, $Q^C_{r,t}$, $Q^H_{r,t}$ – виробництво тепла відповідно котельнями, когенерацією та тепловими насосами; $Dis^T_{r,t}$, $Ch^T_{r,t}$ – розряд і заряд теплового накопичувача; $Imp^h_{r,t}$ – зовнішнє надходження тепла; $D^h_{r,t}$ – забезпечений тепловий сервіс; $Ls^h_{r,t}$ – втрати;

$ENS_{r,t}^{h}$ – дефіцит теплового сервісу. Тепловий сервіс доцільно визначати на межі кінцевого споживача, а мережеві втрати – між джерелом і цією межею. Якщо попит формується як корисна теплота приміщень, додатково враховуються ефективність внутрішньобудинкової системи та теплові характеристики будівель, що забезпечує методичне розмежування заходів з модернізації генерації, мереж і кінцевого використання.

Газовий баланс пов'язує місцеве постачання і зовнішній імпорт із використанням газу когенераційними установками, котельнями, кінцевими споживачами, втратами та дефіцитом

$$Gas_{r,t}^{S} + Imp_{r,t}^{g} = Gas_{r,t}^{C} + Gas_{r,t}^{B} + D_{r,t}^{g} + Ls_{r,t}^{g} + ENS_{r,t}^{g}, \qquad (3.20)$$

де: $Gas_{r,t}^{S}$ – місцеве надходження або відбір газу зі сховищ; $Imp_{r,t}^{g}$ – імпорт до регіону; $Gas_{r,t}^{C}$, $Gas_{r,t}^{B}$ – використання газу когенерацією та котельнями; $D_{r,t}^{g}$, $Ls_{r,t}^{g}$, $ENS_{r,t}^{g}$ – відповідно забезпечений газовий сервіс, втрати й дефіцит. Газ, використаний для виробництва електроенергії й тепла, відображається як витрата газового сектору, а виходи (права частина балансу) – як надходження електричного та теплового секторів. Саме така симетрія забезпечує замикання міжсекторних зв'язків і виключає зарахування первинної енергії газу та виробленої з нього електроенергії як незалежних локальних ресурсів.

Формалізація міжсекторних перетворень для когенераційної установки пов'язує газовий вхід з двома корисними виходами – електричним і тепловим

$$E_{r,t}^{C} = \eta_{C}^{e} Gas_{r,t}^{C}, \quad Q_{r,t}^{C} = \eta_{C}^{h} Gas_{r,t}^{C}, \qquad (3.21)$$

де коефіцієнти η_{C}^{e} та η_{C}^{h} позначають електричний і тепловий ККД когенераційної установки. Для реальних CHP співвідношення між виходами може змінюватися залежно від режиму, тому замість двох сталих коефіцієнтів застосовується допустима область спільного виробництва, де обов'язково має виконуватися умова енергетичної коректності з урахуванням власних потреб і втрат установки $\eta_{C}^{e} + \eta_{C}^{h} \leq 1$.

Тепловий насос пов'язує електричний вхід і тепловий вихід коефіцієнтом перетворення COP: $Q_{r,t}^{H} = COP_{r,t} E_{r,t}^{H}$. На відміну від звичайного ККД, COP може перевищувати одиницю, оскільки теплова енергія формується не лише з електричного

входу, а й за рахунок низькопотенційної теплоти довкілля. Значення COP залежить від температурного напору та режиму роботи, тому для сезонного моделювання його слід задавати часовим рядом або кусково-лінійною функцією.

Формалізація міжсекторних зв'язків дозволяє кількісно оцінити конкуренцію за ресурси. Так, збільшення роботи теплових насосів зменшує газове навантаження, але підвищує електричне; когенерація збільшує споживання газу, водночас формуючи електричний і тепловий сервіси, тому оптимізаційне рішення має враховувати обидва ефекти, а не оцінювати технологію в одному секторі ізольовано.

Взаємодія РЕС з іншими регіонами та ІЕС формалізується через змінні міжрегіональних перетоків електроенергії, де для напрямку від регіону *r* до регіону *s* встановлюється обмеження $0 \leq P_{rs,t} \leq A_{rs}P_{rs}^{max}$. Тут: $P_{rs,t}$ – перетік електроенергії з регіону *r* до регіону *s*; P_{rs}^{max} – пропускна спроможність зв'язку; A_{rs} – елемент матриці суміжності, який дорівнює одиниці за наявності зв'язку та нулю за його відсутності; для двонаправленої лінії можуть використовуватися дві невід'ємні змінні або одна знакова змінна з симетричними межами.

Чистий міжрегіональний обмін регіону визначається сумою вхідних потоків за вирахуванням вихідних: $NI_{r,t} = \sum_{s\in N(r)}P_{sr,t} - \sum_{s\in N(r)}P_{rs,t}$, де множина $N(r)$ охоплює регіони, безпосередньо пов'язані з *r*. Якщо враховуються мережеві втрати, вхідний потік має бути зменшений на відповідний коефіцієнт. У сценаріях атак або аварій матриця суміжності та доступна пропускна спроможність змінюються, що безпосередньо відображає топологічну вразливість РЕС.

Баланс резервів потужності характеризує різницю між доступною потужністю та навантаженням, яку можна фактично активувати в необхідний час:

$$Reserve_{r,t} = Cap_{r,t}^{A} - Load_{r,t} \geq Reserve_{r,t}^{min}, \tag{3.22}$$

де: $Cap_{r,t}^{A}$ – доступна встановлена потужність; $Load_{r,t}$ – навантаження регіону; $Reserve_{r,t}$ – розрахунковий резерв; $Reserve_{r,t}^{min}$ – мінімально необхідний резерв. Доступна потужність має враховувати планові й аварійні ремонти, погодозалежність ВДЕ, забезпеченість паливом, стан заряду накопичувачів, швидкість пуску та мережеву пропускну спроможність, тому номінальна потужність ВДЕ або

накопичувача не може автоматично повністю зараховуватися до гарантованого резерву. У деталізованій моделі резерв розподіляється за напрямком регулювання, швидкістю активації та тривалістю підтримання, що дозволяє пов’язати формальний баланс резерву з реальними умовами експлуатації та не допускає одночасного використання тієї самої потужності для покриття навантаження і резервної послуги без відповідного обмеження.

Для всіх секторів РЕС має бути чітко визначено, чи баланс складається на межі джерела, мережі або кінцевого споживача. До того ж: потоки та запаси не можна без перетворення змішувати в одному рівнянні; ВДЕ й СНР не включаються повторно до агрегованої генерації; заряд і розряд, імпорт і експорт задаються окремо або через однозначні знаки; електрична, теплова й газова енергія не додаються без коефіцієнтів перетворення; сервісні індекси нормуються окремо; ENS не може набувати від’ємних значень і має співвідноситися з конкретним видом попиту; розряд накопичувача обмежується попереднім станом заряду, а резерв – енергетичною спроможністю підтримання; доступність потужностей, мережевих зв’язків, палива й зовнішньої допомоги задається для кожного сценарію порушення; система рівнянь утворює замкнене балансове ядро лише тоді, коли кожний внутрішній міжсекторний потік одночасно є витратою одного сектора і надходженням іншого, а кожний зовнішній потік має однозначно визначену межу.

Запропонована формалізація системи балансів забезпечує перехід від описової сервіс-орієнтованої концепції до розрахункової моделі, придатної для сценарного аналізу та оптимізації, де енергетичні баланси гарантують фізичну коректність, сервісні змінні відображають корисний результат і його дефіцит, міжсекторні рівняння описують взаємозаміщення технологій, міжрегіональні потоки – взаємодію РЕС з ІЕС, а баланс резервів – спроможність системи реагувати на відхилення.

Формалізована система дозволяє оцінювати наслідки розвитку ВДЕ, СНР, теплових насосів, накопичувачів і керованого попиту не ізольовано, а цілісно-узгоджено. Наприклад, встановлення теплового насоса одночасно змінює електричний і тепловий баланси, потребу в резерві, імпортозалежність і величину

ENS у кризовому сценарії. Саме така системна взаємозалежність є визначальною ознакою РЕС як складової ІЕС країни.

Водночас наведені рівняння становлять базовий лінійний рівень формалізації, де залежно від мети дослідження вони доповнюються мережевими потокорозподілами, нелінійними характеристиками, бінарними змінними введення потужностей, обмеженнями запуску й зупинки, нечіткими параметрами та сценарними ймовірностями або можливостями. Це завершує логічний перехід від понятійної структури та типології балансів до математично визначеної системи взаємопов'язаних рівнянь, що формують цілісну основу моделювання розвитку РЕС за критеріями ефективності, самодостатності, гнучкості та стійкості.

3.7. Висновки до розділу

Сформовано цілісну методологічну основу побудови та застосування балансово-оптимізаційних моделей сервіс-орієнтованого розвитку РЕС. За результатами проведеного дослідження сформульовано такі висновки:

1. Обґрунтовано доцільність застосування балансово-оптимізаційного підходу до моделювання розвитку РЕС в умовах децентралізації, зростання частки ВДЕ, поширення накопичувачів, керованого попиту та міжсекторних технологій. На відміну від традиційного ресурсно-технологічного моделювання, цей підхід поєднує дотримання фізичних балансів із вибором структури енергетичних ресурсів і сервісів за критеріями ефективності, самодостатності, гнучкості та стійкості. РЕС при цьому розглядається як відкрита багатосекторна система, функціонування якої має бути узгоджене з ресурсами, обмеженнями та системними послугами ІЕС країни.

2. Розвинуто поняття інтегрованого енергетичного та енергосервісного балансу РЕС, встановлено, що фізичний енергетичний баланс відображає рівність надходження, перетворення, накопичення, передавання, споживання та втрат енергії, тоді як енергосервісний баланс характеризує достатність функціонального результату для задоволення визначеної потреби. Енергосервісний баланс не замінює секторних балансів, а утворює над ними функціональний рівень, який пов'язує технологічну

конфігурацію РЕС із забезпеченням корисних результатів для споживачів, регіону та ІЕС країни.

3. Сформовано багаторівневу балансово-оптимізаційну модель РЕС, що охоплює інформаційний, фізико-балансовий, міжсекторний, сервісний, сценарний, критеріальний та оптимізаційний рівні. Змінними моделі визначено структуру й потужність технологій, режими генерації, імпорту та експорту, накопичення, активації керованого попиту, резервування і величину незабезпеченого попиту. Система обмежень охоплює баланси енергоносіїв, технологічні характеристики, стани накопичувачів, пропускну спроможність мереж, доступність резервів і мінімально допустимі рівні енергетичних сервісів, а цільова функція забезпечує пошук компромісу між витратами, ENS та стійкістю.

4. Запропоновано типологію інтегрованих енергетичних та енергосервісних балансів РЕС, до якої віднесено баланси забезпечення сервісу, гнучкості, резервування, стійкості, корисності й міжсекторних сервісів. Визначено, що для фізичних потоків баланс має форму рівності, а для сервісних властивостей – умови достатності доступної спроможності щодо встановленої потреби. Така типологія забезпечує коректне розмежування енергетичних, часових, якісних і нормованих показників, а також недопущення компенсації дефіциту критичної послуги надлишком менш пріоритетного сервісу.

5. Розроблено методичну послідовність побудови та застосування балансово-оптимізаційної моделі, яка охоплює: формування й верифікацію інформаційної бази; побудову електричного, теплового та газового балансів; інтеграцію міжсекторних зв’язків; калібрування і валідацію параметрів; формування математичного ядра й критеріїв; сценарний аналіз; оптимізаційні розрахунки; оцінювання прийнятності та визначення показників розвитку. Обґрунтовано ітераційний характер процедури: порушення балансових, технічних або сервісних вимог є підставою для уточнення даних, параметрів, технологічної структури чи сценарних припущень і повторного розрахунку.

6. Формалізовано взаємопов’язану систему взаємодії енергетичних та енергосервісних балансів електричного, теплового і газового секторів РЕС-ІЕС. У

рівняннях окремо враховано традиційну й відновлювану генерацію, когенерацію, імпорт та експорт, заряджання і розряджання накопичувачів, споживання теплових насосів, корисний енергетичний сервіс, технологічні втрати, ENS, міжрегіональні перетоки й резерви потужності. Визначено умови математичної узгодженості системи: єдність просторово-часових меж та одиниць вимірювання, невід'ємність дефіциту, узгодження потоків зі станами запасів, симетричне відображення міжсекторних перетворень і недопущення подвійного обліку ресурсів та сервісних ефектів.

7. Сформовано цілісну науково-прикладну основу моделювання РЕС як складових ІЕС країни, яка поєднує фізичну коректність секторних балансів, міжсекторну інтеграцію, сервісну орієнтацію, багатокритеріальну оптимізацію та сценарну перевірку стійкості. Її застосування забезпечує перехід від переважно ресурсного планування до сервіс-орієнтованого обґрунтування структури, режимів функціонування та інвестиційних пріоритетів розвитку РЕС і створює методичну основу для подальшої верифікації, валідації та практичної апробації запропонованих моделей.

РОЗДІЛ 4. ЗАСАДИ ЦІЛІСНО-УЗГОДЖЕНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ, СТІЙКОСТІ ТА САМОДОСТАТНОСТІ РЕС

4.1. Формалізація моделі системи систем як задачі багаторівневої оптимізації

Сучасні дослідження регіональних та інтегрованих енергетичних систем дедалі більше відходять від оптимізації окремих енергетичних об’єктів на користь моделей, у яких електричні, теплові, газові, накопичувальні та споживчі підсистеми розглядаються як взаємопов’язані, але функціонально відносно самостійні компоненти складної системи. У цьому контексті перспективним є застосування концепції системи систем (SoS), яка дозволяє враховувати операційну незалежність підсистем, їх розосередженість, емерджентні властивості та необхідність координації локальних цілей, що створює фундамент для інтеграції різнорідних джерел, мереж, накопичувачів і засобів керування та є особливо релевантним для підвищення інтероперабельності, ефективності й стійкості енергетичних систем [38, 110]. Розвиток цієї тенденції простежується в роботах, присвячених багаторівневій і багатокритеріальній оптимізації, в яких підтверджується доцільність переходу від ізольованого вибору обладнання до оптимізації архітектури системи у цілому [4, 22, 111] з одночасним врахуванням невизначеність цін, попиту та виробництва, а також реакції попит як активний керований ресурс [25, 112]. Розроблено просторово-часову кооперативну модель для міжрегіональних інтегрованих енергосистем, у якій поєднано внутрішньо-регіональне багатовекторне перетворення енергії та міжрегіональний обмін [113], що дає змогу одночасно підвищувати використання ВДЕ та знижувати системні витрати.

РЕС з точки зору організації своєї функціональної структури складається з сукупності взаємопов’язаних, але частково автономних підсистем енергетичного спрямування $\{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, до яких належать підсистеми електропостачання, теплопостачання, газопостачання, розподілена генерація та ВДЕ, накопичення енергії, активні споживачі й просьюмери, керування попитом, мікромережі [114],

агрегатори, віртуальні електростанції, цифрові системи керування та енергосервісні оператори тощо, що з математичної точки зору повністю відповідає положенням теорії організації і функціонування системи систем.

З метою формалізації, кожну складову підсистему S_i РЕС, як системи систем, будемо характеризувати вектором стану $x_i(t) = [P_i(t), Q_i(t), E_i(t), R_i(t), C_i(t), Em_i(t)]$, 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 S_i визначимо як

$$u_i(t) = \left[P_i^{gen}, P_i^{ch}, P_i^{dis}, P_i^{DR}, P_i^{imp}, P_i^{exp}, u_i^{serv}\right],$$

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.

Задача оптимізації розвитку РЕС є багаторівневою, що складається з трьох рівнів: локального, регіонального та взаємодії РЕС-ІЕС.

Локальна задача оптимізації формується на рівні окремої підсистеми S_i

$$\max_{u_i} F_i(x_i, u_i) \text{ за умов } g_i(x_i, u_i) \le 0,\ h_i(x_i, u_i) = 0, \qquad (4.1)$$

де: $F_i(x_i, u_i)$ – локальна цільова функція i-ї підсистеми; $g_i(x_i, u_i)$ – вектор технічних, економічних, екологічних та режимних обмежень у формі нерівності; $h_i(x_i, u_i)$ – вектор рівнянь балансу та інших обмежень у формі рівності.

Функція F_i визначає локальну ефективність відповідної підсистеми, а g_i та h_i формалізують технічні, балансові, економічні, екологічні та інші обмеження. Відмітимо, що локальний оптимум окремої підсистеми, як правило, не відповідає оптимуму РЕС.

Тому, на регіональному рівні задача набуває вигляду

$$\max_{\mathrm{u}} F_{RES} = F_{RES}\left(F_1, \dots, F_N, S^{EE}, S^{flex}, S^{res}, S^{self}\right), \tag{4.2}$$

де: u – сукупний вектор керуючих змінних усіх підсистем РЕС; F_{RES} – цільова функція регіонального рівня; S^{EE} – системний результат сервісів підвищення енергоефективності; S^{flex} – системний результат сервісів гнучкості; S^{res} – системний результат сервісів забезпечення стійкості; S^{self} – системний результат сервісів підвищення самодостатності.

Узагальнений інтегральний критерій системної ефективності РЕС визначений як $I_{RES} = w_{EE}I_{EE} + w_{flex}I_{flex} + w_{res}I_{res} + w_{self}I_{self} - w_C I_C - w_{env}I_{env}$, де: I_{EE}, I_{flex}, I_{res}, I_{self} – нормовані індекси відповідних системних властивостей; I_C – індекс витрат; I_{env} – індекс екологічного навантаження; w_j – вагові коефіцієнти.

Третій рівень, пов’язаний із взаємодією РЕС з ІЕС країни, визначається як

$$\max F_{IES} = F\left(I_{RES_1}, I_{RES_2}, \dots, I_{RES_M}, B_{IES}\right), \tag{4.3}$$

де F_{IES} – цільова функція рівня інтегрованої енергетичної системи країни; I_{RES_m} – інтегральний показник m-ї регіональної енергосистеми, $m \in M$ – кількість РЕС, що взаємодіють у межах ІЕС; B_{IES} – сукупність загальнодержавних енергетичних, паливних і резервних балансів та системних обмежень.

Для кожної РЕС виконуються умови балансу. Так, для електроенергетичної підсистеми

$$P_{gen,t} + P_{imp,t} + P_{dis,t} + P_{DR,t} = P_{load,t} + P_{ch,t} + P_{exp,t} + P_{loss,t} + ENS_t.$$

де: $P_{gen,t}$ – сумарна доступна генерація РЕС у момент t, МВт; $P_{imp,t}$ – імпорт потужності до РЕС, МВт; $P_{dis,t}$ – розряд накопичувачів, МВт; $P_{DR,t}$ – ефект керування попитом, що використовується для покриття балансу, МВт; $P_{load,t}$ – навантаження РЕС, МВт; $P_{ch,t}$ – потужність заряджання накопичувачів, МВт; $P_{exp,t}$ – експорт

потужності, МВт; $P_{loss,t}$ – мережеві та інші технологічні втрати, приведені до потужності, МВт; ENS_t – незабезпечена енергія/дефіцит енергопостачання за інтервал Δt.

Узагальнена задача багаторівневої оптимізації записана як

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

де: u^* – оптимальний вектор керуючих рішень; F_{SoS} – узагальнена цільова функція системи систем.

У сукупності, запропонована постановка задачі сервіс-орієнтованої оптимізації РЕС забезпечує узгодження автономних цілей її окремих підсистем із системними цілями ІЕС країни і відрізняється від традиційної багаторівневої оптимізації тим, що допускає локальну автономність підсистем за умови виконання системних обмежень і досягнення погоджених сервісних результатів. Її відмінність від оптимізації за кількома критеріями, полягає в об’єкті та кінцевому результаті управління, – багатокритеріальна оптимізація може одночасно мінімізувати витрати, викиди та втрати або максимізувати надійність, однак її результатом залишається оптимальний стан енергетичної інфраструктури. У сервіс-орієнтованій моделі результатом є не оптимальний набір потужностей чи обсяг виробленої енергії як такий, а гарантований рівень енергетичного сервісу, що безпосередньо задовольняє потреби споживача, і де багатокритеріальна оптимізація слугує одним з інструментів. Основним індикатором переходу РЕС до сервіс-орієнтованої моделі слугує рівень забезпечення потреб споживачів у заданих енергетичних сервісах: РЕС вважається сервіс-орієнтованою, якщо рівень забезпечення потреб, а не обсяг виробництва енергії чи завантаження потужностей, виступає основним цільовим показником планування, оптимізації та оцінювання її розвитку, при цьому визначальною ознакою є не лише числова оцінка цього рівня, а включення сервісних вимог до цільової функції, балансів та обмежень моделі РЕС.

Для формалізації процедури структурно-параметричної оптимізації РЕС відобразимо методологічні положення SoS на площину двошарової моделі, що інтегрує регіональний (верхній) і локальні (нижній) рівні.

На рівні підсистем-агентів (нижній рівень) кожен агент i мінімізує власні витрати/максимізує прибуток (Revenue_i) за умов контрактів, фізичної здійсненності та економічної доцільності (Cost_i)

$$\max_{x_i,u_i} \sum_{\omega} \pi_{\omega} \left(\text{Revenue}_i(\hat{s}, y, p, \omega) - \text{Cost}_i(x_i, u_i, \omega)\right) \tag{4.4}$$

На верхньому рівні координатор системи систем обирає архітектуру системи, правила заключення контрактів, узгоджує мінімально допустимі рівні сервісу, їх інтеграцію та ризики реалізації. Системна цільова функція на цьому рівні максимізує сукупну цінність сервісів мінус системні витрати та ризики:

$$\max_{x,u,y,p,b,\hat{s}} \sum_{\omega\in\Omega} \pi_{\omega} \left[\sum_{k\in\mathcal{K}} \sum_{n\in\mathcal{N}} \sum_{t\in\mathcal{T}} V_{k,n,t}(\cdot)\left(\hat{s}_{k,n,t,\omega}\right) - C_{\text{sys}}(x,u,\omega) \right] - \lambda\, \mathcal{R}(x,u,y,\omega),$$

де: π_{ω} – можливість реалізації (вага) сценарію ω; $V_{k,n,t}(\cdot)$ – функція корисності сервісів ефективності, стійкості та самодостатності; $\hat{s}_{k,n,t,\omega}$ – верифікований (підтверджений M&V) рівень k-го сервісу; $C_{\text{sys}}(x,u,\omega)$ – CAPEX+OPEX+інтеграційні витрати на рівні системи; $\mathcal{R}(\cdot)$ – міра ризику (штрафи за порушення та за недосягнення гарантованої економії); $\lambda \geq 0$ – ваговий коефіцієнт ризику.

Обмеження SoS на цьому рівні: бюджетні/інвестиційні ліміти $\sum_n \text{CAPEX}_n\,(x_n) \leq B$, де B – доступний інвестиційний бюджет; технічні обмеження $u_{n,t,\omega} \in \mathcal{U}_n(x_n), E_{n,t,\omega} \in \left[\underline{E}_{n,t,\omega}, \bar{E}_{n,t,\omega}\right], 0 \leq s_{k,n,t,\omega} \leq \bar{s}_{k,n,t}(x_n),$ де $\mathcal{U}_n(x_n)$ – допустима область керування u для об'єкта n (технічні межі), $\left[\underline{E}_{n,t,\omega}, \bar{E}_{n,t,\omega}\right]$ – допустимі межі споживання енергії/потужності; $\bar{s}_{k,n,t}(x_n)$ – верхня межа надання сервісу k на об'єкті n; мінімально допустима якість сервісів $\bar{s}_{k,n,t,\omega} \geq \underline{s}_{k,n,t} \forall k,n,t,\omega,$ де $\bar{s}_{k,n,t}(x_n)$ – верхня межа надання сервісу k на об'єкті n, а $\underline{s}_{k,n,t}$ – мінімально допустимий рівень сервісу; викиди/екологічні обмеження $\sum_{n,t} \text{CO2}_{n,t,\omega}\left(E_{n,t,\omega}\right) \leq \text{CO2Cap}_{\omega},$ де $\text{CO2}_{n,t,\omega}(E_{n,t,\omega})$ – викиди як функція споживання/палива, а CO2Cap_{ω} – ліміт викидів у сценарії ω.

Математичною “платформою” системи систем в задачі багаторівневої оптимізації РЕС слугують енергетичні баланси та їх зв’язок із сервісами. Нехай $E_{n,t,\omega}$ – фактичне споживання електроенергії/тепла/природного газу (вектор, якщо мультиенергія). Енергетичний баланс/операційні обмеження у загальному вигляді представимо як

$$E_{n,t,\omega} = f_n(\cdot)(u_{n,t,\omega}, x_n, \xi_{t,\omega}), \quad (4.5)$$

де: $f_n(\cdot)$ – фізично/технологічно обґрунтована модель об’єкта n; $u_{n,t,\omega}$ – керуючі змінні; x_n – інтенсивність/обсяг інвестиції; $\xi_{t,\omega}$ – екзогенні фактори (погода, виробництво, обмеження); Ω – множина сценаріїв невизначеності, $\omega \in \Omega$; t – час.

Формалізуємо поняття: енергоефективності (EFF) як сервісу $s_{\text{EFF},n,t,\omega} = b_{n,t,\omega} - E_{n,t,\omega}$, де $b_{n,t,\omega}$ – базова лінія споживання для об’єкта n; гнучкості (SYS) як сервісу $s_{\text{SYS},n,t,\omega} = L^{\text{ref}}_{n,t,\omega} - L_{n,t,\omega}$, де $L_{n,t,\omega}$ – навантаження, а $L^{\text{ref}}_{n,t,\omega}$ – референтний профіль; стійкості/безпеки (SEC) як сервісу через ENS або резерв автономності $s_{\text{SEC},n,t,\omega} = \text{ENS}^{\text{base}}_{n,t,\omega} - \text{ENS}_{n,t,\omega}$, або $s_{\text{SEC},n,\omega} = \text{AutonomyHours}_{n,\omega}(x_n, u)$, де $\text{ENS}_{n,t,\omega}$ – недовідпущена енергія або інша метрика надійності), $\text{ENS}^{\text{base}}_{n,t,\omega}$ – базовий рівень ENS без втручання, $\text{AutonomyHours}_{n,\omega}(x_n, u)$ – тривалість автономної роботи (год) як функція x_n, u.

Стійкість у цьому дослідженні розглядається як інтегральна системна властивість, що характеризує здатність РЕС зберігати працездатність за умов збурень, адаптуватися до змін режимів функціонування та відновлюватися до прийнятного рівня сервісу за мінімальних втрат. На відміну від традиційних підходів, де стійкість трактується через локальні технічні показники, у цій роботі вона формалізується в межах SoS як результат взаємодії сервісних підсистем, реалізований через механізм енергія-як-сервіс (EaaS), де ключовим є твердження, що стійкість РЕС не може бути забезпечена без сервісної інтеграції енергоефективності, гнучкості, цифрового керування та безпекових сервісів, узгоджених через контрактні та інформаційні механізми.

Запропоновано визначати індекс системної стійкості РЕС як агреговану функцію системи верифікованих сервісів:

$$\mathcal{R}^{\mathrm{RES}} = \sum_{\omega\in\Omega} \pi_\omega \left[w_{\mathrm{EFF}} \cdot \hat{S}_{\mathrm{EFF},\omega} + w_{\mathrm{SYS}} \cdot \hat{S}_{\mathrm{SYS},\omega} + w_{\mathrm{SEC}} \cdot \hat{S}_{\mathrm{SEC},\omega} - w_{\mathrm{ENS}} \cdot \mathrm{ENS}_\omega \right],$$

де: $\hat{S}_{\mathrm{EFF},\omega}$ – підтверджений обсяг енергоефективності; $\hat{S}_{\mathrm{SYS},\omega}$ – підтверджена системна гнучкість; $\hat{S}_{\mathrm{SEC},\omega}$ – підтверджений сервіс безпеки (резерв, автономність); ENS_ω – недовідпущена енергія; $w.$ – вагові коефіцієнти пріоритетів стійкості. Тобто, індекс системної стійкості є очікуваною зваженою корисністю сервісів, зменшеною на втрати від недопостачання.

З урахуванням сервісної логіки, цільову функцію моделі стійкості сформуємо як $\max_{x,u,y}\left\{\mathcal{R}^{\mathrm{RES}} - \sum_{\omega\in\Omega} \pi_\omega \cdot C_{\mathrm{sys}}(x,u,\omega) - \lambda \cdot \mathrm{CVaR}_\alpha(\mathrm{Loss}_\omega)\right\}$, де: x – інвестиційні рішення (резерви, накопичення, модернізація); u – вектор операційного керування (диспетчеризація, обмеження/перерозподіл навантаження, режими мікромереж); y – вектор вибору сервісних контрактів; $C_{\mathrm{sys}}(x,u,\omega)$ – сукупні витрати РЕС у сценарії ω, що включають інвестиційні витрати, операційні витрати та витрати на інтеграцію і адміністрування сервісів; Loss_ω – системні втрати у сценарії ω (економічні, соціальні, технологічні); $\mathrm{CVaR}_\alpha(\mathrm{Loss}_\omega)$ – умовне середнє значення найгірших втрат на рівні довіри $\alpha \in (0,1)$; λ – коефіцієнт ризик-аверсії системи (негативного ставлення до ризику, що доходить до невизнання його значення і ролі).

Обмеження стійкості та безпеки РЕС охоплюють: енергетичні $E_{n,t,\omega} \le \bar{E}_{n,t,\omega}, P_{n,t,\omega} \le \bar{P}_n$; автономності $\mathrm{Autonomy}_{n,\omega}(x,u) \ge T_n^{\min}$; сервісні $\hat{S}_{k,n,\omega} \ge \underline{S}_{k,n}, k \in \{\mathrm{SYS,SEC}\}$; M&V-узгодженості $\hat{S}_{k,n,\omega} = S_{k,n,\omega} - \epsilon_{k,n,\omega}, \epsilon_{k,n,\omega} \in \mathcal{E}$, де: $E_{n,t,\omega}$ – енергоспоживання об'єкта nу час t, сценарій ω; $\bar{E}_{n,t,\omega}$ – допустима верхня межа споживання; $P_{n,t,\omega}$ – потужність; $\bar{P}_n$ – встановлена або допустима потужність; $\mathrm{Autonomy}_{n,\omega}(x,u)$ – тривалість автономної роботи об'єкта n, $\mathrm{Autonomy}_{n,\omega}(x,u) \ge T_n^{\min}$; $T_n^{\min}$ – мінімально допустимий час автономності; $\underline{S}_{k,n}$ – мінімально допустимий рівень сервісу класу k; $\hat{S}_{k,n,\omega} \ge \underline{S}_{k,n}, k \in \{\mathrm{SYS,SEC}\}$; $S_{k,n,\omega}$ – фактично наданий сервіс; $\hat{S}_{k,n,\omega}$ – верифікований сервіс; $\epsilon_{k,n,\omega}$ – похибка або невизначеність M&V; $\mathcal{E}$ – допустима множина похибок.

Для врахування поведінки сервісних агентів (ESCO, агрегатори, оператори) верхній рівень задачі оптимізації максимізує $\mathcal{R}^{\mathrm{RES}}$, а ніжній – прибуток агентів, що дозволяє формалізувати процес інтеграції їх ринкової та контрактної поведінки в задачі оптимального підвищення ефективності, стійкості та самодостатності функціонування сервіс-орієнтованої РЕС для забезпечення гарантованого рівня верифікованого результату реалізації проєктів. Модель верифікації у роботі формалізовано у вигляді $\hat{s}_{\mathrm{EFF},n,t,\omega} = (b_{n,t,\omega} - E_{n,t,\omega}) - \epsilon_{n,t,\omega}$ або узагальнено для будь-якого сервісу $\hat{s}_{k,n,t,\omega} = s_{k,n,t,\omega} - \epsilon^{(k)}_{n,t,\omega}$, де: $b_{n,t,\omega}$ – базова лінія споживання (контрфакт "без заходів") для об'єкта n; $\epsilon_{n,t,\omega}$ – похибка/невизначеність верифікації (загальна); $\epsilon^{(k)}_{n,t,\omega}$ – похибка для конкретного сервісу k (якщо потрібна деталізація); $\epsilon_{n,t,\omega} \in \mathcal{E}_{n,t,\omega}$, де $\mathcal{E}$ задається статистично (довірчі інтервали) або робастно (інтервальні межі). Вибір типу контракту (платежі, гарантії, штрафи) представлено у вигляді $\sum_{m\in\mathcal{M}} y_{m,i,n} = 1 \forall i, n,$ де $y_{m,i,n} \in \{0,1\}$ – бінарна змінна вибору, яку актор i застосовує для об'єкта n контракт типу m.

Розглядаються контракти гарантованої економії (guaranteed savings), для яких штрафні заходи визначаються як $\mathrm{Penalty}_{n,\omega} \geq \alpha_n\big(G_n - \sum_t \hat{s}_{\mathrm{EFF},n,t,\omega}\big)_+$, де $\alpha_n \geq 0$ – ставка штрафу за недосягнення гарантії, G_n – гарантований обсяг економії (за період/горизонт) для об'єкта n. Позначення $(\cdot)_+$ у цій формулі це оператор додаткової частини, за яким $\big(G_n - \sum_t \hat{s}_{\mathrm{EFF},n,t,\omega}\big)_+ = \max\big\{G_n - \sum_t \hat{s}_{EFF,n,t,\omega}\big\}$. Якщо фактична верифікована економія менша за гарантовану, оператор набуває додатного значення, на основі якого розраховується штраф, а якщо гарантію виконано або перевиконано, вираз дорівнює нулю і штраф не нараховується. Дохід для цього типу контракту визначається як

$$Rev_i = \sum_\omega \pi_\omega \Big[\mathrm{BaseFee}_n - \alpha_n\big(G_n - \sum_t \hat{s}_{\mathrm{EFF},n,t,\omega}\big)_+\Big].$$

Розмір платіжу ЕСКО за контрактом з розподілу економії (shared savings) розраховуються як $\mathrm{Pay}_{n,\omega} = \rho_n \sum_t \hat{s}_{\mathrm{EFF},n,t,\omega} \cdot \tau_{t,\omega}$, де $\rho_n \in (0,1)$ – частка розподілу економії на користь ЕСКО, $\tau_{t,\omega}$ – ціна/тариф енергії в час t за сценарієм ω. Дохід для цього типу контракту визначається як

$$Rev_i = \sum_{\omega} \pi_{\omega} \sum_{t} \rho_n \ \tau_{t,\omega} \ \hat{s}_{\mathrm{EFF},n,t,\omega}.$$

Платіж за контрактом на гнучкість (доступність + активація) визначається як $\mathrm{Pay}_{n,\omega}^{\mathrm{SYS}} = A_n \cdot \bar{F}_n(x_n) + \sum_t a_{n,t,\omega} \cdot \hat{s}_{\mathrm{SYS},n,t,\omega}$, де: A_n – ставка оплати за доступність гнучкості; $a_{n,t,\omega}$ – ставка оплати за активацію гнучкості; а дохід – як

$$Rev_i = \sum_{\omega} \pi_{\omega} \left[A_n \bar{F}_n(x_n) + \sum_{t} a_{n,t,\omega} \ \hat{s}_{SYS,n,t,\omega} \right].$$

Платіж за контрактом з абонплатою: $\mathrm{Pay}_{n,\omega}^{\mathrm{EaaS}} = \mathrm{Fee}_n + \kappa_n \sum_t \hat{s}_{\mathrm{EFF},n,t,\omega}$, де: Fee_n – фіксована абонплата за контрактом; κ_n – надбавка/частка за підтверджену економію; а дохід визначається як $Rev_i = \sum_{\omega} \pi_{\omega} \left[Fee_n + \kappa_n \sum_t \hat{s}_{EFF,n,t,\omega} \right]$.

Таким чином, розглянутий підхід до оптимізації забезпечує формалізацію ефективності та стійкості, інтеграцію ENS, автономності та гнучкості у цільову функцію, узгоджених в межах SoS підсистем РЕС.

4.2. Формалізація взаємозв’язку енергоефективності та сервісу з підвищення ефективності

Сучасні дослідження енергоефективності (ЕЕ) демонструють поступовий перехід від її традиційного трактування як сукупності технічних заходів зі скорочення енергоспоживання у виробничій сфері, сільському господарстві [56] і побуті [115, 116] та зниження викидів забруднюючих речовин в атмосферу [117] до розгляду ЕЕ як вимірюваного результату енергетичного сервісу, у контексті якого принципового значення набуває взаємозв’язок між енергоефективністю як характеристикою стану енергетичної системи та сервісом з підвищення ЕЕ як організаційно-технологічним і економічним механізмом цілеспрямованої зміни цього стану [5, 26, 39].

Наукові публікації останніх років активно розвивають концепцію енергосервісу, де предметом взаємовідносин між замовником і постачальником стає не саме встановлення енергоефективного обладнання, а досягнення заздалегідь визначеного та підтвердженого результату, отримання якого безпосередньо залежить від розподілу ризиків, механізмів фінансування та можливості достовірного визначення фактично досягнутої економії [104. 118, 119].

Розвиток цієї логіки значною мірою відбувається в межах концепцій ЕЕ-як-сервіс (EEaaS) та енергія-як-сервіс (EaaS) [67, 108, 120], що свідчить про формування нового підходу, за яким споживач отримує не технічний актив як такий, а функціональний результат його використання – зниження споживання, витрат або навантаження за заданого рівня корисної функції. Розширення цієї парадигми простежується у дослідженнях керування попитом і гнучкості [106, 107], що аналізуються як самостійні сервіси, здатні змінювати часову структуру споживання, зменшувати пікове навантаження та підтримувати баланс енергосистеми. При цьому результати [106] підкреслюють роль агрегаторів і ринкового дизайну, а [107] – поведінкових та соціотехнічних факторів участі споживачів. Відмічається, що важливою передумовою розвитку таких моделей є достовірність і гарантування результату [105, 109, 120-122].

В умовах сервіс-орієнтованого розвитку РЕС зміст взаємозв'язку енергоефективності та сервісу з підвищення ефективності потребував суттєвого удосконалення, обумовленого необхідністю урахування системного впливу обсягів споживання енергії на профіль навантаження, пікову потужність, потребу в резерві, використання локальних енергетичних ресурсів, величину імпорту, незабезпечену енергію, екологічні характеристики та стійкість РЕС.

Принципово важливим для сервіс-орієнтованого розвитку РЕС стає розмежування понять EE_t, яке визначає рівень енергоефективності як характеристики стану системи у момент або період часу, та $S_{EE,t}$ – як сервісу із підвищення енергоефективності, як організований і керований вплив, спрямований на зміну цього стану. Отже, EE_t і $S_{EE,t}$ мають співвідноситися як результативна властивість системи та механізм її цілеспрямованої зміни, або у формалізованому вигляді $S_{EE,t} \Rightarrow \Delta EE_t$, де ΔEE_t – зміна рівня енергоефективності, зумовлена реалізацією сервісу.

При цьому, величина ΔEE_t залежить не тільки від самого сервісу, а й від вихідного стану системи, режиму її функціонування та зовнішніх факторів: $\Delta EE_t = f\left(S_{EE,t}, \mathrm{x}_t, \mathrm{u}_t, \omega_t\right)$, де: x_t – вектор стану РЕС; u_t – вектор керуючих впливів; ω_t – вектор

зовнішніх факторів та невизначеностей; $f(\cdot)$ – функціональна залежність між станом, сервісом, керуванням і результатом.

Для побудови моделі сервіс-орієнтованого розвитку РЕС необхідно розмежувати енергоефективність та енергозбереження, оскільки зменшення енергоспоживання саме по собі не завжди означає підвищення енергоефективності. Так, якщо $E^1 < E^0$, де E^0, E^1 – енергоспоживання у базовому та післясервісному станах, але одночасно $Y^1 < Y^0$, Y^0, Y^1 – корисний результат у базовому та післясервісному станах. то скорочення енергоспоживання може бути наслідком зменшення корисного результату, а не підвищення ефективності. Тому, умова фактичного підвищення ЕЕ має мати вигляд $Y^1/E^1 > Y^0/E^0$, а умова збереження корисного результату $Y_t^{serv} \geq Y_t^{req}$, де: Y_t^{serv} – фактичний корисний результат після реалізації сервісу; Y_t^{req} – мінімально необхідний або нормативно встановлений рівень результату, що дозволяє сформулювати важливий принцип: економія енергії визнається результатом сервісу енергоефективності лише за умови збереження або підвищення необхідного рівня корисної функції.

Кількісне оцінювання результатів енергосервісу потребує визначення базового стану, відносно якого і встановлюється результат. Найпростішим виразом є $\Delta E_t = E_t^{base} - E_t^{act}$, де E_t^{base} – базове енергоспоживання, а E_t^{act} – фактичне енергоспоживання після реалізації сервісу, проте безпосереднє порівняння цих величин може бути некоректним, якщо змінилися зовнішні умови, тому базове споживання має коригуватися $E_t^{base,adj} = f(\mathrm{z}_t, \beta)$, де z_t – вектор релевантних факторів коригування базової лінії (погода, обсяг виробництва, режим роботи тощо), β – параметри моделі базового споживання. У сервіс-орієнтованій моделі результат повинен бути не просто розрахованим, а верифікованим відносно обґрунтованої базової лінії: $\Delta E_t^{ver} = E_t^{base,adj} - E_t^{act}$, де ΔE_t^{ver} – верифікована економія енергії, а $E_t^{base,adj}$ – скориговане базове енергоспоживання з урахуванням релевантних факторів.

Для окремого об’єкта економія ΔE може бути основним результатом енергосервісного заходу, однак для РЕС цього недостатньо, оскільки однаковий обсяг

економії може мати принципово різну системну цінність, тому потрібно розрізняти ΔE – енергетичний результат сервісу та V_{EE}^{sys} – його системну цінність (корисність). Для формалізації введемо вектор

$$\mathrm{R}_{EE} = \left[\Delta E, \Delta P_{peak}, \Delta C, \Delta R_{req}, \Delta ENS, \Delta SSR, \Delta Em\right], \quad (4.6)$$

де: R_{EE} – вектор системних результатів сервісу енергоефективності; ΔP_{peak} – зменшення пікової потужності/навантаження, МВт; ΔC – зміна витрат або економічний результат; ΔR_{req} – зміна необхідного системного резерву, МВт; ΔENS – зміна недопостачання енергії, МВт·год; ΔSSR – зміна коефіцієнта енергетичної самодостатності; ΔEm – зміна екологічного навантаження або викидів. Отже перехід $S_{EE} \to \mathrm{R}_{EE}$ є принциповим для сервіс-орієнтованої моделі, оскільки предметом оцінювання стає не технологія, що була встановлена, а сукупність системних результатів, які вона забезпечила через відповідний сервіс.

Сервіс енергоефективності змінює не тільки сумарне споживання енергії, а й часовий профіль навантаження. Покажемо це. Позначимо базове навантаження як P_t^{base}, а після реалізації сервісу визначимо як $P_t^{serv} = P_t^{base} - \Delta P_t^{EE}$, де: P_t^{serv} – навантаження після реалізації сервісу, МВт; ΔP_t^{EE} – зменшення навантаження через сервіс енергоефективності, МВт. Тоді, сумарна економія $\Delta E^{EE} = \sum_t \Delta P_t^{EE} \Delta t$, а піковий ефект $\Delta P_{peak} = P_{peak}^{base} - P_{peak}^{serv}$, де: ΔP_{peak} – зменшення пікової потужності/навантаження, МВт; P_{peak}^{base} – максимальне базове навантаження, МВт; P_{peak}^{serv} – максимальне навантаження після сервісу, МВт; $P_{peak}^{base} = \max\limits_t P_t^{base}$, $P_{peak}^{serv} = \max\limits_t P_t^{serv}$; коефіцієнт впливу енергоефективності на пік $K_{peak}^{EE} = \Delta P_{peak} / P_{peak}^{base}$, який характеризує частку базового пікового навантаження, усунену внаслідок сервісу. Для РЕС це має значно більшу системну цінність, ніж рівномірне скорочення споживання, оскільки дозволяє зменшувати необхідну потужність генерації, мережеве завантаження та потребу в резерві.

Необхідний резерв РЕС представимо як $R_t^{req} = f\left(P_{load,t}, \sigma_t^{RES}, \sigma_t^{load}, \xi_t\right)$, де: R_t^{req} – необхідний системний резерв у момент t, МВт; $P_{load,t}$ – навантаження РЕС у момент t, МВт; σ_t^{RES} – характеристика невизначеності генерації ВДЕ; σ_t^{load} –

характеристика невизначеності навантаження; ξ_t – інші фактори ризику/збурення. Визначимо умову скорочення навантаження внаслідок ЕЕ як $P_{load,t}^{serv} < P_{load,t}^{base}$, де $P_{load,t}^{serv}$, $P_{load,t}^{base}$ – навантаження після сервісу та у базовому сценарії. Це може забезпечити $R_t^{req,serv} < R_t^{req,base}$ з ефектом $\Delta R_t^{EE} = R_t^{req,base} - R_t^{req,serv}$, де: $R_t^{req,serv}$, $R_t^{req,base}$ – необхідний резерв після сервісу та у базовому сценарії; ΔR_t^{EE} – вивільнення/зменшення потреби у резерві завдяки енергоефективності. Тут частина результату ЕЕ проявляється у формі вивільненого резервного ресурсу, що особливо важливо за дефіциту генеруючої потужності, обмежених міжсистемних перетоків або аварійних режимів.

Формалізуємо взаємозв'язок енергоефективності та незабезпеченої енергії. Так, за дефіцитного режиму $P_{sup,t} < P_{load,t}$, $P_{def,t} = \max\left(0, P_{load,t} - P_{sup,t}\right)$, а незабезпечена енергія $ENS = \sum_t P_{def,t}\,\Delta t$, де: $P_{sup,t}$ – доступна потужність енергопостачання у момент t, МВт; $P_{def,t}$ – дефіцит потужності у момент t, МВт. Після реалізації ЕЕ сервісу $P_{def,t}^{EE} = \max\left(0,\ P_{load,t}^{base} - \Delta P_t^{EE} - P_{sup,t}\right)$, відповідно $ENS^{EE} = \sum_t P_{def,t}\Delta t$, а системний ефект $\Delta ENS_{EE} = ENS^{base} - ENS^{EE}$. Отже, в умовах дефіциту, ЕЕ фактично виконує функцію віртуального ресурсу постачання, оскільки кожна одиниця попиту, якої вдалося уникнути, може бути еквівалентною додатковій одиниці доступної енергії. Для балансу: $P_{sup,t} + \Delta P_t^{EE} \geq P_{load,t}^{base}$ може бути еквівалентним збільшенню генерації $P_{sup,t} + P_t^{add} \geq P_{load,t}^{base}$, якщо $P_t^{add} = \Delta P_t^{EE}$, де P_t^{add} – еквівалентна додаткова потужність постачання, яку за системним балансом може заміщувати скорочення попиту.

Взаємозв'язок енергоефективності та самодостатності встановимо за допомогою коефіцієнта енергетичної самодостатності РЕС: $SSR = E_{local}/E_{demand}$, де E_{local} – енергія, забезпечена локальними ресурсами, а E_{demand} – сукупний попит. Після реалізації ЕЕ сервісу $E_{demand}^{EE} = E_{demand}^{base} - \Delta E^{EE}$, де E_{demand}^{EE}, E_{demand}^{base} – попит після сервісу та у базовому сценарії. Якщо локальне виробництво не зменшується, тобто $E_{local}^{EE} \approx E_{local}^{base}$, де E_{local}^{EE}, E_{local}^{base} – локальне виробництво після сервісу та у базовому сценарії, то $SSR^{EE} = E_{local}/E_{demand}^{base} - \Delta E^{EE}$. За умови $\Delta E^{EE} > 0$, $SSR^{EE} >$

SSR^{base}, де SSR^{EE}, SSR^{base} – самодостатність РЕС після сервісу та у базовому сценарії. Отже, підвищення самодостатності може бути досягнуто двома принципово різними шляхами: $SSR \uparrow \Leftarrow E_{local} \uparrow$, або $SSR \uparrow \Leftarrow E_{demand} \downarrow$. Перша стратегія є ресурсно-затратною, а друга – сервісно-ефективною. Для сервіс-орієнтованого розвитку це має принципове значення, оскільки дозволяє розглядати енергоефективність як альтернативний ресурс підвищення самодостатності без обов'язкового нарощування локальних генеруючих потужностей.

Енергоефективність впливає і на стійкість РЕС, при чому декількома способами: $S_{EE} \rightarrow \Delta P_{load} \rightarrow \Delta R_{req}$, $S_{EE} \rightarrow \Delta P_{load} \rightarrow \Delta ENS$, $S_{EE} \rightarrow \Delta E_{demand} \rightarrow \Delta SSR$ і сукупно $S_{EE} \rightarrow \Delta I_{res}$. Тут S_{EE} – сервіс із підвищення енергоефективності, а I_{res} – інтегральний індекс стійкості РЕС. Якщо $I_{res} = f\left(ENS, TTR, R, CI_{backup}, F\right)$, де TTR – час відновлення системи після збурення, R – доступний резерв, CI_{backup} – показник резервного забезпечення критичного навантаження, F – показник гнучкості РЕС, то вплив ЕЕ сервісу $\Delta I_{res}^{EE} = I_{res}^{EE} - I_{res}^{base}$, де ΔI_{res}^{EE} – зміна інтегрального індексу стійкості внаслідок енергоефективності, а I_{res}^{EE}, I_{res}^{base} – стійкість після сервісу та у базовому сценарії. Важливо, щоб енергоефективність не ототожнювалася зі стійкістю, оскільки її внесок залежить від того, коли, де і для якого навантаження відбувається скорочення споживання. Зниження некритичного навантаження у період дефіциту може вивільнити ресурс для критичної інфраструктури $\Delta P_{EE}^{noncrit} \rightarrow P_{avail}^{crit} \uparrow$, де: $\Delta P_{EE}^{noncrit}$ – скорочення некритичного навантаження через енергоефективність, МВт; P_{avail}^{crit} – потужність, доступна для критичного навантаження, МВт. Саме тому системна оцінка повинна враховувати не тільки обсяг, а й часову та просторову локалізацію ефекту.

Енергоефективність і гнучкість також не є тотожними, адже ЕЕ переважно забезпечує $E_{demand} \downarrow$, тоді як гнучкість: $P_t \rightarrow P_{t+\Delta t}$, тобто змінює час або режим споживання, проте сучасні цифрові сервіси можуть одночасно формувати обидва ефекти. Наприклад, інтелектуальне керування системами опалення, вентиляції та кондиціювання повітря (HVAC) може зменшувати сумарне споживання та переносити частину навантаження з пікового періоду. Тому $S_{EE} \cap S_{flex} \neq \varnothing$, де S_{flex} – сервіс

гнучкості. Для уникнення подвійного врахування системного ефекту необхідно розділяти ΔE^{pure} – чисте скорочення енергоспоживання та ΔE^{shift} – енергію, лише перенесену в часі. Загальна зміна профілю $\Delta P_t^{serv} = \Delta P_t^{pure} + \Delta P_t^{shift}$, де ΔP_t^{serv} – загальна зміна профілю навантаження після сервісу, ΔP_t^{pure} – складова зміни навантаження, обумовлена чистою економією та ΔP_t^{shift} – складова зміни навантаження, обумовлена перенесенням у часі. При цьому для перенесення навантаження $\sum_t \Delta P_t^{shift} \Delta t \approx 0$, тоді як для енергоефективності $\sum_t \Delta P_t^{shift} \Delta t > 0$, що є важливим для коректної оцінки внеску різних сервісів у цільову функцію SoS.

Економічний ефект сервісного результату значною мірою визначається прямим економічним внеском: $\Delta C_{energy} = C_{energy}^{base} - C_{energy}^{serv}$, де ΔC_{energy} – прямий економічний ефект від зміни витрат на енергію, C_{energy}^{base} – витрати на енергію у базовому сценарії та C_{energy}^{serv} – витрати на енергію після реалізації сервісу. Однак повна економічна цінність для РЕС є ширшою

$$V_{EE}^{sys} = V_{energy} + V_{peak} + V_{reserve} + V_{ENS} + V_{grid} + V_{env} - C_{serv}, \qquad (4.7)$$

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. Економічний ефект від зменшення ENS: $V_{ENS} = VoLL \cdot \Delta ENS_{EE}$, де $VoLL$ – питома економічна оцінка вартості недопоставленої енергії.

Часову залежність системної цінності ЕЕ від режиму функціонування РЕС врахуємо як $\lambda_{EE,t} = -\partial F_{SoS} / \partial E_{load,t}$, де $\lambda_{EE,t}$ – часозалежна гранична системна цінність одиниці скороченого попиту, F_{SoS} – цільова функція системи систем, а $E_{load,t}$ –попит на енергію в момент часу t. Тоді системна цінність енергоефективності з урахуванням часової локалізації $V_{EE}^{time} = \sum_t \lambda_{EE,t} \Delta E_t^{EE}$, де у нормальному режимі $\lambda_{EE,t} = \lambda_{EE,t}^{normal}$, а у дефіцитному $\lambda_{EE,t} = \lambda_{EE,t}^{def}$. Тут $\lambda_{EE,t}^{normal}$ – гранична цінність ЕЕ у нормальному режимі, а $\lambda_{EE,t}^{def}$ – теж, у дефіцитному. При цьому $\lambda_{EE,t}^{def} > \lambda_{EE,t}^{normal}$, що означає, що одиниця енергії, заощаджена у дефіцитну годину, має більшу системну

цінність, ніж така сама одиниця економії за відсутності системних обмежень. Отже, сервіс енергоефективності повинен оцінюватися не лише через кількість зекономлених МВт·год, а й через часову структуру і просторову локалізацію цієї економії.

Аналогічні положення стосуються і доступності сервісу. Введемо коефіцієнт доступності сервісу $A_s = T_s^{avail}/T_s^{req}$, де T_s^{avail} – фактичний час доступності сервісу; T_s^{req} – необхідний час його доступності. Тоді, сервісно гарантований ефект $\Delta E_s^{guar} = A_s \cdot K_{pers} \cdot \Delta E_s^{ver}$, де K_{pers} – узагальнений коефіцієнт персистентності ефекту (здатності стану існувати довше, ніж процес, що створив його), ΔE_s^{ver} – верифікований результат сервісу s. Це дозволяє відрізняти номінально розрахований потенціал від результату, на який система реально може розраховувати та представити загальну логіку формування сервіс-орієнтованої енергоефективності як системної властивості РЕС у формалізованому вигляді:

$$R^{tech} \rightarrow S_{EE} \rightarrow \Delta E^{ver} \rightarrow \{\Delta P_{peak}, \Delta R, \Delta ENS, \Delta SSR, \Delta Em\} \rightarrow$$
$$\rightarrow \{\Delta I_{res}, \Delta I_{self}, \Delta I_{env}\} \rightarrow V_{EE}^{sys}. \quad (4.8)$$

Отже, сервіс із підвищення енергоефективності у запропонованій моделі виступає не просто засобом скорочення енергоспоживання, а керованим механізмом трансформації стану РЕС, здатним формувати одночасно енергетичний, економічний, екологічний ефекти та стійкість.

4.3. Засади включення сервісу енергоефективності у цільову функцію РЕС в умовах SoS-взаємодії підсистем

Аналіз сучасних публікацій показує, що питання включення керованих ресурсів попиту до оптимізації інтегрованих енергетичних систем активно розвивається, однак сервіс енергоефективності як самостійний ендогенний ресурс SoS та його системна цінність формалізуються значно рідше, оскільки переважна частина досліджень включає енергоефективність або керування попитом виключно через зміну профілю навантаження, не розмежовуючи первинний сервісний результат і похідні ефекти, що виникають в інших підсистемах. У той же час показано, що інтегрована реакція попиту може істотно змінювати режим роботи РЕС, використання ВДЕ та економічні

результати, а зміна попиту має системні наслідки, що виходять за межі самого споживача [112]. Ще більш уваги до цього ефекту приділяється у роботі [123], де взаємодія користувачів, спільного накопичувача та енергетичних станцій моделюється як багатоагентний процес, в іншій роботі [113] підтверджується, що локальна зміна режиму однієї підсистеми в просторово пов'язаних інтегрованих системах змінює міжрегіональні потоки та оптимальне функціонування інших підсистем. Тобто, сучасні дослідження наголошують, що результат функціонування РЕС, як системи систем, не зводиться до простої суми ефектів автономних компонентів, а визначається структурою їх взаємодії, що указує на важливість системно-узгодженого включення сервісу енергоефективності до цільової функції РЕС через створювану ним чисту системну цінність, яка враховує прямі та міжсистемні ефекти, що потребує визначення механізму, за яким локальний результат ЕЕ сервісу трансформується в системну цінність та включається до цільової функції РЕС в умовах взаємодії її підсистем.

Принципова особливість такої постановки полягає в тому, що в системі систем ЕЕ сервіс не може оцінюватися виключно за обсягом скорочення кінцевого енергоспоживання, оскільки зменшення споживання в одній підсистемі змінює потоки енергії, режими завантаження генеруючого та мережевого обладнання, потребу в резерві, накопиченні та зовнішньому постачанні, а через міжсекторні зв'язки може впливати на функціонування інших підсистем РЕС. Відповідно, однакова фізична економія енергії може мати різну системну цінність залежно від місця її виникнення, часу реалізації, поточного стану РЕС та характеру міжсистемних зв'язків.

У традиційній постановці вплив енергоефективності на попит зазвичай представлений як $D_{i,t}^{EE} = D_{i,t}^{base} - \Delta E_{i,t}^{EE}$, де $D_{i,t}^{base}$ – базовий попит у підсистемі i у період t; $\Delta E_{i,t}^{EE}$ – верифіковане скорочення споживання внаслідок реалізації сервісу енергоефективності, що є достатнім для оцінювання прямого результату сервісу, але недостатнім для SoS-постановки, оскільки не відображає поширення первинної зміни на інші елементи системи. Тому для РЕС як системи систем пропонується розрізняти первинний сервісний результат і похідний SoS-ефект, де первинний результат $\Delta e^{EE} =$

$[\Delta E_1^{EE}, \Delta E_2^{EE}, \dots, \Delta E_n^{EE}]^T$, а похідна зміна стану SoS $\Delta \mathrm{x}^{SoS} = \mathrm{H}^{EE} \Delta \mathrm{e}^{EE}$, де: H^{EE} – матриця поширення системного ефекту ЕЕ сервісу між взаємопов'язаними підсистемами РЕС; $\Delta \mathrm{e}^{EE}$ – вектор первинних результатів ЕЕ сервісу за підсистемами РЕС. Тут елементи $h_{ji}^{EE} = \partial x_j / \partial E_i$ матриці H^{EE} характеризують чутливість стану підсистеми j до зміни енергоспоживання в підсистемі i; x_j – показник або компонент стану підсистеми j; E_i – енергоспоживання або енергетичний потік підсистеми i. У цьому полягає принципова відмінність запропонованого підходу, за яким об'єктом оцінювання стає не лише величина заощадженої енергії, а сукупність змін, які ця економія спричиняє в системі систем.

Нехай РЕС складається з множини взаємопов'язаних підсистем:

$$\mathcal{S}^{RES} = \{S^{el}, S^{heat}, S^{gas}, S^{stor}, S^{net}, S^{serv}\}, \tag{4.9}$$

до яких входять електроенергетична, теплова, газова, накопичувальна, мережева та сервісна підсистеми і де первинний ЕЕ ефект в одній підсистемі не завжди може поширюватися через систему міжсистемних зв'язків $\Delta E_i^{EE} \to \Delta F_{ij} \to \Delta x_j \to \Delta F_{jk} \to \Delta x_k$. Тут F_{ij} характеризує енергетичний, функціональний або керуючий зв'язок між підсистемами i та j, а ΔF_{ij} – зміну міжсистемного потоку або зв'язку внаслідок сервісного впливу. Як наслідок, сервіс, фізичним результатом якого є скорочення електроспоживання, одночасно змінює потребу в генеруючій потужності, резерві та зовнішньому енергопостачанні і тому первинний ефект SoS не буде обмежуватися підсистемою його виникнення.

Для уникнення змішування фізичного результату сервісу з його системною цінністю доцільно розмежувати пряму складову ΔV_{EE}^{dir}, що формується безпосередньо в підсистемі, де реалізовано сервіс, від міжсистемної складової ΔV_{EE}^{cross}, яка виникає в інших підсистемах унаслідок зміни міжсистемних потоків та режимів. У розгорнутому вигляді:

$$\Delta V_{EE}^{SoS} = \Delta V_E + \Delta V_P + \Delta V_R + \Delta V_{ENS} + \Delta V_{self} + \Delta V_{flex} + \Delta V_{cross}, \tag{4.9}$$

де: $\Delta V_{EE}^{SoS} = \Delta V_{EE}^{dir} + \Delta V_{EE}^{cross}$ – сумарна зміна системної цінності внаслідок сервісу енергоефективності; ΔV_E – цінність прямого енергетичного ефекту; ΔV_P – цінність зміни параметрів потужності і пікового навантаження; ΔV_R – цінність зміни потреби

в резерві; ΔV_{ENS} – цінність зміни незабезпеченої енергії; ΔV_{self} – цінність зміни самодостатності; ΔV_{flex} – цінність зміни гнучкості; ΔV_{cross} – сукупна цінність міжсистемних ефектів. При цьому окремі складові не повинні автоматично підсумовуватися, якщо вони характеризують різні представлення одного й того самого фізичного результату.

Тобто, в умовах SoS однаковий обсяг економії енергії в різних підсистемах не є системно еквівалентним, тому $V_{EE}^{SoS} = f(i, t, \omega, \mathrm{x}, \mathrm{F})$, де i – локалізація сервісу; t – час; ω – сценарій; x – вектор поточного стану РЕС; F – вектор або сукупність міжсистемних потоків і зв'язків, що дозволяє сформулювати принцип просторово-часової диференціації системної цінності ЕЕ сервісу: цінність одиниці заощадженої енергії визначається не лише її фізичним обсягом, а місцем і часом виникнення відповідного ефекту в SoS.

Для сервісу s, реалізованого в підсистемі i РЕС, повну системну SoS-цінність визначено як $V_s^{SoS} = V_s^{dir} + V_s^{cross} + V_s^{res} + V_s^{self} + V_s^{flex} + V_s^{ecol}$, де: V_s^{dir} – пряма цінність скорочення енергоспоживання; V_s^{cross} – цінність міжсистемних ефектів; V_s^{res} – цінність внеску у стійкість; V_s^{self} – цінність внеску у самодостатність; V_s^{flex} – цінність додаткової гнучкості; V_s^{ecol} – цінність екологічного внеску. Чиста системна цінність сервісу s: $NV_s^{SoS} = V_s^{SoS} - C_s^{serv}$, де C_s^{serv} – повні приведені витрати на забезпечення сервісу.

Якщо одночасно реалізується множина сервісів $\mathcal{S}_{EE} = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, то $V^{SoS}(\mathcal{S}_{EE}) \neq \sum_{s \in \mathcal{S}_{EE}} V_s^{SoS}$ у загальному випадку. Причиною є те, що після реалізації першого сервісу змінюється стан системи, а отже, і гранична SoS-цінність наступного, тобто ранжування сервісів за ізольованою економічною ефективністю може не збігатися з їх оптимальною послідовністю або комбінацією в SoS.

Нехай $F_{RES}^{base}(\mathrm{u})$ – базова цільова функція РЕС без ЕЕ сервісу, тоді після включення множини сервісів $F_{RES}^{EE} = F_{RES}^{base} - V_{EE}^{SoS} + C_{EE}^{serv}$ або у розгорнутій оптимізаційній постановці

$$\min_{\mathrm{u}, \mathrm{y}^{EE}} \left[F_{RES}^{base}(\mathrm{u}) - V_{EE}^{SoS}(\mathrm{y}^{EE}, \mathrm{u}, \xi) + C_{EE}^{serv}(\mathrm{y}^{EE}) \right], \tag{4.10}$$

де: F_{RES}^{EE} – модифікована цільова функція РЕС після включення ЕЕ сервісу; u – вектор керуючих рішень РЕС; y^{EE} – вектор неперервних змінних масштабу ЕЕ сервісів; $V_{EE}^{SoS}(y^{EE}, u, \xi)$ – системна цінність портфеля сервісів за заданого керування та зовнішніх умов; $C_{EE}^{serv}(y^{EE})$ – сукупні витрати на реалізацію портфеля ЕЕ сервісів. Ця формула є центральною для параграфа, оскільки показує, що сервіс включається в цільову функцію не як арифметична величина енергозбереження, а через баланс між витратами на його реалізацію та створюваною ним системною цінністю з урахуванням взаємозалежності сервісів, де оптимальна конфігурація визначається як $\mathcal{S}_{EE}^{*} = \underset{\mathcal{S}_{EE}}{\operatorname{argmax}} [V^{SoS}(\mathcal{S}_{EE}) - C^{serv}(\mathcal{S}_{EE})]$, де $\mathcal{S}_{EE}^{*}$ – оптимальна множина ЕЕ сервісів, а $C^{serv}(\mathcal{S}_{EE})$ – сукупні витрати на задану комбінацію сервісів. За такого підходу оптимізаційна модель визначає не просто факт доцільності енергоефективності, а місце, час, тип сервісу та оптимальний масштаб його залучення.

Як наслідок, розглянуто постановку задачі оптимізації розвитку РЕС, що змінює сам принцип вибору енергоефективних заходів. Так, якщо у традиційній практиці пріоритет, як правило, визначається максимальною економією або мінімальним строком окупності, то у SoS-постановці критерієм стає чиста системна цінність сервісної конфігурації, за якою оптимальним може виявитися не сервіс із найбільшим абсолютним скороченням енергоспоживання, а сервіс, який реалізується в системно критичному місці або часовому періоді та забезпечує найбільше послаблення дефіцитних міжсистемних зв’язків.

4.4. Модель екологічної компоненти сервіс-орієнтованого розвитку РЕС

Екологічна компонента є невід’ємною складовою оцінювання сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем, оскільки трансформація структури виробництва, споживання, накопичення та керування енергетичними потоками безпосередньо змінює обсяги використання первинних енергоресурсів і пов’язане з ними екологічне навантаження [8, 12, 20, 116, 117]. Водночас у сервіс-орієнтованій парадигмі екологічний результат зводиться не лише до наслідків заміщення викопного палива відновлюваними джерелами, а потребує урахування

впливу енергоефективності, керування попитом, накопичення, гнучкості, локальної генерації, мікромереж та інших сервісів, які також змінюють структуру енергетичного балансу, режими завантаження генеруючих потужностей, обсяги імпорту, пікові навантаження і, відповідно, екологічні характеристики РЕС.

Сучасні дослідження інтегрованих енергетичних систем показують перехід від використання фіксованих агрегованих коефіцієнтів викидів до просторово-часового відстеження вуглецевих потоків, пов'язаних із реальними енергетичними потоками та режимами роботи системи, що має особливе значення для оцінювання екологічного результату енергосервісу, оскільки однакове скорочення енергоспоживання може забезпечувати різний ефект щодо викидів залежно від часу, джерела заміщеної генерації та структури міжсекторного енергообміну.

Модель змінного у часі вимірювання вуглецевої інтенсивності для інтегрованої енергосистеми представлено у роботі [124], де автори показали, що склад генеруючих джерел у різні часові інтервали суттєво впливає на вуглецеву ціну споживання та запропонували інтегроване енергетично-вуглецеве ціноутворення, яке впливає на поведінку споживачів і розподіл потоків. Автори роботи [125] пішли далі, об'єднавши в одній моделі багатовекторні енергетичні та вуглецеві потоки, та показали, що оптимальна конфігурація обладнання має визначатися одночасно за економічними й вуглецевими критеріями. Доцільність врахування не лише кількості, а й якості енергії через поєднання ексергетичних і вуглецевих потоків обґрунтовується в роботі [126], а багатокритеріальна постановка підтверджується [127], де автори одночасно оптимізують економічну ефективність, скорочення викидів та надійність регіональної інтегрованої системи, а також авторами [128], які доповнюють багатокритеріальну постановку невизначеністю прогнозів генерації й навантаження. Отже, сучасні результати підтверджують доцільність оцінювання екологічного результату сервісів через зміну реальних енергетичних і вуглецевих потоків, а не лише через середній статичний коефіцієнт викидів.

У загальному вигляді відповідний причинно-наслідковий зв'язок екологічних характеристик РЕС можна представити як $S_s \rightarrow \Delta \mathrm{x}_{RES} \rightarrow \Delta \mathrm{E} \rightarrow \Delta \mathrm{Em} \rightarrow V_{env,s}$, де S_s – сервіс s; $\Delta \mathrm{x}_{RES}$ – зміна стану і режиму РЕС; $\Delta \mathrm{E}$ – зміна енергетичних потоків; $\Delta \mathrm{Em}$ –

зміна екологічного навантаження; $V_{env,s}$ – екологічна цінність результату сервісу, в яких екологічний ефект розглядається не як автономна характеристика технології, а як результат зміни режиму функціонування всієї системи.

Для окремого виду забруднювача p обсяг викидів у період t може бути визначений як $Em_{p,t} = \sum_{i \in \mathcal{G}} EF_{i,p,t} E_{i,t}$ де $\mathcal{G}$ – множина джерел енергії; $EF_{i,p,t}$ – питомий коефіцієнт викидів забруднювача p для джерела i; $E_{i,t}$ – вироблена або використана енергія джерела i. При оцінюванні сервісного ефекту за зміною потужності $E_{i,t} = P_{i,t}\Delta t$, тому $Em_{p,t} = \sum_{i \in \mathcal{G}} EF_{i,p,t} P_{i,t} \Delta t$, а сумарні викиди за розрахунковий період $Em_p = \sum_t Em_{p,t}$. Для парникових газів використано CO_2-еквівалент $Em_{CO_2 eq} = \sum_g GWP_g \, Em_g$, де Em_g – маса парникового газу g; GWP_g – його потенціал глобального потепління відносно CO_2.

Для РЕС екологічна модель має багатосекторний характер $Em_{RES} = Em_{el} + Em_{heat} + Em_{gas} + Em_{fuel} + Em_{imp}$, що враховує викиди електроенергетичного сектору, теплопостачання, екологічний вплив використання та постачання газу, викиди, пов'язані з іншими видами палива, та еквівалентні викиди імпортованої енергії. Нехай Em^{base} – екологічне навантаження без реалізації сервісного рішення, а Em^{serv} – навантаження після його реалізації, тоді екологічний ефект сервісу $\Delta Em_s = Em^{base} - Em^{serv}$. У багатосекторній постановці

$$\Delta Em_s^{RES} = \sum_j (Em_j^{base} - Em_j^{serv}), \text{ де } j \text{ – індекс сервісу.} \qquad (4.11)$$

Для ЕЕ сервісу первинним результатом є скорочення енергоспоживання внаслідок сервісу енергоефективності $\Delta E_{EE} > 0$. Якщо скорочення енергоспоживання заміщує виробництво енергії з питомим коефіцієнтом викидів EF^{marg}, то $\Delta Em_{EE} = EF^{marg} \Delta E_{EE}$, а середній коефіцієнт викидів $EF^{avg} = Em/E$, де: EF^{marg} – граничний коефіцієнт викидів за період t; EF^{avg} – середній коефіцієнт викидів; ΔE_{EE} – економія енергії внаслідок ЕЕ сервісу. Питома екологічна результативність сервісу $\eta_{env}^{EE} = \Delta Em_{EE} / \Delta E_{EE}$.

Екологічний ефект локальної генерації та ВДЕ визначається як $\Delta Em_{DG} = Em^{displaced} - Em^{DG}$, де: ΔEm_{DG} – екологічний ефект локальної генерації; $Em^{displaced}$ – викиди заміщеної генерації; Em^{DG} – викиди локального джерела.

Економічні складові екологічного ефекту формалізовано як сукупність $C_{env} = \sum_p c_p^{env} Em_p$, $V_{env,s} = C_{env}^{base} - C_{env}^{serv}$ або $V_{env,s} = \sum_p c_p^{env} \Delta Em_{p,s}$, $V_{CO_2,s} = c_{CO_2} \Delta Em_{CO_2,s}$, де: C_{env} – монетизовані екологічні витрати; c_p^{env} – питома вартість викиду; $V_{env,s}$ – екологічна цінність сервісу; $V_{CO_2,s}$ – цінність скорочення CO_2; c_{CO_2} – ціна одиниці CO_2-еквіваленту.

Екологічної компоненти включено до цільової функції SoS у вигляді

$$\min TC_{SoS} = C_{tech} + C_{energy} + C_{serv} + C_{ENS} + C_{env}, \quad (4.12)$$

де: TC_{SoS} – сукупні системні витрати; C_{tech} – технологічні витрати; C_{energy} – витрати на енергію; C_{serv} – витрати на сервіси; C_{ENS} – вартість незабезпеченої енергії; екологічні витрати $C_{env} = f(\mathrm{u}, \mathrm{x}, \xi)$, де: u – вектор рішень; x – вектор стану; ξ – вектор невизначених факторів РЕС. Цільову функцію SoS у нормованій багатокритеріальній постановці визначено як

$$\max F_{SoS} = w_{EE}\widetilde{EE} + w_{res}\tilde{I}_{res} + w_{self}\widetilde{SSR} + w_{flex}\tilde{F} + w_{env}\tilde{I}_{env} - w_C\widetilde{TC}, \quad (4.13)$$

де: F_{SoS} – цільова функція SoS; $\widetilde{EE}$, $\tilde{I}_{res}$, $\widetilde{SSR}$, $\tilde{F}$, $\tilde{I}_{env}$, $\widetilde{TC}$ – нормовані показники; w_{EE}, w_{res}, w_{self}, w_{flex}, w_{env}, w_C – їх вагові коефіцієнти за умови $w_{EE} + w_{res} + +w_{self} + w_{flex} + w_{env} + w_C = 1$ та $Em_{CO_2eq} \le Em_{CO_2eq}^{max}$, $Em_p \le Em_p^{max}$.

Взаємозв'язок екологічності з самодостатністю РЕС визначається наступними співвідношеннями: якщо $\uparrow SSR$ забезпечується локальними ВДЕ, то $Em \downarrow$, якщо самодостатність підвищується через локальну викопну генерацію, можливе одночасне $SSR \uparrow$ та $Em \uparrow$. Аналогічно, взаємозв'язок екологічності зі стійкістю РЕС обмежується наступними співвідношеннями: резервна генерація може забезпечувати $I_{res} \uparrow$, але одночасно $Em \uparrow$, а комбінація $RES + BESS + EE + DR$ може заразом забезпечити $I_{res} \uparrow$ та $Em \downarrow$. Екологічна синергія сервісів i і j визначається як $Syn_{ij}^{env} = \Delta Em_{i+j} - \Delta Em_i - \Delta Em_j$, де: ΔEm_{i+j} – ефект їх комбінації. Якщо $Syn_{ij}^{env} > 0$, має місце позитивна екологічна синергія, якщо $Syn_{ij}^{env} < 0$, сервіси частково заміщують один одного або створюють додаткові втрати.

Інтегральний індекс екологічної результативності сервісу

$$I_{env,s} = \beta_1 \Delta\widetilde{CO}_2 + \beta_2 \Delta\widetilde{NO}_x + \beta_3 \Delta\widetilde{SO}_x + \beta_4 \Delta\widetilde{PM} + \beta_5 \Delta\tilde{E}_{imp}, \quad (4.14)$$

де: $\Delta\widetilde{CO}_2$, $\Delta\widetilde{NO}_x$, $\Delta\widetilde{SO}_x$, $\Delta\widetilde{PM}$, $\Delta\tilde{E}_{imp}$ – нормовані зміни відповідних показників; $\beta_1, \dots, \beta_5$ – ваги; $\sum_{j=1}^{5}\beta_j = 1$. Якщо екологічний ефект імпорту вже повністю включений через Em^{imp}, показник ΔE_{imp} не повинен повторно включатися до інтегрального індексу.

Узагальнена процедура моделювання екологічної компоненти SoS: $\mathrm{u}_s \to \Delta\mathrm{E}_s \to \Delta\mathrm{Em}_s \to \{I_{env,s}, V_{env,s}\} \to F_{SoS}$, де u_s – вектор рішень сервісу s; $\Delta\mathrm{E}_s$ – 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. При цьому $\Delta\mathrm{E}_s = \left[\Delta E_{el}, \Delta E_{heat}, \Delta E_{gas}, \Delta E_{fuel}, \Delta E_{imp}\right]$ – зміни відповідних енергоносіїв.

Таким чином, запропонована модель екологічної компоненти сервіс-орієнтованого розвитку РЕС ґрунтується на переході від традиційного статичного обліку викидів окремих технологій до системного оцінювання зміни екологічного навантаження, зумовленої сервісною трансформацією енергетичних потоків. При цьому враховується, що однаковий обсяг енергії може мати різну екологічну цінність залежно від часу її виробництва або споживання, структури граничної генерації та режиму РЕС. а підвищення стійкості або самодостатності не ототожнюється автоматично з екологічним поліпшенням, тому екологічні компоненти розглядаються спільно з критеріями вартості, енергоефективності, стійкості, гнучкості та самодостатності в межах багатокритеріальної SoS-оптимізації.

4.5. Цілісно-узгоджена модель забезпечення стійкості та самодостатності РЕС

Проблема побудови моделі, яка б достатньо повно задовольняла системні властивості стійкості та самодостатності РЕС, пов’язана з необхідністю цілісно-узгодженого урахування їх взаємозалежності, сервісної доступності і компромісу між вартістю, стійкістю та автономністю функціонування, враховуючи, що стійкість і самодостатність є взаємопов’язаними, але не тотожними властивостями, адже самодостатність характеризує спроможність РЕС покривати попит за рахунок локально доступних ресурсів, тоді як стійкість – здатність зберігати та/або оперативно

відновлювати виконання критичних функцій після збурення, тому високий рівень самодостатності може сприяти стійкості, однак сам по собі її не гарантує.

У сучасних дослідженнях стійкість інтегрованих енергетичних систем дедалі частіше розглядається не тільки як здатність уникати відмов, а як динамічна властивість системи зберігати критичні функції під час порушення та відновлювати їх у прийнятні строки. Особливо важливою є інтеграція електричних, теплових, газових, накопичувальних ресурсів, керування попитом та локального енергетичного обміну, оскільки саме їх координація створює додаткові можливості резервування та відновлення. Багатокритеріальну модель інтегрованої системи, яка одночасно враховує стійкість, економічні показники та викиди і поєднує ВДЕ, накопичення, обмін енергією та керування попитом запропоновано у роботі [129], де на розрахунковому прикладі показано суттєве зниження пікового навантаження та підвищення стійкості системи. У роботі [123] підтверджено, що кооперація систем накопичення енергії, споживачів та локальних енергетичних станцій підвищує не тільки економічність, а й гнучкість і здатність системи адаптуватися до змін режиму. У роботі [130] стійкість SoS формалізується через траєкторію втрати та відновлення функціональності і де оцінювання охоплює не тільки факт порушення, а й глибину деградації та швидкість відновлення. Автори роботи [131] на прикладі моделі регіональної та локальних інтегрованих систем показують, що під час аварійних станів міжсистемна кооперація та цінові стимули можуть забезпечувати взаємну підтримку локальних систем і підвищувати надійність регіонального енергопостачання. При цьому сучасна література переважно розглядає стійкість, надійність, гнучкість та енергетичну незалежність окремо, що створює потребу їх системно узгодженого представлення через сервісно-доступний резерв, критичну ENS, час відновлення, оперативну та сервісно-забезпечену самодостатність.

Для оцінювання стійкості будемо використовувати вже визначений раніше показник незабезпеченої енергії ENS, який конкретизуємо для критичного навантаження та доповнимо оцінкою наслідків порушення. Величину незабезпеченої енергії критичних споживачів визначимо 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 залучимо зважений показник $WENS = \sum_c \omega_c \, ENS_c$, де: $P_{crit,t}$ – потреба критичних споживачів в 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.

Для кожного часового інтервалу спочатку визначаємо $P_{def,t}^{crit} = max\big(0, P_{crit,t} - P_{sup,t}^{crit}\big)$, потім дефіцит потужності переводиться в незабезпечену енергію $ENS_t^{crit} = P_{def,t}^{crit} \Delta t$, і після підсумовування за всіма інтервалами отримуємо ENS^{crit}.

Для оцінювання швидкості відновлення вводиться показник $TTR = t_{rec} - t_{dist}$, де: TTR – час відновлення заданого рівня функціональності, год; t_{dist} – момент виникнення порушення; t_{rec} – момент відновлення заданого рівня функціональності, та визначається нормований індекс швидкості відновлення $I_{TTR} = 1 - TTR/TTR_{max}$, де TTR_{max} – максимально допустимий або нормований час відновлення.

Для відображення динаміки функціонування системи вводиться функція рівня сервісу $Q(t) \in [0,1]$, де $Q(t) = 1$ відповідає нормальному функціонуванню, а зниження $Q(t)$ характеризує втрату здатності РЕС забезпечувати необхідний енергетичний сервіс. Інтегральну втрату функціональності РЕС протягом періоду порушення та відновлення визначимо площею дефіциту системного сервісу $L_{res} = \int_{t_d}^{t_r} [Q_0 - Q(t)] \, dt$, де Q_0 – базовий рівень функціональності; t_d – момент збурення; t_r – момент відновлення, а інтегральний динамічний показник стійкості має вигляд $R_{int} = 1 - \int_{t_d}^{t_r} [Q_0 - Q(t)] \, dt / Q_0 (t_r - t_d)$, що дозволяє одночасно враховувати характеристики глибини падіння системної функціональності та швидкості її відновлення.

Сумарний сервісно-доступний резерв визначимо:

$$R_t^{serv} = R_t^{gen} + R_t^{BESS} + R_t^{DR} + R_t^{CHP} + R_t^{MG} + R_t^{imp}, \text{ МВт} \qquad (4.15)$$

де: R_t^{gen} – доступний резерв генеруючих потужностей; R_t^{BESS} – резерв, який може бути забезпечений системами накопичення електроенергії BESS; R_t^{DR} – резерв, що формується за рахунок керування попитом; R_t^{CHP} – доступний резерв когенераційних

установок; R_t^{MG} – резерв, доступний через локальні мікромережі; R_t^{imp} – доступний резерв зовнішнього постачання або імпорту.

Реально доступний резерв окремого ресурсу $R_{i,t}^{serv} = R_i^{tech} A_{i,t} C_{i,t}$, де R_i^{tech} – технічний резервний потенціал i-го ресурсу; $A_{i,t}$ – коефіцієнт технічної доступності; $C_{i,t}$ – коефіцієнт керованості та можливості активації ресурсу в необхідний момент. Умова достатності резерву $K_R \geq 1$, де коефіцієнт резервної достатності $K_R = R_t^{serv}/R_t^{req}$, де: R_t^{serv} – фактично доступний сервісний резерв; R_t^{req} – необхідний резерв для забезпечення заданого режиму роботи РЕС. Для критичної інфраструктури вводиться окремий коефіцієнт забезпечення критичного навантаження $CI_{backup} = P_{backup}^{avail}/P_{crit}$, де: P_{backup}^{avail} – доступна резервна потужність, яку реально можна спрямувати на критичних споживачів; P_{crit} – сукупна потужність критичного навантаження. Оскільки BESS та інші накопичувальні ресурси обмежені не лише потужністю, а й запасом енергії, фактично доступним для резервного енергозабезпечення, необхідною є додаткова умова $E_{backup}^{avail} \geq \int_{t_d}^{t_r} P_{crit}(t)dt$, де $P_{crit}(t)$ – критичне навантаження як функція часу. Тобто, резервна спроможність стійкості характеризується не тільки енергетичною, а й одночасно і достатністю у потужності.

Аналогічний підхід стосується і потребам переходу від балансової до оперативної та сервісно-забезпеченої самодостатності, адже балансовий SSR не враховує часової відповідності локальної генерації та попиту. Тому оперативну самодостатність у період t визначено як $SSR_t^{op} = \min\left(E_{local,t}^{avail}, E_{demand,t}\right)/E_{demand,t}$, і окремо за весь розрахунковий період як

$$SSR^{op} = \sum_t min\left(E_{local,t}^{avail}, E_{demand,t}\right) / \sum_t E_{demand,t}, \quad (4.16)$$

де: SSR_t^{op} – оперативний коефіцієнт самодостатності РЕС у період t; $E_{local,t}^{avail}$ – фактично доступний обсяг енергії з локальних ресурсів у період t; $E_{demand,t}$ – енергетичний попит у період t; $\min(\cdot)$ – оператор, що не дозволяє враховувати локальну генерацію понад фактичний попит як додаткову самодостатність та виключає ситуацію, коли надлишкова генерація одного періоду формально компенсує

дефіцит іншого. Для оцінювання зовнішньої залежності вводиться індекс зовнішньої енергетичної залежності $EDI = E_{imp}/E_{demand}$, де: E_{imp} – обсяг енергії, отриманої із зовнішніх джерел або ввезеної до РЕС; E_{demand} – загальний енергетичний попит РЕС.

Новим у моделі є показник сервісно-забезпеченої самодостатності

$$SSR_t^{serv} = SSR_t^{op} A_t^{local} F_t^{local} N_t^{avail}, \quad (4.17)$$

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. При цьому, $SSR^{serv} \neq SSR^{nominal}$, де $SSR^{nominal}$ – номінальна або балансова самодостатність, і саме SSR^{serv} характеризує здатність РЕС фактично використовувати наявний локальний ресурс у потрібний момент і в потрібній частині системи.

Підвищення самодостатності зменшує залежність від зовнішніх перетоків, але не гарантує стійкість, тому в моделі формалізовано функціональний зв'язок $I_{res} = f\left(SSR^{serv}, K_R, CI_{backup}, I_{TTR}, F\right)$, де: I_{res} – інтегральний індекс стійкості РЕС; SSR^{serv} – сервісно забезпечена самодостатність; K_R – коефіцієнт резервної достатності; CI_{backup} – коефіцієнт резервного забезпечення критичного навантаження; I_{TTR} – нормований індекс швидкості відновлення; F – показник доступної гнучкості РЕС; а для сценарного порівняння використано інтегральний індекс стійкості $I_{res} = \gamma_1 \tilde{k}_{stab} + \gamma_2 \widetilde{CI}_{backup} + \gamma_3 \tilde{I}_{TTR} + \gamma_4 \widetilde{K}_R + \gamma_5 \tilde{F}$, де: $\tilde{k}_{stab}$ – нормоване значення коефіцієнта збереження енергопостачання; k_{stab} – коефіцієнт збереження енергопостачання; $\widetilde{CI}_{backup}$ – нормований коефіцієнт резервного покриття; $\tilde{I}_{TTR}$ – нормований показник швидкості відновлення; $\widetilde{K}_R$ – нормований коефіцієнт резервної достатності; $\tilde{F}$ – нормований показник гнучкості; $\gamma_1, \dots, \gamma_5$ – вагові коефіцієнти компонент інтегрального індексу стійкості, $\sum_{j=1}^{5} \gamma_j = 1$.

Щоб уникнути компенсаційного ефекту, за якого критично низький рівень окремої компоненти може бути прихований високими значеннями інших, інтегральний показник доповнюється мінімальними системними обмеженнями: $k_{stab} \geq k_{stab}^{min}$; $CI_{backup} \geq CI_{backup}^{min}$; $TTR \leq TTR^{max}$; $K_R \geq K_R^{min}$.

Для відображення взаємного підсилення властивостей стійкості та самодостатності вводиться інтегральний індекс

$$I_{RS} = \theta I_{res} + (1-\theta) SSR^{serv} + \kappa I_{res} SSR^{serv}, \quad (4.18)$$

де: I_{RS} – узгоджений інтегральний індекс стійкості та сервісно забезпеченої самодостатності; I_{res} – інтегральний індекс стійкості; SSR^{serv} – сервісно забезпечена самодостатність; θ – коефіцієнт відносної пріоритетності стійкості, $0 \leq \theta \leq 1$; $(1-\theta)$ – відповідна вага самодостатності; κ – коефіцієнт синергетичної взаємодії стійкості та самодостатності. При $\kappa > 0$ враховується взаємне підсилення стійкості та самодостатності, при $\kappa = 0$ модель стає адитивною.

Граничну ефективність сервісних інвестицій визначено: за стійкістю $ME_s^{res} = \Delta I_{res,s}/\Delta TC_s$; за самодостатністю $ME_s^{self} = \Delta SSR_s^{serv}/\Delta TC_s$; та за узгодженим інтегральним показником $ME_s^{RS} = \Delta I_{RS,s}/\Delta TC_s$, де: ME_s^{res} – гранична ефективність інвестиції в s-й сервіс за критерієм стійкості; ME_s^{self} – гранична ефективність сервісу за критерієм самодостатності; ME_s^{RS} – гранична ефективність за узгодженим критерієм стійкості та самодостатності; $\Delta I_{res,s}$ – приріст інтегрального індексу стійкості завдяки сервісу s; ΔSSR_s^{serv} – приріст сервісно забезпеченої самодостатності; $\Delta I_{RS,s}$ – приріст узгодженого індексу; ΔTC_s – додаткові системні витрати на реалізацію s-го сервісу, що дозволяють оцінювати не абсолютну потужність або вартість сервісу, а приріст системної властивості на одиницю додаткових витрат.

Через неадитивність сервісних ефектів внесок окремих ресурсів до стійкості та самодостатності не може коректно визначатися простим порівнянням сценаріїв – для цього використано показник Шеплі

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} (|S|!\,(|N| - |S| - 1)!/|N|!)\,[v(S \cup \{i\}) - v(S)], \quad (4.19)$$

де: ϕ_i – значення показника Шеплі для i-го сервісу, тобто його середній граничний внесок у спільний системний результат; i – сервіс, внесок якого оцінюється; N – множина всіх сервісів; S – коаліція сервісів, яка не містить i; N_{-i} – множина всіх сервісів, крім i-го; $|S|$ – кількість сервісів у коаліції; $|N|$ – загальна кількість сервісів; ! – факторіал; $v(S)$ – характеристична функція коаліції S; $v(S+i)$ – системний результат після додавання i-го сервісу до коаліції S; $v(S+i)-v(S)$ – граничний внесок i-го сервісу в конкретну коаліцію. Характеристична функція коаліції визначається через приріст узгодженого індексу $v(S)=\Delta I_{RS}(S)$ або для окремої задачі через $v(S)=\Delta I_{res}(S)$, де $\Delta I_{RS}(S)$ – приріст узгодженого індексу, забезпечений коаліцією S, а $\Delta I_{res}(S)$ – приріст стійкості, забезпечений цією коаліцією. Показник Шеплі дозволяє розподілити загальний приріст системного результату між різними сервісами з урахуванням усіх можливих комбінацій їх взаємодії.

Новизна розглянутого підходу полягає у переході від оцінювання наявності локальних ресурсів і резервів до оцінювання їх фактичної сервісної спроможності у момент збурення, що дозволяє розглядати стійкість і самодостатність як керовані системні властивості, що формуються комбінацією технологічних і сервісних ресурсів та оптимізуються з урахуванням їх взаємного впливу.

4.6. Висновки до розділу

1. Розроблено формалізовану модель регіональної енергосистеми як системи систем у вигляді задачі багаторівневої оптимізації, у якій взаємопов’язані підсистеми РЕС узгоджуються за станами, енергетичними потоками, керуючими впливами, ресурсними та балансовими обмеженнями і системними критеріями. що забезпечує перехід від оптимізації окремих енергетичних об’єктів до узгодженого вибору технологічних і сервісних рішень на рівні РЕС з урахуванням міжсистемних зв’язків, обмежень та системних ефектів та створює математичну основу для подальшого включення до SoS-моделі показників енергоефективності, стійкості, самодостатності та екологічної результативності.

2. Формалізовано взаємозв’язок енергоефективності та сервісу з підвищення ефективності, відповідно до якого енергоефективність розглядається не лише як

характеристика технічного стану енергетичного об’єкта, а як вимірюваний системний результат цілеспрямованого сервісного впливу, встановлено причинно-наслідковий зв’язок між сервісним рішенням, зміною режиму функціонування РЕС, верифікованим скороченням енергоспоживання та формуванням системних ефектів, зокрема зменшенням пікового навантаження, незабезпеченої енергії, потреби у зовнішньому енергопостачанні та підвищенням самодостатності, що дозволило оцінювати сервіс з підвищення енергоефективності не тільки за величиною фізичної економії енергії, а за його внеском у сукупну ефективність функціонування РЕС.

3. Розроблено засади включення сервісу енергоефективності до цільової функції SoS, що реалізують перехід від традиційного розгляду ЕЕ-сервісу як заходу з енергозбереження до ендогенного керованого ресурсу розвитку РЕС та дозволяють формалізувати сервісний вплив енергоефективності через зміну системних витрат, енергоспоживання, пікового навантаження, ENS, самодостатності та інших цільових характеристик, які визначаються за приростом системної цінності з урахуванням вартості реалізації.

4. Сформовано матрицю поширення системного ефекту енергоефективності, розмежовано прямі та міжсистемні складові цінності сервісу, встановлено його просторово-часову, станозалежну та сценарну неоднорідність, а для кількісного оцінювання визначено показник граничної SoS-цінності енергоефективності та коефіцієнти системної мультиплікації і міжсистемної зв’язності, що дозволило сформулювати механізм включення сервісу енергоефективності до цільової функції РЕС та перейти від традиційного принципу вибору заходів за максимальним скороченням енергоспоживання до принципу максимізації чистої системної цінності сервісу в умовах взаємодії підсистем РЕС.

5. Сформовано модель екологічної компоненти сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, яка забезпечує перехід від статичного оцінювання екологічності окремих технологій до визначення екологічної результативності сервісних рішень через спричинену ними зміну енергетичних потоків і структури генерації з урахуванням часової неоднорідності вуглецевої інтенсивності, граничних коефіцієнтів викидів, міжсекторного перенесення екологічного навантаження та неадитивності ефектів

сервісів, що дає змогу включати представлення екологічного результату до цільової функції та системи обмежень SoS-моделі поряд з економічними і сервісними критеріями.

6. Розроблено модель цілісно-узгодженого забезпечення стійкості та самодостатності РЕС, які розглядають ці властивості як взаємопов'язані, але не взаємозамінні результати сервіс-орієнтованого розвитку, проведено: поглиблене оцінювання стійкості через критичну та зважену незабезпечену енергію, час і динаміку відновлення функціональності, сервісно-доступний резерв та резервне покриття критичного навантаження; базовий показник самодостатності розвинуто до оперативної та сервісно-забезпеченої самодостатності, що враховує фактичну доступність, керованість і мережеву досяжність локальних ресурсів; для узгодженого вибору рішень запропоновано інтегральний індекс стійкості, узгоджений індекс стійкості та самодостатності, фронтир «вартість – стійкість – самодостатність», тіньові ціни стійкості й самодостатності, показники граничної ефективності сервісних інвестицій та оцінювання внеску окремих сервісів за показником Шеплі.

7. У підсумку, сформовано цілісну математичну основу узгодженого сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, що на відміну від ізольованої оптимізації окремих технологій або показників, дає змогу визначати конфігурації технологічних і сервісних ресурсів, за яких підвищення однієї системної властивості узгоджується з впливом на інші, а компроміси між витратами, енергоефективністю, екологічністю, стійкістю та самодостатністю стають предметом кількісного багатокритеріального оцінювання.

РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ РОЗВИТКУ РЕС В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

5.1. Методичний інструментарій моделювання розвитку РЕС в умовах невизначеності

Моделювання розвитку регіональних енергосистем належить до класу довгострокових системних задач, для яких характерні неповнота інформації, множинність траєкторій розвитку, взаємозалежність технічних, економічних, екологічних, інституційних і соціальних чинників, а також неможливість однозначного прогнозування майбутніх умов функціонування через зростання частки ВДЕ, поширення розподіленої генерації, накопичувачів енергії, керування попитом, цифровізації та секторного інтегрування, які підвищують роль невизначеності під час обґрунтування напрямів розвитку [132-135].

У цих умовах традиційна детермінована постановка, за якої кожному вхідному параметру відповідає одне наперед задане значення, не забезпечує достатньої обґрунтованості довгострокових рішень – оптимальне для одного з прогнозованих станів, воно може втрачати економічну ефективність або навіть допустимість за іншої реалізації зовнішніх умов, тому предметом моделювання має бути не лише оптимальність рішення для базового прогнозу, а й стійкість його результативності відносно множини можливих станів РЕС [136-138].

Невизначеність є поняттям, що характеризує неповноту знань щодо майбутніх значень параметрів, структури системи, зовнішніх умов або закономірностей їх зміни, за яких сторони можуть не мати достатніх підстав для узгодження ймовірностей, моделей або навіть переліку релевантних майбутніх станів, що обумовлює застосування підходів прийняття рішень в умовах глибокої невизначеності (DMDU), де потенційні рішення оцінюються за кількома можливими майбутніми сценаріями [136]. Тому, вибір адекватного математичного інструментарію має обґрунтовано розрізняти параметричну, стохастичну, інтервальну, нечітку, сценарну, структурну, екстремальну та глибоку невизначеність, що підтверджується сучасними оглядами, у яких наголошується на необхідності пов’язувати спосіб формалізації невизначеності

з природою вихідних даних і постановкою задачі, а не використовувати один універсальний підхід [133, 139, 140].

Параметрична невизначеність, до якої для РЕС належать CAPEX та OPEX технології, ККД, ставки дисконтування, вартість палива, величини попиту, ціна електроенергії, доступна потужність керування попитом тощо, виникає, коли структура моделі відома, але значення окремих параметрів задані неточно або можуть змінюватися у визначеному діапазоні. Стохастична невизначеність стосується параметрів, для яких існують підстави застосовувати ймовірнісні розподіли, зокрема погодо-залежного виробництва ВДЕ, короткострокових коливань навантаження та випадкових відмов [132, 139]. Сценарна і структурна невизначеність пов’язані з існуванням декількох внутрішньо узгоджених, але якісно відмінних траєкторій майбутнього, обумовлених різними темпами декарбонізації, електрифікації, розвитку ВДЕ, накопичення, локальної генерації, зміною регуляторних умов та інфраструктурних обмежень. Екстремальна невизначеність охоплює рідкісні, але критичні стани – дефіцит енергоресурсів, втрату зовнішніх зв’язків, пошкодження активів, тривалі періоди низької генерації ВДЕ або пікових навантажень. Глибока невизначеність виникає тоді, коли немає достатніх підстав достовірно встановити не лише значення параметрів, а й їхні розподіли, взаємозв’язки чи майбутню структуру системи [136, 138].

Результати проведеного у роботі огляду сучасних досліджень методів аналізу та оптимізації енергосистем не виявили існування єдиного методу, однаково ефективного для всіх типів невизначеності, навпаки, вони виокремлюють стохастичну, обмежено-ймовірнісну, робастну та розподілено-робастну оптимізацію, водночас широко використовуючи довгострокове енергетичне планування, сценарії, аналіз чутливості та імітаційні процедури [132, 133, 139], тим самим підтверджуючи доцільність багаторівневої комбінації методів дослідження РЕС з урахуванням невизначеності.

Розроблену класифікацію груп невизначености, прикладів їх застосування для РЕС та переважний характер представлено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Відповідність джерел невизначеності методам урахування

Група невизначеності	Приклади для РЕС	Переважний характер
Попит	Електричне/теплове навантаження, піковий попит	Стохастичний / сценарний
ВДЕ	Сонячна радіація, вітер, виробіток Сонячні/Вітрові	Стохастичний
Технології	CAPEX, OPEX, ККД, ресурс, строки впровадження	Параметричний / сценарний
Ринки	Ціни електроенергії, газу, палива	Стохастичний / сценарний
Інвестиції	Вартість капіталу, доступність фінансування	Параметричний / нечіткий
Інфраструктура	Пропускна спроможність, аварійність, доступність	Стохастичний / стресовий
Політика і регулювання	Тарифи, стимули, екологічні обмеження	Сценарний / глибокий
Безпекові чинники	Пошкодження активів, дефіцит постачання	Стресовий / глибокий
Поведінкові чинники	Реакція споживачів на DR, прийняття технологій	Нечіткий / сценарний
Сервісні параметри	Гнучкість, резервування, швидкість відновлення	Змішаний

Сценарний аналіз, призначення якого полягає у формуванні множини внутрішньо узгоджених можливих станів енергосистеми, використовується як базовий структуроутворюючий інструмент, придатний для довгострокових структурних та інституційних невизначеностей, для яких визначення імовірностей не може бути достатньо обґрунтованим [133, 136]. Формалізація методології сценарного аналізу РЕС в узагальненій форми описується наступним чином. Задається множина $\mathcal{S}$ сценаріїв розвитку РЕС $\mathcal{S} = \{S_0, S_1, \dots, S_N\}$, де: S_0 – базовий (референтний) сценарій розвитку РЕС; $S_1, \dots, S_N$ – альтернативні сценарії розвитку РЕС. Кожний S_s сценарій характеризується сукупністю параметрів попиту, генерації, вартості, технологій, інфраструктури, ризику та зовнішніх умов $S_s = \{D_s, G_s, C_s, T_s, I_s, R_s, E_s\}$, де: D_s – вектор параметрів попиту в s-му сценарії: обсяги та профілі електричного/теплового навантаження, піковий попит тощо; G_s – вектор параметрів генерації та ресурсного забезпечення в s-му сценарії, включаючи доступність і виробіток генеруючих джерел; C_s – вектор економічних і цінових параметрів s-го сценарію (CAPEX, OPEX, ціни енергоресурсів, тарифи та інші вартісні характеристики); T_s – вектор технологічних параметрів s-го сценарію (ККД, ресурс обладнання, технологічні обмеження, темпи впровадження технологій); I_s – вектор інфраструктурних параметрів s-го сценарію (пропускна спроможність, доступність мереж та інших інфраструктурних активів); R_s

– вектор параметрів ризику в s-му сценарії (аварійність, імовірність/масштаб дефіцитів, відмов та інших несприятливих подій); E_s – вектор зовнішніх умов s-го сценарію (регуляторні, ринкові, природно-кліматичні, інституційні та безпекові чинники). Для заданого вектору 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); $F(\cdot)$ – цільова або результуюча функція моделі, що встановлює залежність показника результативності від керованих рішень і невизначених умов. Сценарії можуть формуватися на основі вибіркового генерування та подальшого скорочення сценарного набору, наклад поєднанням гіперкубічної вибірки, кластеризації та багатокритеріальної оптимізації [128].

Стохастичне програмування є доцільним за наявності обґрунтованих імовірнісних характеристик невизначених параметрів. оскільки дозволяє мінімізувати очікувані витрати або інший критерій з урахуванням випадковості, що особливо корисне для погодозалежної генерації, попиту й відмов обладнання [132, 139]. Мінімізується оператор математичного сподівання $\mathbb{E}_\xi[F(\cdot)]$ за розподілом випадкового вектору ξ: $\min_x \mathbb{E}_\xi[F(x,\xi)]$, де ξ – вектор випадкових або невизначених параметрів моделі за умов $G(x,\xi) \leq 0$, де *G(x, ξ)* – вектор функцій обмежень стохастичної оптимізаційної задачі. У двоетапній постановці частина рішень приймається до реалізації невизначеності, а коригувальні рішення – після її спостереження: $\min_x \left[C^I(x) + \mathbb{E}_\xi\, Q(x,\xi)\right]$, де: $C^I(x)$ – витрати (або інший критерій) першого етапу розв'язання стохастичної моделі; *Q(x, ξ)* – оптимальне значення коригувальної задачі другого етапу після реалізації невизначеності *ξ*. Для РЕС перший етап може включати інвестиційні рішення щодо PV, BESS, CHP, P2H, резервної генерації або мережевих активів, а другий – режими експлуатації, керування попитом, заряджання/розряджання накопичувачів і обмін з ІЕС. Разом з тим необхідність

достовірного задання розподілів обмежує застосування стохастичного програмування для глибокої та структурної невизначеності.

Робастна оптимізація орієнтована на пошук рішень, які залишаються допустимими та прийнятними в межах заданої множини невизначеності без необхідності задавати точний розподіл імовірностей, що стимулювало широке використання двоетапної робастної оптимізації в задачах планування та диспетчеризації енергосистем [134, 141]: $\min_{x} \max_{\xi \in \mathcal{U}} F(x, \xi)$, $\xi \in \mathcal{U}$, де $\mathcal{U}$ – задана множина невизначеності, у межах якої можуть змінюватися невизначені параметри. Основним недоліком класичного найгіршого (worst-case) підходу є можливий надмірний консерватизм, тому доцільно оцінювати ціну робастності та поєднувати робастну допустимість із regret-критеріями (критеріями жалю) [137, 142], наприклад $PoR = (F^{rob} - F^{det})/F^{det} \cdot 100\%$, де: PoR – ціна робастності або відносна зміна цільової функції при переході від детермінованого до робастного рішення; F^{rob} – значення цільової функції для робастного рішення; F^{det} – значення цільової функції для детермінованого рішення.

Нечітке моделювання є доцільним для параметрів, щодо яких відсутня достатня статистична база, але доступні експертні інтервали або лінгвістичні оцінки, які доцільно розглядати як допоміжний, а не універсальний інструмент, оскільки результат залежить від обґрунтованості функцій належності [133, 134]. У контексті РЕС це можуть бути темпи прийняття технологій, інвестиційна привабливість, поведінкова реакція споживачів або окремі інституційні характеристики. Задається нечіткий параметр $\tilde{p}$, поданий, зокрема, трикутним нечітким числом $\tilde{p} = (p^L, p^M, p^U)$, де: p^L – нижня межа нечіткого параметра $\tilde{p}$; p^M – модальне (найбільш характерне/очікуване) значення нечіткого параметра $\tilde{p}$; p^U – верхня межа нечіткого параметра $\tilde{p}$.

Метод Монте-Карло забезпечує кількісне поширення невизначеності вхідних параметрів на результати моделі. Його перевагою є можливість одержання емпіричних розподілів результуючих показників, довірчих інтервалів, квантилів і ймовірностей порушення обмежень, завдяки чому метод доцільно використовувати

передусім як інструмент кількісної оцінки невизначеності та перевірки стійкості результатів, а не як самостійну оптимізаційну модель [139, 140]:

$\xi^{(k)} = \left\{\xi_1^{(k)}, \xi_2^{(k)}, \dots, \xi_m^{(k)}\right\}$, $Y^{(k)} = F\left(x, \xi^{(k)}\right), k = 1, \dots, N_{MC}$, $\bar{Y} = \frac{1}{N_{MC}} \sum_{k=1}^{N_{MC}} Y^{(k)}$,

$\sigma_Y = \sqrt{\frac{1}{N_{MC}-1} \sum_{k=1}^{N_{MC}} (Y^{(k)} - \bar{Y})^2}$, $P\left(Y > Y^{lim}\right)$, де: $\xi^{(k)}$ – вектор значень невизначених параметрів у k-й реалізації методу Монте-Карло; $m \in M$ – кількість невизначених вхідних параметрів у векторі ξ; k – номер окремої реалізації (вибірки) Монте-Карло; $Y^{(k)}$ – значення результуючого показника Y, отримане в k-й реалізації Монте-Карло; N_{MC} – загальна кількість реалізацій Монте-Карло; $\bar{Y}$ – вибіркове середнє значення результуючого показника Y за всіма реалізаціями Монте-Карло; σ_Y – вибіркове стандартне відхилення результуючого показника Y; Y^{lim} – граничне (допустиме або критичне) значення результуючого показника Y; $P\left(Y > Y^{lim}\right)$ – імовірність перевищення результуючим показником установленого граничного значення, знак нерівності змінюється, якщо небажаним є зниження показника.

Аналіз чутливості спрямований на визначення параметрів, варіація яких найбільше впливає на результати та вибір рішення, що є особливо важливим для великорозмірних енергетичних моделей, оскільки дає змогу досліджувати спільну варіацію параметрів та підвищувати прозорість моделі [143, 144]: $S_i = \partial Y / \partial p_i$, $E_i = \partial Y / \partial p_i \cdot p_i / Y$, де: S_i – локальний коефіцієнт чутливості результату Y до зміни і-го параметра p_i – вхідного параметра моделі, відносно якого оцінюється чутливість; E_i – нормований коефіцієнт чутливості (еластичність) результату Y до параметра p_i. У задачах РЕС аналіз чутливості доцільно застосувати до CAPEX BESS, вартості палива та електроенергії, попиту, доступності ВДЕ, VoLL, ставки дисконтування, керування попитом, вартості резервування та інших параметрів, за результатами аналізу яких формується підмножина критичних невизначеностей, що підлягають подальшому сценарному та імітаційному дослідженню.

Стрес-тестування відрізняється від звичайного аналізу чутливості цілеспрямованим формуванням критичних або екстремальних станів, якими для РЕС можуть бути тривале обмеження зовнішнього електропостачання, дефіцит газу чи

палива, пошкодження ключових активів, екстремальне пікове навантаження, тривалий період низького виробництва ВДЕ або одночасна реалізація декількох несприятливих чинників. У цьому разі оцінюється не середня ефективність, а межа працездатності та ступінь деградації системних і сервісних показників $D_Y = (Y^{stress} - Y^{base})/Y^{base}$, де: D_Y – відносний ступінь зміни (деградації або покращення) показника Y у стресовому стані порівняно з базовим; Y^{stress} – значення результуючого показника в умовах стресового (критичного) сценарію; Y^{base} – значення того самого показника у базовому стані/сценарії.

Концепція прийняття рішень в умовах глибокої невизначеності (DMDU) зміщує акцент із пошуку рішення, оптимального для одного погодженого прогнозу, на пошук рішень, які демонструють прийнятну результативність у широкому просторі можливих майбутніх станів. Системний огляд [136] показує, що для енергетичних систем жоден окремий DMDU-метод не охоплює всі джерела глибокої невизначеності, що обґрунтовує застосування цілісно узгодженої сукупності методів. У [138] запропонували орієнтовану на прийняття рішень систему методів, що враховує різні сценарії та багатоцільові завдання, застосовуючи стохастичне програмування, робастну оптимізація та minimax regret для планування розвитку енергосистем. Для порівняння альтернатив доцільним виявився критерій мінімаксного жалю (minimax regret), який оцінює втрату від вибору рішення порівняно з найкращим рішенням, яке могло б бути прийняте за умови достовірного знання конкретного сценарію [137, 142] $R(x,s) = F(x,s) - F(x_s^*,s)$, $x^* = \operatorname{argmin}_x \max_s R(x,s)$, де: R(x, s) – втрата/«жаль» від застосування рішення x у сценарії s порівняно з найкращим рішенням, яке могло б бути прийняте за достовірного знання цього сценарію; x_s^* – оптимальне рішення для конкретного сценарію s за умови, що цей сценарій відомий наперед; argmin – оператор визначення аргументу (значення змінної), за якого цільова функція набуває мінімального значення; x* – рішення, вибране за критерієм minimax regret, тобто таке, що мінімізує максимальне значення жалю серед усіх сценаріїв.

Окремого розгляду потребує *метод урахування ендогенної невизначеності*, параметри застосування якого у плануванні та експлуатації енергосистем залежать від

прийнятого рішення (decision-dependent uncertainty, DDU) [145]. Для сервіс-орієнтованого розвитку РЕС такий підхід є принципово важливим, адже встановлення BESS, розвиток керування попитом, локальної генерації, мікромереж, резервування або цифрових сервісів не лише змінюють значення цільової функції, а й можуть змінювати архітектуру системи в процесі її оптимального розвитку [146, 147].

Проведена систематизація свідчить, що різні види невизначеності розвитку РЕС потребують різних форм математичного представлення, тому використання єдиного універсального методу для всіх невизначених параметрів є методологічно недостатнім [132, 136, 138]. Найбільш обґрунтованою є цілісно узгоджена схема, представлена на рисунку 5.1, у якій кожний метод виконує визначену функцію на відповідному етапі дослідження.

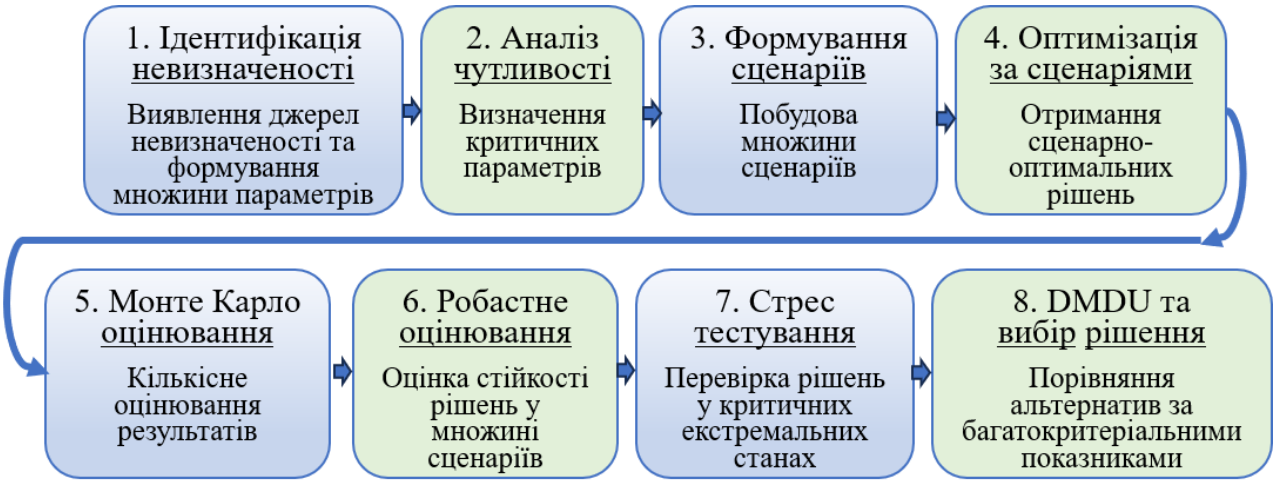


Рис. 5.1. Послідовність етапів моделювання розвитку РЕС в умовах невизначеності

На першому етапі формується множина невизначених параметрів, після чого на другому етапі проводиться аналіз чутливості для виділення підмножини критичних параметрів, на третьому – формується сценарний простір, а на четвертому – для кожного сценарію розв’язується сценарно-оптимізаційна задача. На п’ятому етапі використовується Монте Карло для кількісного оцінювання поширення параметричної невизначеності на результати, на шостому – робастне оцінювання і regret-критерії визначають стійкість альтернатив, на сьомому – стрес-тестування перевіряє працездатність системи в критичних станах і на завершальному восьмому етапі DMDU виконує інтегруючу функцію підтримки вибору. Стохастичне програмування при цьому не виключається з методичного апарату, але застосовується

за наявності достатньої статистичної бази, а нечітке моделювання – для експертних та слабко формалізованих параметрів, що запобігає необґрунтованому ускладненню моделі та одночасно зберігає відповідність математичного інструменту природі конкретної невизначеності.

Для подальшого дослідження, ядро методичного інструментарію формують п’ять взаємопов’язаних компонентів: сценарне моделювання; оптимізація; аналіз чутливості; кількісне оцінювання невизначеності; робастне оцінювання та стрес-тестування; DMDU розглядається як інтегруюча логіка прийняття рішення, а стохастичні й нечіткі моделі – як спеціалізовані засоби для відповідних типів невизначеності. Тобто, запропонований методичний інструментарій формується не як механічна сукупність незалежних методів, а як послідовна процедура перетворення невизначеності вихідних умов на кількісно обґрунтоване та перевірене на стійкість рішення щодо сервіс-орієнтованого розвитку РЕС.

5.2. Базові положення сценарного моделювання розвитку РЕС в умовах невизначеності

Сучасні дослідження енергетичних і електроенергетичних систем розглядають сценарний аналіз як один із ключових засобів опису невизначеності в умовах за високої частки ВДЕ, варіативності попиту та структурних змін у системі [132, 133, 148]. З урахуванням особливостей формування та прояву невизначеності у процесах розвитку РЕС це обумовлює необхідність переходу від детермінованого прогнозування до сценарного представлення можливих станів і траєкторій розвитку РЕС, яке трактується не як просте варіювання окремих вихідних параметрів, а як методичний інструмент формування внутрішньо узгоджених сукупностей умов, за яких досліджуються структурні, технологічні та сервісні рішення щодо розвитку РЕС.

На відміну від прогнозного підходу, спрямованого переважно на визначення найбільш імовірного майбутнього стану системи, сценарне моделювання передбачає дослідження множини альтернативних станів без необхідності апріорного твердження про реалізацію одного з них, що особливо важливо для довгострокового розвитку РЕС, де невизначеними є не лише числові значення попиту, цін, вартості технологій або обсягів генерації ВДЕ, але й структура енергозабезпечення, масштаби

децентралізації, розвиток накопичення, керування попитом, характер взаємодії з ІЕС, а також рівень необхідної стійкості до зовнішніх збурень [134, 136, 140].

Відповідно, сценарій розвитку РЕС пропонується визначати як внутрішньо узгоджену сукупність екзогенних умов, параметрів системи, керованих впливів та обмежень, яка характеризує один із можливих варіантів її функціонування і трансформації протягом заданого часового горизонту та використовується для кількісного оцінювання наслідків прийняття відповідних рішень.

За таким визначенням принципово розмежовуються поняття сценарію і прогнозу, де прогноз характеризує очікуваний розвиток певного показника або системи за визначених припущень, тоді як сценарій є комплексним описом можливого майбутнього стану і не обов'язково характеризується найбільшою ймовірністю реалізації. Така постановка узгоджується з підходами прийняття рішень в умовах глибокої невизначеності (DMDU), у яких акцент переноситься з пошуку одного «найбільш імовірного» майбутнього на перевірку рішень у широкому просторі можливих станів [136-138].

Для математичного представлення сценарного розвитку введемо множину можливих сценаріїв $\mathcal{S} = \{S_0, S_1, \dots, S_s, \dots, S_N\}$, де $\mathcal{S}$ – множина сценаріїв розвитку РЕС; S_0 – базовий сценарій; S_s – окремий s-й сценарій; N – кількість альтернативних сценаріїв. Тут базовий сценарій S_0 характеризує інерційний розвиток системи за збереження основних структурних співвідношень і без реалізації додаткових сервіс-орієнтованих заходів понад уже передбачених або наявних та створює референтну основу для визначення ефектів альтернативних сценаріїв.

Кожний сценарій формується як багатовимірний вектор $S_s = \{\mathrm{D}_s, \mathrm{R}_s, \mathrm{T}_s, \mathrm{C}_s, \mathrm{I}_s, \mathrm{B}_s, \mathrm{M}_s\}$, де D_s – параметри попиту на енергетичні ресурси та сервіси; R_s – параметри ресурсного забезпечення та доступності генерації; T_s – технологічні параметри; C_s – економічні та вартісні параметри; I_s – інфраструктурні умови; B_s – безпекові параметри; M_s – параметри сервісних механізмів та управлінських впливів, що дозволяє відокремити екзогенні сценарні умови від ендогенних керованих змінних моделі.

У сучасних роботах з оптимізації енергосистем під невизначеністю таке розмежування є принциповим для коректної постановки стохастичних, робастних і сценарних задач [132, 141, 142]. Наприклад, ціна природного газу, рівень попиту або доступність зовнішнього енергопостачання є сценарними параметрами, тоді як оптимальна потужність BESS, обсяг використання DR або структура локальної генерації мають визначатися моделлю.

У загальному випадку множину параметрів моделі доцільно подати як $\Theta = \Theta^{fix} \cup \Theta^{unc} \cup X$, де Θ^{fix} – множина детермінованих параметрів; Θ^{unc} – множина невизначених параметрів; X – множина керованих змінних, що дозволяє з урахуванням результатів аналізу чутливості із множини невизначених параметрів виділяти підмножину критичних. Це особливо доцільне у великорозмірних енергетичних моделях, де повний перебір комбінацій потребує надмірних обчислювальних витрат [143] $\Theta^{crit} = \{\theta_i \in \Theta^{unc} : |E_i| \geq E^{lim}\}$, де Θ^{crit} – множина критичних параметрів; E_i – коефіцієнт чутливості результуючого показника до зміни параметра θ_i; E^{lim} – граничне значення чутливості, прийняте для відбору параметрів.

За таким підходом, до сценарного простору включаються передусім ті параметри, зміна яких здатна суттєво впливати на структуру оптимального рішення або цільові показники РЕС, що дозволяє уникнути комбінаторного зростання кількості сценаріїв і узгоджується з практикою генерування та скорочення сценаріїв у сучасних енергетичних моделях [128, 140, 148].

Для задач сервіс-орієнтованого розвитку РЕС сценарні фактори пропонується систематизувати за наступними взаємопов’язаними групами:

1. Попит і структура споживання, до якої належать загальний попит на електричну та теплову енергію, часові профілі навантаження, пікові значення, електрифікація окремих видів кінцевого споживання, зміна енергоємності та можливість керування попитом і де невизначеність попиту є одним із базових джерел ризику як для довгострокового планування, так і для функціонування РЕС [133, 149].

2. Ресурсне забезпечення, що враховує доступність традиційних енергоресурсів, потенціал ВДЕ, обмеження зовнішнього енергопостачання, доступність локальної генерації та можливості енергетичного обміну з ІЕС і де для погодозалежної генерації

сценарне представлення може поєднуватися зі стохастичними або робастними підходами [132, 139].

3. Технологічний розвиток, де сценарними параметрами виступають CAPEX і OPEX технологій, їх ККД, ресурс, темпи впровадження ВДЕ, BESS, CHP, P2H, EV, мікромереж та інших технологій і де технологічна невизначеність є особливо значущою у довгострокових моделях енергетичних трансформацій [133, 136].

4. Економічні та ринкові умови, до яких належать ціни електроенергії, природного газу та інших видів палива, вартість капіталу, ставки дисконтування, тарифи, вартість викидів та економічна оцінка незабезпеченої енергії, що часто формують значну частину невизначеності результатів [139].

5. Інфраструктурні умови, що враховують пропускну спроможність мереж, доступність міжсистемних зв'язків, можливості підключення розподілених ресурсів, обмеження локальної інфраструктури та необхідність її модернізації [150, 151].

6. Безпекові та стресові умови, до яких належать часткове або тривале обмеження зовнішнього енергопостачання, пошкодження окремих активів, дефіцит палива, порушення логістики, зниження доступності генеруючих або мережевих потужностей і де найбільш доцільним є поєднання сценарного опису, робастного аналізу та стрес-тестування [134, 142, 152].

7. Сервісні та управлінські механізми, що враховують масштаби використання DR, накопичення, резервування, агрегування розподілених ресурсів, мікромереж, ЕСКО та інших механізмів, спрямованих на підвищення енергоефективності, гнучкості, стійкості та самодостатності РЕС, які істотно змінюють як оптимальну конфігурацію, так і реакцію системи на невизначеність [128, 149, 152].

Для кожного критичного параметра θ_i задається множина сценарних рівнів $L_i = \{\theta_i^L, \theta_i^B, \theta_i^H\}$, де θ_i^L, θ_i^B, θ_i^H – відповідно нижній, базовий та верхній сценарні рівні параметра. Механічне комбінування всіх рівнів усіх параметрів є недоцільним. оскільки за m параметрів і трьох рівнів кожного з них повний факторний простір містив би $N_{full} = 3^m$ комбінацій, що уже за десяти параметрів становить 59049 варіантів, значна частина яких може бути внутрішньо суперечливою або практично нерелевантною. Тому пропонується застосовувати принцип узгодженого сценарного

конструювання, за якого окремі рівні параметрів об’єднуються у логічно несуперечливі сценарії відповідно до причинно-наслідкових зв’язків між ними, що відповідає сучасним практикам та дозволяє зменшити обчислювальну складність без втрати репрезентативності ключових станів [128, 148].

Для апробації методичних положень розглянутого підходу сформовано чотири базові типи сценаріїв (S_0)-(S_3), які відображають послідовне розширення сервісних можливостей РЕС. Базовий сценарій S_0 передбачає збереження вихідної структури енергозабезпечення та існуючих принципів взаємодії РЕС з ІЕС і де додаткові засоби гнучкості, накопичення та сервісної інтеграції не впроваджуються або використовуються на початковому рівні. Сценарій S_1 технологічної модернізації та енергоефективності передбачає підвищення ефективності використання енергоресурсів, модернізацію обладнання, скорочення питомого споживання та розширення локальних ВДЕ. Сценарій сервісної інтеграції та гнучкості S_2 поряд із заходами S_1 передбачає активне використання BESS, DR, P2H, CHP, агрегування розподілених ресурсів та інших механізмів, які забезпечують гнучке узгодження виробництва, споживання і накопичення енергії, що підтверджується дослідженнями регіональних інтегрованих енергосистем, де спільне урахування невизначеності, DR і накопичення підвищує економічність та надійність рішень [128, 149]. Сценарій підвищеної стійкості та самодостатності S_3, орієнтований на забезпечення працездатності РЕС за несприятливих і кризових умов, передбачає збільшення локальної генерації, резервування, накопичення, можливість автономізації окремих вузлів, використання мікромереж та підвищення частки критичного навантаження, що може бути забезпечене локальними ресурсами. Така логіка відповідає сучасному переходу від оптимізації середнього очікуваного результату до планування, орієнтованого на стійкість та/або заснованого на жалю [138, 142].

Для кожного сценарію формується вектор параметрів $\theta_s = [\theta_{1s}, \theta_{2s}, \dots, \theta_{ms}]^T$ та визначається сценарна матриця дослідження

$$\Theta^S = \begin{bmatrix} \theta_{10} & \theta_{20} & \cdots & \theta_{m0} \\ \theta_{11} & \theta_{21} & \cdots & \theta_{m1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{1N} & \theta_{2N} & \cdots & \theta_{mN} \end{bmatrix}, \tag{5.1}$$

де кожний рядок матриці відповідає окремому сценарію, а кожний стовпець – одному критичному параметру.

Оскільки розвиток РЕС є динамічним процесом, то сценарні параметри задаються не лише для кінцевого року, а і у вигляді траєкторій, що поєднують довго-, середньо- та короткострокові невизначеності у багатостадійних структурах [152]. Так, для відносної зміни параметра може бути використано запис $\theta_{i,s,t} = \theta_{i,0}\left(1 + g_{i,s,t}\right)$, де $\theta_{i,s,t}$ – значення i-го параметра у сценарії s у момент часу t; $\theta_{i,0}$ – його базове значення; $g_{i,s,t}$ – сценарна відносна зміна параметра; для параметрів, зміна яких має накопичувальний характер, застосовується рекурентне представлення $\theta_{i,s,t} = \theta_{i,s,t-1}\left(1 + g_{i,s,t}\right)$, де часовий горизонт моделювання поділяється на множину періодів $\mathcal{T} = \{t_0, t_1, \dots, t_H\}$, де H – кількість розрахункових періодів.

Сценарії можуть мати спільну траєкторію до моменту розгалуження t_b, після якого реалізуються різні умови: $S_s(t) = S_{s\prime}(t)$, якщо $t < t_b$; та $S_s(t) \neq S_{s'}(t)$, при $t \geq t_b$. Такий підхід у перспективі дозволяє розвивати модель у напрямі багатостадійного сценарного дерева, де для репрезентативного моделювання достатнім є використання обмеженої множини узгоджених сценаріїв, що відповідає практиці зменшення сценарного простору в задачах планування енергосистем [128,148].

Для кожного сформованого сценарію розвитку РЕС розв'язується оптимізаційна задача $\mathrm{x}_s^* = \underset{\mathrm{x}\in X_s}{\operatorname{argmin}} F(\mathrm{x}; \theta_s)$, 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 має відображати не лише прямі витрати на енергозабезпечення, але й вартісні наслідки дефіциту енергетичних сервісів, недостатньої гнучкості, порушення надійності та інших небажаних станів

$$F_s = C_s^{inv} + C_s^{op} + C_s^{fuel} + C_s^{grid} + C_s^{em} + C_s^{serv}, \tag{5.2}$$

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. Остання складова може бути представлена як $C_s^{serv} = \sum_{q \in Q} \lambda_q \ \Delta Serv_{q,s}$, де: Q – множина енергетичних сервісів; $\Delta Serv_{q,s}$ – незабезпечена частина потреби у q-му сервісі; λ_q – штрафний або вартісний коефіцієнт дефіциту відповідного сервісу. Для кожного сценарію виконуються балансові, технічні, економічні, екологічні та сервісні обмеження:
$\mathrm{h}(\mathrm{x}_s, \theta_s) = 0$; $\mathrm{g}(\mathrm{x}_s, \theta_s) \leq 0$, 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 $\mathcal{X}^* = \{\mathrm{x}_0^*, \mathrm{x}_1^*, \dots, \mathrm{x}_N^*\}$.

Принципово важливо, що оптимальне рішення одного сценарію не вважається автоматично найкращим рішенням для розвитку РЕС. Воно має бути перевірене за інших сценарних умов. Це відповідає сучасним підходам робастного прийняття рішень та жалю, за яких рішення оцінюється за ширшим набором майбутніх станів, ніж той, для якого воно було оптимізоване [137, 138, 142].

Для визначення залежності результату від сценарію пропонується виконувати перехресне сценарне оцінювання. Кожне рішення x_i^*, отримане для сценарію S_i, перевіряється за умов усіх сценаріїв S_j: $Z_{ij} = F\left(\mathrm{x}_i^*; \theta_j\right),\ i, j = 0, \dots, N$, у результаті формується матриця

$$\mathrm{Z} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & \cdots & Z_{0N} \\ Z_{10} & Z_{11} & \cdots & Z_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N0} & Z_{N1} & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix}, \tag{5.3}$$

де діагональні елементи Z_{ii} характеризують результат рішення у сценарії, для якого воно було оптимізоване, а позадіагональні елементи показують, наскільки ефективним залишається це рішення у разі реалізації іншого майбутнього стану. Саме перехресне оцінювання дозволяє перейти від поняття сценарно-оптимального рішення до поняття сценарно-стійкого рішення, де для кожного рішення визначається відносна оцінка «жалю» $Reg_{ij} = (Z_{ij} - Z_{jj}) / \left|Z_{jj}\right|$. Тут Reg_{ij} – відносна втрата від застосування рішення, оптимізованого для сценарію i, за фактичної реалізації

сценарію j, для якого $Reg_i^{max} = \max_j Reg_{ij}$ – максимальний «жаль» рішення, а одним із критеріїв вибору стійкого рішення є $i^R = \text{argmin}_i Reg_i^{max}$.

Поєднання критеріїв робастного прийняття рішень та жалю використовується у сучасному стратегічному енергетичному плануванні як спосіб зменшення надмірного консерватизму класичного worst-case підходу найгіршого варіанту [137]. Аналогічно дослідження з планування заходів щодо забезпечення стійкості показують, що рішення «найменшого жалю» можуть забезпечувати кращий баланс інвестицій, експлуатаційних витрат і незабезпеченого попиту за широкої множини сценаріїв [142]. У підході багатокритеріального робастного прийняття рішень (MORDM) «мінімакс жаль» також використовується як один із базових механізмів порівняння рішень за глибокої невизначеності [138].

У процесі порівняння сценаріїв сервіс-орієнтованого розвитку РЕС для кожного сценарію s формується вектор результативності

$$\text{K}_s = [TC_s, EE_s, Flex_s, Res_s, SSR_s, ENS_s, SI_s] \quad (5.4)$$

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.

Для порівняння зі станом S_0 визначається сценарний ефект $\Delta K_{k,s} = K_{k,s} - K_{k,0}$ або у відносному вигляді $\delta K_{k,s} = (K_{k,s} - K_{k,0})/|K_{k,0}| \cdot 100\%$, де $K_{k,0}$ – вектор результативності РЕС у базовому сценарії. При інтерпретації результатів ураховується напрям бажаної зміни для показників енергоефективності, гнучкості, стійкості та самодостатності, позитивна динаміка яких переважно відповідає їх збільшенню, тоді як для системних витрат та ENS – їх зменшенню, що дозволяє оцінювати не лише економічний ефект окремого сценарію, а й структуру сервісного ефекту, тобто визначати, завдяки яким саме властивостям РЕС формується перевага певної траєкторії розвитку.

На платформі викладених положень сценарне моделювання розвитку РЕС здійснюється у такій послідовності: Визначення базового стану РЕС → Ідентифікація

джерел невизначеності → Аналіз чутливості та відбір критичних параметрів → Встановлення діапазонів і траєкторій зміни параметрів → Формування внутрішньо узгоджених сценаріїв → Оптимізація кожного сценарію → Розрахунок системних та сервісних показників → Перехресне сценарне оцінювання → Визначення стійкості рішень → Відбір перспективних альтернатив.

Розглянуті положення ґрунтуються на принципах: *системності*, який передбачає одночасне врахування енергетичних, економічних, технологічних, інфраструктурних та сервісних взаємозв'язків; *внутрішньої узгодженості*, що дозволяє виключати комбінації параметрів, які суперечать одна одній з технологічної, економічної або ресурсної точки зору; *розмежування екзогенних та ендогенних змінних*, за яким сценарієм задаються умови, а оптимізаційною моделлю визначаються рішення репрезентативності, порівнянності, сервісної орієнтації, робастності та адаптивності; *репрезентативності*, який вимагає, щоб обмежена множина сценаріїв охоплювала основні напрями зміни критичних факторів без необхідності повного перебору їх комбінацій; *порівнянності*, що забезпечується єдиним базовим станом, однаковою системою балансів, критеріїв та методів розрахунку показників для всіх сценаріїв; *сервісної орієнтації*, який передбачає оцінювання сценаріїв не лише за обсягом виробленої енергії та витратами, а й за ступенем забезпечення енергоефективності, гнучкості, стійкості, самодостатності та інших цільових сервісів; *робастності*, за яким перевага надається не виключно рішенню з найкращим результатом в одному сценарії, а альтернативі, яка зберігає прийнятні характеристики за зміни сценарних умов; *адаптивності*, що передбачає можливість коригування структури і режимів РЕС у міру надходження нової інформації та уточнення зовнішніх умов.

У сукупності, системно-узгоджена реалізація цих принципів формує етапи переходу від «узгодженості за припущеннями» до «узгодженості за рішеннями» у задачах розвитку РЕС з урахуванням невизначеності [136, 150], де моделювання розглядається як складова єдиного сценарно-оптимізаційного блоку прийняття рішень, у якому невизначені умови формалізуються через сценарний простір, кожний сценарій оптимізується за єдиною системою енергетичних і сервісних балансів, а

отримані рішення підлягають перехресній перевірці за альтернативних сценарних умов.

5.3. Репрезентативна модель РЕС та її параметризація

Під репрезентативною моделлю у цьому дослідженні розуміється агрегована модель РЕС, що відтворює характерні для регіонів України взаємозв'язки між електричною, тепловою і газовою підсистемами, попитом, локальними енергетичними ресурсами, зовнішнім обміном з ІЕС, сервісами гнучкості тощо та призначена для науково-обґрунтованої апробації методологічних положень сервіс-орієнтованого розвитку РЕС.

Модель ґрунтується на інтегрованому представленні електричної (E), теплової (H) та газової (G) підсистем, між якими формуються енергетичні, технологічні та сервісні взаємозв'язки. Часова структура моделі задається погодинною дискретизацією репрезентативного добового циклу $t = 1,\ldots,24$, що дає змогу відтворити внутрішньодобову зміну навантаження, генерації, режимів заряджання та розряджання BESS, використання DR, роботи міжсистемних перетворювачів і зовнішніх перетоків. Річні показники споживання та витрат при цьому використовуються для параметризації масштабу РЕС і приведення відповідних результатів до річного виміру.

Електрична підсистема моделі охоплює традиційну та відновлювану генерацію, споживання електроенергії, імпортно-експортні перетоки між РЕС та ІЕС, системи накопичення електричної енергії і керування попитом, теплова підсистема включає теплове навантаження, котельні установки, когенераційні установки (CHP) та електро-теплове перетворення P2H, а газова – характеризується доступним ресурсом газу, попитом на нього та використанням для роботи CHP і котельних установок. Взаємозв'язок між підсистемами E–H–G забезпечується насамперед технологіями CHP і P2H, завдяки яким зміна режиму однієї енергетичної підсистеми впливає на баланси та режимні параметри інших підсистем.

Окремий блок моделі утворюють сервіси гнучкості, до яких у межах дослідження віднесено використання BESS, DR, керованих міжсистемних

перетворень, резервної генерації та інших ресурсів, здатних компенсувати часову і структурну невідповідність між попитом та доступним енергозабезпеченням. Для оцінювання наслідків недостатності ресурсів у модель введено змінні незабезпеченого попиту на електроенергію, тепло та газ, на основі яких визначаються показники ENS та економічні втрати від незабезпечення енергетичних потреб із використанням VoLL. Результативність функціонування РЕС оцінюється за сукупністю економічних і сервісних показників, серед яких системні витрати, рівень незабезпеченого попиту, використання ресурсів гнучкості та часткові й інтегральний показники стійкості.

Зазначені складові об'єднано в єдину репрезентативну модель РЕС, у якій для кожного часового інтервалу одночасно узгоджуються енергетичні баланси E–H–G, режими роботи генеруючих і сервісних технологій, технічні обмеження та показники результативності, на основі яких формується базовий стан S_0 РЕС як референтний для подальших сценарно-оптимізаційних розрахунків. Зовнішня енергосистема виступає одним із джерел балансування взаємодії РЕС-ІЕС, що задається через імпортно-експортні перетоки електроенергії, і де локальні ресурси виступають засобом підвищення гнучкості та стійкості системи у цілому [153-156].

Використання для апробації репрезентативної моделі даних РЕС Хмельницької області як прикладної основи є доцільним з огляду на поєднання великої базової генерації, системи централізованого теплопостачання, газової складової, потенціалу розподілених ВДЕ та необхідності підвищення стійкості інфраструктури. Водночас встановлена потужність Хмельницької АЕС не включається до регіонального балансу як ресурс, який безпосередньо «належить» споживачам області, однак характеризує структурну специфіку енергетичного вузла та зв’язок регіону з ІЕС України.

Визначимо множину енергетичних підсистем репрезентативної моделі РЕС як $\mathcal{K} = \{\mathrm{E}, \mathrm{H}, \mathrm{G}\}$, часовий горизонт типового добового розрахунку – як $\mathcal{T} = \{1,2, \dots ,24\}$, структуру електричної підсистеми – множиною традиційних джерел генерації $\mathcal{G}$, відновлюваних джерел $\boldsymbol{\mathcal{R}}$, накопичувачів $\boldsymbol{\mathcal{B}}$ та енергетичних сервісів $\mathcal{Q}$, а вектор керованих змінних x моделі як

$$\mathrm{x} = \left[\mathrm{P}, \mathrm{P}_{\mathrm{RES}}, \mathrm{P}_{\mathrm{imp}}, \mathrm{P}_{\mathrm{exp}}, \mathrm{P}_{\mathrm{ch}}, \mathrm{P}_{\mathrm{dis}}, \mathrm{SOC}, \mathrm{P}_{\mathrm{DR}}, \mathrm{Q}_{\mathrm{CHP}}, \mathrm{Q}_{\mathrm{boil}}, \mathrm{P}_{\mathrm{P2H}}, \mathrm{U}_{\mathrm{E}}, \mathrm{U}_{\mathrm{H}}, \mathrm{U}_{\mathrm{G}}\right], \qquad (5.5)$$

де: P – традиційна електрична генерація; P_{RES} – генерація ВДЕ; P_{imp}, P_{exp} – імпорт та експорт електроенергії; P_{ch}, P_{dis} – потужності заряджання та розряджання накопичувачів; SOC – запас енергії у BESS; P_{DR} – використаний ресурс керування попитом; Q_{CHP} – теплова генерація когенерації; Q_{boil} – теплова генерація котелень; P_{P2H} – електрична потужність Power-to-Heat; $, U_E, U_H, U_G$ – незабезпечений попит відповідно на електроенергію, тепло та газ. Інтеграція різних енергоносіїв у єдиної системі моделювання дає змогу використовувати міжсекторну взаємозамінність ресурсів і підвищувати економічність, гнучкість та адаптивність системи [155, 157], тому взаємозв'язок енергетичних підсистем через когенераційні установки, технології перетворення енергії, накопичення та керування попитом є одним із ключових принципів моделювання IEC, оскільки дає змогу використовувати взаємозамінність енергоносіїв та міжсистемну гнучкість для балансування режимів [154, 155].

Позначимо $U_{k,t} = D_{k,t} - D_{k,t}^{serv}, k \in \{E, H, G\}$, де: $D_{k,t}^{serv}$ – фактично забезпечена частина попиту; $D_{k,t}$, – повний попит (потреба) на відповідний енергетичний ресурс; $U_{k,t}$ – незабезпечена частина попиту. Тоді, електричний баланс у кожний момент часу t формується з урахуванням локальної генерації, ВДЕ, зовнішнього обміну, BESS, DR, електроспоживання P2H та фактично забезпеченого попиту

$$\sum_{i \in \mathcal{G}} P_{i,t} + \sum_{r \in \mathcal{R}} P_{r,t} + P_{imp,t} + P_{dis,t} + P_{DR,t} = D_{E,t}^{serv} + P_{ch,t} + P_{P2H,t} + P_{exp,t}.$$

Формування окремих, але взаємопов’язаних балансів електроенергії, тепла та газу відповідає прийнятому в сучасних моделях IEC принципу багатоенергетичного зв’язування, за якого взаємодія підсистем забезпечується спільними технологіями перетворення та режимними обмеженнями [155, 158].

Тепловий баланс визначається сумою теплової енергії когенерації, котелень та P2H з урахуванням фактично забезпеченого теплового попиту

$$Q_{CHP,t} + Q_{boil,t} + Q_{P2H,t} = D_{H,t}^{serv}.$$

Газовий баланс пов’язує доступний газовий ресурс $G_{sup,t}$ із використанням газу у когенерації та котельнях і фактично забезпеченим попитом

$$G_{sup,t} = G_{CHP,t} + G_{boil,t} + D_{G,t}^{serv}.$$

У цих балансах незабезпечена частина попиту, тобто дефіцити $U_{E,t}, U_{H,t}, U_{G,t}$ опосередковано представлено окремими невід'ємними змінними, що дозволяє не порушувати балансові рівняння за кризових або ресурсно обмежених режимів, а економічні наслідки дефіциту враховувати у цільовій функції через VoLL та відповідні сервісні штрафи [154].

Зв'язок газової та електричної/теплової підсистем через когенерацію у моделі задається коефіцієнтами $\eta_{\mathrm{CHP,E}}$ та $\eta_{\mathrm{CHP,H}}$ електричної та теплової ефективності $\mathrm{P_{CHP,t}} = \eta_{\mathrm{CHP,E}}\mathrm{G_{CHP,t}}$, $\mathrm{Q_{CHP,t}} = \eta_{\mathrm{CHP,H}}\mathrm{G_{CHP,t}}$. Перетворення електроенергії у тепло за технологією P2H визначається коефіцієнтом перетворення COP як $\mathrm{Q_{P2H,t}} = \mathrm{COP_{P2H}P_{P2H,t}}$, а теплова генерація газових котелень – як $\mathrm{Q_{boil,t}} = \eta_{\mathrm{boil}}\mathrm{G_{boil,t}}$.

Динаміка запасу енергії у BESS задається рівнянням міжчасового вибору, за допомогою якого приймається рішення про те, що і скільки робити в різні моменти часу, коли вибір в один момент впливає на можливості, доступні в інші моменти часу [153, 155, 157, 159] $\mathrm{SOC_t} = \mathrm{SOC_{t-1}} + \eta_{\mathrm{ch}}\mathrm{P_{ch,t}}\Delta\mathrm{t} - (\mathrm{P_{dis,t}}/\eta_{\mathrm{dis}})\Delta\mathrm{t}$, де η_{ch}, η_{dis} – ККД заряджання та розряджання BESS; з обмеженнями $\mathrm{SOC_{min}} \le \mathrm{SOC_t} \le \mathrm{SOC_{max}}$, $0 \le \mathrm{P_{ch,t}} \le \mathrm{P_{ch,max}}$, $0 \le \mathrm{P_{dis,t}} \le \mathrm{P_{dis,max}}$; та ресурсів керування попитом і зовнішніх перетоків $0 \le \mathrm{P_{DR,t}} \le \mathrm{P_{DR,max}}$, $0 \le \mathrm{P_{imp,t}} \le \mathrm{P_{imp,max}}$, $0 \le \mathrm{P_{exp,t}} \le \mathrm{P_{exp,max}}$.

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, де на базовому етапі моделювання стійкість не оптимізується як окрема незалежна ціль, а задається через показники дефіциту та мінімально допустимий інтегральний рівень

$$\min\ \mathrm{TC} = \sum_{\mathrm{t}\in\mathcal{T}}\left(\mathrm{C_{gen,t}} + \mathrm{C_{RES,t}} + \mathrm{C_{grid,t}} + \mathrm{C_{BESS,t}} + \mathrm{C_{DR,t}} + \mathrm{C_{fuel,t}} + \mathrm{C_{ENS,t}}\right), \quad (5.6)$$

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

Інтегральний обсяг незабезпеченої енергії за розрахунковий період (дефіцит) визначено як $\mathrm{ENS} = \sum_{t\in\mathcal{T}}\left(\omega_E U_{E,t} + \omega_H U_{H,t} + \omega_G U_{G,t}\right)$, де ω_E, ω_H, ω_G – вагові коефіцієнти важливості відповідних енергетичних сервісів, а часткові індекси забезпеченості попиту – відношенням незабезпеченого попиту до загальної потреби $R_k = 1 - \sum_{t\in\mathcal{T}} U_{k,t} / \sum_{t\in\mathcal{T}} D_{k,t}$, $k \in \{E, H, G\}$. Інтегральний індекс стійкості у базовій постановці задається зваженою агрегацією часткових індексів $R_{int} = \alpha_E R_E + \alpha_H R_H + \alpha_G R_G$, $\alpha_E + \alpha_H + \alpha_G = 1$, $R_{int} \geq R_{min}$, де: R_{int} – інтегральний індекс стійкості; R_E, R_H, R_G – часткові індекси забезпеченості / стійкості підсистем; R_{min} – мінімально допустимий рівень інтегральної стійкості; α_E, α_H, α_G – вагові коефіцієнти часткових індексів стійкості. Включення незабезпеченого попиту до критерію оптимізації дозволило пов'язати економічну ефективність із надійністю та стійкістю енергозабезпечення, оскільки мінімізація лише експлуатаційних витрат не відображає наслідків втрати енергетичного сервісу для споживачів [153, 154, 160].

Параметризація моделі виконана на прикладі РЕС Хмельницької області, для якої через відсутність повного набору офіційних статистичних рядів частина значень має розрахунковий характер, який визначає масштаб попиту, технічний потенціал локальних ресурсів і сервісних технологій за результатами модельного експерименту. Вихідні параметри моделі РЕС представлено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – 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 автором для побудови репрезентативної моделі РЕС на основі доступних даних Державної служби статистики України, Хмельницької обласної військової адміністрації, АТ «НАЕК «Енергоатом», НКРЕКП та зарубіжних публікацій [161-166] із подальшою параметризацією відповідно до цілей модельного експерименту і не інтерпретуються як точне відтворення фактичного енергетичного балансу Хмельницької області. При цьому, вартісні оцінки втраченого навантаження $VoLL_E$ суттєво різняться, наприклад, близько 7 000 €/МВт·год для Греції, 8 000 для Фінляндії, 11 000 для Словенії, 12 000 для Німеччини–Люксембургу та 17 000 для Польщі. У розрахунковому експерименті прийнято $VoLL_E$ = 6 000 €/МВт·год як модельну вартісну оцінку незабезпеченої електроенергії. Це значення використовується для порівняльного сценарного аналізу і не інтерпретується як VoLL для України.

Перелік потенційних сервісних ресурсів, що використовуються для визначення верхніх меж альтернатив розвитку РЕС, представлено у таблиці 5.3. Представлений портфель сформовано як взаємопов'язаний комплекс засобів генерації, накопичення, перетворення, керування попитом та міжсистемної гнучкості, спільне використання яких забезпечує адаптацію РЕС до змінних режимних і ресурсних умов [153, 159, 160, 167].

Таблиця 5.3 – 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	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

Проведено систематизацію ризиків забезпечення вихідних параметрів РЕС, яка показала, що найбільш критичними є пошкодження генеруючих потужностей, дефіцит палива/газу, мережеві обмеження та недостатня координація E–H–G. До значущих також віднесено мінливість ВДЕ, недостатній DR, відмови BESS, кіберзагрози та інвестиційні обмеження.

Результати систематизації ризиків представлено у таблиці 5.4 та використано для обґрунтування набору керованих сервісних ресурсів. Розрахунки проведено у табличному середовищі з розділенням вихідних параметрів, погодинних профілів, змінних, обмежень і результатів, що дозволило відокремити параметризацію від оптимізаційного ядра в межах логіки обчислювального експерименту (таблиця 5.5).

Таблиця 5.4 – Систематизація ризиків та сервісних засобів пом'якшення

Ризик	Критичність	Основний наслідок	Засоби пом'якшення
Пошкодження генерації	критичний	зниження доступності, ENS	резерв, BESS, DR
Дефіцит палива/газу	високий	зменшення теплової та газової генерації	диверсифікація, біоенергетика, локальні резерви
Мінливість ВДЕ	високий	дисбаланс, витрати балансування	BESS, Flex, VPP
Недостатній DR	середній	втрата потенціалу гнучкості	ринкові стимули, цифрові сервіси
Мережеві обмеження	високий	локальні перевантаження, обмеження ВДЕ	модернізація, мікромережі
Низька точність прогнозу	середній	неефективне управління	цифрове прогнозування
Відмова BESS	середній	зниження резерву та швидкості балансування	резервування, сервісне обслуговування
Кіберзагрози	високий	порушення координації сервісів	кіберзахист, дублювання контурів
Нестача інвестицій	високий	затримка RES/DR/BESS	поетапні інвестиції, підтримка, PPP
Недостатня координація E–H–G	високий	втрата міжсистемної синергії	SoS-архітектура, інтеграція

Таблиця 5.5 – Структурна реалізація розрахункової моделі

Модуль/лист	Функція
Inputs	параметри системи та технологій
Profiles_24h	погодинний профіль електричного попиту
Profiles_EHG_24h	погодинні профілі попиту E–H–G
Vars_24h	керовані змінні оптимізації
Calc_24h	баланси, витрати та проміжні розрахунки
Constraints_24h	технічні, балансові та сервісні обмеження
Results_24h	агреговані результати оптимізації
Resilience_KPIs	часткові та інтегральні показники стійкості
Dashboard	візуалізація результатів
Resilience_Frontier	модуль Frontier-аналізу

Перед сценарними експериментами репрезентативну модель РЕС розраховано у базовому стані S_0 (таблиця 5.6), який виконує функцію референтного стану, відносно якого оцінюються ефекти альтернативних сервісних конфігурацій і зовнішніх сценарних впливів.

Отримані результати розрахунку базового стану задовольняють прийняту умову $R_{int} \geq 0{,}92$. При цьому ненульовий ENS показує, що навіть у референтному режимі економічно оптимальне рішення не обов'язково відповідає абсолютному нульовому дефіциту: модель зіставляє вартість додаткових резервів із вартістю

недопостачання. Саме тому вартість втраченого навантаження VoLL є одним із критичних параметрів подальшого аналізу чутливості.

Таблиця 5.6 – 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	–

Результати розрахунку помісячної структури задіяних джерел енергії РЕС і гнучкості енергосервісу представлено на рисунку 5.2, а системних витрат РЕС у базовому стані – на рисунку 5.3.

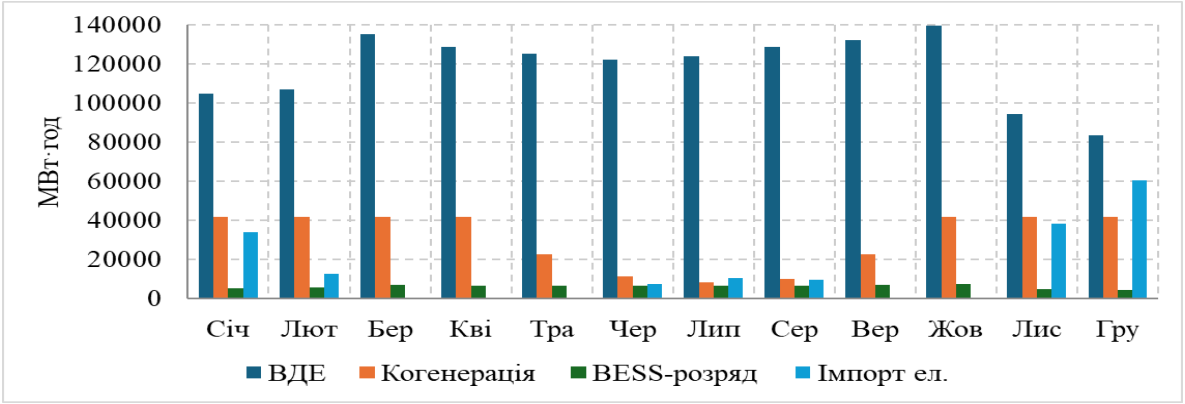


Рис. 5.2. Помісячна структура джерел енергії і гнучкості енергосервісу

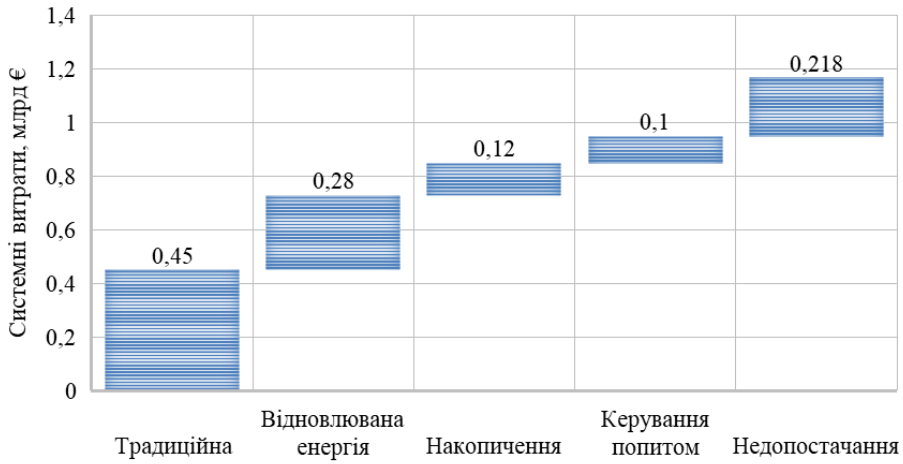


Рис. 5.3. Структура системних витрат репрезентативної РЕС у базовому стані

Аналіз структури системних витрат показав, що найбільшу частку становлять витрати традиційної генерації (38 %), тоді як відновлювані джерела енергії формують 24 % витрат. Значущу роль відіграють сервіси гнучкості – накопичувачі енергії (10 %) та керування попитом (9 %). При цьому економічні втрати від недопостачання електроенергії (ENS) становлять близько 19 % системних витрат, що підкреслює важливість підвищення стійкості енергосистеми.

Деталізація ключових драйверів сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, відсоткові значення яких характеризують частку енергетичного попиту, що забезпечується відповідними сервісними компонентами, представлена на рисунку 5.4.

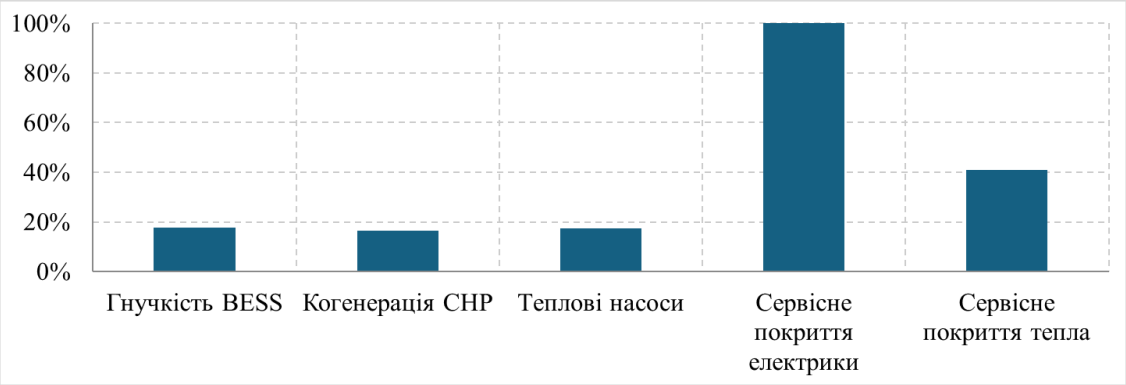


Рис. 5.4. Ключові драйвери сервіс-орієнтованої трансформації РЕС.

Перевірку внутрішньої узгодженості результатів базового розрахунку проведено за трьома групами умов та встановлено, що: 1) у кожному часовому інтервалі виробництво, імпорт, накопичення, перетворення та дефіцит забезпечують відповідний попит; 2) усі потужності, SOC, DR, перетоки та технологічні коефіцієнти перебувають в установлених межах; 3) інтегральний індекс стійкості вище за прийняте мінімальне значення, тобто, репрезентативна модель виконує усі функції дослідження взаємозв'язків між структурою ресурсів, міжсекторною інтеграцією, дефіцитом, гнучкістю та стійкістю РЕС за різних режимних умов, що узгоджується із сучасною практикою модельного дослідження стійкості інтегрованих енергетичних систем [154, 160, 168].

Репрезентативний характер моделі визначає межі застосування результатів: вона не відтворює вузлову топологію електричних і газових мереж, деталі РДН/ВДР/БР, обмеження конкретних генеруючих блоків, повний річний хронологічний ряд або ймовірнісну модель аварійності. Відповідно, отримані

абсолютні вартісні та енергетичні показники використовуються передусім для порівняння сценаріїв і сервісних конфігурацій у межах цілісної системи моделювання.

Водночас розглянута агрегована постановка дозволяє дослідити методологічно важливі для функціонування РЕС 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.

5.4. Сценарно-оптимізаційне дослідження сервіс-орієнтованого розвитку РЕС

Принциповим для подальшого аналізу є розмежування двох вимірів модельного експерименту, перший вимір якого 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. Зміст та очікуваний прояв сценаріїв зовнішніх умов функціонування РЕС відображено у таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Сценарії зовнішніх умов

Сценарій	Зміст	Зміна параметрів	Очікуваний прояв
S_0	Базовий режим	стандартні параметри	референтний стан
S_1	Пошкодження генерації	доступність генерації −20 %; обмеження імпорту	зростання ENS і витрат
S_2	Дефіцит газу	доступність газу −30 %	зниження теплової/газової забезпеченості
S_3	Низька генерація ВДЕ	генерація RES −40 %	зростання потреби у резерві
S_4	Пікове навантаження	попит +25 %	підвищене навантаження на ресурси
S_5	Мережеві обмеження	пропускна здатність −30 %	локальні дисбаланси
S_6	Комбінована криза	генерація −20 %; попит +20 %	максимальний системний ризик

Примітка: Значення відносних змін параметрів у сценаріях S_1–S_6 сформовано автором як параметри стрес-тестування репрезентативної РЕС. Вони не є прогнозними оцінками ймовірності або масштабу конкретних майбутніх подій, а задають контрастні умови для перевірки реакції моделі на окремі та комбіновані збурення.

Тут S_0 використовується як контрольний стан, $S_0 - S_5$ відображають окремі типи збурень, а S_6 поєднує погіршення ресурсної доступності зі зростанням навантаження. Можливості реалізації $S_0 - S_6$ не задаються, а використовуються як

дискретні стани сценарного простору для перевірки стійкості рішень. Використання множини контрастних сценаріїв зовнішніх збурень надає змогу досліджувати поведінку РЕС без необхідності приписування кожному сценарію точної ймовірності реалізації, що є доцільним для дослідження стійкості енергетичних систем за умов глибокої невизначеності, коли параметри та ймовірності майбутніх збурень не можуть бути достовірно визначені [137, 157].

Визначено альтернативні конфігурації розвитку РЕС за рахунок послідовного збільшення залучення ВДЕ, накопичувачів та керування попитом, що дало змогу дослідити компроміс між додатковими витратами, гнучкістю та стійкістю інтегрованої енергосистеми. Такий підхід підтверджується і сучасними дослідженнями ролі накопичення та керованої гнучкості у підвищенні стійкості енергетичних систем [157, 159]. Результати розрахунку альтернативних сервісних конфігурацій розвитку РЕС представлено в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – 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

Значення $A_0 - A_4$ отримано з фронтир-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».

Для кожної пари «сервісна конфігурація – зовнішній сценарій» розраховується значення цільової функції та вектор результативності сценаріїв:

$$Z_{ij} = F(x_i;\ \theta_j),\ \ i = 0,\dots,4;\ \ j = 0,\dots,6;$$

$$K_{ij} = [TC_{ij}, ENS_{ij}, RES_{ij}, BESS_{ij}, DR_{ij}, R_{ij}, Flex_{ij}, SSR_{ij}], \qquad (5.7)$$

де: x_i – рішення, що характеризує конфігурацію A_i; θ_j – параметри зовнішнього сценарію S_i; TC – системні витрати; ENS – незабезпечена енергія; RES – частка ВДЕ;

BESS і DR – використання накопичення та керування попитом; R – інтегральний індекс стійкості; Flex – показник гнучкості; SSR – показник самодостатності.

Таке представлення забезпечує відокремлення керованих рішень x_i, що визначають структуру сервісної конфігурації РЕС, від некерованих параметрів зовнішнього середовища θ_j, що закладає основу для перехресного оцінювання однієї і тієї самої альтернативи за різних реалізацій невизначеності та подальшого вибору сценарно-стійкого рішення [137]. Отримані результати моделювання за сценаріями $S_0 - S_6$ наведено у таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – 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

Формування альтернативних конфігурацій шляхом послідовного збільшення залучення ВДЕ, накопичувачів та керування попитом дало змогу дослідити технологічний компроміс між додатковими витратами, гнучкістю та стійкістю ІЕС за умов відмов та екстремальних впливів [157, 159].

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. Отже, для даної параметризації особливо критичними є одночасне зростання попиту та

дефіцит керованих ресурсів. Графічне відображення взаємозв'язку ENS та інтегрального індексу стійкості R за сценаріями $S_0 - S_5$ представлено на рисунку 5.5.

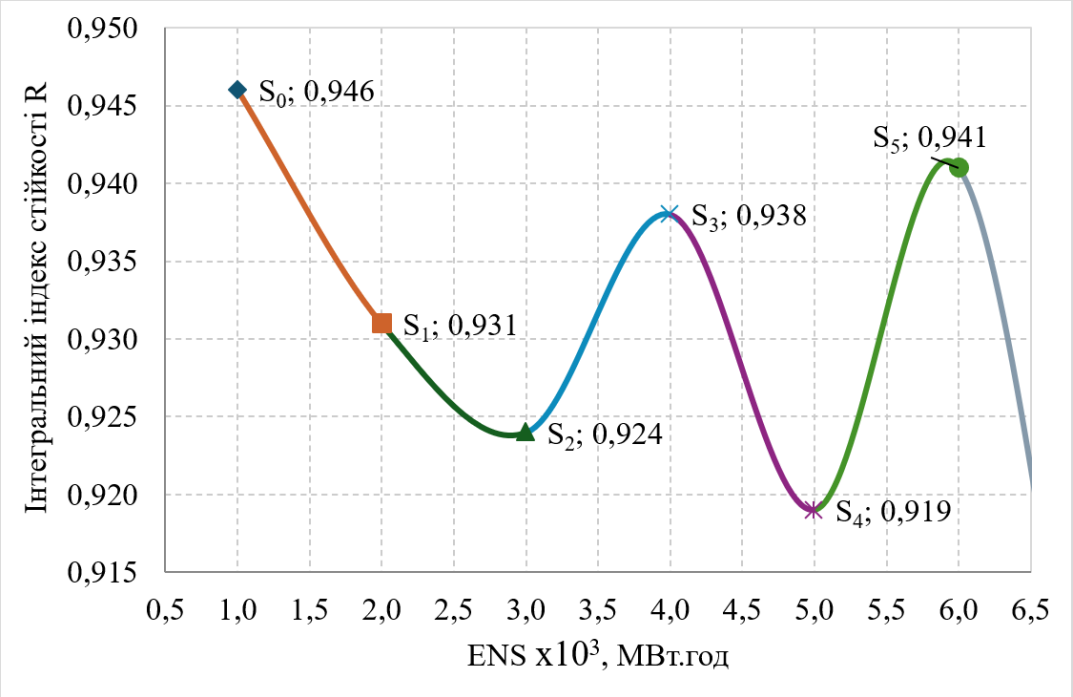


Рисунок 5.5. Взаємозв'язок ENS та R за сценаріями $S_0 - S_5$

Представлена діаграма узагальнює взаємозв'язок між ENS та інтегральним індексом стійкості R для $S_0 - S_6$, за яким у міру переходу до більш несприятливих режимів точки зміщуються у напрямі більшого незабезпечення та нижчої стійкості. Найгірше положення займає комбінований сценарій S_6, де ENS дорівнює 15719 МВт·год, тоді як S_0 формує референтну область. Графічне представлення підтверджує, що ENS є одним із ключових факторів деградації сервісної результативності, але не замінює інтегральний R, оскільки останній узагальнює стан кількох енергетичних підсистем.

З метою визначення множини ефективних конфігурацій сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, які характеризують компроміс між сукупними системними витратами та досягнутим рівнем стійкості енергосистеми проведено аналіз межі ефективності (фронтиру) сервісних конфігурацій РЕС, результати якого представлено у таблиці 5.10. Основними задачами такого аналізу, що відображає найкращі можливі компроміси між системними витратами та рівнем стійкості РЕС, є оцінювання зміни системних витрат при послідовному підвищенні вимог до стійкості, визначення раціонального рівня залучення ВДЕ, BESS, DR та інших сервісних ресурсів, кількісне

оцінювання граничної ціни приросту стійкості; а також формування інформаційної основи для вибору конфігурації РЕС, яка забезпечує економічно обґрунтований баланс між вартістю її функціонування та здатністю зберігати необхідний рівень енергетичного сервісу в умовах зовнішніх збурень і невизначеності.

Таблиця 5.10 – Фронтир сервісних конфігурацій РЕС

A	ВДЕ, %	BESS, МВт	DR, МВт	R	ТС, млрд €
A0	34	89,8	54,5	0,946	1,168
A1	42	102,7	57,7	0,952	1,213
A2	45	141,1	61,0	0,958	1,258
A3	48	166,8	77,0	0,965	1,315
A4	52	205,3	96,2	0,973	1,424

Фронтир відображає послідовність ефективних сервісних конфігурацій $A_0 - A_4$. Так, 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 €, отже, додаткова стійкість має економічну ціну (рисунок 5.6). Водночас зростання R формується не одним ресурсом: частка ВДЕ збільшується до 52 %, BESS – до 205,3 МВт, а DR – до 96,2 МВт.

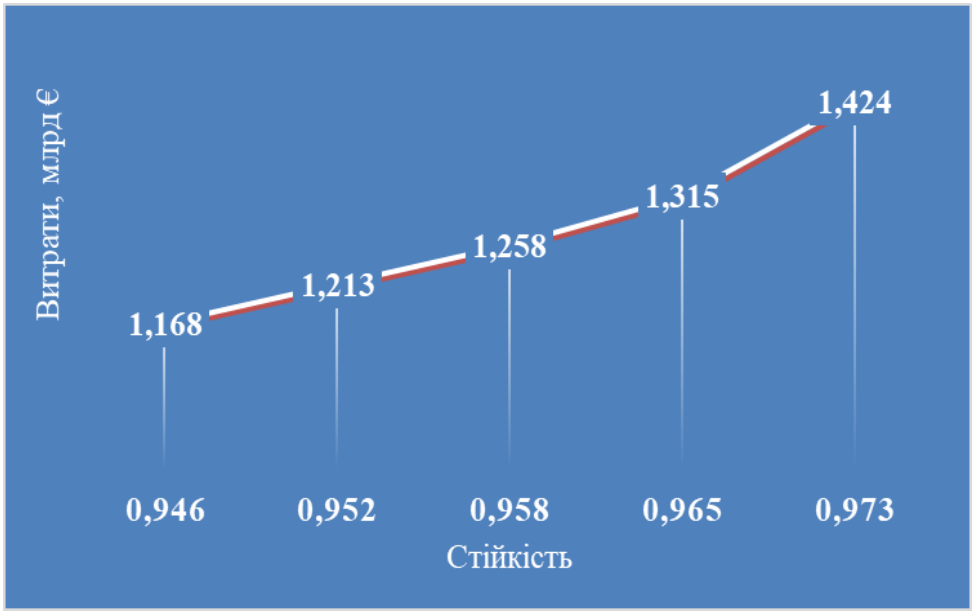


Рис. 5.6. Фронтир системних витрат і стійкості сервісних конфігурацій РЕС

Крива на рисунку відображає множину Парето-ефективних конфігурацій енергетичної системи, що визначають компроміс між витратами функціонування РЕС та рівнем її стійкості, а нахил дотичної до цієї кривій – приховану ціну, що характеризує граничну вартість підвищення стійкості системи.

Приріст інтегральної стійкості супроводжується зростанням системних витрат. Так. перехід від R = 0,946 до R = 0,973 відповідає збільшенню витрат від 1,168 до 1,424 млрд євро. Економічний зміст кривої полягає у визначенні граничної ціни додаткової стійкості: чим більший приріст витрат потрібний для наступного приросту R, тим дорожчим стає подальше резервування системи, тобто кожна точка фронтиру є результатом комплексної зміни ВДЕ, BESS і DR, а не ізольованого нарощування одного ресурсу.

Побудова фронтиру «витрати – стійкість» ґрунтується на багатокритеріальній інтерпретації результатів оптимізації, що дає змогу виділити ефективні конфігурації, для яких підвищення стійкості потребує додаткових системних витрат, та визначити множину компромісних рішень між економічністю та стійкістю РЕС [157].

Кількісну оцінку вартості додаткового підвищення стійкості РЕС здійснено за формулою $\Delta TC_i = TC_i - TC_{i-1}$, що визначає приріст системних витрат при переході від попередньої сервісної конфігурації A_{i-1}до наступної A_i. Тут: TC_i – сукупні системні витрати для конфігурації A_i; TC_{i-1} – витрати для попередньої конфігурації; ΔTC_i – додаткові витрати, необхідні для переходу до більш стійкої конфігурації. Приріст стійкості, отриманий у результаті цього переходу, визначено за формулою $\Delta R_{\text{і}} = R_{\text{і}} - R_{\text{і}-1}$, де: R_i – інтегральний індекс стійкості конфігурації A_i; R_{i-1} – індекс стійкості попередньої конфігурації; ΔR_i – отриманий приріст стійкості. Нарешті, за формулою $SP_i^R \approx \Delta TC_i/\Delta R_i$, що пов’язує попередні дві величини, показано, які додаткові системні витрати припадають на одиницю приросту інтегрального індексу стійкості.

Тривимірна поверхня, представлена на рисунку 5.7, уточнює характер взаємозв’язку між часткою ВДЕ, стійкістю та системними витратами. Зона нижчих витрат відповідає меншому сервісному насиченню, тоді як рух у напрямі вищих значень R та більшої частки ВДЕ супроводжується збільшенням витрат. Це підтверджує, що декарбонізація і підвищення стійкості не є незалежними цілями: за високої частки ВДЕ необхідно одночасно забезпечувати достатній обсяг балансування, накопичення, резерву та керування попитом.

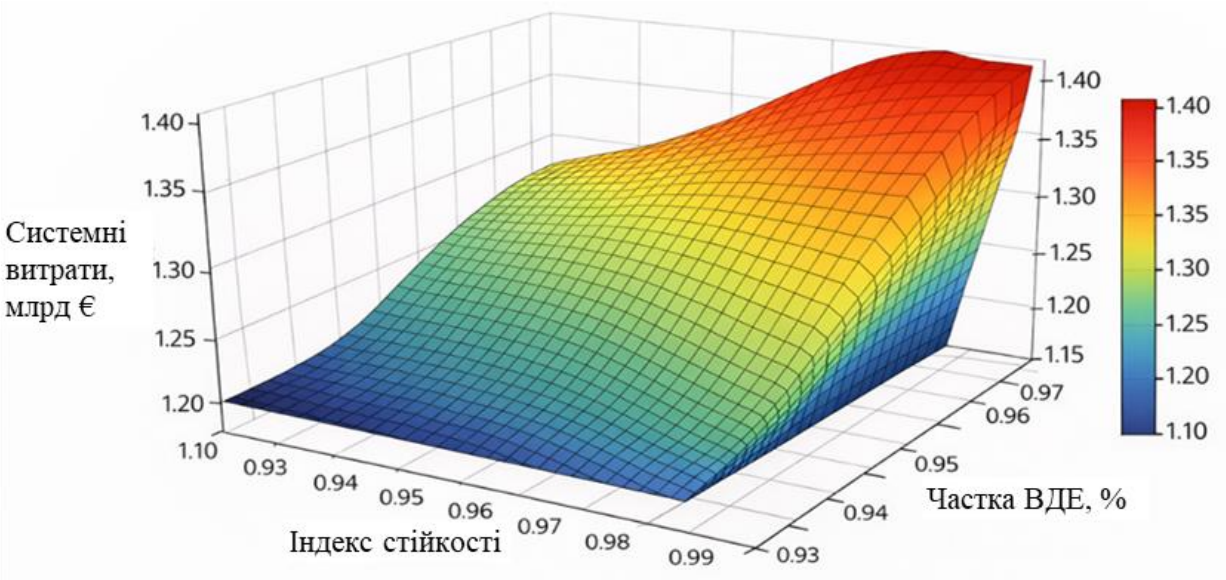


Рис. 5.7. Поверхня системних витрат РЕС залежно від частки ВДЕ та інтегрального індексу стійкості

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. Такий підхід використовується в дослідженнях IEC для розподілу системного ефекту, оцінювання внеску компонентів та ідентифікації їх впливу на надійність системи [159, 169].

Результати розрахунку внеску окремих сервісів у підвищення стійкості РЕС за показником Шеплі представлено у таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 – 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 підсистеми

За вихідними розрахунками найбільший внесок у приріст стійкості належить ВДЕ (41 %) та BESS (24 %), DR забезпечує 17 %, сервіси гнучкості – 12 %, а CHP – 6 %. Така структура показує, що ефект сервіс-орієнтованого розвитку РЕС має комплексний взаємозалежний характер, за яким внесок кожної технології у підвищення стійкості РЕС визначається не лише її власними характеристиками, а й характером її взаємодії з іншими сервісними та технологічними ресурсами системи.

Результати розрахунку економічних та екологічних показників сервіс-орієнтованого розвитку представлено у таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – 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 витрати на балансування на 26 %, ENS – на 56 %, викиди CO_2 – на 31 % та підвищує R з 0,905 до 0,946, що ілюструє принципову відмінність сервісно-орієнтованого критерію від мінімізації лише прямих витрат: економічно дещо дорожча конфігурація може забезпечувати суттєво кращі системні та сервісні характеристики.

Проведено аналіз чутливості та виявлено критичні параметри розвитку РЕС, результати якого представлено у таблиці 5.13. Аналіз використано для перевірки реакції оптимізаційної моделі на варіювання вхідних параметрів, зміна яких найбільш суттєво впливає на цільові показники розвитку РЕС.

Таблиця 5.13 – 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	15 00

Аналіз підтверджує, що найбільш критичними параметрами є доступність генерації, потужність BESS і потенціал DR. Зниження доступності генерації до 60 % приводить до R = 0,894 та ENS = 15700 МВт·год. а збільшення BESS і DR, навпаки, зменшує ENS та підвищує стійкість, хоча потребує додаткових витрат. VoLL впливає

на економічний компроміс: вища ціна незабезпечення стимулює модель використовувати дорожчі рішення для зниження дефіциту.

Графічна залежність системних витрат РЕС від потужності BESS та інтегрального індексу стійкості відображена на рисунку 5.8.

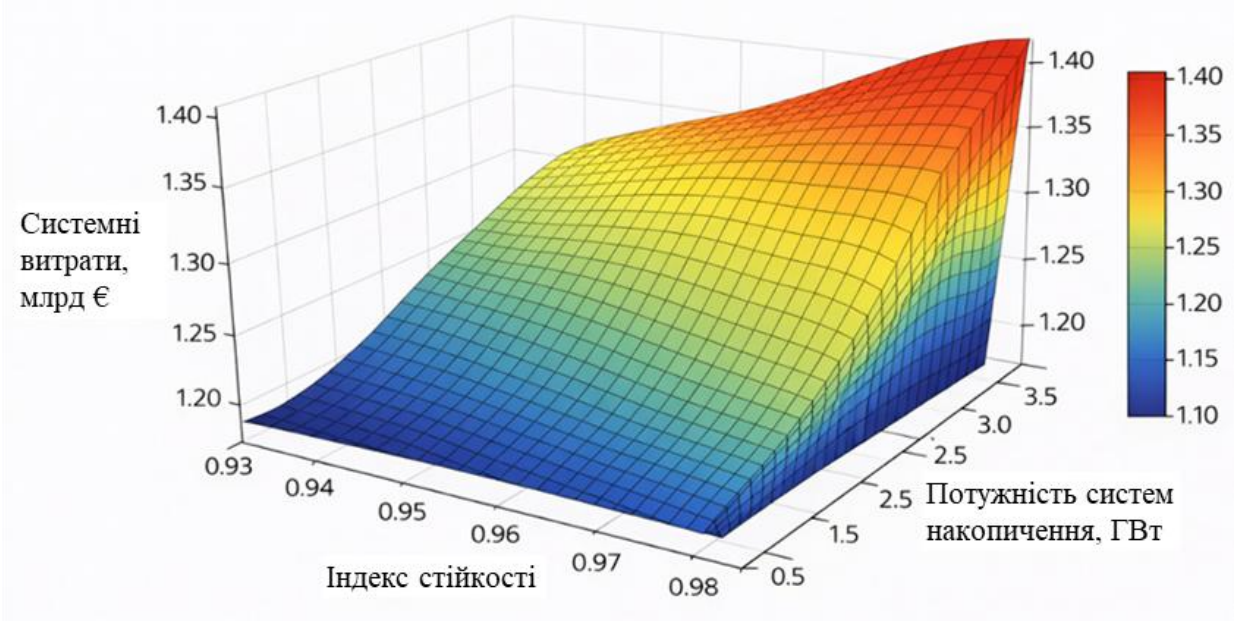


Рис. 5.8. Залежність системних витрат РЕС від потужності R та BESS

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. Отже, потужність накопичення має визначатися не за принципом максимізації, а в комплексі з DR, структурою генерації та допустимим рівнем ENS. Графік підтверджує висновок аналізу чутливості про BESS як одного із параметрів, що найбільш суттєво впливають на результативність сервісної конфігурації.

Проведено аналіз самодостатності РЕС в контексті сезонної динаміки зміни $SSR_t = E_t^{avail}/D_t$, де: SSR_t – показник достатності доступних локальних енергетичних ресурсів у часовому інтервалі t; E_t^{avail} – обсяг енергії, який може бути фактично доступний для забезпечення потреб РЕС у період t за рахунок локальних генеруючих, накопичувальних та інших доступних ресурсів, врахованих у системі моделювання; D_t – сукупна потреба (попит) на енергію в тому самому часовому інтервалі.

Результати розрахунку сезонної динаміки зміни показника достатності локальних енергетичних ресурсів репрезентативної РЕС представлено на рисунку 5.9. Показано, що показник самодостатності змінюється протягом року від 1,08 у грудні до 1,50-1,53 у літні місяці, що характеризує сезонну зміну співвідношення між модельним локальним енергетичним потенціалом та потребою з урахуванням резерву.

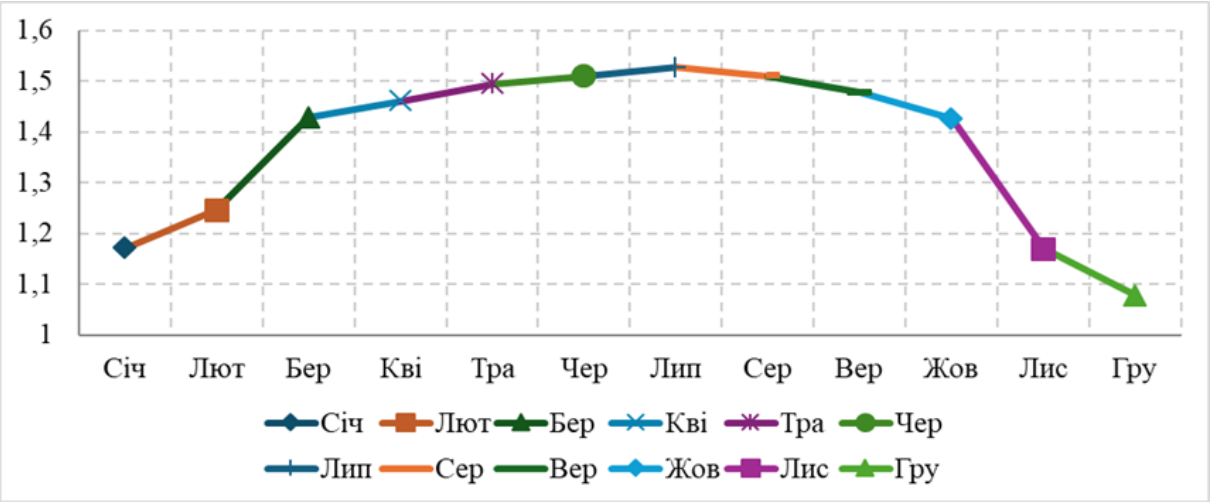


Рис. 5.9. Динаміка показника самодостатності локальних енергетичних ресурсів

Значення $SSR_t < 1$ означає, що доступних локальних ресурсів недостатньо для покриття потреби; $SSR_t = 1$ – ресурси та потреба збалансовані; $SSR_t > 1$ – розрахунково доступний ресурс перевищує потребу. Найнижчі значення спостерігаються у зимові місяці, коли зростає сукупне навантаження і зменшується внесок сонячної генерації; у весняно-літній період показник підвищується.

Сезонна динаміка SSR має практичне значення для сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, оскілки періоди з мінімальними значеннями показника визначають часові інтервали найбільшої ресурсної напруженості, для яких доцільним є посилення резервування, використання BESS, DR, CHP та інших засобів гнучкості. Періоди з підвищеним SSR, навпаки, характеризують потенціал для накопичення енергії, керування режимами споживання та перерозподілу доступного ресурсу в часі. Таким чином, аналіз SSR дозволяє перейти від статичної оцінки достатності ресурсів до визначення сезонної потреби у відповідних енергетичних сервісах та засобах гнучкості.

Водночас, показник самодостатності не слід інтерпретувати як доказ автономності Хмельницької області від ІЕС, а трактувати його як модельний індекс достатності локальних/доступних ресурсів у репрезентативному відображенні РЕС, де межі зон мають задаватися не довільним кольоровим зонуванням, а нормативними або модельними порогами.

Для вибору рішення, стійкого до зміни сценарних умов, використано критерій minimax regret. На відміну від вибору альтернативи, оптимальної лише за одного сценарію, цей критерій мінімізує найбільші можливі втрати ефективності рішення порівняно з найкращою альтернативою, яка могла б бути обрана за умови апріорного знання реалізованого сценарію у задачах стратегічного енергетичного планування за неповної інформації щодо ймовірностей майбутніх станів системи [137].

З цією метою проведено перехресну перевірку сценаріїв $A_0 - A_4$ у $S_0 - S_6$, спираючись на результати попередніх розрахунків окремо для сценаріїв $A_0 - A_4$ і збурень $S_0 - S_6$. Результати перехресних перевірок оцінено методом комплексної інтерполяції, що охоплює визначення:

- відносної втрати ефективності рішення (regret) $Reg_{i,j} = (Z_{ij} - Z_j^*)/|Z_j^*|$, де: $Reg_{i,j}$ – відносний regret, тобто відносне погіршення результату при виборі альтернативи A_i за реалізації сценарію S_j; $Z_{i,j}$ – значення цільового критерію для альтернативної сервісної конфігурації A_i за умов сценарію S_j; Z_j^* – найкраще значення цільового критерію, яке може бути отримане серед усіх альтернатив за сценарію S_j; i – номер альтернативної сервісної конфігурації A_i; j – номер зовнішнього сценарію S_j; $|Z_j^*|$ – модуль найкращого значення критерію, що використовується для нормування regret. Для задачі мінімізації $Z_j^* = \min_i Z_{i,j}$, тобто $Reg_{i,j} = 0$, якщо A_i є найкращою альтернативою саме для сценарію S_j і чим більше $Reg_{i,j}$, тим сильніше рішення поступається найкращому можливому рішенню за цього сценарію;
- максимальної втрати для кожної альтернативи $\mathrm{R}eg_i^{max} = \max_j Reg_{i,j}$, де: Reg_i^{max} – максимальні відносні втрати ефективності альтернативи A_i серед усіх розглянутих сценаріїв; $Reg_{i,j}$ – regret альтернативи A_i у сценарії S_j; $\max_j$ – вибір

найбільш несприятливого для цієї альтернативи значення серед сценаріїв $S_0 - S_6$. Тобто, для кожної конфігурації A_i визначається наскільки сильно ця конфігурація може програти найкращому рішенню, якщо реалізується несприятливий для неї сценарій;

- вибору сценарно-стійкої альтернативи $A^R = \arg\min_i Reg_i^{max}$, де: A^R – сценарно-стійка сервісна конфігурація РЕС; $\arg\min_i$ – оператор, який визначає не саме мінімальне числове значення, а альтернативу A_i, для якої це значення є мінімальним; Reg_i^{max} – максимальні втрати ефективності альтернативи A_i.

Отже, розглянуті процедури інтерполяції утворюють послідовність $Z_{ij} \rightarrow Reg_{ij} \rightarrow Reg_i^{max} \rightarrow A^R$, за якої спочатку кожну сервісну конфігурацію перевіряють у кожному сценарії, потім визначають її найбільші можливі втрати ефективності, після чого обирають конфігурацію, для якої ці максимальні втрати є найменшими, тобто визначають потрібний minimax regret.

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»: 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

$$\max_{x\in\Omega} F_r = w_1 I_{E,r} + w_2 S_{int,r} + w_3 B_r \quad (5.8)$$

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 за цільовою функцією (5.8) 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 значною мірою визначалось обставинами воєнного часу.

Максимізація за критерієм $I_E \to \max$ забезпечила підвищення його значення з $0{,}07$ до $0{,}17$, тобто більш ніж у 2,4 рази, що свідчить про істотне покращення структури енергоспоживання РЕС. При цьому первинне енергоспоживання системи зменшилось приблизно на 8-10 %. Оптимізація за критерієм $S_{int} \to \max$ 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 $B \to \max$ 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 у роботі сукупності цільових функцій сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, зокрема функцій системної корисності (2.5), стійкості (2.7), багатокритеріальної (3.8), (3.16) і (4.13), локальної (4.1), на регіональному рівні (4.2), на рівні РЕС-ІЕС (4.3) і підсистем-агентів (4.4), із урахуванням екологічної компоненти (4.12), 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.

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.

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 5.10.

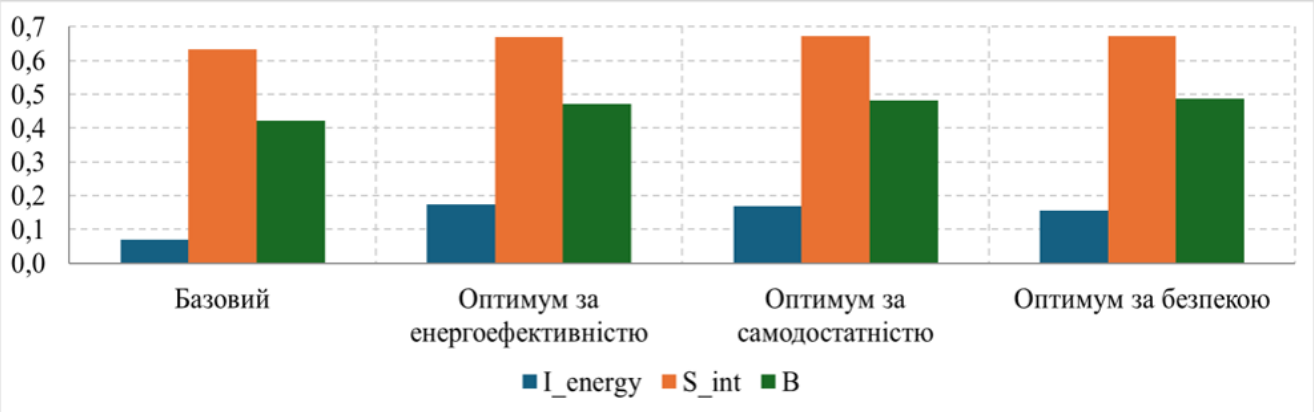


Рис. 5.10. Порівняння критеріїв оптимізації

Розрахункові рівні недопостачання енергетичних ресурсів (електроенергії, тепла та газу) у різних сценаріях оптимізації розвитку РЕС відображено на рисунку 5.11

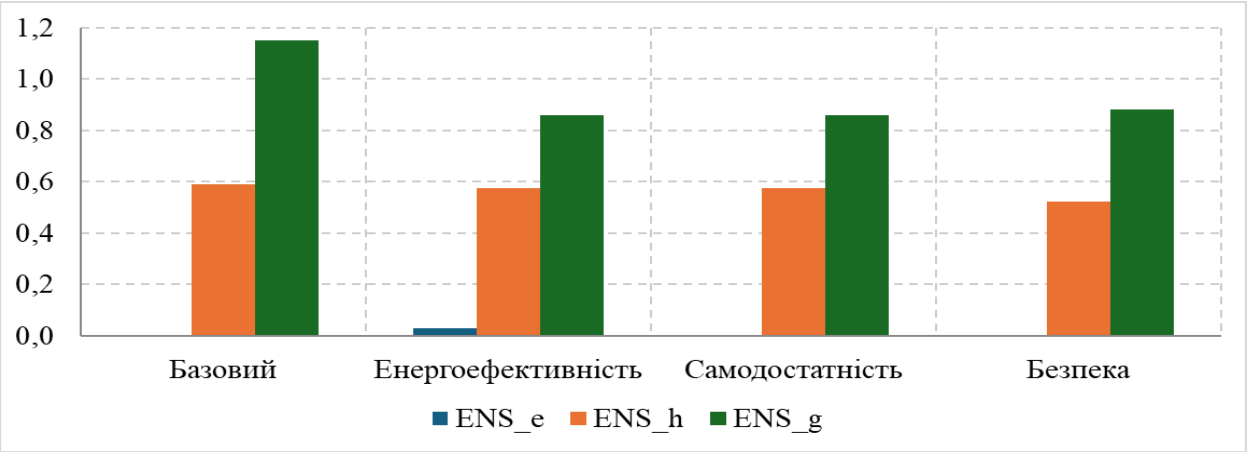


Рис. 5.11. Частка ENS за сценаріями оптимізації

Визначено регіональні профілі внеску енергетичних сервісів у сервіс-орієнтований розвиток РЕС за областями України (рисунок 5.12).

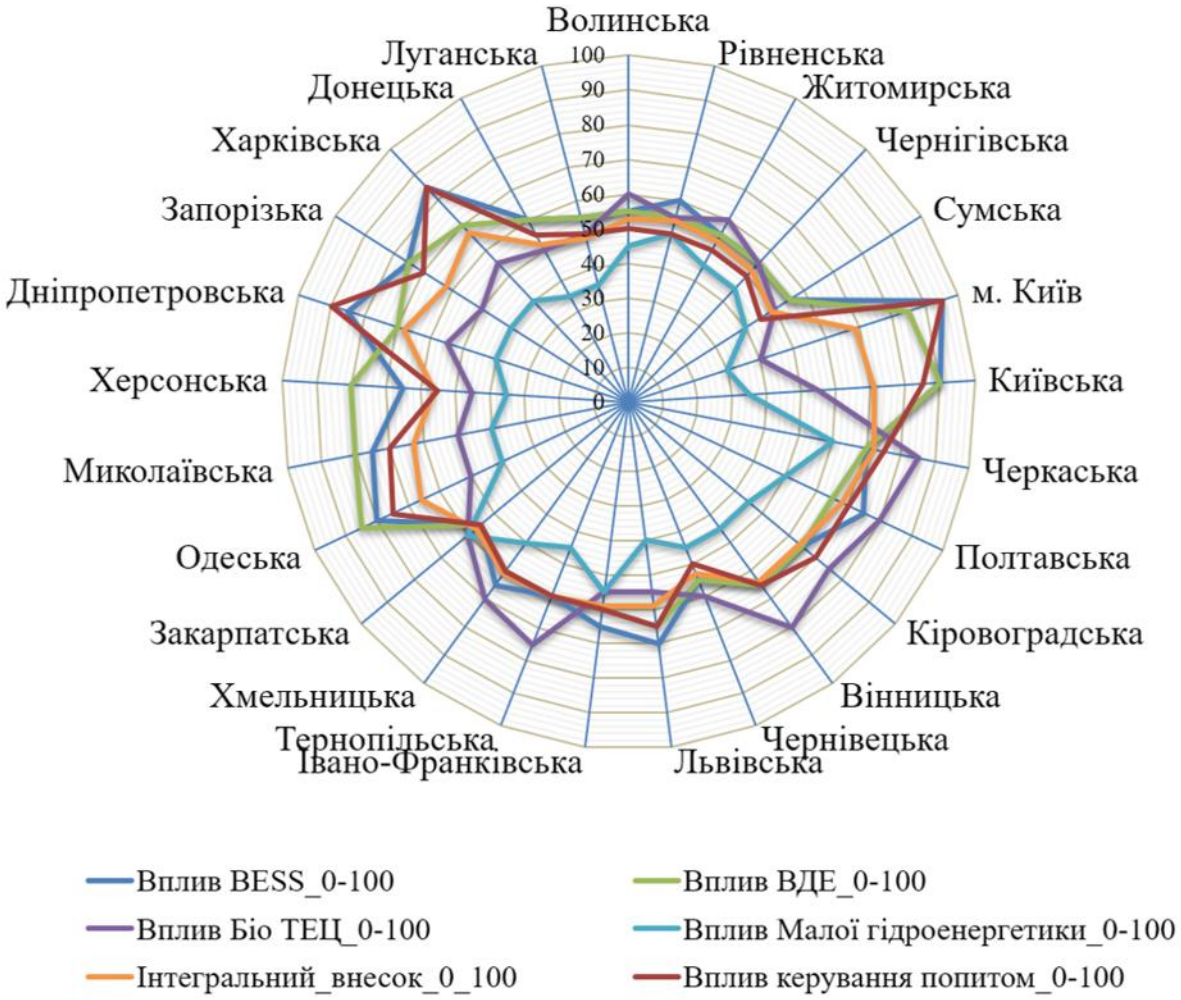


Рис. 5.12. Результати рейтингового оцінювання сервісного впливу РЕС за областями країні

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). 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 5.13.



Рис. 5.13. Результати рейтингового оцінювання стійкості РЕС за областями Україні

У результатах 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 Київська (260-310), Дніпропетровська (280-330) та Харківська (240-290) області, 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.

5.5. Методика кількісного оцінювання достовірності та стійкості результатів моделювання РЕС

Результати моделювання сервіс-орієнтованого розвитку РЕС носять прогнозний характер і стосуються конфігурацій, які не завжди мають повномасштабний фізичний аналог, 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.

Пропонована методика розвиває логіку VVUQ кількісного оцінювання достовірності та стійкості результатів моделювання енергетичних систем (Verification, Validation and Uncertainty Quantification) для задач сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, що поєднує математичну верифікацію, часткову емпіричну та критеріальну валідацію, кількісне оцінювання невизначеності, аналіз чутливості, імітаційне моделювання, перевірку сценарної робастності та інтегральне оцінювання рівня довіри до результатів моделі. На відміну від оцінки точності окремого прогнозного значення, методика VVUQ визначає достатність доказів для використання результатів моделювання під час порівняння сценаріїв і підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності. Це досить типова ситуація для дослідження перспективних енергетичних систем: розумні мережі (Smart Grid) на початку 2000-х років; віртуальні електростанції (Virtual Power Plant); місцеві енергетичні спільноти (Local Energy Communities); інтегровані енергетичні системи (Integrated Energy Systems); системи систем (System-of-Systems) тощо [170-174].

Проведено порівняльний аналіз сучасних програмних засобів оцінювання рівня обґрунтованості моделей енергосистем [175-181], результати якого представлено у таблиці 5.14.

Таблиця 5.14 – Порівняння підходів до оцінювання достовірності моделей РЕС

Критерій	VVUQ	ASME V&V 40	ERIGrid	Energy PLAN	MARKAL /TIMES	РЕС методика
Математична верифікація	+	+	+	△	△	+
Валідація результатів	+	+	+	+	△	+
Кількісне оцінювання невизначеності	+	±	△	△	△	+
Аналіз чутливості та Monte Carlo	△	±	±	↓	+	+
Перевірка сценарної робастності	△	△	△	+	△	+
Інтегральний індекс довіри	↓	↓	↓	↓	↓	+
Застосування до РЕС без повного аналога	△	±	△	△	△	+

Примітка: Позначення «+» означає, що відповідна процедура входить до основної логіки підходу; △ – реалізовано частково, застосовується залежно від завдання, доступних даних або зовнішніх інструментів; ± – залежить від контексту застосування; ↓ – не задається.

Сильна сторона VVUQ – загальна постановка задач верифікації та валідації (V&V) і оцінювання невизначеності (UQ), а її обмеження – відсутність

спеціалізованого механізму для оцінювання прогнозних моделей енергосистем. ASME V&V 40 є продуктивним інструментом щодо зв'язку обґрунтованості з ризиком прийняття рішення. Засіб розроблений для ситуацій, де модель використовується в межах чітко заданого регуляторного або інженерного контексту, а не для прогнозної моделі енергетичної системи, яка ще не має повномасштабної реалізації [182]. ERIGrid більш близький до енергетики, оскільки охоплює розумні енергетичні системи і підтримує кіберфізичну валідацію [170, 175, 176]. Його обмеження полягає в тому, що він орієнтований на тестування конфігурацій у лабораторних, ко-симуляційних або віртуальних середовищах. EnergyPLAN демонструє важливу для прогнозних енергосистем логіку: достовірність моделі може обґрунтовуватися не лише прямим експериментом, а й широкою апробацією, сценарними дослідженнями, географічною різноманітністю застосувань і сталістю результатів у різних кейсах [172]. Це підтримує підхід до сценарної робастності, але EnergyPLAN не пропонує універсального інтегрального показника обґрунтованості для моделей прогнозних енергосистем. MARKAL/TIMES – одна з найбільш поширених у світі платформ стратегічного енергетичного моделювання, яка використовується більш ніж у 70 країнах, є еталоном для довгострокового планування розвитку енергетики, широко застосовується при розробленні енергетичних стратегій, але не пропонує процедур для верифікації та валідації [183].

Результати порівняльного аналізу показують, що існуючі міжнародні концепції забезпечують ефективне оцінювання моделей функціонуючих або експериментально доступних систем, однак не враховують специфіку прогнозних енергосистем, для яких відсутній повномасштабний фізичний аналог. Унаслідок цього виникає наукова проблема розроблення методології кількісного оцінювання обґрунтованості результатів моделювання прогнозних енергетичних систем за відсутності можливості проведення повної емпіричної валідації.

В найбільшій мірі критеріям оцінювання рівня обґрунтованості результатів моделювання прогнозних енергосистем відповідає методика VVUQ, яка застосовується для верифікації, валідації та кількісної оцінки невизначеності складних енергетичних систем [184]. Разом із тим, VVUQ передбачає порівняння

моделі з експериментальними або експлуатаційними даними, що суттєво обмежує її застосування до верифікації і валідації моделей прогнозних енергосистем та потребує створення методичного підходу, який усуває таке обмеження.

Методологічні засади пропонованого підходу полягають у наступному.

Нехай математична модель РЕС задана відображенням

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathcal{M}\left(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\theta}, \tilde{\boldsymbol{\xi}}; s\right), \tag{5.9}$$

де: $\mathbf{x}$ – вектор станів РЕС; $\mathbf{u}$ – керовані змінні; $\boldsymbol{\theta}$ – детерміновані техніко-економічні параметри; $\tilde{\boldsymbol{\xi}}$ – вектор нечітко заданих вхідних величин; $s \in S$ – структурний сценарій; $\tilde{\mathbf{y}}$ – сукупність нечітких вихідних показників, зокрема ENS_e, ENS_h, SSR, TTR, інтегральний індекс стійкості, системні витрати та показники надання енергетичних сервісів. Тут сценарій s задає структуру системи та сукупність умов її функціонування, наприклад склад генеруючих потужностей, наявність BESS, DR, CHP, ступінь інтеграції ВДЕ або аварійний стан. Вектор $\tilde{\boldsymbol{\xi}}$ описує нечітко визначені параметри в межах сценарію: попит, виробіток ВДЕ, ціни, доступність потужностей, тривалість відновлення та інші величини, точні значення яких не можуть бути однозначно встановлені. Отже, сценарний аналіз характеризує альтернативні структурні стани РЕС, а теорія можливостей – множину більш або менш допустимих значень параметрів усередині кожного стану.

Математична верифікація моделі підтверджує коректність реалізації балансів, обмежень і логічних зв'язків моделі. Для кожної контрольної перевірки $i = 1, \ldots, N_{ver}$ вводиться бінарний індикатор

$$I_i = \begin{cases} 1, & |g_i(\mathbf{x}, \mathbf{u})| \le \varepsilon_i \text{ або } h_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \le \varepsilon_i, \\ 0, & \text{в іншому разі,} \end{cases}$$

де: g_i – контрольоване рівняння балансу; h_i – функція порушення нерівності або логічної умови; ε_i – допустима похибка. Показник верифікації визначається як $V_{ver} = \frac{1}{N_{ver}} \sum_{i=1}^{N_{ver}} I_i$, $0 \le V_{ver} \le 1$. Тут значення $V_{ver} = 1$ є необхідною, але недостатньою умовою довіри: воно підтверджує правильність обчислювальної реалізації, а не адекватність прийнятих припущень реальним процесам.

Перевірка охоплювала: баланси електричної енергії, тепла й природного газу; обмеження генеруючих установок і міжсистемного обміну; межі заряду, розряду та стану заряду BESS; резерви потужності; технічні обмеження DR, CHP і P2H; економічні та сервісні обмеження; логічні зв'язки між підсистемами; умови оптимальності та відтворюваність розрахунку. Для балансових рівнянь додатково визначається максимальна відносна нев'язка

$$\delta_{bal}^{max} = \max_{t,k}\left|Supply_{k,t} - Demand_{k,t} - Loss_{k,t}\right| / \max\left(Demand_{k,t}, \epsilon\right),$$

де: k позначає вид енергоносія або сервісу; t – часовий інтервал; ϵ – мала додатна величина, що запобігає діленню на нуль. За результатами перевірки балансів електричної і теплової енергії та природного газу, технічних, економічних і сервісних обмежень, структурних взаємозв'язків між підсистемами та умов оптимізації, порушень не виявлено, тобто V_{ver}= 1,00.

Наголосимо, що валідація моделі перспективної РЕС має доказовий, а не суто експериментальний характер, що потребувало поєднання результатів часткової емпіричної валідації доступних підмоделей із критеріальною перевіркою фізичної, технічної та економічної правдоподібності вихідних KPI. Для визначення інтегрованого показника валідації застосовано геометричне середнє, щоб високе значення однієї складової не компенсувало критично низьке значення іншої $V_{val} = \sqrt{V_{emp}V_{plaus}}$, $0 \le V_{val} \le 1$, де V_{emp} – показник часткової емпіричної валідації, а V_{plaus} – показник критеріальної правдоподібності.

Для підмоделей, щодо яких доступні паралельні ряди фактичних і модельних значень, застосовується часткова емпірична валідація та розраховуються відносна похибка (MAPE) і середня величина похибки (RMSE), яка сильніше враховує великі відхилення: $MAPE_j = \frac{100\%}{n_j}\sum_{t=1}^{n_j}\left|\frac{y_{j,t}^{fact} - y_{j,t}^{mod}}{y_{j,t}^{fact}}\right|$, $RMSE_j = \sqrt{\frac{1}{n_j}\sum_{t=1}^{n_j}\left(y_{j,t}^{fact} - y_{j,t}^{mod}\right)^2}$, $NRMSE_j = \frac{RMSE_j}{y_j^{max} - y_j^{min}}$, де: $y_{j,t}^{fact}$ і $y_{j,t}^{mod}$ – фактичне та модельне значення показника j у момент t; n_j – кількість зіставлень; y_j^{max} і y_j^{min} – межі діапазону фактичних значень. Нормований показник відповідності для підмоделей визначається як $V_j^{data} =$

$\max\left\{0; 1 - \frac{MAPE_j}{MAPE_j^{lim}}\right\}$, або, якщо відносна похибка нестійка поблизу нульових значень, $V_j^{data} = \max\left\{0; 1 - \frac{NRMSE_j}{NRMSE_j^{lim}}\right\}$. Порогові значення $MAPE_j^{lim}$ і $NRMSE_j^{lim}$ установлюються до проведення валідації відповідно до призначення підмоделей та якості вихідних даних.

За відсутності часових рядів застосовується критеріальна перевірка джерел даних $V_{emp} = \frac{1}{N_{emp}} \sum_{j=1}^{N_{emp}} D_j$, де для кожного блоку j задається індикатор $D_j = 1$, якщо параметри блоку підтверджені незалежними статистичними, технічними або нормативними даними та пройшли перевірку розмірності й діапазонів, або $D_j = 0$. Оскільки повномасштабної сервіс-орієнтованої РЕС не існує, емпірична валідація виконувалася не для системи в цілому, а для окремих підмоделей (таблиця 5.15)

Таблиця 5.15 – Результати емпіричної валідації моделі РЕС

№	Блок моделі	Нормована оцінка
1	Електроенергетичний блок	0,85
2	Тепловий блок	0,80
3	Газовий блок	0,80
4	Економічний блок	0,75
5	Сервісний блок	0,80

Тоді $V_{emp} = (0{,}85 + 0{,}80 + 0{,}80 + 0{,}75 + 0{,}80)/5 = 0{,}80$, що свідчить про достатній рівень часткової емпіричної узгодженості моделі за наявних статистичних, технічних та економічних даних.

На етапі критеріальної валідації правдоподібності для кожного ключового показника X_i задаються допустимий інтервал $\left[X_i^{min}, X_i^{max}\right]$ та цільове значення X_i^{opt}, а функція критеріальної відповідності визначається як

$$\varphi_i = \max\left\{0; 1 - \frac{\left|X_i - X_i^{opt}\right|}{\max\left(\left|X_i^{opt} - X_i^{min}\right|, \left|X_i^{max} - X_i^{opt}\right|\right)}\right\}. \quad (5.10)$$

Якщо X_i виходить за допустимі межі, приймається $\varphi_i = 0$. Для показників типу ENS або TTR, оптимальне значення яких дорівнює нулю, формула спрощується до $\varphi_i = \max\{0; 1 - X_i/X_i^{max}\}$. Для показників, бажане значення яких наближається до одиниці, наприклад нормованих індексів стійкості, використовується вираз $\varphi_i =$

$\max\left\{0; \frac{X_i - X_i^{min}}{X_i^{opt} - X_i^{min}}\right\}$, $X_i \le X_i^{opt}$, а загальний показник правдоподібності дорівнює $V_{plaus} = \frac{1}{N_{KPI}} \sum_{i=1}^{N_{KPI}} \varphi_i$.

Результати оцінювання показника правдоподібнісної валідації для репрезентативної моделі РЕС, виконані через функцію критеріальної відповідності ϕ_i, представлено у таблиці 5.16.

Таблиця 5.16 – Результати розрахунку показника правдоподібнісної 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	0,02	0,00	0,00	0,10	0,80
6	TTR	9,45	0,00	0,00	24,0	0,61

Отримане значення V_{plaus} = (0,67 + 0,92 + 0,74 + 0,81 + 0,80 + 0,61)/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.

Застосування положень теорії можливості дозволяє усунути цей недолік. Покажем це. Нехай множина S охоплює альтернативні структурні стани РЕС, а вектор $\tilde{\boldsymbol{\xi}}$ описує нечітко визначені значення попиту, виробітку ВДЕ, цін, доступності обладнання, тривалості відновлення та інших параметрів усередині кожного сценарію. Вихідний показник для фіксованого сценарію s задамо нечітким відображенням $\tilde{Z}_s = f_s(\tilde{\boldsymbol{\xi}})$, де $\tilde{Z}_s$ може відповідати ENS_e, ENS_h, системним витратам $Cost$, TTR, SSR або інтегральному індексу стійкості.

Нехай кожний нечіткий параметр $\tilde{\xi}_j$ описується функцією належності $\mu_{\tilde{\xi}_j}(x) \in [0; 1]$, що відображає ступінь узгодженості значення x з наявними даними, технічними межами та прийнятими припущеннями. Тоді. для трикутного нечіткого числа $\tilde{\xi}_j = (a_j, m_j, b_j)$ функція належності буде мати вигляд

$$\mu_{\tilde{\xi}_j}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_j, \\ \dfrac{x - a_j}{m_j - a_j}, & a_j \le x \le m_j, \\ \dfrac{b_j - x}{b_j - m_j}, & m_j < x \le b_j, \\ 0, & x > b_j, \end{cases}$$

де: a_j і b_j – нижня та верхня допустимі межі; m_j — найбільш обґрунтоване значення. Якщо наявні дані вказують на інтервал однаково обґрунтованих значень, використовується трапецієподібне нечітке число, тобто форма функції належності визначається за фактичними діапазонами, технічними характеристиками, нормативними межами та узгодженістю незалежних джерел, а не за частотами спостережень [185, 186].

Для кожного рівня належності $\alpha \in [0;1]$ формується α-рівень нечіткого параметра $\left[\tilde{\xi}_j\right]_\alpha = \left\{x: \mu_{\tilde{\xi}_j}(x) \ge \alpha\right\} = \left[\xi_{j,\alpha}^L; \xi_{j,\alpha}^U\right]$ та за принципом узагальнення визначається функція належності вихідного показника $\mu_{\tilde{Z}_s}(z) = \sup\limits_{\boldsymbol{\xi}:\, f_s(\boldsymbol{\xi})=z} \min\limits_j \mu_{\tilde{\xi}_j}(\xi_j)$. Практична реалізація такого підходу виконується методом α-рівнів, де для кожного α розв'язуються дві оптимізаційні задачі $Z_{s,\alpha}^L = \min\limits_{\boldsymbol{\xi}\in[\tilde{\boldsymbol{\xi}}]_\alpha} f_s(\boldsymbol{\xi})$, та $Z_{s,\alpha}^U = \max\limits_{\boldsymbol{\xi}\in[\tilde{\boldsymbol{\xi}}]_\alpha} f_s(\boldsymbol{\xi})$, унаслідок чого отримується сімейство вкладених інтервалів $[\tilde{Z}_s]_\alpha = \left[Z_{s,\alpha}^L; Z_{s,\alpha}^U\right]$. Зі збільшенням α інтервал звужується до найбільш обґрунтованої області результату, а за $\alpha = 0$ він охоплює всю допустиму область.

Для критерію виду $\tilde{Z}_s \le Z^{lim}$ міра можливості його виконання визначається як $\Pi_s\left(\tilde{Z}_s \le Z^{lim}\right) = \sup\limits_{z \le Z^{lim}} \mu_{\tilde{Z}_s}(z)$, а міра необхідності – як $N_s\left(\tilde{Z}_s \le Z^{lim}\right) = 1 - \sup\limits_{z > Z^{lim}} \mu_{\tilde{Z}_s}(z)$. Тут міра можливості показує, наскільки виконання критерію узгоджується хоча б з однією допустимою реалізацією, тоді як міра необхідності характеризує стійкість критерію до всієї множини реалізацій, що залишаються можливими. Для показників типу SSR або Res, де кращим є більше значення, аналогічно оцінюються події $\tilde{Z}_s \ge Z^{min}$. Інтегральна необхідність виконання системи критичних обмежень визначається найменшим значенням серед окремих критеріїв

$N_s^{crit} = \min_{q \in Q} N_s(C_{q,s})$, де Q – множина обов'язкових умов щодо ENS_e, ENS_h, TTR, SSR, стійкості та системних витрат; $C_{q,s}$ – відповідний нечіткий критерій. Рішення вважається достатньо обґрунтованим за невизначеності, якщо $N_s^{crit} \geq N^{min}$ для всіх досліджуваних сценаріїв, де N^{min} – встановлений рівень необхідності. Отже, реалізується послідовність «нечітко задані входи → α-рівні → нечіткі вихідні KPI → міри можливості й необхідності виконання критеріїв», яка не вимагає частотних даних і відповідає природі перспективного моделювання РЕС, для яких інформація часто подана інтервалами, технічними межами та лінгвістичними оцінками.

Результати розрахунку сценарної невизначеності ряду показників репрезентативної моделі РЕС представлено в таблиці 5.17.

Таблиця 5.17 – Показники сценарної невизначеності РЕС

Показник	Середнє	Область сценарної невизначеності	Сценарне відхилення	Інтерпретація
$k_{stab,t}$	0,884	[0,840; 0,930]	0,032	Стійкість змінюється незначно
S_t	1,375	[1,077; 1,527]	0,161	Самодостатність в усіх сценаріях
Покриття сервісу	0,566	[0,289; 1,000]	0,263	Найбільш сезонно чутливий блок
ENS_H, тис. МВт·год	127,7	[0; 314,2]	116,4	Невизначеність недовідпуску висока
Імпорт електроенергії, тис. МВт·год	14, 4	[0; 60,3]	19,5	Імпорт має високу сценарну мінливість

Як видно, найстійкішими показниками є $k_{stab,t}$ та S_t, оскільки їхні області сценарної невизначеності залишаються у функціонально прийнятних межах. Найбільшу невизначеність мають тепловий сервіс, ENS_H та імпорт електроенергії, що пояснюється сезонністю теплового навантаження та залежністю від зовнішнього енергозабезпечення.

В межах розглянутого підходу формалізовано процедуру аналізу чутливості, що встановлює нечіткі вхідні параметри, які найбільше розширюють область можливих вихідних результатів. Для локальної перевірки поблизу найбільш обґрунтованого значення застосовано нормований коефіцієнт еластичності $S_{ij}^{loc} = \frac{\partial y_i}{\partial \xi_j} \frac{m_j}{y_i^m} \approx \frac{\Delta y_i / y_i^m}{\Delta \xi_j / m_j}$, де y_i^m – результат за модальними значеннями (за найбільшою частотою, часткою тощо) параметрів, а m_j – модальне значення $\tilde{\xi}_j$. Для оцінювання

впливу повної нечіткості параметра додатково порівнюється ширина вихідного α-інтервалу за початкової та звуженої функції належності. Параметр вважається впливовим, якщо його уточнення істотно зменшує $Z_{s,\alpha}^{U} - Z_{s,\alpha}^{L}$ або підвищує N_s^{crit}.

Для моделей типу РЕС аналіз проводиться щодо попиту, коефіцієнта використання встановленої потужності ВДЕ, CAPEX і OPEX технологій, цін енергоносіїв, доступної ємності BESS, потенціалу DR, тривалості аварійного відновлення та VoLL. Параметри з найбільшим впливом на ширину нечітких результатів мають пріоритет під час уточнення даних, калібрування та формування робастних рішень.

Сценарна робастність характеризує збереження ключових висновків під час переходу між сімома сценаріями S_0–S_6 та доповнює можливості оцінювання параметричної невизначеності, де теорія можливостей визначає допустимі області KPI всередині кожного сценарію, а сценарна перевірка встановлює, чи зберігається перевага сервіс-орієнтованої конфігурації за зміни структури й режимів РЕС. Для цього, для кожного ключового висновку $k = 1, \dots, K$ вводиться індикатор $J_{k,s} = \begin{cases} 1, & \text{висновок } k \text{ зберігається у сценарії } s, \\ 0, & \text{висновок } k \text{ не зберігається у сценарії } s \end{cases}$, за яким часткова та інтегральна оцінки робастності дорівнюють $R_k = \frac{1}{N_{sc}} \sum_{s=1}^{N_{sc}} J_{k,s}$, $V_{rob} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} R_k$. Далі перевіряються результати щодо переваги за SSR, зниження ENS_e і ENS_h, скорочення TTR, підвищення інтегральної стійкості, поліпшення 3E-ефективності та прийнятності системних витрат, що дає змогу комплексно оцінювати загальну стійкість результатів моделювання.

Розрахунок показника робастної валідації здійснено шляхом перевірки збереження основних наукових висновків у сценаріях S_0–S_6 (таблиця 5.18).

Таблиця 5.18 – Результати розрахунку показника робастної валідації

№	Ключовий результат	Кількість сценаріїв	Сценарії, де висновок зберігається	R_i
1	$SSR_{SOR} > SSR_{base}$	7	7	1,00
2	$ENS_{SOR} < ENS_{base}$	7	7	1,00
3	$TTR_{SOR} < TTR_{base}$	7	7	1,00
4	$Res_{SOR} > Res_{base}$	7	7	1,00
5	$3E_{SOR} > 3E_{base}$	7	6	0,92
6	$B_{SOR} > B_{base}$	7	7	1,00

Тоді: V_{rob} = (1,00 + 1,00 + 1,00 + 1,00 + 0,92 + 1,00)/6 = 0,99. Це свідчить, що основні результати моделі є стійкими майже в усіх досліджених сценаріях.

Для опису абсолютної сценарної мінливості кожного показника додатково формується область $\Omega_i^{sc} = [X_i^{min}; X_i^{max}]$, де: $X_i^{min} = \min\limits_{s \in S} X_{i,s}$, $X_i^{max} = \max\limits_{s \in S} X_{i,s}$, $X_{i,s}$ – значення i-го показника у сценарії $s \in S$. Область Ω_i^{sc} утворює детерміновану сценарну оболонку результатів, яка разом із вкладеними α-інтервалами дає змогу розмежувати міжсценарну мінливість і нечіткість параметрів усередині кожного сценарію.

Структурно-функціональну схему проведення кількісного оцінювання обґрунтованості результатів моделювання прогнозних енергетичних систем представлено на рисунку 5.14.



Рис. 5.14. Графічне відображення методики

Для комплексного оцінювання достовірності результатів моделювання запропоновано інтегральний індекс довіри $Cred(M)$, який поєднує нормовані оцінки верифікації, валідації і робастності та розвиває положення VUQ-підходу щодо комплексного оцінювання достовірності прогнозних моделей

$$Cred(M) = \sqrt[3]{V_{ver} \cdot \sqrt{V_{emp} \cdot V_{plaus}} \cdot V_{rob}}, \quad (5.11)$$

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 комплексного оцінювання достовірності та стійкості результатів моделювання сервіс-орієнтованого розвитку РЕС наведено у таблиці 5.19.

Таблиця 5.19 – 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

Для інтерпретації встановлено авторську шкалу: $Cred(M) > 0{,}90$ – високий рівень; $0{,}80 \le Cred(M) \le 0{,}90$ – достатній; $0{,}70 \le Cred(M) < 0{,}80$ – задовільний; $Cred(M) < 0{,}70$ – недостатній. Тобто 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 (рисунок 5.15).

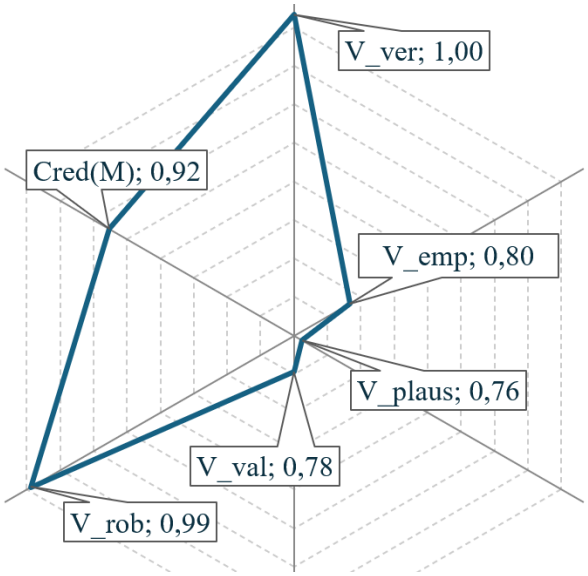


Рис.5.15. Підсумкові значення складових моделювання

Практичне застосування методики передбачає ряд послідовних етапів:

- Визначити мету моделювання, область застосування результатів і наслідки помилкового рішення.
- Зафіксувати структуру моделі, джерела даних, припущення, часову й просторову деталізацію.
- Виконати математичну верифікацію та розрахувати V_{ver}.

- Провести калібрування підмоделей за доступними фактичними даними без використання контрольної вибірки.
- Виконати часткову емпіричну та критеріальну валідацію, визначити V_{emp}, V_{plaus} і V_{val}.
- Сформувати структурні сценарії, нечіткі параметри та їх функції належності всередині кожного сценарію.
- Виконати розрахунки за α-рівнями, побудувати нечіткі KPI, визначити міри можливості й необхідності виконання критичних умов та провести можливісний аналіз чутливості.
- Перевірити збереження ключових висновків у множині сценаріїв і розрахувати V_{rob}.
- Розрахувати $Cred(M)$, подати всі складові індексу, α-інтервали, міри Π і N та межі застосування результатів.

Таким чином, запропонована методика доповнює міжнародну логіку енергетичного моделювання авторським блоком комбінованої валідації, сценарного оцінювання робастності критеріїв ефективності та інтегрального показника обґрунтованості результатів моделювання. Саме тому її обґрунтованість підтверджується не прямим порівнянням з неіснуючим реальним об’єктом, а відповідністю міжнародним принципам VVUQ, коректною математичною поведінкою показника Cred(M), апробацією на репрезентативній моделі РЕС та здатністю формально оцінювати довіру до прогнозних результатів моделювання.

5.6. Методичне забезпечення гарантованої результативності сервісно-інвестиційних рішень РЕС в умовах невизначеності

За останні декілька десятиліть діяльність господарюючих суб’єктів всіх форм власності та функціонального призначення значно активізувалася на ринках сервіс-орієнтованих послуг у зв’язку з суттєвим зростанням ролі енергоефективності та відновлюваних джерел енергії на шляху до низьковуглецевої трансформації сучасної енергетики [122, 187]. Важливо, що до цієї діяльності, окрім енергосервісних компаній (ЕСКО), активно підключаються інші господарюючи суб'єкти, насамперед,

виробники енергоефективного обладнання і матеріалів, постачальники первинних паливно-енергетичних ресурсів, комунальні і приватні підприємства, інвестори, представники торговельних майданчиків, державних і місцевих органів влади та регулюючих органів.

Це пояснюється широким спектром сервіс-орієнтованих послуг, що охоплюють заходи, засоби і ресурси [54, 188], необхідні для підвищення результативності (продуктивності, якості тощо) процесів виробництва, передачі, розподілу, постачання та кінцевого споживання енергії, та які забезпечують створення додаткової доданої вартості (прибутковість, вигоду, корисність, тощо) за рахунок поєднання енергії з енергоефективною технологією та/або дією, що включають процедури технічного обслуговування та контролю, необхідні для надання послуг [70, 71, 73, 74].

Враховуючи розміри та складність ринку сервіс-орієнтованих послуг будемо розглядати структурно-функціональну схему взаємодії його учасників як бізнес-екосистему (рисунок 5.16), у тому числі створену віртуально, що поєднує учасників постачання первинних енергетичних ресурсів (природного газу, вугілля, електроенергії,

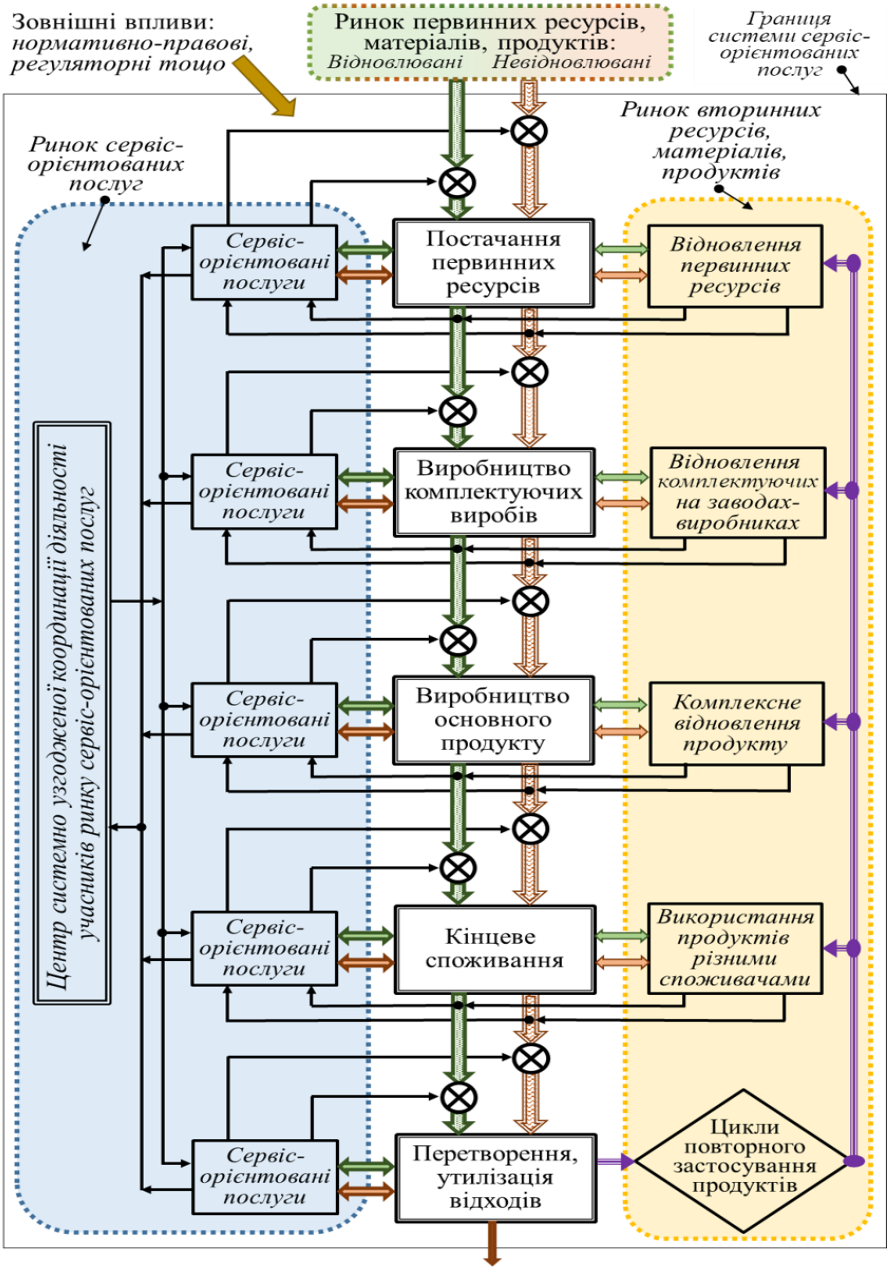


Рис.5.16. Структурно-функціональна схема взаємодії учасників ринку сервіс-орієнтованих послуг РЕС

опалення і охолодження) та енергосервісних послуг, виробників (постачальників) енергоефективного обладнання і матеріалів та основних продуктів, споживачів енергії різних форм власності (приватної, державної, муніципальної, кооперативної тощо) та учасників ринків перетворення і утилізації відходів.

Як наслідок, результативність інвестиційних рішень на сервіс-орієнтованому ринку має враховувати вибір технологій, обсяг і час інвестування, схему фінансування, набір енергетичних сервісів та правила розподілу результатів між учасниками, що 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. Тому, під гарантованою результативністю не коректно декларувати результат, який має бути досягнуто у майбутньому, – а доцільно визначити та прийняти науково обґрунтовану нижню межу результативності, що гарантовано забезпечується для заданої множини сценаріїв і невизначених параметрів.

Це потребувало розроблення методичного 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.

Нехай $d = \{x_i, I_i, \tau_i, q_i, \pi_i, a_i\}_{i \in P}, d \in D$ – узгоджений набір проєктів і контрактних умов сервісно-інвестиційного рішення, де: P – множина доступних проєктів; $x_i \in \{0,1\}$ – ознака включення проєкту i до портфеля; I_i – обсяг потрібних інвестицій; τ_i – строк реалізації проєкту; q_i – гарантований або цільовий обсяг енергетичного сервісу; π_i – правило оплати результату; a_i – правило розподілу ризиків і системних ефектів. Результат рішення залежить від сценарію $s \in S$ і вектора невизначених параметрів $\boldsymbol{\xi} \in \mathcal{U}_s$:

$$\mathbf{K}(d, s, \boldsymbol{\xi}) = (Cost, NPV, ENS_e, ENS_h, SSR, TTR, Res, Flex, EE, SE), \quad (5.12)$$

де: $Cost$ – системні витрати; NPV – чиста приведена вартість; ENS_e і ENS_h – недовідпуск електричної і теплової енергії; SSR – самодостатність; TTR – час

відновлення; Res – індекс стійкості; $Flex$ – гнучкість; EE – енергоефективність; SE – сервісний ефект.

Інфраструктуру прийняття рішень Центром координації діяльності учасників ринку сервіс-орієнтованих послуг будемо розглядати як координаційний блок РЕС, що акумулює заявки, дані й ресурси, формує портфель проєктів, контролює виконання сервісних зобов'язань і коригує рішення за результатами моніторингу. У практичній реалізації ці функції зазвичай виконує регіональна система енергетичного менеджменту, регіональна ЕСКО або інша уповноважена координаційна структура. Тобто, Центр має здійснювати порівняння різнорідних та різномасштабних інвестиційних проєктів в умовах координування діяльності учасників системи, що належать до принципово різних технологічних підсистем, при чому розглядаючи їх в межах цілісної системи, взаємо узгоджуючи локальну ефективність, яка враховує ефекти, одержувані учасниками безпосередньо від залучення інвестицій в рамках окремих проєктів, з загальносистемною ефективністю, яка має співвідносити результати, одержувані усіма учасниками системи в цілому. При цьому, Центр має організувати процес відбору найкращих інвестиційних пропозицій, не ущемляючи інтереси жодного з учасників, бо погіршення ефективності функціонування кожного з них безпосередньо відображається на результатах діяльності всіх інших учасників системи. У цілому, це призводить до необхідності проведення Центром порівняння ефективності реалізації різнопланових інвестиційних проєктів, цільове призначення, розміри фінансування та терміни реалізації яких суттєво відрізняються. А враховуючи той факт, що терміни окупності проєктів з ЕЕ та ВДЕ складають декілька років, проводити таке порівняння з урахуванням зміни вартості грошей в часі за методологією дисконтування їх вартості. Складності полягають у тому, що при порівнянні такого роду проєктів загальновідомі показники оцінки їх ефективності, такі, як чиста приведена вартість (net present value, NPV), період окупності (payback period, PB), внутрішня ставка прибутковості (internal rate of return, IRR), еквівалентний річний ануїтет (equivalent annual annuity, EAA) тощо, які кожен учасник системи розраховує, враховуючи, насамперед, власні інтереси, не

дозволяють Центру проводити коректне порівняння проєктів з точки зору їх загальносистемної ефективності та загальносистемного ресурсозбереження [39].

Моделювання поведінки такої системи будемо проводити, залучаючи алгоритми розв'язання багатокрокових задач динамічного програмування, що ґрунтуються на принципі оптимальності Беллмана, який гласить: яким би не був стан системи *P* перед наступним кроком (рівнем), треба вибрати управління *u* на цьому кроці так, щоб виграш на даному кроці плюс оптимальний виграш на всіх наступних кроках був максимальним [189]. Далі, спираючись на теоретичні положення цього принципу, визначимо поступові зміні стану системи сукупністю змінних стану h_i, $i = \overline{1,n}$, що належать до простора станів H (фазового простора) їх допустимих значень, обмежених техніко-економічними, енергетичними, екологічними тощо умовами ведення технологічного процесу. Динаміку зміни стану системи будемо розглядати вважаючи, що вони відбуваються внаслідок відповідного управляючого заходу, – у нашому випадку при передачі технологічного процесу від одного учасника ринку до іншого. Означимо вплив при переході від стану h_{i-1} до стану h_i як u_i, який у свою чергу, як правило, визначається сукупністю m (вектором) допустимих параметрів управління $u_{ij},\ j = \overline{1,m}$. При цьому зрозуміло, що стан h_i на кожному рівні системи також буде визначатися сукупністю допустимих змінних стану $h_{ik},\ k = \overline{1,l}$. Тобто, на кожному рівні системи управляючи впливи та змінні стану можуть приймати значення з відповідних множин $u_i \in U_i, h_i \in H_i$. Тоді, для кожної зміни стану системи можна записати: $h_i = \varphi_i(h_{i-1}, u_i)$, де φ – функціональна залежність зв'язку станів. З наведених співвідношень видно, що стани системи, що моделюються за розглянутою методологією, визначаються відсутністю післядій, коли кожен наступний *i*-й стан системи буде залежати тільки від попереднього (*i*-1)-го стану та управління u_i. Приймемо, що ефективність реалізації заходів (інвестиційних проєктів) по системі у цілому оцінюється загальносистемною цільовою функцією (функцією оптимальності) системи $F_s = \sum_{i=1}^{n} F_i\,(h_{i-1}, u_i)$, що визначається сумою локальних цільових функцій F_i. Тоді, задача оптимізації буде полягати у максимізації (або мінімізації в залежності від мети) цільової функції системи за умов обмежень на

доступні ресурси (матеріально-технічні, паливно-енергетичні, фінансово-економічні, трудові тощо). При цьому слід наголосити, що задача оптимізації загальносистемної цільової функції не зводиться до арифметичної суми результатів незалежної оптимізації локальних цільових функцій – у нашому випадку цільових функцій учасників системи. Для будь-якого *k*-го рівня реалізації технологічного процесу діяльності учасників ринку сервіс-орієнтованих послуг основне рівняння динамічного програмування (рівняння Беллмана) для задач на максимум / мінімум буде мати вигляд [25, 39, 189]:

$$F_k^*(h_{k-1}) = \max_{u_k} / \min_{u_k} \{F_k(h_{k-1}, u_k) + F_{k+1}^*(h_k)\}, \qquad (5.13)$$

де: $F_{k+1}^*(h_k) = \max_{u_{k+1}} / \min_{u_{k+1}} \{F_{k+1}(h_k, u_{k+1})\}$; $h_k = \varphi_k(h_{k-1}, u_k)$ характеризують ефективність реалізації інвестиційних проєктів при оптимальному управлінні з *k*-го по *n*-й рівні системи.

Застосування цього рівняння дозволяє звести процес розв'язання сформульованої *n*-мірної оптимізаційної задачі динамічного програмування до послідовного вирішення *n* більш простих одномірних задач. Будемо розв'язувати цю задачу за два етапи. На першому, кожен з учасників системи самостійно розраховує показники NPV, PB, IRR, VES (обсяги запланованого річного енерго,-ресурсозбереження), інші важливі для нього показники власних проєктів, наприклад, соціального чи природоохоронного призначення. А на другому етапі Центр буде вирішувати задачу вибору та оптимального розподілення обмежених ресурсів серед представлених проєктів [39]. Базове економічне оцінювання кожного проєкту будемо виконувати за чистою приведеною вартістю $NPV_i = \sum_{t=1}^{T_i} CF_{i,t}/(1 + r_i)^t - I_{i,0}$, де $CF_{i,t}$ – чистий грошовий потік від енергозбереження, надання сервісів і уникнених збитків у періоді t; T_i – горизонт проєкту; r_i – ставка дисконтування; $I_{i,0}$ – початкові інвестиції, а внутрішню норму дохідності IRR_i – визначати з умови

$$\sum_{t=1}^{T_i} CF_{i,t}/(1 + IRR_i)^t - I_{i,0} = 0.$$

Для зіставлення проєктів різної капіталомісткості та тривалості в дослідженні використано індекс інвестиційної привабливості $PIA_i = NPV_i/I_{i,0}T_i$, який показує приведений ефект на одиницю початкових інвестицій і тривалості проєкту та є

допоміжним критерієм ранжування, оскільки віддає перевагу коротшим і менш капіталомістким проєктам та не відображає системні сервісні ефекти.

За обмеженого бюджету B детермінована задача формування портфеля має вигляд: $\max\limits_{x_i} \sum_{i\in P} NPV_i\, x_i;\ \sum_{i\in P} I_{i,0} x_i \le B\ ;\ x_i \in \{0,1\}$. Якщо кожний учасник системи подає взаємовиключні проєкти j на фінансування $k \in K_j$, вводяться змінні $x_{j,k}$, тоді: $\max \sum_j \sum_{k\in K_j} NPV_{j,k}\, x_{j,k};\ \sum_j \sum_{k\in K_j} I_{j,k}\, x_{j,k} \le B;\ \sum_{k\in K_j} x_{j,k} \le 1$.

Нехай, учасники кожного з п’яти рівнів (Р1, Р2, Р3, Р4, Р5) системи Р, представлених на рисунку 5.16, подалі до Центру заявки на реалізацію п’яти інвестиційних проєктів кожний, всього 25 проєктів, при цьому Центр має можливості залучити для їх фінансування 400 грошових одиниць інвестиційних ресурсів (наприклад, млн. грош. од.), які він має розподілити між учасниками та представленими ними проєктами, забезпечуючи максимальну прибутковість (максимальне енерго-, ресурсозбереження тощо) системи у цілому. Результати розрахунку Центром NPV проєктів, поданих на розгляд учасниками Р1, Р2, Р3, Р4, Р5, представлено на Рис. 5.17 (дивись цифри над проєктами). Шляхом вирішення оптимізаційної задачі динамічного програмування серед поданих учасниками проєктів були відібрані проєкти, які відповідають обсягам фінансування у розмірі 40+80+200+40+40 = 400 млн. грош. од. і при цьому, максимальне значення сумарного NPV склало: 8,0 + 9,0 + 18,0 + 4,0 + 5,0 = 44 млн. грош. од. [25].

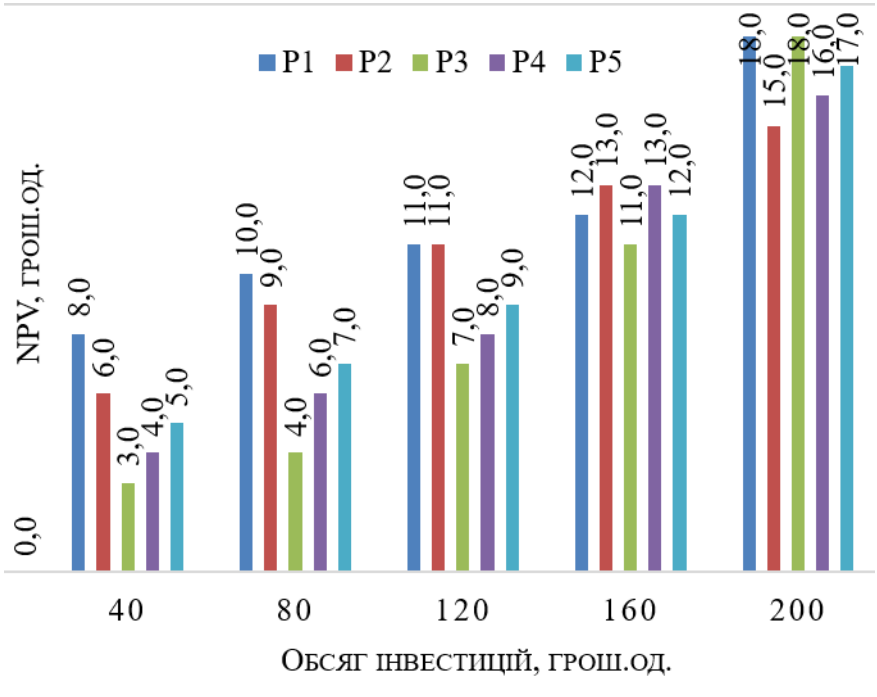


Рис. 5.17. Результати вибору інвестиційних проєктів

Розрахунок підтверджує працездатність процедури розподілу бюджету, однак є детермінованим. Він не гарантує збереження результату за зміни грошових потоків,

ставки дисконтування, вартості обладнання, попиту або доступності технологій. Крім того, оптимальні набори за NPV, IRR і PIA можуть відрізнятися. Тому остаточний вибір має спиратися на багатокритеріальну результативність і перевірку невизначеності.

Для зіставлення показників різної розмірності застосовано нормування. Якщо менше значення KPI є кращим, корисність визначається як $U_{j,s}^{-}(d) = (KPI_{j,s}^{max} - KPI_{j,s}(d))/(KPI_{j,s}^{max} - KPI_{j,s}^{min})$, а якщо кращим є більше значення, то $U_{j,s}^{+}(d) = (KPI_{j,s}(d) - KPI_{j,s}^{min})/(KPI_{j,s}^{max} - KPI_{j,s}^{min})$, де $U_{j,s} \in [0; 1]$; $KPI_{j,s}^{min}$ і $KPI_{j,s}^{max}$ – нижня та верхня межі показника в порівнюваній множині рішень і сценаріїв. Межі нормування фіксуються до остаточного ранжування, щоб зміна складу альтернатив не змінювала оцінки вже проаналізованих рішень. Узагальнена сервісна результативність рішення в сценарії s визначається як $J_s(d) = \sum_{j=1}^{m} w_j\, U_{j,s}(d)$, $\sum_{j=1}^{m} w_j = 1,\ w_j \geq 0$, де w_j – вагові коефіцієнти. (5.14)

Для узгодження з репрезентативною моделлю РЕС агрегований оптимізаційний критерій верхнього рівня зберігає структуру

$$J_s(d) = 0{,}5\, U_{3E,s}(d) + 0{,}3\, U_{SSR,s}(d) + 0{,}2\, U_{Res,s}(d),$$

де: $U_{3E,s}$ – нормована 3E-ефективність, що враховує енергетичний, економічний та екологічний результати; $U_{SSR,s}$ – нормована самодостатність; $U_{Res,s}$ – нормована безпекова стійкість; ваги $0{,}5; 0{,}3; 0{,}2$ визначено в репрезентативній моделі. Для іншого управлінського контексту вони мають проходити аналіз чутливості, а результати слід додатково перевіряти за окремими KPI, щоб агрегування не приховувало критичних порушень ENS або TTR.

Сервісна результативність вважається прийнятною лише за одночасного виконання мінімальних умов

$$ENS_{e,s}(d) \leq ENS_e^{lim}, \quad ENS_{h,s}(d) \leq ENS_h^{lim}, \quad TTR_s(d) \leq TTR^{lim},$$
$$SSR_s(d) \geq SSR^{min}, \quad Res_s(d) \geq Res^{min}, \quad NPV_s(d) \geq 0. \qquad (5.15)$$

Отже, високе інтегральне значення J_s не компенсує порушення обов'язкового сервісного обмеження.

Формалізацію гарантованого результату виконано наступним чином.

Нехай $\mathcal{U}_s$ – допустима множина невизначених параметрів для сценарію s, а робастно гарантована результативність рішення визначається його найгіршим допустимим результатом $G(d) = \min\limits_{s\in S}\min\limits_{\boldsymbol{\xi}\in\mathcal{U}_s} J(d,s,\boldsymbol{\xi})$. Тоді, задача вибору рішення за гарантованим рівнем має вигляд $d^{rob} = \arg\max\limits_{d\in D} G(d)$. Якщо встановлено мінімально прийнятний рівень J^{min}, умова гарантування записується як $J(d,s,\boldsymbol{\xi}) \geq J^{min} \quad \forall s \in S,\ \forall \boldsymbol{\xi} \in \mathcal{U}_s$. Аналогічно, всі критичні технічні та економічні обмеження мають виконуватися для кожної реалізації невизначеності.

Робастна постановка забезпечує сильну гарантію в межах заданої множини $\mathcal{U}_s$, але може призвести до надмірно консервативного портфеля. Для контролю консерватизму використовується бюджет невизначеності Γ, який обмежує кількість або сумарну величину параметрів, що одночасно набувають несприятливих значень [190, 191]. Залежність системних витрат від Γ характеризує ціну робастності. Якщо для $\boldsymbol{\xi}$ можна обґрунтовано задати розподіли можливостей, застосовуються можлівісні обмеження

$$P\{J(d,s,\boldsymbol{\xi}) \geq J^{min}\} \geq 1-\alpha, \qquad (5.16)$$
$$P\{ENS_e(d,s,\boldsymbol{\xi}) \leq ENS_e^{lim}, ENS_h(d,s,\boldsymbol{\xi}) \leq ENS_h^{lim}\} \geq 1-\alpha,$$

де α – допустима можливість невиконання. Така гарантія є статистичною, наприклад, за $\alpha = 0{,}05$ установлені умови мають виконуватися щонайменше з можливістю $0{,}95$. Для втрат $L(d,s,\boldsymbol{\xi})$, що можуть включати перевищення бюджету, вартість ENS і недоотриманий NPV, ризик обмежується з урахуванням тяжкості наслідків за його перевищення.

Форми гарантування, зміст та обмеження застосування сервісно-інвестиційного рішення системно відображено у таблиці 5.20.

Таблиця 5.20 – Результативність сервісно-інвестиційного рішення

Форма	Зміст гарантії	Обмеження застосування
Сценарна	Результат не нижчий за поріг у сформованих сценаріях	Не охоплює невраховані сценарії
Робастна	Поріг виконується для всієї множини $\mathcal{U}_s$	Залежить від коректності меж; може бути консервативною
Можливісна	Поріг виконується з імовірністю не нижчою за $1-\alpha$	Потребує обґрунтованих розподілів
Ризикова	Обмежено середні втрати у хвості розподілу	Необхідно визначити функцію втрат і рівень β
Адаптивна	Результат підтримується шляхом перегляду дій після надходження інформації	Потребує моніторингу й можливості змінювати рішення

Гарантія завжди є умовною щодо конкретної області застосування (набору сценаріїв, меж $\mathcal{U}_s$, розподілів, порогів і горизонту планування), тому її слід характеризувати як гарантування із заданою довірчою можливістю у межах прийнятої множини невизначеності.

За глибокої невизначеності, рішення оцінюється за максимальним жалем (regret), оскільки можливості реалізації сценаріїв можуть бути невідомими або недостатньо обґрунтованими, . У цьому разі, для сценарію s regret визначається як втрата результативності порівняно з найкращим рішенням, яке могло б бути обрано за умови завчасного знання цього сценарію

$$Regret(d,s) = J_s^* - J_s(d), \qquad J_s^* = \max_{d' \in D} J_s(d'),$$

А критерій minimax regret має вигляд $d^{mmr} = \arg\min_{d \in D} \max_{s \in S} Regret(d,s)$.

Рішення d^{mmr} не обов'язково максимізує результат у базовому сценарії, але обмежує найбільшу втрату від помилкового вибору сценарію [192-194]. У межах DMDU (прийняття рішень в умовах глибокої невизначеності) цей критерій використовується разом зі сценарним аналізом, робастними обмеженнями й стрес-тестуванням. Рішення визнається достатньо стійким, якщо одночасно виконуються три умови: $G(d) \geq J^{min}$; максимальний regret не перевищує встановленого рівня R^{lim}; критичні KPI не порушують умов (5.15) – (5.16), що усуває ситуацію, коли портфель має прийнятний середній результат, але є неприйнятним за найгіршим сценарієм або за окремим критичним показником.

Наприклад, підвищення стійкості РЕС зазвичай потребує додаткових інвестицій у резервування, BESS, локальну генерацію, керування попитом, захист і відновлення, для аналізу компромісу яких формується Парето-межа «витрати–стійкість» $\min_d Cost(d)$, $\max_d Res(d)$ за умов виконання енергетичних, сервісних і бюджетних обмежень, вище якої зменшити витрати без погіршення стійкості або підвищити стійкість без збільшення витрат неможливо.

Практично фронтир будується параметричним розв'язанням

$$C^*(\bar{R}) = \min_d \{Cost(d) : Res(d) \geq \bar{R},\ d \in D_{feas}\},$$

де: $\bar{R}$ – послідовно підвищуваний мінімальний рівень стійкості; D_{feas} – множина допустимих рішень. Гранична економічна вартість підвищення стійкості визначається як $SP_{Res}(\bar{R}) = \partial C^*(\bar{R}) / \partial \bar{R} \approx (C^*(\bar{R} + \Delta R) - C^*(\bar{R}))/\Delta R$.

Показник SP_{Res} є тіньовою, або прихованою вартістю стійкості, який показує, наскільки зростають мінімальні системні витрати за посилення вимоги до стійкості на одну одиницю. Так, різке збільшення SP_{Res} вказує на ділянку, де подальше підвищення стійкості стає економічно обтяжливим, тому остаточна точка на фронтирі обирається з урахуванням VoLL, критичності споживачів, бюджетних меж і допустимого ризику, а не лише за мінімальними витратами.

Результати аналізу чутливості NPV для кожного з портфеля проєктів, поданих на розгляд учасниками P1, P2, P3, P4, P5, до зміни обсягів інвестицій, представлено на Рис. 5.18 [25].

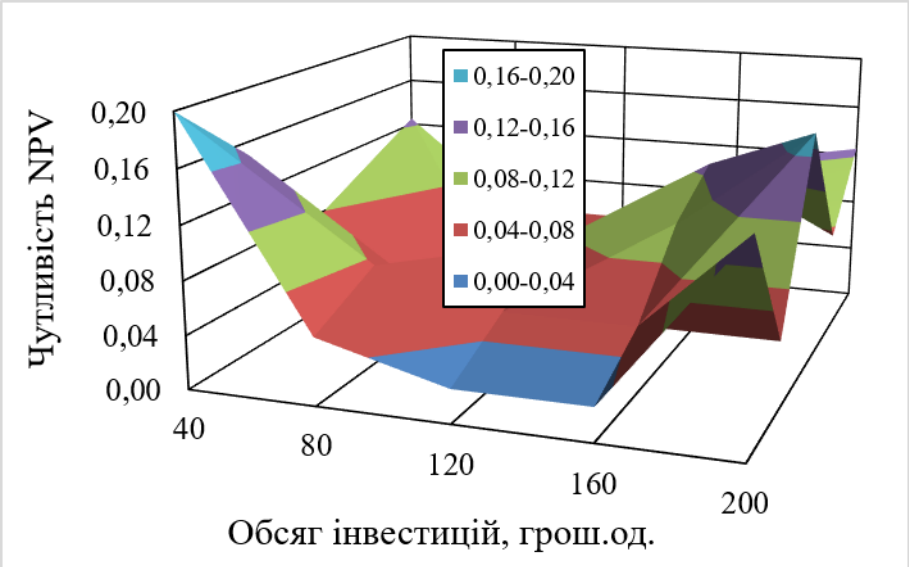


Рис. 5.18. Результати аналізу чутливості портфеля проєктів

Однак для повного оцінювання гарантованої результативності перелік параметрів, крім NPV, потребує аналізу чутливості ставки дисконтування, CAPEX, OPEX, ціни електроенергії й палива, виробітку ВДЕ, попиту, ресурсу BESS, доступного потенціалу DR, тривалості відмов, TTR і VoLL. Тоді, нормований локальний коефіцієнт чутливості буде визначатися як $S_{kj} = (\Delta KPI_k / KPI_k^0)/(\Delta \xi_j / \xi_j^0)$, де параметри з найбільшим $|S_{kj}|$ включаються до стрес-тестів і множини $\mathcal{U}_s$ у пріоритетному порядку. Стрес-сценарії мають охоплювати не лише ізольовані зміни, а й несприятливі комбінації одночасного зростання попиту й цін, зниження виробітку

ВДЕ та недоступності частини BESS, тривалу мережеву відмову, затримку введення проєкту до експлуатації, зростання CAPEX і ставки дисконтування, кібератаку з обмеженням керованості DER тощо. Портфель проходить стрес-тест, якщо після кожного впливу зберігаються умови (5.14) – (5.15), а $J_s(d)$ і $NPV_s(d)$ не знижуються нижче визначених порогів.

Зрозуміло, що інвестиція в проєкти одного учасника, як правило, зменшує можливості, втрати й витрати у інших, тому локальний ефект не дорівнює системному внеску в результативність РЕС. Для послідовності n підсистем із коефіцієнтами ефективності η_i вихідний енергетичний сервіс визначається як $E_{out} = E_{in}\prod_{i=1}^{n}\eta_i$, за фіксованого E_{out} потреба у вхідній енергії дорівнює $E_{in} = E_{out}/\prod_{i=1}^{n}\eta_i$, а системне енергозбереження після підвищення ефективності становить $\Delta E^{sys} = E_{out}\left(1/\prod_i \eta_i^{before} - 1/\prod_i \eta_i^{after}\right)$.

Результати розрахунків показали, що підвищення коефіцієнтів ефективності з 0,7 до 0,8 для п'яти учасників зменшило сукупні втрати з 83,2 до 34,5 умовних одиниць, а системний ефект становив 48,7 умовних одиниць. При цьому вибір учасників і проєктів, між якими розподіляються інвестиції, визначається процедурою оптимізації.

Щоб витрати проєкту не залишалися в одного учасника, тоді як вигоди отримують інші, системний ефект розподіляється за внеском. Для множини учасників N і характеристичної функції $v(A)$, що дорівнює системному ефекту групи $A \subseteq N$, внесок учасника i визначається за значенням Шеплі (4.19), яке відображає середній граничний внесок учасника в усіх допустимих послідовностях формування спільного рішення [195] і використовується для розподілу зекономлених витрат, сервісної винагороди, компенсації інвестицій або платежів за гнучкість. При цьому, контрактна виплата учаснику визначається як

$$Pay_i = Base_i + \lambda_E\phi_i(\Delta E) + \lambda_C\phi_i(\Delta Cost) + \lambda_R\phi_i(\Delta Res),$$

де: $Base_i$ – базова винагорода або компенсація; λ_E, λ_C, λ_R – ставки монетизації енергетичного, економічного та стійкісного ефектів. Розподіл має виконувати умову бюджетної збалансованості та не погіршувати становище учасників порівняно з їх відмовою від спільного проєкту.

Для довгострокових проєктів одноразово сформоване робастне рішення може втрачати актуальність, тому методика передбачає двоетапну структуру

$$\min_{d^0}\left\{C^0(d^0)+\mathcal{R}_s\left[\min_{d_s^1\in A(d^0,s)} C^1(d_s^1,s)\right]\right\},$$

де: d^0 – початкове інвестиційне рішення, яке приймається до реалізації невизначеності; $C^0(d^0)$ – витрати, пов'язані з реалізацією початкового інвестиційного рішення; s – сценарій зовнішніх умов; d^1 – коригувальне (адаптаційне) рішення, що приймається після ідентифікації сценарію s; $C^1(d^1,s)$ – витрати на реалізацію коригувального рішення d^1за сценарію s; $A(d^0,s)$ – множина допустимих адаптаційних рішень за заданого початкового рішення d^0 та реалізованого сценарію s; R_s – оператор оцінювання ризику для множини розглянутих сценаріїв.

Моніторинг охоплює фактичне енергоспоживання, наданий сервіс, грошові потоки, ENS, TTR, доступність обладнання, стан BESS, активований DR та виконання контрактних KPI. Після кожного контрольного періоду виконуються оновлення параметрів, перевірка відхилення «план–факт», повторне оцінювання, перегляд портфеля або графіка інвестицій та коригування сервісних платежів.

Системне відображення складових процедури сервісно-інвестиційного рішення, яке розкриває його простежуваність від вихідних припущень до контрактних зобов'язань і управлінського вибору, представлено у таблиці 5.21.

Таблиця 5.21 – 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 фронтиру
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	ϕ_i, Pay_i	Учасники отримують не менше резервної альтернативи	Перегляд механізму компенсацій і сервісної винагороди

У цілому доведено потребу доповнення базових показників NPV, IRR і PIA сервісними KPI, багатокритеріальною оцінкою, робастними та можливісними обмеженнями, що 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.

5.7. Висновки до розділу

1. Систематизовано методичний інструментарій моделювання розвитку РЕС в умовах ризиків і невизначеності, який поєднує сценарний аналіз, стохастичне програмування, робастну оптимізацію, нечіткі моделі, аналіз чутливості, стрес-тестування та методи прийняття рішень за глибокої невизначеності (DMDU). Обґрунтовано селективне застосування цих методів залежно від характеру невизначеності: імовірнісні моделі використовуються за наявності статистично підтверджених розподілів, сценарні та інтервальні – за неповної інформації, а minimax regret – за неможливості достовірно визначити ймовірності майбутніх станів. Такий комплекс забезпечує послідовний перехід від формування невизначених вхідних даних до вибору стійкого варіанта сервіс-орієнтованого розвитку РЕС.

2. Розроблено базові положення сценарного моделювання розвитку РЕС, відповідно до яких сценарій визначає структурну конфігурацію, технологічний склад і зовнішні умови функціонування системи, тоді як параметрична невизначеність характеризує можливі відхилення всередині кожного сценарію. Сформовано систему базових, трансформаційних, декарбонізаційних, сервіс-орієнтованих, аварійних і стресових сценаріїв та визначено вектор їх результативності, що охоплює системні витрати, енергоефективність, гнучкість, самодостатність, ENS, TTR, стійкість і сервісний ефект. Для порівняння альтернатив запропоновано уніфіковане нормування KPI, багатокритеріальне агрегування та критерій minimax regret, що дає змогу обирати рішення, стійкі до помилкового визначення майбутнього сценарію.

3. Сформовано та параметризовано репрезентативну мультисекторну модель РЕС на прикладі Хмельницької області, яка охоплює взаємопов’язані електроенергетичну, теплову і газову підсистеми, місцеву та розподілену генерацію, ВДЕ, BESS, CHP, P2H, керування попитом, імпорт, резерви й енергетичні сервіси.

Розрахункове ядро моделі утворюють баланси виробництва, перетворення, накопичення, транспортування та споживання енергії з урахуванням втрат, технологічних, ресурсних, економічних і сервісних обмежень. Параметризація регіональних навантажень, структури генерації, доступності місцевих ресурсів, вартості технологій і показників надійності забезпечила відтворення характерних особливостей Хмельницької РЕС та сформувала інформаційну основу для сценарно-оптимізаційних розрахунків.

4. За результатами сценарно-оптимізаційного дослідження встановлено, що сервіс-орієнтований розвиток РЕС забезпечується не окремою технологією, а узгодженою інтеграцією ВДЕ, накопичувачів, керування попитом, когенерації, локальних резервів та сервісів EaaS і HaaS. Для кількісного порівняння конфігурацій використано інтегральний критерій, що поєднує 3E-ефективність, самодостатність і безпекову стійкість, а також показники ENS, TTR і системних витрат. Побудова фронтиру «витрати – стійкість – самодостатність» дала змогу визначити варіанти розвитку РЕС та оцінити граничні витрати підвищення стійкості через показник її прихованої вартості. Застосування значень Шеплі забезпечило кількісне визначення внеску окремих технологій і сервісів у сукупний системний ефект та створило основу для його обґрунтованого розподілу між учасниками РЕС.

5. Розроблено методику кількісного оцінювання достовірності та стійкості результатів моделювання РЕС, яка розвиває положення VVUQ шляхом поєднання математичної верифікації, часткової емпіричної та критеріальної валідації, оцінювання невизначеності, аналізу чутливості і сценарної робастності. Для репрезентативної моделі отримано показник верифікації $V_{ver} = 1{,}00$, комбінованої валідації $V_{val} = 0{,}76$ та сценарної робастності $V_{rob} = 0{,}99$. Розрахований за геометричним середнім інтегральний індекс $Cred(M) = 0{,}92$ свідчить про високий рівень довіри до результатів у межах заявленої мети моделювання. При цьому визначено, що $Cred(M)$ характеризує достатність виконаних процедур перевірки, а не ймовірність істинності моделі або відсоткову точність прогнозу.

6. Розроблено методичне забезпечення гарантованої результативності сервісно-інвестиційних рішень РЕС, у межах якого гарантований результат визначено як

формально встановлену нижню межу ефективності, що забезпечується для заданої множини сценаріїв і невизначених параметрів або із заданою можливістю. Традиційні показники NPV, IRR і PIA доповнено сервісними KPI, робастними та можливісними обмеженнями, minimax regret і стрес-тестуванням. Запропоновано використовувати фронтир «витрати – стійкість» та показник прихованої вартості стійкості для обґрунтування рівня резервування, а системний ефект енергоефективності розподіляти відповідно до граничного внеску учасників. Сформований контур зворотного зв'язку забезпечує адаптивне коригування портфеля проєктів, параметрів моделі, сервісних зобов'язань і платежів за результатами моніторингу.

Отже, у розділі сформовано цілісне методичне забезпечення моделювання сервіс-орієнтованого розвитку РЕС в умовах ризиків і невизначеності, яке об'єднує сценарне формування майбутніх станів, мультисекторне балансно-оптимізаційне моделювання, багатокритеріальний вибір технологічних конфігурацій, кількісне оцінювання достовірності та формування гарантовано результативних сервісно-інвестиційних рішень. Запропонований підхід дає змогу одночасно оцінювати економічну ефективність, енергетичну самодостатність, гнучкість, надійність і стійкість РЕС, визначати ціну підвищення стійкості, контролювати ризик несприятливих результатів та узгоджувати інтереси учасників. Апробація на репрезентативній моделі Хмельницької області підтвердила придатність розробленого інструментарію для порівняння сценаріїв, обґрунтування пріоритетів інвестування та підтримки управлінських рішень щодо сервіс-орієнтованої трансформації регіональних енергосистем.

РОЗДІЛ 6. ПРИКЛАДНІ ЗАСАДИ СЕРВІС-ОРІЄНТОВАНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНАЛЬНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

6.1. Концептуальні положення сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем у складі інтегрованої енергосистеми України

Сучасний етап трансформації енергетики характеризується одночасним розвитком процесів децентралізації генерації, поширенням відновлюваних джерел енергії, систем накопичення енергії, активного управління попитом, електрифікації кінцевого споживання, цифровізації та секторальної інтеграції. Зазначені процеси змінюють не тільки технологічну структуру енергетичних систем, а й принципи планування їх розвитку, оскільки одна й та сама потреба споживача або енергосистеми може забезпечуватися різними комбінаціями генеруючих, накопичувальних, мережевих, споживчих та інформаційно-управлінських ресурсів [196].

Особливого значення ця трансформація набуває на регіональному рівні, де безпосередньо взаємодіють територіально розподілені споживачі, об'єкти централізованої та розподіленої генерації, електричні, теплові й газові мережі, накопичувачі енергії, об'єкти критичної інфраструктури, локальні енергетичні системи та інші суб'єкти енергетичних відносин. Регіональна енергосистема при цьому не є ізольованим енергетичним утворенням, а функціонує як складова інтегрованої енергосистеми України, що обумовлює необхідність узгодження регіональних рішень із загальносистемними вимогами щодо стійкості, гнучкості, самодостатності та керованості.

Сучасні дослідження підтверджують поступовий перехід від трактування розподілених систем генерації і споживання як сукупності окремих технологічних об'єктів до їх розгляду як керованих і координованих портфелів, здатних забезпечувати множину локальних та системних функцій, які змінюють традиційну односпрямовану архітектуру енергопостачання на систему з двоспрямованими потоками енергії та інформації, що потребує розвитку відповідних засобів моніторингу, координації та агрегування [197]. Водночас, розвиток інформаційно-комунікаційних технологій створює можливості для участі агрегованих DER у

функціонуванні енергетичних ринків і наданні відповідних системних сервісів [198, 199], а подальший розвиток цього напряму – з використанням ресурсів активних розподільних мереж для забезпечення допоміжних послуг системам вищого рівня, що потребує поглиблення координації між операторами систем передачі та розподілу [200, 201]. При цьому, збільшення кількості DER обумовлює необхідність зміни традиційної парадигми планування розвитку РЕС та перехід до координованого планування із застосуванням комплексного оцінювання пропускної спроможності, динамічних операційних обмежень та областей гнучкості, оскільки послідовний розгляд окремих об'єктів без оцінювання їх сукупного впливу може призводити до нераціонального використання їх виробничих спроможностей та обмеження подальшої інтеграції розподілених ресурсів [202]. Це підтверджує доцільність переходу від переважно ресурсно-технологічної парадигми розвитку РЕС до сервіс-орієнтованої парадигми, за якої первинним об'єктом планування є потреба споживача, території або енергосистеми та необхідний рівень відповідного енергетичного сервісу, тоді як технології розглядаються як один із можливих засобів його забезпечення.

Як наслідок. логічна послідовність планування розвитку енергосистеми у традиційній постановці, представлена як: прогноз попиту → визначення дефіциту потужності або пропускної спроможності → вибір енергетичного об'єкта → інвестиційне рішення → введення потужності, для сервіс-орієнтованого розвитку замінюється на послідовність: визначення потреби в енергетичному сервісі → аналіз альтернативних технологій та організаційних механізмів → оцінювання сервісного і системного результату → інвестиційне рішення → реалізація раціональної конфігурації «сервіси–технології». Принципова відмінність такої заміни полягає в тому, що технологія перестає бути вихідною точкою планування, оскільки, наприклад, потреба у забезпеченні безперервності електропостачання може реалізовуватися не лише введенням додаткової генеруючої потужності, а й використанням BESS, керуванням попитом, локальною когенерацією, формуванням мікромереж, резервуванням критичних споживачів або певною комбінацією зазначених засобів. Це не встановлює однозначної відповідності між сервісом і технологією, навпаки, характерною ознакою сервіс-орієнтованого розвитку є технологічна варіативність

забезпечення сервісу, коли один сервіс може реалізовуватися різними технологіями, а одна технологія забезпечувати декілька сервісів.

SoS-представлення РЕС як територіально локалізованої системи систем з функціонально самостійними, але взаємопов'язаними електроенергетичною, тепловою, газовою, накопичувальними, споживчими та інформаційно-комунікаційними підсистемами, має принципове значення для сервіс-орієнтованого розвитку енергосистеми, оскільки дає змогу перейти від незалежної оптимізації окремих підсистем до оцінювання їх функціональної взаємодії. Наприклад, дефіцит електричної потужності може компенсуватися не тільки введенням додаткової електричної генерації, але й зміною режимів теплопостачання, використанням теплового акумулювання, P2H, когенерації, керуванням заряджанням EV або зміною графіків кінцевого споживання. РЕС при цьому виконує одночасно декілька функцій: є простором формування попиту на енергетичні сервіси; середовищем концентрації та координації розподілених ресурсів; об'єктом регіонального енергетичного менеджменту; потенційним джерелом гнучкості та інших системних сервісів; складовою ІЕС України.

Водночас оптимальність рішення для окремого споживача або локальної системи не означає автоматично його оптимальності для РЕС, так само як локальна оптимальність РЕС не гарантує загальносистемного ефекту ІЕС, отже фундаментальною вимогою реалізації сервіс-орієнтованого розвитку є 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 (відповідності завдань та функцій, що покладаються на той чи інший рівень управління та об'єктивним можливостям ефективного їх забезпечення), які характеризують доцільність забезпечення сервісу на тому рівні системи, на якому це технічно можливо, економічно обґрунтовано та не погіршує функціонування систем вищого рівня;
- достовірності результату, що передбачає встановлення кількісних або формалізованих KPI, які забезпечують можливість порівняння планового та фактичного рівнів сервісу.

Зазначені положення утворюють взаємоузгоджену систему, що потребує реалізації у межах п'яти її складових рівнів: об'єктного, локального, муніципального (територіального), регіонального та загальносистемного, де:

- на об'єктному рівні формуються потреби кінцевого споживача та реалізуються сервіси енергоефективності, локальної генерації, управління навантаженням, накопичення, резервування та автоматизованого енергоменеджменту;
- на локальному рівні здійснюється координація групи взаємопов'язаних об'єктів (мікромереж, промислового майданчика, енергетичної спільноти, житлового комплексу або іншого локального енергетичного утворення), агрегування ресурсів яких дозволяє використовувати ефекти взаємоузгодження графіків виробництва та споживання;

- на муніципальному рівні координуються енергетичні потреби й ресурси громади або групи громад, комунальна інфраструктура, програми енергоефективності та локальні енергетичні ресурси;
- на регіональному рівні формується портфель сервісів РЕС, координуються локальні ресурси, визначаються пріоритети розвитку та оцінюються міжсекторальні ефекти;
- на загальносистемному рівні агреговані ресурси РЕС взаємодіють з ІЕС України та можуть забезпечувати не тільки енергетичний обмін, але й гнучкість, резерви та інші системні функції.

Сучасні дослідження підтверджують перспективність такого переходу від пасивних розподільних систем до активних систем, здатних підтримувати функціонування систем вищого рівня [200].

Структура та складові багаторівневої організації енергетичних сервісів РЕС представлені у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Багаторівнева організація енергетичних сервісів РЕС

Рівень	Основна потреба	Характерні сервіси	Основні механізми	Суб'єкти	Результат для РЕС	Результат для ІЕС
Об'єктний	ефективність надійність	DR, резервування, енергоеф-сть	BESS, PV, CEM	споживач, ЕСКО	зменшен-ня попиту, резерву-ня	потенціал гнучкості
Локальний	баланс і стійкість	агрегування, балансування	мікрогрід BESS, DER	локальний оператор, агрегатор	локальна стійкість	агрегова-ний ресурс
Муніципальний	оптимізація територіального забезпечення	Енергоменеджмент, локальні програми	DER, CHP, ВДЕ, CEM	громада, енергоменеджер	зниження витрат і дефіцитів	зменшення пікового навантаження
Регіональний	системна координація	портфель сервісів, гнучкість, резервування	VPP, DERMS, агрегування	регіональні суб'єкти управління	стійкість та ефективність РЕС	регіональний ресурс гнучкості
Загально-системний	баланс і безпека ІЕС	резерви, балансування, системна гнучкість	агреговані ресурси РЕС	оператори систем	доступ до ресурсів ІЕС	підвищен. системної керован-сті

Принциповою особливістю наведеної у таблиці архітектури є двоспрямованість сервісної взаємодії, за якої система вищого рівня забезпечує ресурсні та системні можливості для нижчого рівня, але водночас агреговані можливості нижчого рівня можуть використовуватися системою вищого рівня, і де керована децентралізація не

протиставляється інтеграції, а створює додатковий ресурс для її ефективного функціонування.

Ключовим об'єктом сервісної взаємодії є портфель енергетичних сервісів РЕС, під яким розуміється структурована сукупність сервісів, необхідних для досягнення встановлених цільових характеристик функціонування та розвитку регіональної енергосистеми, насамперед сервісів енергозабезпечення, енергоефективності, гнучкості, надійності та стійкості, інтеграції ВДЕ, агрегації, екологічних, декарбонізаційних, інформаційно-управлінських та ринкових тощо. Структура портфелю є динамічною, що змінюється залежно від стану РЕС, структури попиту, доступності ресурсів, зовнішніх обмежень і цільових показників розвитку, саме тому сервіс-орієнтоване планування потребує переходу від оцінювання виключно ресурсних характеристик до оцінювання функціональної здатності ресурсу забезпечувати конкретний сервіс.

Узагальнення наведених положень дозволяє сформувати концептуальну архітектуру сервіс-орієнтованої взаємодії РЕС-ІЕС, представлену на рисунку 6.1. Вона охоплює: потреби регіону (достатність енергозабезпечення, надійність, стійкість, гнучкість, доступність, економічність, декарбонізацію); портфель енергетичних сервісів (енергозабезпечення, енергоефективність, резервування, інтеграцію ВДЕ, інформаційно-управлінські сервіси); функціональні вимоги (генерування, перетворення, накопичення, резервування, зміну попиту, агрегування, керування); технологічні ресурси (ВДЕ, DER, BESS, CHP, P2H, DR, EV, мікромереж); організаційно-цифровий та сценарно-оптимізаційний контури; двоспрямовану сервісну взаємодію РЕС-ІЕС.

Розглянута на рисунку 6.1 архітектура відображає перехід від управління окремими енергетичними активами до управління результатами їх координованого використання у формі енергетичних сервісів.

Практичну реалізацію розглянутої концептуальної архітектури сервіс-орієнтованого розвитку РЕС пропонується здійснювати як замкнений адаптивний цикл, де на першому етапі якого проводиться діагностика стану РЕС (аналіз енергетичних балансів, структури генерації та споживання, стану інфраструктури,

характеристик надійності, доступних DER, накопичувачів і ресурсів керування попитом).

На другому етапі ідентифікуються потреби та дефіцити сервісів, які трактуються як недостатній рівень гнучкості, стійкості, резервованості, керованості або інший розрив між необхідним і фактичним рівнями сервісу, а на третьому етапі встановлюються цільові рівні сервісів та відповідні KPI: ENS, SSR, TTR, CI-backup, економічні, екологічні та інші показники, обґрунтовані у попередніх розділах.

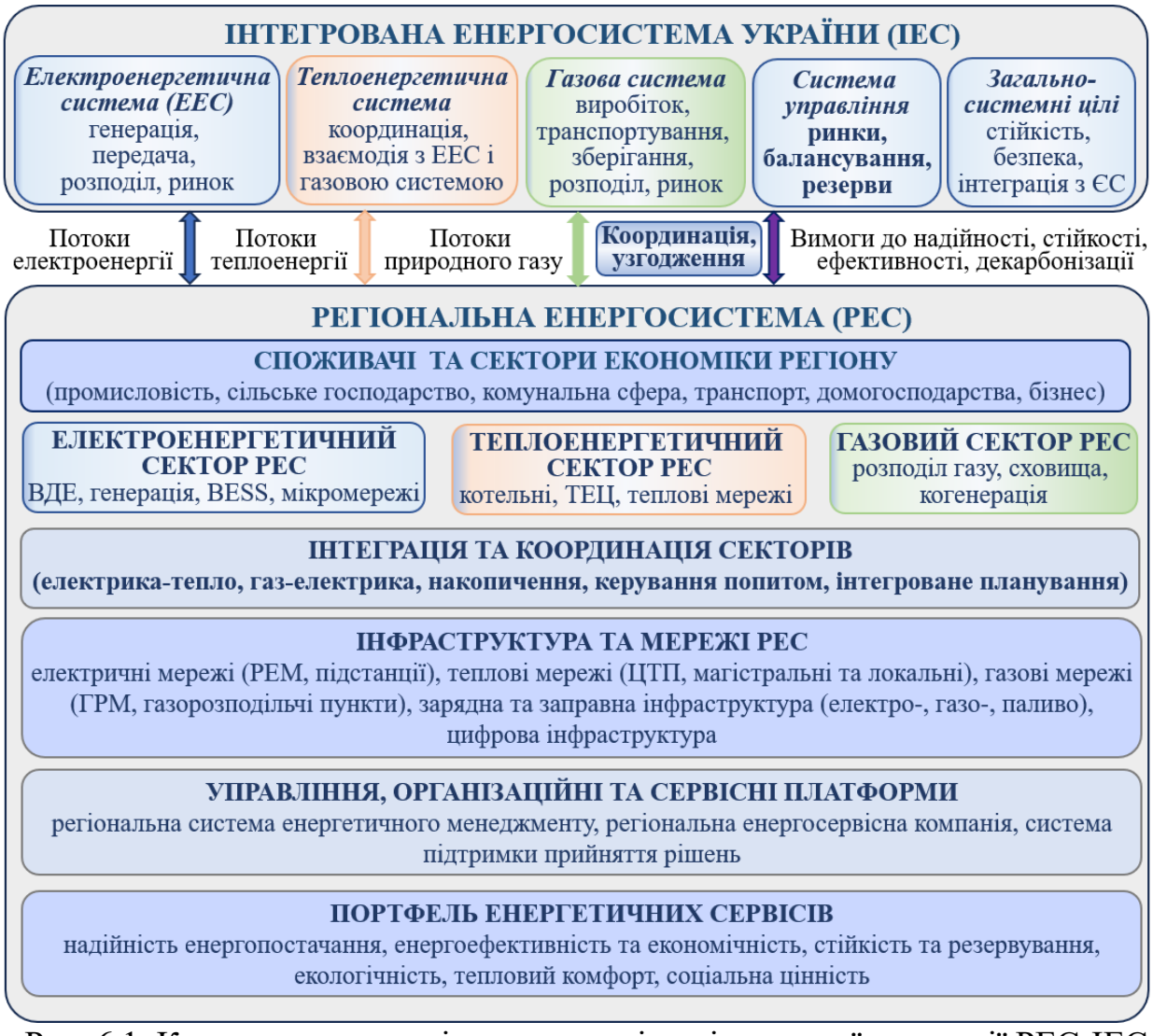


Рис. 6.1. Концептуальна архітектура сервіс-орієнтованої взаємодії РЕС-ІЕС

На четвертому етапі формуються альтернативні портфелі сервісів, здатні забезпечити досягнення встановлених цілей, на п'ятому етапі для кожного портфеля формуються альтернативні технологічні конфігурації DER, ВДЕ, BESS, CHP, P2H, DR, EV, мікромереж та інших ресурсів, на шостому етапі здійснюється сценарне моделювання та оцінювання впливу невизначеності, де за умов нечіткості вихідних

параметрів використовується апарат теорії можливостей, на сьомому етапі здійснюється багатокритеріальна оптимізація альтернатив, на восьмому етапі обирається раціональна конфігурація «сервіси–технології» з урахуванням економічних, технічних, сервісних, екологічних критеріїв і показників стійкості, на дев'ятому етапі здійснюється організаційно-інвестиційна реалізація рішення із визначенням відповідальних суб'єктів, джерел фінансування, контрактних механізмів та моделей ЕСКО/EaaS, на десятому етапі проводиться моніторинг та M&V фактичних параметрів функціонування, на одинадцятому етапі фактично досягнуті значення порівнюються із цільовими сервісними KPI і на дванадцятому етапі здійснюється адаптивне коригування портфеля сервісів, технологічної конфігурації або цільових параметрів, після чого цикл повторюється.

Узагальнена форма механізму реалізації сервіс-орієнтованого розвитку РЕС відображена на рисунку 6.2.



Рис. 6.2. Структура механізму реалізації сервіс-орієнтованого розвитку РЕС

Принциповою властивістю запропонованого механізму є наявність зворотного зв'язку, в межах якого розвиток РЕС розглядається не як одноразове формування довгострокового плану, а як безперервний адаптивний процес коригування структури ресурсів і портфелю сервісів відповідно до фактично досягнутих результатів та зміни умов функціонування. При цьому, сервіс-орієнтований розвиток РЕС не передбачає їх технологічного відокремлення від ІЕС України, а, навпаки, визначається можливостями поєднання переваг локалізації ресурсів із перевагами функціонування у складі інтегрованої системи.

Такий підхід відповідає сучасній тенденції до залучення агрегованих DER активних розподільних систем до забезпечення сервісів системам вищого рівня [200], а також до розширення участі DER у ринкових механізмах на основі відповідних інформаційно-комунікаційних та агрегаторних технологій [198].

У цьому контексті у роботі розглядаються чотири функціональні ролі РЕС: як споживача сервісів, що отримує енергію, резерви, балансувальні та інші можливості від систем вищого рівня; як постачальника сервісів, який використовує ресурси генерації, накопичення та керування попитом для забезпечення власних потреб та потреб системи; як агрегатора сервісів, що консолідує можливості локальних систем та окремих споживачів у ресурс регіонального або загальносистемного значення; як адаптивної підсистеми ІЕС, який змінює власні режими відповідно до стану інтегрованої енергосистеми при збереженні необхідного рівня забезпечення регіональних потреб.

З урахуванням наведеного, критерієм ефективності регіонального рішення визначається не максимальна автономність РЕС, а раціональне поєднання локальної самодостатності, регіональної стійкості, використання можливостей ІЕС та здатності РЕС забезпечувати системно корисні сервіси, що дозволяє сформулювати важливе положення: децентралізація та інтеграція є взаємоузгодженими напрямами розвитку РЕС, де децентралізація забезпечує просторову й технологічну диверсифікацію ресурсів, інтеграція – можливість їх координованого використання, а їх взаємодія формує синергію системного ефекту.

Узагальнення отриманих результатів дозволяє сформувати систему взаємопов'язаних концептуальних положень практичної реалізації сервіс-орієнтованого розвитку РЕС:

1. Цільове положення – сервісна результативність, за яким цільовим орієнтиром є не максимізація встановленої потужності або кількості енергетичних активів, а забезпечення необхідного рівня енергетичних сервісів для споживачів, регіону та інтегрованої енергосистеми;

2. Об'єктне положення – РЕС розглядається як система систем, у якій електричні, теплові, газові, накопичувальні, споживчі та інформаційно-управлінські підсистеми взаємодіють для забезпечення сукупності сервісів;

3. Структурне положення – планування розвитку здійснюється на основі портфеля взаємопов'язаних енергетичних сервісів, а не незалежного формування набору технологічних об'єктів;

4. Технологічне положення – потреба в сервісі є первинною відносно вибору технології; один сервіс може забезпечуватися альтернативними технологіями, а одна технологія – реалізовувати декілька сервісів;

5. Просторове положення – сервіс-орієнтований розвиток реалізується на об'єктному, локальному, муніципальному, регіональному та загальносистемному рівнях і потребує узгодження рішень між ними;

6. Операційне положення – розвиток РЕС має забезпечувати можливість зміни (гнучкість) виробництва, споживання, накопичення та міжсекторального перетворення енергії відповідно до потреб системи;

7. Безпекове положення – оцінювання альтернатив повинно враховувати стійкість і гарантованість сервісу, здатність системи зберігати критичні функції, мінімізувати дефіцит сервісу та відновлення необхідного рівня енергозабезпечення після порушень;

8. Інформаційне положення – вимірюваність кожного сервісу підтверджується системою KPI, а планових та фактичних результатів – процедурами моніторингу та M&V;

9. Управлінське положення – планування, реалізація, моніторинг та коригування утворюють замкнений управлінський цикл;

10. Системне положення – РЕС виступає одночасно споживачем, постачальником та агрегатором енергетичних сервісів, що забезпечує можливість формування системних ефектів на основі взаємодії локальних, регіональних і загальносистемних ресурсів.

Таким чином, сформовані концептуальні положення визначають прикладну логіку реалізації сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, за яким на відміну від ресурсно-технологічного підходу, де розвиток переважно пов'язується зі створенням або модернізацією окремих енергетичних об'єктів, передбачається первинність потреб у сервісах, технологічну варіативність способів їх забезпечення, багаторівневе узгодження рішень та постійний зворотний зв'язок між запланованими і фактичними результатами. Це створює передумови для переходу від фрагментарного використання ВДЕ, DER, BESS, DR, CHP, P2H, EV, мікромереж та цифрових систем управління до їх координованої інтеграції в межах єдиного сервісного портфеля, внаслідок чого РЕС набуває властивостей не лише територіальної підсистеми енергозабезпечення, а й активної сервісної підсистеми ІЕС України, здатної адаптувати структуру виробництва та споживання, агрегувати розподілені ресурси, забезпечувати локальну і регіональну стійкість та одночасно формувати системно корисні ефекти.

6.2. Синергетичні ефекти та ефекти масштабу сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем

Можливість отримання результатів, які не можуть бути досягнуті шляхом незалежного використання окремих технологій, обумовлює необхідність дослідження синергетичних ефектів та ефектів масштабу, які виникають внаслідок координації різнорідних ресурсів, сервісів і суб’єктів, що є принциповим, оскільки економічна та технічна доцільність сервісної трансформації визначається не лише характеристиками окремих ВДЕ, BESS, DR, CHP, P2H або цифрових систем керування, а й ефектом їх взаємодії.

У сервіс-орієнтованого розвитку РЕС синергетичний ефект обумовлюється додатковим результатом, що виникає при спільному використанні двох або більше сервісних ресурсів порівняно із сумою результатів їх ізольованого застосування, а ефект масштабу характеризує зміну питомих витрат, сервісної результативності, гнучкості та стійкості внаслідок агрегування ресурсів, збільшення кількості учасників або розширення просторової межі.

Такий підхід узгоджується із сучасними дослідженнями агрегування розподілених енергетичних ресурсів, у яких цінність координації пов'язується з економікою масштабу, керуванням ризиками, підвищенням операційної ефективності, можливістю формувати портфель гнучкості та забезпечувати системні сервіси [198, 200, 203]. Водночас для РЕС ці ефекти мають ширший зміст, оскільки охоплюють не лише електроенергетичну, а й міжсекторну електро-тепло-газову інфраструктуру. Основні види синергетичних ефектів у сервіс-орієнтованій РЕС та їх зміст системно представлено у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Види синергетичних ефектів у сервіс-орієнтованій РЕС

Вид синергії	Механізм виникнення	Типова комбінація	Основний результат	KPI
Технологічна	Часові і режимні обмеження ресурсів	ВДЕ + BESS	Зменшення обмеження ВДЕ та дефіциту	ENS, обмеження, R
Сервісна	Один актив забезпечує декілька сервісних функцій	BESS + DR	Резервування, гнучкість, обмеження максимуму навантаження	гнучкість, ENS, TTR
Міжсекторна	Координація електро-, тепло- та газового контурів	CHP + P2H + TES	Перенесення навантаження між енергоносіями	TC, SSR, CO_2
Просторова	Компенсування локальних дисбалансів між вузлами/громадами	Мікрогрід + агрегація	Зменшення пікових потоків та локального дефіциту	ΔP, ENS, втрати
Організаційна	Спільне планування, диспетчеризація та M&V	CEM/DERMS + ESCO/VPP	Зменшення транзакційних і координаційних витрат	OPEX, час реагування
Інформаційна	Спільні дані, прогнозування та контроль	CEM + смарт вимірювання	Підвищення спостережуваності та керованості	MAPE, TTR, KPI доступність

Для кількісного оцінювання синергії формалізовано множину сервісних ресурсів $\Omega = \{$ВДЕ, BESS, DR, CHP, P2H, EMS, …$\}$. Прийнято $F(X)$ – значення обраного критерію результативності для конфігурації $X \subseteq \Omega$. Залежно від постановки,

F може відображати зменшення системних витрат, скорочення ENS, приріст інтегральної стійкості R, збільшення самодостатності SSR або інтегрального сервісного показника

$$\Delta F_{syn}(X) = F(X) - F(\emptyset) - \sum_{i \in X}[F(\{i\}) - F(\emptyset)], \quad (6.1)$$

де: $\Delta F_{syn}(X)$ – абсолютний синергетичний ефект конфігурації X; $F(\emptyset)$ – результат базової конфігурації без додаткового сервісного ресурсу; $F(\{i\})$ – результат ізольованого використання і-го ресурсу; $[F(\{i\}) - F(\emptyset)]$ – приріст від спільного використання ресурсів множини X. Формула віднімає суму окремих приростів від спільного приросту і залишок визначає ефект їхньої взаємодії. Для показників, які максимізуються, $\Delta F_{syn}(X) > 0$ свідчить про позитивну синергію, а для витрат або ENS, що мінімізуються, знак доцільно нормувати так, щоб позитивне значення також відповідало поліпшенню

$$I_{syn}(X) = \Delta F_{syn}(X)/(\sum_{i \in X}|F(\{i\}) - F(\emptyset)| + \varepsilon), \quad (6.2)$$

де: I_{syn} – нормований індекс синергії; ε – мале додатне число, що запобігає діленню на нуль; чисельник – додатковий результат взаємодії з (6.1), а знаменник – сума модулів окремих приростів, яка задає масштаб, відносно якого оцінюється синергія; значення $I_{syn} > 0$ характеризує компліментарність (взаємозалежність) ресурсів, $I_{syn} \approx 0$ – переважно адитивний результат, а $I_{syn} < 0$ – взаємне обмеження або конкуренцію ресурсів; перед застосуванням формул (6.1)–(6.2) усі критерії подають у спрямованості “більше – краще”, а для мінімізованих показників використовують величину їх зменшення відносно базової конфігурації.

Оцінювання вектору синергетичних ефектів S_{syn} дозволяє уникнути ситуації, коли економічний виграш супроводжується погіршенням надійності або, навпаки, максимізація стійкості досягається непропорційним зростанням витрат

$$S_{syn} = (S_{TC}, S_{ENS}, S_R, S_{Flex}, S_{SSR}, S_{CO2}), \quad (6.3)$$

де компоненти цього вектору характеризують, відповідно, синергію за системними витратами, незабезпеченою енергією, стійкістю, гнучкістю, самодостатністю та екологічним результатом.

Ефект масштабу в РЕС виникає тоді, коли розширення координованого портфеля ресурсів змінює середню вартість або результативність одиниці наданого сервісу, що є характерним для цифрових платформ, агрегаторів, систем енергоменеджменту та M&V, наявність значної частки умовно-постійних витрат яких через їх розподіл між більшою кількістю об'єктів може зменшувати питомі витрати. Одночасно різноманітність профілів генерації, споживання та гнучкості створює портфельний ефект, за якого агрегована потреба в резерві може бути нижчою за просту суму індивідуальних резервів [203, 204]

$$\mathrm{AC_{serv}(N)} = C_{fix}/N + \mathrm{c_{var}}(N), \tag{6.4}$$

де: $\mathrm{AC_{serv}(N)}$ – середні витрати на одиницю сервісу при N учасниках; C_{fix} – умовно-постійні витрати цифрової, організаційної та вимірювальної інфраструктури; $\mathrm{c_{var}}$ – змінні питомі витрати. Економія масштабу має місце, якщо $d\mathrm{AC_{serv}}/\mathrm{d}N < 0$ у релевантному діапазоні N

$$\mathrm{E_{scale}(N_1, N_2)} = 1 - \mathrm{AC_{serv}(N_2)/AC_{serv}(N_1)},\ \mathrm{N_2 > N_1}, \tag{6.5}$$

де показник $\mathrm{E_{scale}} > 0$ означає зниження питомих витрат при переході від масштабу $\mathrm{N_1}$ до $\mathrm{N_2}$. Для технічних сервісів аналогічно оцінюється масштабний приріст результативності

$$\mathrm{G_{scale}^{R(N_1,N_2)}} = [\mathrm{R(N_2) - R(N_1)}]/\mathrm{R(N_1)}. \tag{6.6}$$

Однак збільшення масштабу не є безумовно позитивним, оскільки після певної межі зростають комунікаційні вимоги, складність координації, вимоги до кіберстійкості, похибки агрегованого прогнозування, мережеві обмеження та транзакційні витрати, тому для сервіс-орієнтованого розвитку важливо визначати не максимальний, а раціональний масштаб агрегування [198, 200]

$$\mathrm{N^*} = \arg\min_{N}\{\mathrm{TC}(N) + \lambda_{\mathrm{ENS}}\mathrm{ENS}(N) - \lambda_{\mathrm{R}}\mathrm{R}(N) + \mathrm{C_{coord}}(N)\}, \tag{6.7}$$

де: N^* – раціональний масштаб сервісної інфраструктури; $\mathrm{C_{coord}}$ – витрати координації, цифрової взаємодії, верифікації та адміністрування; λ_{ENS} і λ_{R} – вагові коефіцієнти, що відображають цінність надійності та стійкості. У багатокритеріальній постановці (6.7) доцільно розглядати як скаляризоване представлення відповідної Парето-задачі.

Систематизація напрямів і ефектів масштабу, можливих обмежень та критеріїв контролю реалізації сервісних заходів представлено у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Напрями та ефекти масштабу реалізації сервісних заходів

Напрям заходу	Позитивний ефект масштабу	Можливе обмеження	Критерій контролю
Технологічний	Спільне використання резерву, BESS, DR	Мережеві обмеження, перевантаження	ENS, ΔP, R
Цифровий	Розподіл постійних витрат EMS/DERMS/M&V	Зростання обсягу даних і кіберризиків	OPEX/об'єкт, час затримки, кібер KPI
Організаційний	Стандартизація процедур і контрактів	Зростання транзакційної складності	C_{coord}, TTR
Інвестиційний	Пакетування проєктів, типові рішення	Неоднорідність об'єктів і профілів	CAPEX/сервіс, NPV
Сервісний	Агрегування малих ресурсів у керований портфель	Конфлікт локальних і системних цілей	Вплив послуг, SSR, R

Найбільш виражена синергія очікується для технологій, що мають різні часові, енергетичні та функціональні характеристики. Так, ВДЕ формують низьковуглецевий енергетичний ресурс, але створюють потребу в гнучкості, BESS забезпечує швидке балансування та часовий перенос енергії, DR змінює профіль попиту без обов'язкового введення нової генерації, CHP та P2H зв'язують електричну і теплову підсистеми, ECM/DERMS/VPP перетворюють фізично розподілені активи на керований сервісний портфель [197, 204, 205].

Для пари RES+BESS синергетичний результат проявляється у зменшенні відсікання генерації ВДЕ, підвищенні локального використання виробленої енергії та зменшенні ENS, для BESS+DR принциповим є розподіл функцій у часі, DR може знижувати або переносити пік, тоді як BESS компенсує швидкі залишкові небаланси, для CHP+P2H+TES синергія виникає завдяки можливості вибору між енергетичними носіями та часовому перенесенню теплового навантаження. Відповідно, технологічна нейтральність сервісного підходу означає вибір не «кращої технології взагалі», а комбінації, що мінімізує вартість досягнення заданого рівня сервісу [204, 205]

$$k_{\text{syn}} = \text{F}(\text{RES}, \text{BESS}, \text{DR}, \dots)/[\text{F}_{\text{RES}} + \text{F}_{\text{BESS}} + \text{F}_{\text{DR}} + \cdots]. \quad (6.8)$$

Тут коефіцієнт сервісу k_{syn} застосовується для показників, де більша величина означає кращий результат. Якщо $k_{\text{syn}} > 1$, сукупна конфігурація забезпечує над-

адитивний ефект, при $k_{\text{syn}} = 1$ відповідає адитивності, а при $k_{\text{syn}} < 1$ – неповній реалізації потенціалу взаємодії. Для мінімізованих показників, зокрема TC або ENS, використовується обернене або попередньо нормоване представлення.

Синергетичний ефект не можна вважати сталою характеристикою конфігурації, оскільки він залежить від зовнішніх умов, насамперед, доступності генерації, газу, пропускної здатності мереж, рівня попиту, виробітку ВДЕ тощо, тому їх оцінювання здійснюється в сценарному просторі, які розглядаються як дискретні комбінації умов для перевірки збереження сервісної результативності

$$\mathbf{K_{i,j}} = \left(\mathrm{TC_{i,j}}, \mathrm{ENS_{i,j}}, \mathrm{R_{i,j}}, \mathrm{Flex_{i,j}}, \mathrm{SSR_{i,j}}, \dots\right), \mathrm{i} = 0, \dots, 4;\ \mathrm{j} = 0, \dots, 6, \qquad (6.9)$$

де вектор $\mathbf{K_{i,j}}$ описує результат *i*-ї сервісної конфігурації $\mathrm{A_i}$ за *j*-го зовнішнього сценарію $\mathrm{S_j}$. Повна перехресна матриця $\mathrm{A_i} \times S_j$ є логічним інструментом перевірки того, чи зберігається ефект агрегування за різних типів збурень, водночас кількісне заповнення такої матриці потребує окремого прогону розрахункової моделі для 5x7 = 35 комбінацій.

Для нечітко заданих параметрів сценарна перевірка виконується на основі положень теорії можливості. Нехай ẏ – нечіткий параметр із функцією належності $\mu\ \dot{x}(x)$. Тоді можливість виконання сервісної вимоги $g(x) \leq 0$ може бути оцінена через множину допустимих значень параметра

$$\Pi[g(\dot{x}) \leq 0] = \sup_{x:g(x)\leq 0} \mu_{\dot{x}(x)}, \qquad (6.10)$$

де на відміну від імовірнісної інтерпретації П характеризує ступінь можливості виконання умови в межах заданої нечіткої інформації і використовується для перевірки робастності сервісних рішень за неповної та нечіткої інформації.

Оскільки сервіс-орієнтований розвиток одночасно впливає на економічні, технічні, екологічні та безпекові характеристики, для узагальнення результатів застосовано нормований інтегральний індекс. При цьому нормування має забезпечувати однакову спрямованість часткових показників. тобто збільшення кожного нормованого компонента повинно відповідати поліпшенню

$$\mathrm{SI_{syn}} = \sum_{q=1}^{Q} \mathrm{w_q z_q},\ \ \sum_{q=1}^{Q} \mathrm{w_q} = 1,\ \ 0 \leq \mathrm{z_q} \leq 1, \qquad (6.11)$$

де: SI_{syn} – інтегральний індекс сервісно-синергетичної результативності; z_q – нормовані часткові показники; w_q – їх ваги. До складу z_q можуть входити зниження ТС та ENS, приріст R, Flex і SSR, зменшення викидів та підвищення впливу сервісу. Ваги визначаються відповідно до цільової постановки, а їх вплив перевіряється аналізом чутливості

$$\Delta SI_{syn} = SI_{syn}^{coord} - SI_{syn}^{isol}, \quad (6.12)$$

де величина ΔSI_{syn} відображає інтегральний ефект переходу від ізольованого до координованого використання ресурсів. Саме цей показник доцільно трактувати як узагальнену кількісну характеристику синергії сервіс-орієнтованого розвитку, тоді як окремі компоненти вектора (6.3) пояснюють джерела отриманого результату (таблиця 6.4).

Таблиця 6.4 – 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	↑	Здатність зберігати/відновлювати сервіс
Гнучкість	Індекс/обсяг гнучкості	Flex	↑	Можливість адаптації до небалансів
Самодостатність	Коефіцієнт самодостатності	SSR	↑	Зниження залежності від зовнішнього забезпечення
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 багатокритеріальний результат

Результати сценарно-оптимізаційного дослідження показують, що перехід між конфігураціями фронтиру A_0–A_4 супроводжується одночасним збільшенням частки ВДЕ, потужності BESS і DR та підвищенням інтегральної стійкості. Для базової точки A_0 використано параметри ВДЕ 34 %, BESS 89,8 МВт, DR 54,5 МВт та R = 0,946, тоді як подальше розширення сервісних можливостей приводить до A_4 із ВДЕ 52 %, BESS 205,3 МВт, DR 96,2 МВт та R = 0,973. Така траєкторія не доводить синергію кожної технологічної пари окремо, але демонструє системний ефект координованого

розширення портфеля, де вища стійкість досягається не одним ресурсом, а узгодженою зміною декількох сервісних компонентів.

Важливим результатом є визначення нелінійності граничної вартості додаткової стійкості, оскільки зі збільшенням R наступний приріст стійкості потребує дедалі більшого залучення резервних, накопичувальних та керованих ресурсів, тому практичне рішення не повинно автоматично відповідати точці максимальної стійкості, а визначатися на фронтирі з урахуванням допустимого рівня ENS, обмеження бюджету, вимог до сервісу та сценарної робастності.

Це означає, що економічна цінність сервіс-орієнтованого розвитку формується трьома взаємопов'язаними механізмами: компліментарності технологій, коли недоліки одного ресурсу компенсуються можливостями іншого; агрегування, яке перетворює сукупність малих і неоднорідних ресурсів на керований сервісний портфель; та формування спільної організаційно-цифрової інфраструктури, завдяки якій витрати прогнозування, диспетчеризації, вимірювання та верифікації розподіляються між багатьма об'єктами.

Водночас синергія не виникає автоматично. За відсутності координації збільшення кількості DER може посилити локальні мережеві обмеження, підвищити вимоги до резерву, ускладнити прогнозування і збільшити інформаційні та кіберризики, тому ключовою умовою позитивного ΔSI_{syn} є наявність регіональної системи управління, яка забезпечує спостережуваність, прогнозування, оптимізацію, M&V та адаптивне коригування портфеля сервісів [197, 200, 204].

Оскільки синергетичний результат залежить від узгодженого використання розподілених ресурсів, то на регіональному рівні необхідний суб'єкт або функціональний центр, здатний бачити систему не як набір незалежних енергетичних об'єктів, а як портфель взаємопов'язаних сервісів. Його завданнями мають бути інвентаризація сервісного потенціалу, визначення цільових KPI, агрегування даних, формування сценаріїв, координація локальних систем енергоменеджменту, оцінювання синергії та ефектів масштабу, а також підготовка управлінських рішень [198, 204].

Таким чином, уточнено зміст синергетичного ефекту та ефекту масштабу стосовно сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, запропоновано розрізняти технологічну, сервісну, міжсекторну, просторову, організаційну та інформаційну синергію, сформовано систему показників для їх кількісного оцінювання, введено абсолютний і нормований індекси синергії, показники економії масштабу та інтегральний сервісно-синергетичний індекс. Обґрунтовано, що найбільша практична цінність виникає не від максимізації окремого ресурсу, а від координованого поєднання ВДЕ, накопичення, керування попитом, міжсекторних перетворень та цифрового управління. Для перевірки стійкості таких рішень запропоновано матричну постановку $A_i \times S_j$, де для нечітких параметрів використано положення теорії можливостей, встановлено, що позитивний ефект масштабу обмежується мережевими, інформаційними, організаційними та кібернетичними чинниками, тому предметом управління має бути раціональний, а не максимальний масштаб агрегування.

6.3. Практичні рекомендації щодо створення та сервіс-орієнтованого розвитку регіональних систем енергетичного менеджменту

Реалізація сервіс-орієнтованого розвитку РЕС потребує створення організаційно-управлінського механізму з урахуванням особливостей зростання кількості DER, накопичувачів, керованих навантажень, електромобілів, локальних енергетичних систем і цифрових засобів керування [18, 19, 115, 206, 207]. У таких умовах традиційного обліку енергоспоживання недостатньо: необхідні моніторинг, координація, агрегування та оптимізація розподілених ресурсів у реальному або близькому до реального часу [197, 208, 209].

Актуальність такого переходу для України посилюється необхідністю підвищення стійкості енергозабезпечення в умовах пошкодження централізованої інфраструктури. Так, у дорожній карті IEA щодо децентралізованої електроенергетичної системи України DER розглядаються як один із ключових напрямів посилення енергетичної безпеки, стійкості та гнучкості, а цифровізація й

координація розподілених ресурсів – як необхідні передумови реалізації їх системної цінності [165].

Міжнародний стандарт ISO 50001 визначає систему енергетичного менеджменту як інструмент систематичного поліпшення енергетичної результативності на основі циклу постійного вдосконалення Плануй–Виконуй–Перевіряй–Дій [210]. Водночас базовим об’єктом цього стандарту є організація, тому запропонована у роботі процедура створення регіональної системи енергетичного менеджменту (РСЕМ) розвиває її процесну логіку на рівні РЕС як системи систем і не ототожнюється із сертифікацією окремої організації.

Під регіональною системою енергетичного менеджменту пропонується розуміти організаційно-функціональну та інформаційно-аналітичну систему координації процесів планування, моніторингу, управління й оцінювання енергетичних сервісів на регіональному рівні, яка забезпечує узгодження енергетичних потреб споживачів, можливостей розподілених енергетичних ресурсів, інфраструктурних обмежень і цільових показників економічності, надійності, стійкості, гнучкості та декарбонізації РЕС.

РСЕМ не є додатковим оперативно-диспетчерським центром і не повинна підмінювати функції операторів систем передачі, розподілу, газових чи теплових мереж. Її призначення полягає у формуванні надоб’єктного інформаційно-аналітичного та координаційного контуру, який перетворює розрізнені дані про потреби, ресурси, обмеження й доступні сервіси на обґрунтовані управлінські та інвестиційні рішення, що відповідає сучасному розвитку DERMS, де ключовими функціями є спостережуваність, агрегування, координація, оптимізація та взаємодія між ієрархічними рівнями керування [197, 209].

Метою РСЕМ є забезпечення цільового рівня енергетичних сервісів регіону шляхом раціонального використання локальних і зовнішніх енергетичних ресурсів із дотриманням вимог економічності, надійності, стійкості, гнучкості та екологічності. Її принципова відмінність від традиційного об’єктно орієнтованого енергоменеджменту полягає у перенесенні центру уваги з мінімізації споживання

окремого об’єкта на забезпечення вимірюваного портфеля сервісів для сукупності взаємопов’язаних об’єктів і підсистем.

До передумов створення PCEM належать фрагментарність інформації про енергетичні ресурси, розподіленість активів між багатьма власниками, недостатня координація електро-, тепло- і газопостачання, зростання частки змінної генерації ВДЕ, необхідність використання BESS та DR, потреба в кількісному оцінюванні стійкості, а також необхідність M&V фактичного ефекту реалізованих енергосервісних заходів. Сучасні дослідження гнучкості підтверджують, що керування попитом, накопичення і цифрові системи стають важливими джерелами гнучкості DER-насичених систем [211, 212].

Основні функції PCEM та потенційні результати їх реалізації в РЕС в узагальненому вигляді представлено в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Основні функції PCEM та результати їх реалізації

Функція	Основний зміст	Інструменти	Результат
Моніторинг	Збір даних про попит, генерацію, мережі, ресурси та якість сервісів	смарт-вимірювання, CEM/BEMS, SCADA, реєстри	Актуальний цифровий енергетичний профіль
Інвентаризація	Визначення DER, резервів і потенціалу гнучкості	географічна інформаційна система, реєстри, паспортизація	Реєстр ресурсів і сервісного потенціалу
Прогнозування	Оцінювання попиту, ВДЕ, піків, 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 зовнішніх умов	S_0–S_6, стрес-тестування, теорія можливостей	Множина сценарних результатів
Оптимізація	Вибір раціонального портфеля ресурсів і сервісів	MILP/інші моделі, фронтир	Рекомендована конфігурація
Інвестиційне планування	Формування та пріоритизація проєктів	CAPEX/OPEX, VoLL, тіньова ціна	Інвестиційний портфель
M&V	Підтвердження фактичного результату	базова лінія, KPI, IPMVP/FEMP принципи	Верифікований сервісний ефект
Адаптація	Коригування за відхиленнями KPI	зворотний зв'язок, повторне моделювання	Оновлений сервісний портфель

Для практичної реалізації зазначених функцій пропонується шестиконтурна організаційно-функціональна архітектура PCEM, що поєднує інформаційно-

моніторинговий, аналітико-прогнозний, сервісно-діагностичний, сценарно-оптимізаційний, управлінсько-інвестиційний блоки та блок M&V і адаптації:

- *Інформаційно-моніторинговий блок* аналізує інформаційне середовище РЕС щодо електричного і теплового попиту, газоспоживання, генерації, ВДЕ, BESS, DR, EV, стану мережевої інфраструктури, аварійності, тарифів і витрат, метеорологічних умов та викидів, де необхідність активного розвитку DER і формування реєстрів ресурсів відзначається як одна з базових передумов їх ефективної інтеграції [197, 213];
- *Аналітико-прогнозний блок* забезпечує прогнозування попиту, генерації ВДЕ, пікових навантажень, доступності гнучкості та потенційного дефіциту, враховуючи, що у DER-насичених системах прогнозування і кількісна оцінка гнучкості є окремою функцією енергоменеджменту, за якою гнучкість має часові, потужнісні, енергетичні та мережеві обмеження [211];
- *Сервісно-діагностичний блок* трансформує традиційні енергетичні баланси у систему сервісних потреб і доступних можливостей, де для k-го сервісу в момент часу t сервісний дефіцит пропонується визначати як $Gap_{k,t} = D_{k,t}^{req} - A_{k,t}^{serv}$, де: $D_{k,t}^{req}$ – необхідний обсяг k-го енергетичного сервісу; $A_{k,t}^{serv}$ – доступний обсяг його забезпечення. За $Gap_{k,t} > 0$ у системі існує дефіцит відповідного сервісу, а за $Gap_{k,t} \leq 0$ наявний потенціал є достатнім. Така постановка змінює логіку планування: дефіцит резервування або гнучкості не ототожнюється автоматично з необхідністю введення нової генерації, а може компенсуватися BESS, DR, CHP, P2H, мікромереж або їх координованою комбінацією [214, 215];
- *Сценарно-оптимізаційний блок* є практичним середовищем використання методології сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, в межах якої альтернативні конфігурації перевіряються за сценаріями S_0–S_6, оцінюються за TC, ENS, R, SSR, сервісними впливами та іншими KPI, після чого формується фронтир ефективних рішень, метод Шеплі застосовується для декомпозиції спільного результату, а тіньова ціна – для оцінювання граничної вартості стійкості;

- *Управлінсько-інвестиційний блок* трансформує результати оптимізації у портфель практичних заходів: BESS, ВДЕ, DR, CHP, P2H, мікромереж, CEM/BEMS, цифрові платформи та енергосервісні механізми;
- *Блок M&V та адаптації* забезпечує перевірку фактично досягнутого результату, базуючись на протоколах M&V щодо визначення базової лінії, вимірювання результату та коригування на зміну умов, відповідні принципи застосування яких систематизовано в IPMVP Core Concepts і FEMP Guidelines [216-218].

В межах пропонованої організаційно-функціональної архітектури PCEM реалізує замкнений адаптивний цикл «планування → реалізація → вимірювання → верифікація → оцінювання → коригування → повторне планування», що методологічно узгоджується з логікою постійного вдосконалення ISO 50001, але розширюється на багаторівневу регіональну сервісну інфраструктуру.

Сучасні огляди CEM і DERMS показують доцільність ієрархічної або розподіленої координації, за якої локальні ресурси зберігають автономність, а вищі рівні забезпечують агрегування, оптимізацію та узгодження цілей [208, 209].

Пропонується виділяти п’ять рівнів організації сервіс-спрямованої архітектури PCEM: об’єктний (CEM/BEMS окремої будівлі, підприємства або DER); локальний (мікромереж, локальний енергетичний комплекс, енергетичне співтовариство); територіальний (система енергоменеджменту громади); регіональний (PCEM); загальносистемний (взаємодія з операторами енергетичної інфраструктури, агрегаторами та іншими суб’єктами інтегрованої енергосистеми в межах їх компетенцій).

Між рівнями мають циркулювати два зустрічні інформаційні потоки: знизу догори передаються фактичний попит, стан ресурсів, доступна гнучкість, сервісні потреби та KPI, а зверху вниз – цільові показники, обмеження, рекомендації, сценарні умови та сервісні завдання, що дозволяє поєднати локальну автономність із системною координацією.

Створення PCEM доцільно здійснювати поетапно. *На першому етапі* проводиться енергетична діагностика регіону: аналіз структури попиту, генерації,

мережевої інфраструктури, критичних споживачів і основних зон дефіциту. *На другому етапі* виконується інвентаризація ресурсів і суб'єктів, включаючи ВДЕ, BESS, CHP, резервну генерацію, DR, EV, P2H, локальні системи та наявні EMS/BEMS. *Третій етап* передбачає формування цифрової інформаційної бази РЕС та правил якості, періодичності й доступності даних. *На четвертому* визначаються сервісні потреби і дефіцити, *на п'ятому* формується система цільових KPI, *на шостому* створюються альтернативні сервісно-технологічні конфігурації, *на сьомому* здійснюється їх сценарно-оптимізаційне оцінювання та перевірка стійкості, *на восьмому* формується інвестиційний портфель і визначаються організаційно-економічні механізми реалізації. *Дев'ятий етап* охоплює впровадження, моніторинг та M&V, а *десятий* – адаптивне коригування цільових показників, сервісного портфеля та інвестиційних пріоритетів.

Запропонований алгоритм має циклічний характер. Це принципово, оскільки попит, технології, ціни, доступність ресурсів і зовнішні обмеження змінюються, а отже конфігурація РЕС не може вважатися одноразово оптимізованою. Аналогічний принцип постійного вдосконалення є базовим для ISO 50001, тоді як у PCEM він доповнюється сценарною та сервісною адаптацією.

Для переведення категорії «енергетичний сервіс» з концептуального рівня у практичний контур регіонального планування пропонується запровадити паспорт енергетичного сервісу РЕС (таблиця 6.6), який формалізує сервіс як вимірюваний об'єкт управління з визначеними потребою, доступністю, дефіцитом, часовими характеристиками, технологічними джерелами, вартістю та процедурою M&V. Наприклад, якщо потреба у швидкодіючому резерві становить 120 МВт, а підтверджений доступний потенціал BESS, DR та інших ресурсів – 85 МВт, сервісний дефіцит дорівнює: $Gap_{reserve}$ = 120 – 85 = 35 (МВт), $K_{serv,reserve}$ = 85/120 = 0,708. Отже, забезпечено 70,8 % визначеної потреби, при цьому управлінське завдання буде полягати не у виборі наперед заданої технології, а у визначенні найбільш раціональної комбінації ресурсів для компенсації дефіциту 35 МВт. Саме це відображає перехід від ресурсно-технологічної до сервісної логіки розвитку РЕС.

Таблиця 6.6 – Структура паспорта енергетичного сервісу РЕС

Параметр	Зміст
Код/назва сервісу	Однозначна ідентифікація сервісу
Споживач/територія	Об’єкт, група споживачів або зона надання
Необхідний обсяг	D^{reg}
Доступний обсяг	A^{serv}
Сервісний дефіцит	$Gap = D^{reg} - A^{serv}$
Період доступності	Години, сезон, режим
Час активації	Допустимий час реакції
Тривалість	Необхідна тривалість надання
Технологічні джерела	BESS, DR, CHP, DER, P2H, мікрогрід тощо
Власник/постачальник	Суб’єкт, що контролює ресурс
Основні KPI	ENS, R, TTR, Flex, SSR
Вартість сервісу	Релевантна одиниця вартості
Базова лінія	Стан, відносно якого визначається результат
M&V	Метод вимірювання та верифікації
Обмеження	Мережеві, технологічні, часові, організаційні
Статус	Доступний / обмежений / дефіцитний

Для комплексного оцінювання результативності PCEM пропонується використовувати структуровану панель KPI (таблиця 6.7), а не створювати універсальний інтегральний індекс. Такий підхід зберігає причинний зв’язок між управлінським рішенням і окремими аспектами результативності, і де ISO 50001 використовує показники енергетичної результативності та базові рівні як основу оцінювання поліпшень, а IPMVP і FEMP M&V Guidelines формалізують принципи визначення базової лінії, меж вимірювання, коригувань і підтвердження результату [210, 216, 217].

Таблиця 6.7 – Система KPI функціонування PCEM

Група	Основні показники	Управлінська інтерпретація
Енергетичні	баланси, попит, частка ВДЕ, втрати	Структура та ефективність енергозабезпечення
Сервісні	K_{serv}, сервісні впливи, доступна гнучкість	Ступінь забезпечення сервісних потреб
Надійність	ENS, SAIDI, SAIFI, TTR	Безперервність енергозабезпечення
Стійкість	R, CI-backup, SSR	Здатність протидіяти, адаптуватися і відновлюватися
Економічні	TC, CAPEX, OPEX, VoLL	Економічна результативність
Екологічні	CO_2, частка ВДЕ, обмеження	Екологічний результат
Управлінські	точність прогнозу, час реакції, частка верифікованих сервісів	Якість функціонування PCEM

Панель KPI має бути ієрархічною: локальні показники агрегуються до територіального та регіонального рівнів, але зберігається можливість декомпозиції для встановлення причин відхилення; в умовах невизначеності контроль не повинен

обмежуватися порівнянням одного точкового прогнозу з фактом; доцільно перевіряти збереження допустимості рішень у заданих можливих інтервалах і сценаріях.

Залежно від інституційних умов РСЕМ може бути реалізована як регіональний енергетичний офіс, координаційний центр, спеціалізована цифрова платформа, функціональний контур у структурі регіонального управління або комбінована організаційно-цифрова модель. На початковому етапі доцільним є поетапний підхід: реєстр ресурсів і даних → KPI і сервісні паспорти → аналітика та сценарії → оптимізація → M&V → масштабування.

Окремого узгодження потребує визначення функцій РСЕМ і ЕСКО: перша має визначати, що необхідно забезпечити, де існує сервісний дефіцит, які альтернативи доступні та чи досягнуто цільових KPI, а друга – відповідати за фінансування, впровадження, експлуатацію та контрактне гарантування результату, що узгоджується з логікою контрактів на основі результатів (performance-based contracting) [217, 219]. Інакше кажучи, РСЕМ формує обґрунтований попит на вимірюваний енергетичний сервіс, а ЕСКО/EaaS або інший постачальник сервісу створює організаційно-економічний механізм його реалізації.

Створення РСЕМ доцільно розпочинати не із закупівлі програмної платформи, а з формування переліку сервісів, ресурсів, суб’єктів і необхідних інформаційних потоків і вже наступними пріоритетами мають бути створення цифрового профілю РЕС, реєстру DER і гнучкості, визначення критичних сервісних потреб та запровадження єдиної системи KPI.

Для України особливо важливим є поєднання децентралізованих ресурсів із локальним резервуванням, гнучкістю попиту, накопиченням та цифровою координацією. IEA підкреслює, що диверсифікований портфель DER може підвищувати стійкість української енергосистеми, тоді як масштабування вимог гнучкості потребує цифрових технологій, відповідних стимулів та координаційних механізмів [165, 212]. Отже, запропонована РСЕМ може розглядатися як прикладна регіональна система енергетичного менеджменту, що поєднує технологічні можливості з методами сценарного планування та сервісної оптимізації.

Таким чином, розроблено організаційно-функціональну модель РСЕМ, яка, на відміну від традиційного об’єктно орієнтованого енергоменеджменту, базується на ідентифікації сервісних потреб і дефіцитів, формуванні та сценарно-оптимізаційному оцінюванні портфеля енергетичних сервісів, багаторівневій координації розподілених ресурсів, моніторингу сервісних KPI та адаптивному коригуванні управлінських рішень. Запропоновано шестиконтурну архітектуру РСЕМ, удосконалено методичний підхід до діагностики розвитку РЕС шляхом введення показників сервісного дефіциту, запропоновано структуру паспорта енергетичного сервісу РЕС, визначено функціональне розмежування РСЕМ і постачальників енергетичних сервісів.

6.4. Концептуальні положення щодо створення та сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосервісних компаній

Розглянута вище регіональна система енергетичного менеджменту забезпечує виявлення сервісних потреб і дефіцитів, формування цільових KPI, сценарно-оптимізаційне порівняння альтернатив та визначення пріоритетних напрямів розвитку РЕС, у той же час прийняття обґрунтованого управлінського рішення саме по собі не забезпечує практичної реалізації пропонованих заходів, – необхідний організаційно-економічний механізм та засоби, здатні поєднати технологічні рішення, фінансування, проєктування, впровадження, експлуатацію, агрегування розподілених ресурсів та верифікацію фактично досягнутого результату [34, 220].

Поширеним у світі інструментом реалізації цих заходів є енергосервісні компанії (ESCO), традиційна модель яких сформувалася переважно навколо проєктів підвищення енергоефективності, за яких інвестиції повністю або частково повертаються за рахунок підтвердженої економії енергетичних витрат [77-79]. Проте децентралізація, цифровізація та декарбонізація енергетики суттєво розширюють предмет енергосервісної діяльності, оскільки поряд з економією енергії економічну цінність набувають гнучкість, резервування, локальна генерація, накопичення, керування попитом, стійкість енергозабезпечення, інтеграція ВДЕ, агрегування DER та цифрове управління [34, 54].

Директива (ЄС) 2023/1791, Рекомендація Європейської Комісії (ЄС) 2024/2476 щодо енергетичних сервісів та Закон України № 1818-IX про енергетичну ефективність розвивають орієнтований на результат підхід до енергосервісу та енергоефективності, що передбачає можливість поєднання перформанс-контрактінгу (EPC) із розширеними енергетичними сервісами, зокрема регулювання попиту та накопичення енергії [68, 221, 222]. Одночасно розвиток підходу «енергія-як-сервіс» (EaaS), агрегаторів та VPP демонструє перехід від традиційної моделі продажу енергії до моделей, у яких споживач (або прос'юмер) оплачує управління, оптимізацію ресурсів, гарантований результат або доступність певної сервісної функції [223-226].

У зв’язку з цим для реалізації сервіс-орієнтованого розвитку РЕС пропонується створення регіональних енергосервісних компаній (РЕСКО) [18] як спеціалізованого суб’єкта сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, який на контрактній основі формує, фінансує, реалізує, агрегує та/або експлуатує портфель енергетичних ресурсів і технологій з метою забезпечення кількісно визначених та верифікованих енергетичних сервісів і досягнення погоджених енергетичних, економічних та екологічних показників, стійкості тощо.

Принципова відмінність пропонованої РЕСКО як регіонального мультисервісного оператора, що поєднує елементи ЕСКО, EaaS, агрегування DER, VPP та управління портфелем сервісних активів полягає в тому, що предметом її основної діяльності стає вимірюваний сервіс-орієнтований результат, який як компоненту включає і економію паливно-енергетичних ресурсів. Водночас функціональне поєднання усіх цих елементів не означає автоматичного надання РЕСКО статусу агрегатора, оператора системи або іншого регульованого суб’єкта.

Еволюцію енергосервісної діяльності доцільно представити послідовністю: енергоефективність → ЕСКО → EPC → розширені енергетичні сервіси → EaaS → мультисервісна модель РЕСКО, де поступово до технічної складової моделі ЕСКО додається фінансування та повернення інвестицій за рахунок економії і де EPC пов’язує винагороду постачальника з фактично досягнутою енергетичною результативністю [221, 222].

Сервіс-орієнтований підхід доповнює енергоефективність гнучкістю, регулюванням попиту та накопиченням енергії, локальною генерацією та іншими функціями, при цьому, EaaS зміщує акцент з володіння енергетичним обладнанням на отримання необхідної корисності або гарантованого результату за сервісною оплатою [223]. Для РЕС логічним етапом є мультисервісна модель, в якій різні технології та джерела доходу об'єднуються у портфель, орієнтований на забезпечення визначеного набору регіональних енергетичних сервісів. Основні параметри еволюційного розвитку моделей енергосервісної діяльності представлено у таблиці 6.8.

Таблиця 6.8 – Еволюція моделей енергосервісної діяльності

Модель	Основний предмет	Джерело результату	Розподіл ризику	Типовий результат
Традиційний підряд	Обладнання/роботи	Оплата виконаних робіт	Переважно замовник	Введений об'єкт
ESCO	Енергоефективний захід	Економія витрат	Розподілений	Економія енергії
EPC	Гарантована результативність	Верифікована економія	Ризик досягнення результату	Гарантований результат енергозбереження
EaaS	Корисність/сервіс	Регулярна сервісна плата	Залежить від контракту	Гарантований сервіс
Агрегатор/VPP	Координований портфель DER	Гнучкість/ пакетування цінностей	Агрегатор + власники DER	Керований агрегований ресурс
РЕСКО	Портфель регіональних сервісів	Комбінована, орієнтована на результат	Контрактний розподіл	Економія + гнучкість + стійкість + KPI

Функціональну модель РЕСКО пропонується формувати за принципом повного життєвого циклу енергетичного сервісу, де перелік функцій охоплює: ідентифікацію сервісної потреби, де вхідними даними є сформовані РСЕМ паспорт енергетичного сервісу, величина $Gap_{k,t}$, цільове значення $K_{serv,k}$, вимоги до R, ENS, SSR, TTR, сервісного впливу та інших KPI; проєктування сервісного рішення – визначення комбінації технічних, цифрових та організаційних ресурсів; формування фінансової моделі – власний капітал, кредитування, лізинг, EPC, фінансування третьою стороною, EaaS і де грантові та змішані механізми можуть використовуватися відповідно до характеристик проєкту: агрегування ресурсів – якщо сервіс формується значною кількістю малих DER, РЕСКО може забезпечувати їх контрактне об'єднання або взаємодіяти зі спеціалізованим агрегатором/VPP [224-226], реалізацію та

експлуатацію сервісно-технологічного портфеля; M&V; економічний розподіл отриманого результату між учасниками відповідно до контрактної моделі.

Відображення функціональної моделі РСЕМ-РЕСКО представлено на рисунку 6.3.

Мультисервісна модель передбачає, що РЕСКО не спеціалізується виключно на скороченні споживання. Її сервісний портфель формується відповідно до виявлених потреб РЕС і за принципом технологічної нейтральності: одна й та сама сервісна потреба може забезпечуватися різними ресурсами або їх комбінацією [227].



Рис. 6.3. Функціональна модель РЕСКО

Складові портфелю енергетичних сервісів РЕСКО представлено у таблиці 6.9.

Таблиця 6.9 – Портфель енергетичних сервісів РЕСКО

Група	Приклади сервісів	Основні технології	Цільові KPI
Енергоефективність	Скорочення споживання, згладжування піків	Модернізація, CEM/BEMS, DR	кВт, максимальний попит, OPEX
Локальне енергозабезпечення	Локальна генерація, самозабезпечення	PV, вітер, CHP, біомаса	SSR, частка ВДЕ
Гнучкість	Перенесення/зменшення навантаження	DR, BESS, EV, P2H	гнучкість, швидкість реагування
Резервування	Backup, автономна робота	BESS, CHP, мікрогрід	CI-backup, ENS, TTR
Стійкість	Збереження критичних сервісів	мікрогрід, BESS, DER	R, ENS, вплив послуг
Декарбонізація	Заміщення викопних ресурсів	ВДЕ, P2H, електрофікація	CO_2, частка ВДЕ
Цифрові сервіси	Моніторинг, прогноз, оптимізація	CEM, DERMS, VPP	Помилка прогнозування, доступність
M&V	Підтвердження результативності	Смарт вимірювання	верифіковані KPI

Особливе значення має пакетування сервісів (value stacking) – використання одного активу для забезпечення декількох сумісних сервісів за умови технічної сумісності та недопущення подвійного врахування результату. Наприклад, BESS може забезпечувати згладжування пікових навантажень, резервування, локальне

балансування, підвищення самодостатності та підтримку стійкості; тому економічна доцільність активу визначається сукупною цінністю його сервісних функцій [228].

Економічна модель РЕСКО має відповідати принципу: дохід формується за результатами забезпечення вимірюваної сервісної цінності, а не виключно за продаж енергії або встановлення обладнання, що у загальному вигляді визначається як

$$Rev_t^{\text{РЕСКО}} = P_{fix,t} + P_{perf,t} + P_{save,t} + P_{flex,t} + P_{res,t} + P_{env,t}, \qquad (6.13)$$

де: $P_{fix,t}$ – фіксована сервісна плата; $P_{perf,t}$ – винагорода за досягнення KPI; $P_{save,t}$ – частка підтвердженої економії; $P_{flex,t}$ – дохід від гнучкості; $P_{res,t}$ – плата за резервування, доступність або інший сервіс стійкості; $P_{env,t}$ – економічний результат, пов'язаний з екологічними характеристиками, якщо його монетизація передбачена відповідним механізмом.

Відповідно, розрахунковий прибуток РЕСКО за період *t* визначається шляхом віднімання з доходу всіх врахованих витрат $П_t^{\text{РЕСКО}} = Rev_t^{RESC} - - CAPEX_t^{ann} - OPEX_t - C_{fin,t} - C_{M\&V,t} - C_{coord,t} - C_{risk,t}$, (6.14)

де: $CAPEX_t^{ann}$ – приведені до відповідного періоду капітальні витрати; $OPEX_t$ – поточні витрати на експлуатацію; $C_{fin,t}$ – витрати на залучення фінансування; $C_{M\&V,t}$ – витрати вимірювання та верифікації; $C_{coord,t}$ – витрати агрегування й координації; $C_{risk,t}$ – економічна оцінка ризиків, які відповідно до контракту приймає РЕСКО.

Аналогічно розраховується $NPV^{\text{РЕСКО}} = -CAPEX_0 + \sum_{t=1}^{T} CF_t^{RESC}/(1 + +r)^t$, враховуючи, що максимізація NPV або прибутку не повинна бути єдиним критерієм регіонального сервісного проєкту, а узгоджуватися із іншими системними KPI РЕС.

Вибір моделі реалізації сервісного проєкту має залежати від типу сервісу, можливості формування базової лінії, характеру інвестицій, контрольованості результату та розподілу ризиків. Для РЕСКО можуть використовуватися контракти на гарантовану економію, розподілену економію, на енергосервіс, підписку на послуги, на основі доступності, показників ефективності, EaaS, та гібридні моделі [222-224]

Сума платежу РЕСКО за наданий сервіс у період t складається з базової плати, винагороди за підтверджені результати та зменшується на величину штрафу

$$Pay_t = P_t^{base} + \alpha \cdot \Delta C_t^{ver} + \beta \cdot V_t^{serv} + \gamma \cdot Flex_t^{ver} - Penalty_t, \quad (6.15)$$

де: P_t^{base} – базова сервісна плата; ΔC_t^{ver} – верифікована економія; V_t^{serv} – верифікована цінність погодженого сервісного результату; $Flex_t^{ver}$ – підтверджений обсяг гнучкості; α, β, γ – контрактно встановлені параметри розподілу результату; $Penalty_t$ – штраф за невиконання гарантованих параметрів.

Перехід від продажу обладнання до продажу результату неможливий без системи вимірювання та верифікації. Для кожного контракту мають бути встановлені базова лінія, межі вимірювання, цільові KPI, джерела даних, період вимірювання, допустимі коригування, правила верифікації, порядок визначення платежу та застосування штрафів і бонусів [221, 222]. Ефект верифікації за період t визначається як різниця між скоригованим базовим і фактичним значеннями показника $Effect_t^{ver} = Baseline_t^{adj} - Actual_t$, де: $Baseline_t^{adj}$ – базове значення, скориговане на погодні, виробничі або інші погоджені фактори; $Actual_t$ – фактично виміряне значення; для показників, що мають максимізуватися, напрям порівняння змінюється відповідно до змісту KPI.

Запропонована модель передбачає чітке функціональне розмежування РСЕМ і РЕСКО: РСЕМ виконує функції потреба → прогалина → ключові показники ефективності (KPI) → альтернативи → рішення, тоді як РЕСКО реалізує послідовність прийняття рішення → фінансування → реалізація → експлуатація → обслуговування → моніторинг та оцінка.

Виявлення потреба та її реалізація в енергетичному сервісі визначається послідовністю дій: потреба → РСЕМ → сервісне завдання → РЕСКО → надання сервісу → вимірювання й верифікація → оцінка KPI → повернення результатів до РСЕМ.

РЕСКО взаємодіє з РСЕМ, споживачами, власниками DER, фінансовими установами, постачальниками обладнання та контрактними підрядниками, агрегаторами/VPP і операторами енергетичної інфраструктури в межах їх

компетенцій [224, 229] і при цьому не обов'язково бути власником усіх активів, а виступати інтегратором сервісного результату.

Сукупна верифікована сервісна цінність усіх активів портфеля проєктів РЕСКО за мультисервісної моделі і результат, який може бути розподілений між учасниками, можуть бути представлені як

$$V^{port} = V^{save} + V^{flex} + V^{res} + V^{env} + V^{other}, V^{dist} = V^{port} - C^{port}, \quad (6.16)$$

де: V^{port} – сукупна верифікована грошова цінність сервісів, наданих портфелем РЕСКО; V^{save} – цінність підтвердженої економії енергії та витрат; V^{flex} – цінність наданої гнучкості; V^{res} – цінність резервування, доступності та підвищення стійкості; V^{env} – монетизована цінність екологічного результату; V^{other} – цінність інших сервісів, прямо визначених контрактом; V^{port} – сукупні витрати на формування й надання портфеля сервісів за той самий період; V^{dist} – чистий результат після їх віднімання, який потенційно можна розподілити між учасниками; якщо $V^{dist} \leq 0$, позитивного результату для розподілу за цією моделлю немає. Для аналітичного визначення внеску окремих ресурсів може використовуватися Шеплі-декомпозиція.

Практичне створення РЕСКО пропонується здійснювати у дев'ять етапів: ідентифікація регіонального попиту на енергетичні сервіси; оцінювання потенційного ринку; формування бізнес-моделі; формування типового портфеля сервісів; визначення джерел фінансування та розподілу ризику; розроблення контрактних моделей і M&V; реалізація пілотного портфеля; оцінювання фактичних KPI та фінансової результативності; масштабування й адаптація бізнес-моделі.

Створенню РЕСКО має передувати визначення реального регіонального попиту на сервіси, оскільки формування організації без портфеля потенційних контрактів створює ризик появи адміністративної структури без достатньої економічної основи. Тому, на початковому етапі доцільно обрати обмежений перелік сервісів із прозорими KPI і M&V та після чого поступово створювати портфель сервіс-орієнтованих проєктів. Для кожного контракту необхідно визначати базову лінію, KPI, M&V, розподіл контрольованих і неконтрольованих ризиків та механізм оплати, а інвестиційні рішення –враховувати можливості пакетування сервісів без подвійного

зарахування одного й того самого результату. Масштабування діяльності РЕСКО доцільно здійснювати після підтвердження технічної, сервісної та фінансової результативності пілотних проєктів, де оцінювати не лише їх прибутковість, але й вплив на ENS, R, SSR, гнучкість та інші системні KPI.

Таким чином, розвинено концептуальні положення щодо організаційно-економічного забезпечення сервіс-орієнтованого розвитку РЕС шляхом формування регіональної енергосервісної компанії, яку на відміну від традиційної ЕСКО-моделі, запропоновано розглядати як регіонального мультисервісного оператора, орієнтованого не лише на скорочення енергоспоживання, а й на забезпечення портфеля кількісно визначених і верифікованих енергетичних сервісів, включаючи енергоефективність, локальне енергозабезпечення, гнучкість, резервування, стійкість, декарбонізацію та цифрові сервіси. Розроблено функціональну модель РЕСКО, що охоплює ідентифікацію сервісної потреби, проєктування рішення, фінансування, агрегування ресурсів, реалізацію, експлуатацію, M&V та економічний розподіл результату. запропоновано організаційно-економічну модель формування доходу РЕСКО із можливістю комбінування фіксованої сервісної плати, винагороди за досягнутий результат, частки верифікованої економії, оплати за гнучкість, резервування та інші контрактно визначені результати. Обґрунтовано, що M&V у сервіс-орієнтованій моделі виконує не лише контрольну, а контракт-утворюючу функцію, визначено функціональне розмежування між РСЕМ і РЕСКО, де РСЕМ забезпечує діагностику потреб, визначення сервісних дефіцитів, формування KPI та підтримку вибору рішення, тоді як РЕСКО забезпечує його фінансування, реалізацію, експлуатацію та контрактно гарантований сервісний результат. Для інтеграції методологічних, модельних, управлінських та економічних інструментів у систему підтримки прийняття управлінських рішень запропоновано дев’яти етапний організаційно-економічний механізм.

6.5. Система підтримки прийняття управлінських рішень щодо сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем

Розроблені у попередніх розділах методологічні положення, сценарно-оптимізаційні моделі, критерії оцінювання, механізми регіонального енергетичного

менеджменту та енергосервісної реалізації утворюють сукупність інструментів, практичне використання яких вимагає їх взаємоузгодженої інтеграції в межах регіональної інформаційно-аналітичної системи, що забезпечує перетворення даних про стан РЕС і сервісні потреби на структурований набір обґрунтованих управлінських альтернатив.

Сучасний розвиток DER ускладнює планування та експлуатацію розподілених енергетичних систем через двонаправленість потоків, зростання кількості керованих ресурсів та необхідність координації PV, накопичувачів, EV і гнучкого попиту. Систематичні огляди 2025–2026 рр. підкреслюють роль DERMS, цифрової спостережуваності, координації та оптимізаційних інструментів для надійної й стійкої інтеграції DER [197, 202, 230, 231].

Водночас багатокритеріальність енергетичних рішень означає, що економічні, технічні, екологічні та сервісні цілі не завжди досягають оптимуму в одній конфігурації, що підтверджують сучасні дослідження методів прийняття рішень на основі багатокритеріального аналізу (MCDM), які наголошують на необхідності явного представлення компромісів, критеріїв та пріоритетів особи, що приймає рішення, замість зведення складного вибору до одного показника [232, 233].

У цьому дослідженні зазначені положення розвиваються шляхом формування системи підтримки прийняття управлінських рішень щодо сервіс-орієнтованого розвитку (СППР-СОР) РЕС, яка інтегрує сервісну діагностику, сценарне моделювання, багатокритеріальну оптимізацію, можливісне оцінювання невизначеності, аналіз фронтиру «витрати–стійкість» та прихованої ціни стійкості, Шеплі-декомпозицію, механізми РСЕМ і РЕСКО та контур M&V.

Під СППР-СОР РЕС пропонується розглядати інтегровану інформаційно-аналітичну систему, призначену для формування, сценарно-оптимізаційного оцінювання, порівняння та обґрунтування альтернатив розвитку РЕС на основі сервісних потреб, ресурсних та інфраструктурних обмежень, невизначеності вихідних параметрів і цільових показників економічності, надійності, стійкості, гнучкості та екологічності, систему, яка не підміняє особу, що приймає рішення (ОПР), а забезпечує прозоре формування множини допустимих і недомінованих

альтернатив та кількісне представлення компромісів і пояснення факторів, що визначають результат.

Основним призначенням СППР-СОР є підтримка стратегічних і тактичних рішень щодо розвитку РЕС, визначення пріоритетних сервісних потреб, формування технологічних конфігурацій, оцінювання їх поведінки за зовнішніх збурень та допустимості за системою KPI, аналіз компромісу між витратами і стійкістю та підготовка сервісного завдання для практичної реалізації.

Користувачами СППР-СОР мають стати регіональні та муніципальні органи управління, функціональні структури РСЕМ, оператори енергетичної інфраструктури в межах їх компетенцій, власники та оператори DER, РЕСКО, інвестори й інші суб'єкти, що беруть участь у формуванні або реалізації регіональних енергетичних рішень.

Логіка функціонування СППР-СОР визначається відповідями на питання: який сервіс потрібний? → який існує дефіцит? → які ресурси можуть його забезпечити? → які альтернативи можуть бути сформовані? → як вони функціонують за різних сценаріїв? → які альтернативи відповідають встановленим KPI? → яким є компроміс «витрати–стійкість»? → хто і за якою контрактною моделлю реалізує рішення? → чи підтверджено результат після реалізації?

Функціональна архітектура СППР формується сукупністю восьми взаємопов'язаних модулів, відображених у таблиці 6.10, що реалізують перехід від ізольованих розрахункових моделей до інтегрованих систем керування, оптимізації та підтримки рішень в активних розподільних мережах [234].

Таблиця 6.10 – Функціональні модулі СППР-СОР РЕС

Модуль	Основні функції	Результат
1. Data Layer	Збір, валідація, синхронізація даних	Цифровий профіль РЕС
2. Service Diagnostic	Потреба, прогалина, K_{serv}, паспорти сервісів	Карта сервісних дефіцитів
3. Scenario	S_0–S_6, збурення, параметри	Множина умов оцінювання
4. Optimization	Формування і оптимізація A_i	Сервісно-технологічні альтернативи
5. Evaluation	TC, ENS, R, SSR, CO_2, Flex	Вектор KPI
6. Decision	Фронтир, regret, SP, Шеплі	Недоміновані альтернативи
7. Implementation	РСЕМ → РЕСКО → проєкт	План реалізації
8. M&V / Learning	Факт, верифікація, коригування	Зворотний зв'язок і адаптація

У структурі СППР-СОР принципового розмежування потребують зовнішні сценарії S_j та керовані альтернативи A_i, оскільки перші характеризують стан середовища, який не обирається ОПР, тоді як A_i є сервісно-технологічною або управлінською альтернативою, параметри якої можуть бути предметом вибору $A_i \times S_j \rightarrow Y_{i,j}$, де $Y_{i,j}$ – результат реалізації альтернативи A_i за умов сценарію S_j.

Склад критеріїв, що забезпечує багатокритеріальне представлення наслідків рішення, може розширюватися залежно від типу сервісної задачі, але має містити показники, які безпосередньо характеризують витрати, сервісну достатність, надійність, стійкість, гнучкість та екологічний результат.

$$A_i \Leftrightarrow ENS_i \leq ENS^{max};\ R_i \geq R^{min};\ K_{serv,k} \geq K_{serv,k}^{min};\ g_m(A_i) \leq 0, \qquad (6.17)$$

де: m – множина допустимих альтернатив; $g_m(A_i)$ – технологічні, мережеві, фінансові, ресурсні та інші обмеження, що передбачає первинне виключення неприйнятних рішень і лише після цього – порівняння альтернатив, які задовольняють критичні вимоги.

Для підтримки рішень ОПР в умовах невизначеності у роботі використовується представлення на основі теорії можливостей, яке не потребує обов'язкового задання ймовірнісних законів розподілу для параметрів, щодо яких доступна неповна, інтервальна, експертна або нечітка інформація

$$\tilde{x} = \{\tilde{D}, RE\tilde{S}, \tilde{C}, VoL\tilde{L}, \tilde{\eta}, \ldots\}, \qquad (6.18)$$

де кожному нечіткому параметру відповідає функція належності, що індукує можливісний розподіл і де для управлінського рішення важливими є не лише центральні або номінальні значення KPI, а й ступінь можливості та необхідності виконання критичних вимог

$$\Pi_i^R = \Pi(R_i \geq R^{min}), N_i^R = N(R_i \geq R^{min}). \qquad (6.19)$$

Тут міра можливості Π відображає, наскільки виконання вимоги не суперечить наявній інформації, тоді як міра необхідності N характеризує ступінь гарантованості її виконання в межах заданого можливісного аналізу, а для консервативної перевірки стійкості використовується обмеження $N(R_i \geq R^{min}) \geq \eta_R$, де η_R – встановлений ОПР мінімальний рівень необхідності. Аналогічні умови формуються для ENS,

сервісної достатності або інших критичних KPI, що узгоджується з логікою можливісного програмування, де нечіткі параметри представляються можливісними розподілами, а рішення перевіряються за рівнями допустимості та гарантованості.

Для уникнення надмірної залежності результату від суб'єктивно заданих вагових коефіцієнтів у СППР-СОР запропоновано не зводити всі критерії до єдиної інтегральної оцінки, а натомість використовувати багатоступеневу процедуру: технічна допустимість → сервісна достатність → сценарна стійкість → можливісна гарантованість → Парето-аналіз → оцінювання граничної вартості стійкості → декомпозиція внесків → представлення альтернатив ОПР. Тут на етапі Парето-аналізу базовий компроміс формується між мінімізацією системних витрат і максимізацією стійкості: $\min TC(A_i)$; $\max R(A_i)$, де альтернатива A_i є Парето-ефективною, якщо не існує іншої альтернативи A_l, для якої одночасно $TC(A_l) \leq TC(A_i)$ та $R(A_l) \geq R(A_i)$, причому принаймні одна з нерівностей є строгою. Отже, СППР не визначає єдине «найкраще» рішення, а формує множину недомінованих альтернатив і кількісно показує компроміси між ними.

Для оцінювання економічної ціни посилення вимог до стійкості використовується прихована ціна стійкості $SP^R = \partial TC/\partial R^{min}$, де у строгому оптимізаційному трактуванні SP^R є дуальною оцінкою активного обмеження $R \geq R^{min}$, тому наближене відношення $\Delta TC/\Delta R$ між сусідніми точками фронтиру може використовуватися лише як скінченно-різницева оцінка і не повинно автоматично ототожнюватися з дуальною тіньовою ціною.

Шеплі-декомпозиція використовується у СППР-СОР як пояснювальний інструмент, що дозволяє оцінити внесок окремих ресурсів або сервісних механізмів у спільний результат, однак не є рейтингом технологій і не доводить синергетичний ефект сама по собі, але покращує інтерпретацію сформованого рішення.

Результати СППР-СОР доцільно формувати не як одну агреговану оцінку, а як стандартизовану картку управлінського рішення, що забезпечує прослідковуваність зв'язку між вихідними припущеннями, сценаріями, KPI, ризиками та рекомендованим механізмом реалізації. Пропонована структура картки управлінського рішення СППР-СОР РЕС представлена у таблиці 6.11.

Таблиця 6.11 – Структура картки управлінського рішення СППР-СОР РЕС

Поле	Зміст
Сервісна потреба	Функція або результат, який необхідно забезпечити
Дефіцит енергетичного сервісу	Величина сервісного дефіциту
Альтернатива	Ідентифікатор A_i та опис конфігурації
Технології	RES/BESS/DR/CHP/P2H/інші
CAPEX / ТС	Інвестиційні та системні витрати
ENS / R / SSR / SI	Ключові KPI сервісу та стійкості
CO_2 / Гнучкість	Екологічний результат і гнучкість
Сценарна стійкість	Результати за релевантними S_i
Можливість / Необхідність	Характеристика гарантованості KPI
Прихована ціна	Гранична ціна посилення вимоги до R
Shapley	Пояснення внеску ресурсів
Ризики	Ключові технічні, фінансові та зовнішні ризики
Виконавець	РЕСКО або інший суб’єкт реалізації
Контракт	EPC/EaaS/ на основі доступності / продуктивності тощо
M&V	Базова лінія, KPI, джерела даних, порядок верифікації

За наявності такої картки ОПР отримує не лише значення цільової функції, а й інформацію про активні обмеження, чутливі параметри, внески ресурсів, положення альтернативи на фронтирі, умови її допустимості та рівень гарантованості виконання KPI.

Організаційну інфраструктуру СППР-СОР РЕС запропоновано формувати на основі циклічного алгоритму, компоненти якого представлено на рисунку 6.4, а практичну реалізацію – як поетапне їх розгортання, а не одномоментне створення автоматизованої платформи. Перший етап може бути реалізований як аналітичне середовище з уніфікованими базами даних, сценарними шаблонами, оптимізаційною моделлю та автоматизованим формуванням картки рішення, а наступні – передбачати інтеграцію з CEM/BEMS, DERMS, смарт вимірюванням та іншими цифровими джерелами даних [235]. Доцільність такого підходу підтверджують результати сучасних досліджень DERMS-необхідності щодо стандартизованих ролей, координації та агрегації при управлінні великою кількістю DER [197], а також у задачах оптимізації, керування, відновлення та диспетчеризації [234].

Водночас для СППР-СОР РЕС застосування складних алгоритмів не повинно утрудняти процедури вибору альтернатив, тому ядром системи пропонується залишити запропоновану модель «сервісна потреба – альтернатива – сценарій – KPI

– допустимість – компроміс – рішення – M&V», яка призначена для підтримки програмних рішень щодо сервіс-орієнтованого розвитку РЕС і не претендує на заміну оперативно-диспетчерських комплексів операторів систем.

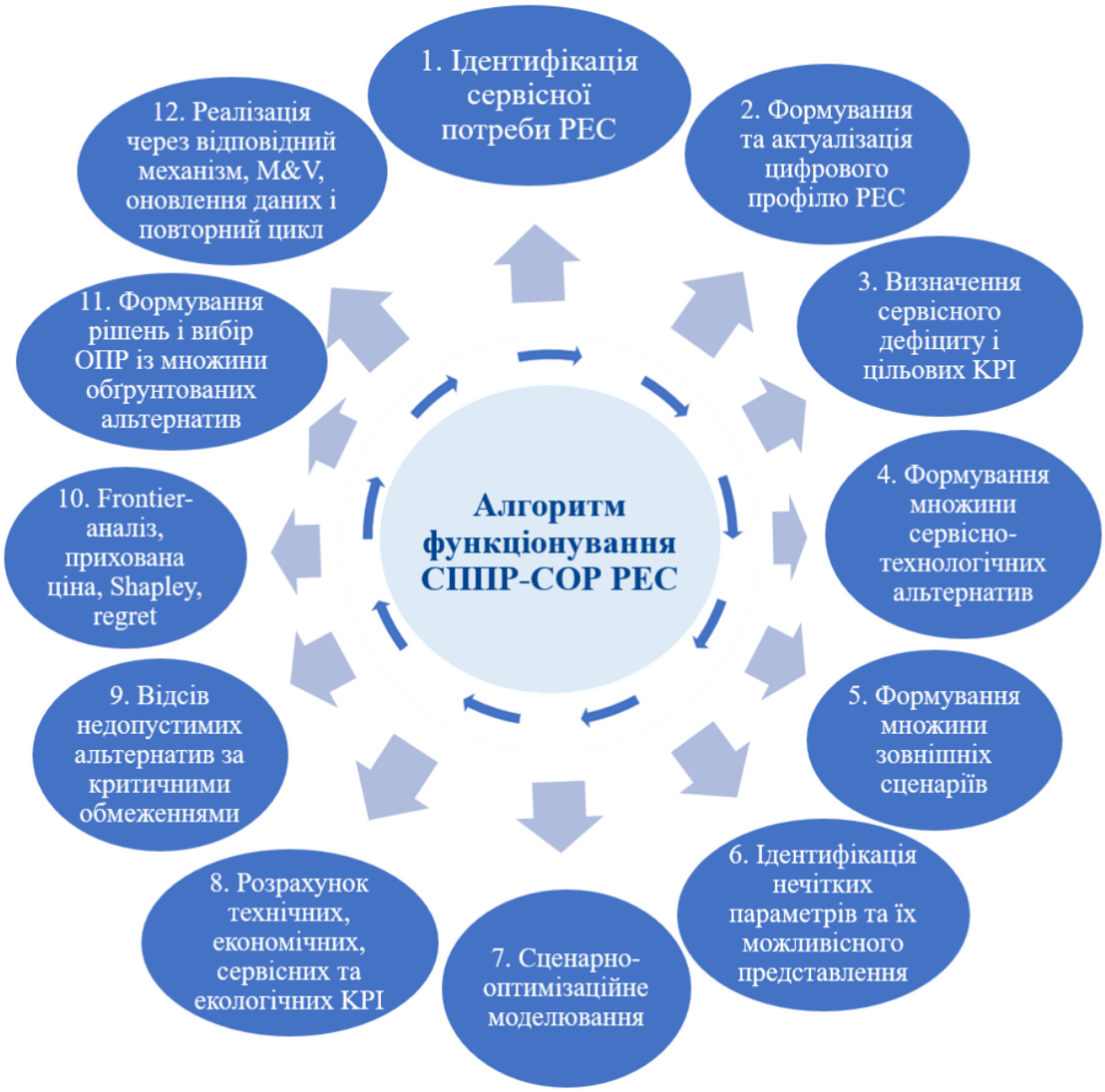


Рис. 6.4. Алгоритм функціонування СППР-СОР РЕС

Таким чином, розроблено функціональну архітектуру системи підтримки прийняття управлінських рішень щодо сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, яка інтегрує результати попередніх розділів дисертації в єдиний інформаційно-аналітичний й управлінський контур на основі науково-обґрунтованого аналізу сервісних потреб, формування сценаріїв і альтернатив, багатокритеріального сценарно-оптимізаційного моделювання, можливісного оцінювання невизначеності, фронтиру «витрати–стійкість», прихованої ціни стійкості, Шеплі-декомпозиції,

механізмів РСЕМ і РЕСКО та M&V зі зворотним зв’язком, методично розмежовано зовнішні сценарії та керовані альтернативи, запропоновано багатоступеневу процедуру підтримки вибору без обов’язкового зведення всіх критеріїв до одної інтегральної оцінки, розроблено структуру картки управлінського рішення та алгоритм функціонування СППР-СОР РЕС.

6.6. Висновки до розділу

1. Набули подальшого розвитку концептуальні положення сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем у складі інтегрованої енергосистеми України, які, на відміну від ресурсно-технологічного підходу до розвитку енергосистем, ґрунтуються на пріоритетності кінцевого енергетичного сервісу та його кількісно визначених характеристик, запропоновано розглядати РЕС як багаторівневу систему систем, розвиток якої визначається не окремим нарощуванням генеруючих, мережевих або потужностей акумуляції, а формуванням конфігурації взаємопов'язаних ресурсів і технологій, здатної забезпечувати заданий портфель сервісів із установленими показниками економічності, надійності, стійкості, гнучкості та екологічності. Наукова новизна полягає у формуванні сервісної логіки розвитку РЕС «потреба → сервіс → функціональна вимога → конфігурація ресурсів → результат → адаптація», яка забезпечує методологічний перехід від оптимізації енергетичних активів до оптимізації спроможності РЕС забезпечувати необхідні енергетичні сервіси та створює основу для узгодження локальних, регіональних і загальносистемних цілей розвитку.

2. Удосконалено методичний підхід до визначення та оцінювання синергетичних ефектів і ефектів масштабу сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, де на відміну від підходів, у яких ефективність інтеграції DER оцінюється переважно через сумарну зміну окремих техніко-економічних показників, запропоновано розмежовувати власне синергетичний ефект, ефект масштабу, ефект агрегування та ефект спільного надання сервісів, формалізовано визначення синергетичного ефекту як результату координованої взаємодії ресурсів порівняно з їх роздільним використанням за однакових зовнішніх умов, а ефект масштабу – через зміну питомої

вартості та сервісної результативності при збільшенні обсягу керованих ресурсів і територіального охоплення. Наукова новизна полягає у встановленні методичного взаємозв'язку між синергетичними ефектами сервісної інтеграції, фронтиром «витрати–стійкість», прихованою ціною стійкості та Шеплі-декомпозицією, що дозволило одночасно характеризувати додатковий системний результат інтеграції, його економічну ціну та внесок окремих ресурсів, не ототожнюючи Шеплі-внесок із величиною синергії.

3. Розроблено організаційно-функціональну модель регіональної системи енергетичного менеджменту (РСЕМ), орієнтовану на управління не окремими енергетичними активами, а регіональним портфелем енергетичних сервісів. На відміну від традиційних СЕМ/BEMS, об'єктом управління яких переважно є енергоспоживання та енергетична результативність окремої організації або об'єкта, запропонована РСЕМ забезпечує координацію сервісних потреб, розподілених ресурсів, інфраструктурних обмежень і цільових KPI на регіональному рівні. Наукова новизна полягає у запропонованій архітектурі РСЕМ «моніторинг → прогнозування → сервісна діагностика → сценарно-оптимізаційне обґрунтування → управлінсько-інвестиційне рішення → M&V та адаптація», а також у введенні сервісного дефіциту, коефіцієнта сервісної достатності та паспорта енергетичного сервісу як взаємопов'язаних інструментів трансформації енергетичної потреби в кількісно визначене управлінське завдання, що забезпечує перехід від фрагментарного управління ресурсами до безперервного управління сервісною спроможністю РЕС.

4. Розвинуто організаційно-економічні засади енергосервісного забезпечення розвитку РЕС шляхом формування концепції регіональної енергосервісної компанії (РЕСКО) як мультисервісного оператора, де на відміну від класичної ЕСКО-моделі, орієнтованої переважно на фінансування енергоефективних заходів із поверненням інвестицій за рахунок досягнутої економії, запропонована модель РЕСКО орієнтується на контрактне забезпечення портфеля верифікованих сервісів – енергоефективності, гнучкості, резервування, локального енергозабезпечення, стійкості, декарбонізації та цифрового управління. Наукова новизна полягає у розробленні організаційно-економічної моделі, в якій технологічні рішення,

фінансування, агрегування DER, експлуатація та M&V об'єднані єдиним, орієнтованим на результат, механізмом, а дохід сервісного оператора пов'язується не лише з економією енергії, а з фактично верифікованою сервісною цінністю. Обґрунтовано функціональне розмежування РСЕМ і РЕСКО за принципом «РСЕМ формує та обґрунтовує сервісне завдання – РЕСКО забезпечує його контрактну реалізацію та гарантований результат», що формує цілісний управлінсько-економічний механізм реалізації сервіс-орієнтованого розвитку РЕС.

5. Розроблено функціональну архітектуру системи підтримки прийняття управлінських рішень щодо сервіс-орієнтованого розвитку РЕС (СППР-СОР РЕС), яка інтегрує сервісний аналіз, сценарне моделювання, оптимізацію, оцінювання невизначеності та механізми практичної реалізації рішення. На відміну від СППР-СОР, побудованих на згортанні різнорідних критеріїв у єдину інтегральну оцінку, запропоновано багатоступеневу процедуру формування рішення, за якої послідовно здійснюються перевірка технічної допустимості, сервісної достатності, сценарної стійкості та можливісної гарантованості, після чого формується множина Парето-недомінованих альтернатив. Наукова новизна полягає в інтеграції в одному контурі СППР-СОР матриці «керована альтернатива – зовнішній сценарій», фронтиру «витрати–стійкість», прихованої ціни стійкості, Шеплі-декомпозиції та оцінки можливостей, що забезпечує не лише вибір допустимих рішень, але й обґрунтування їх економічної ціни, стійкості до невизначеності та внеску окремих ресурсів у системний результат.

6. У цілому, це дало змогу сформувати 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. Науково-прикладним результатом є формування замкненого циклу «сервісна потреба → сервісний дефіцит →

альтернативи → сценарії та невизначеність → оптимізація → множина допустимих і недомінованих рішень → управлінський вибір → фінансування та контрактна реалізація → верифікований сервіс → M&V → адаптація», який забезпечує наскрізний зв'язок між методологічними положеннями, математичним моделюванням і практичними механізмами реалізації рішень, що дозволяє трактувати сервіс-орієнтований розвиток РЕС не як сукупність окремих технологічних або організаційних заходів, а як керований адаптивний процес формування спроможності РЕС забезпечувати задані енергетичні сервіси в умовах структурної невизначеності, багатокритеріальності та зовнішніх збурень.

Загальні 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.

Теоретико-методологічну основу дисертаційного дослідження становить поєднання системної парадигми розвитку енергетики, сервіс-орієнтованої логіки створення цінності та економіко-математичних методів сценарного моделювання трансформації складних енергетичних систем в умовах невизначеності. До ключових засад дослідження належать: 1) Системний підхід до дослідження РЕС, які розглядаються як складні соціотехнічні системи з багаторівневою структурою взаємодії учасників енергосервісного ринку, що функціонують у середовищі технологічної, економічної та інституційної невизначеності; 2) Парадигма сервіс-орієнтованої трансформації енергетики, за якою енергетична інфраструктура РЕС інтерпретується як система створення сервісної цінності, у межах якої взаємодіють виробники, оператори мереж, агрегатори, прос'юмери та споживачі, що дозволило перейти від продуктової моделі функціонування РЕС до сервіс-інтегрованої моделі їх розвитку; 3) Концепція багатовимірної цінності енергетичних сервісів, у межах якої корисність енергетичних сервісів визначається через інтегральний вплив на технічну ефективність, економічну результативність, якість взаємодії учасників ринку та рівень стійкості енергосистеми, що забезпечило формалізацію механізмів сервісної взаємодії у регіональних енергосистемах; 4) Методологія сценарного економіко-математичного моделювання розвитку РЕС, на основі якої альтернативні траєкторії розвитку РЕС досліджуються з урахуванням факторів ризику та невизначеності, що дозволило оцінювати ефективність управлінських рішень у довгостроковій перспективі; 5) Концепція стійкості РЕС як економічної категорії, у межах якої стійкість енергосистем

розглядається як інтегральна характеристика їх здатності забезпечувати надійне функціонування в умовах зовнішніх збурень, що дало можливість сформувати підхід до оцінювання прихованої вартості стійкості та визначення економічної доцільності її підвищення; 6) Принцип системно-інтегрованої взаємодії учасників РЕС, за яким розвиток енергосистем інтерпретується як результат координації дій виробників, споживачів, операторів мереж і сервісних компаній, що забезпечило можливість формування моделей сервіс-орієнтованого управління енергетичною інфраструктурою; 7) Методологія підтримки прийняття рішень у процесах енергетичного переходу, за якою розвиток РЕС розглядається у контексті децентралізації генерації та цифровізації енергетики, що дозволило сформувати науково-методичну основу стратегічного планування розвитку регіональної енергетики.

Найбільш вагомі наукові та практичні результати роботи полягають у такому.

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 яких: системний підхід до дослідження РЕС як складних соціотехнічних 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. Запропоновано 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 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.

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

6. 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.

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. Виконано верифікацію та валідацію результатів моделювання сценаріїв сервіс-орієнтованого розвитку РЕС, що підтвердило адекватність розроблених моделей, достовірність отриманих результатів та можливість їх застосування для дослідження процесів розвитку регіональної енергетики й підтримки стратегічних рішень. 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 0,070 до 0,174, тобто більш ніж у 2,4 рази, що свідчить про можливості суттєвого 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 0,422 до 0,487 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 РЕС, 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 підготовки проєктів нормативно-правових актів, програмних документів та матеріалів науково-аналітичного характеру, що визначають концептуальні засади розвитку комунальної теплоенергетики та систем теплопостачання, а також методичний підхід до обґрунтування пріоритетних напрямів розвитку РЕС, підхід до інтегрального оцінювання рівня енергетичної самодостатності регіонів та методичні положення щодо сервіс-орієнтованого розвитку РЕС; в 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 відновлювальними джерелами».

У цілому, розроблені у дисертації 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, розробленні стратегій енергетичного переходу, підвищенні енергоефективності регіональної економіки та забезпеченні стійкого розвитку енергетики в умовах невизначеності та ризиків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. International Energy Agency. (2026a). Energy system resilience. https://www.iea.org/reports/energy-system-resilience

2. DIXI Group. (2026). Holding the grid: Ukraine's energy resilience playbook. https://dixigroup.org/en/analytic/holding-the-grid-ukraines-energy-resilience-playbook/

3. 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

4. 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 V. Babak & A. Zaporozhets (Eds.), Systems, decision and control in energy VI (pp. 149–165). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_7

5. 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

6. 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

7. Ковалко, О. М., Новосельцев, О. В., & Євтухова, Т. О. (2017). Вертикально-інтегровані структури управління ефективністю функціонування систем комунальної теплоенергетики. ІТТФ НАН України.

8. 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

9. Chernyavskyy, M., Makarov, V., Kaplin, M., Bilan, T., & Yevtukhova, T. (2024). Prospects for coal-fired power plants fuel supply in Ukraine. In V. Babak & A. Zaporozhets

(Eds.), Systems, decision and control in energy VI (pp. 167–181). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_8

10. 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

11. Energy Community Secretariat. (2026). Adopted national energy and climate plans 2025–2030 and 2025 progress towards energy and climate targets in the Energy Community [Assessment report]. https://www.energy-community.org/news/Energy-Community-News/2026/8/17.html

12. 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

13. Eutukhova, T., Iliev, I., Novoseltsev, O., Nikitin, Y., & Shcherbyna, Y. (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

14. Купчак, В. Р., Павлова, О. М., Павлов, К. В., & Лагодієнко, В. В. (2019). Формування та регулювання регіональних енергетичних систем: Теорія, методологія та практика. Волиньполіграф.

15. European Commission. (2020). Powering a climate-neutral economy: An EU strategy for energy system integration (COM(2020) 299 final).

16. Babak, V., Nikitin, Y., & Teslenko, O. (2024). Holistic approach to the systemic transformation of the electric power industry, district heating and municipal infrastructure. System Research in Energy, 4(80), 6–25. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.006

17. Nielsen, C. B., Larsen, P. G., Fitzgerald, J., Woodcock, J., & Peleska, J. (2015). Systems of systems engineering: Basic concepts, model-based techniques, and research directions. ACM Computing Surveys, 48(2), 1–41. https://doi.org/10.1145/2794381

18. Yevtukhova, T., Nikitin, Y., 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

19. Ковалко, О. М., Ковалко, Н. М., Євтухова, Т. О., & Новосельцев, О. В. (2023). Communal heat engineering: Energy efficiency, structure of management, energy services. NAS of Ukraine, Institute of General Energy. https://web.nlu.org.ua/object.html?id=2196

20. 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

21. Sukhonos, M. K., & Belyavceva, V. V. (2019). Theoretical and methodological support for solving tasks of regional development. The Problems of Economy, 2, 96–101. https://doi.org/10.32983/2222-0712-2019-2-96-101

22. Novoseltsev, O., Eutukhova, T., & Chuprina, L. (2023). Multicriteria optimization of municipal heat power systems with renewable energy sources. In Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: Матеріали XXIV міжнародної науково-практичної конференції, 130–131. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023

23. 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

24. Ковалко, О. М., Новосельцев, О. В., & Євтухова, Т. О. (2020). Структурно-функціональні особливості інтеграції ВДЕ в муніципальні системи теплопостачання. In Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: Матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції (pp. 310–313). Інтерсервіс.

25. 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

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

27. Nikitin, Y. Y., Yevtukhova, T. O., Novoseltsev, O. V., & Komkov, I. S. (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

28. 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

29. 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 V. Babak & A. Zaporozhets (Eds.), Systems, decision and control in energy VII (pp. 229–274). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_9

30. Sarno, D., & Siano, P. (2022). Exploring the adoption of service-dominant logic as an integrative framework for assessing energy transitions. Sustainability, 14(15), Article 9755. https://doi.org/10.3390/su14159755

31. Vargo, S. L., Wieland, H., & O'Brien, M. (2023). Service-dominant logic as a unifying theoretical framework for the re-institutionalization of the marketing discipline. Journal of Business Research, 164, Article 113965. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.113965

32. Nguyen, P. (2022). Service-dominant logic: A model of service satisfaction and its antecedents. European Journal of Business and Management Research, 7(3), 357–363. https://doi.org/10.24018/ejbmr.2022.7.3.1404

33. Akaka, M. A., Koskela-Huotari, K., & Vargo, S. L. (2021). Formalizing service-dominant logic as a general theory of markets: Taking stock and moving forward. AMS Review, 11(3–4), 375–389. https://doi.org/10.1007/s13162-021-00214-y

34. 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

35. 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

36. Novoseltsev, O., Kovalko, O., Eutukhova, T., & Yevtukhova, M. (2022). Service-oriented logic of using information technologies in the circular economy. In 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) (pp. 400–403). IEEE. https://doi.org/10.1109/ess57819.2022.9969328

37. Lysenko, I., Stepenko, S., Novoseltsev, O., Verbytska, A., Dyvnych, H., & Yevtukhova, T. (2026). Challenges and marketing strategies of renewable energy market development. In 2026 IEEE 9th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ess70338.2026.11536671

38. 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. Системні дослідження в енергетиці, 1(85), 85–93. https://doi.org/10.15407/srenergy2026.01.085

39. Yevtukhova, T., Novoseltsev, O., & Zaporozhets, A. (2026). Program-targeted approach for improving energy efficiency and sustainability through system-integrated services. In A. Zagorodny, V. Bogdanov, A. Zaporozhets, & T. Ermolieva (Eds.), Nexus of sustainability (pp. 197–217). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-03616-2_8

40. Lingegård, S. (2020). Product service systems: Business models towards a circular economy. In M. Brandão, D. Lazarevic, & G. Finnveden (Eds.), Handbook of the circular economy (pp. 61–73). Edward Elgar Publishing. https://doi.org/10.4337/9781788972727.00013

41. Henriques, R., Figueiredo, F., & Nunes, J. (2023). Product-services for a resource-efficient and circular economy: An updated review. Sustainability, 15(15), Article 12077. https://doi.org/10.3390/su151512077

42. Barravecchia, F., Franceschini, F., Mastrogiacomo, L., & Zaki, M. (2021). Research on product-service systems: Topic landscape and future trends. Journal of Manufacturing Technology Management, 32(9), 208–238. https://doi.org/10.1108/jmtm-04-2020-0164

43. Emili, S., Ceschin, F., & Harrison, D. (2016). Product–service system applied to distributed renewable energy: A classification system, 15 archetypal models and a strategic design tool. Energy for Sustainable Development, 32, 71–98. https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.03.004

44. Karaca, F., Camci, F., & Turkyilmaz, A. (2018). A product service system design for energy provision. International Journal of Management and Enterprise Development, 17(3), 244–266. https://doi.org/10.1504/IJMED.2018.093538

45. Kusumaningdyah, W., McLellan, B., & Tezuka, T. (2019). Designing and evaluating energy product-service systems for energy sector (EPSS) in liberalized energy market: A case study in space heating services for Japan household. Challenges, 10(1), Article 18. https://doi.org/10.3390/challe10010018

46. Vezzoli, C., Ceschin, F., Osanjo, L., M'Rithaa, M. K., Moalosi, R., Nakazibwe, V., & Diehl, J. C. (2018). Sustainable product-service system (S.PSS). In Designing sustainable energy for all (pp. 41–51). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70223-0_3

47. Kusatake, E., Imahori, M., & Shinomiya, N. (2023). A peer-to-peer energy trading model for optimizing both efficiency and fairness. Energies, 16(14), Article 5501. https://doi.org/10.3390/en16145501

48. Sadeghi, R., Sadeghi, S., Memari, A., Rezaeinejad, S., & Hajian, A. (2024). A peer-to-peer trading model to enhance resilience: A blockchain-based smart grids with machine learning analysis towards sustainable development goals. Journal of Cleaner Production, 450, Article 141880. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141880

49. Islam, S. N. (2024). A review of peer-to-peer energy trading markets: Enabling models and technologies. Energies, 17(7), Article 1702. https://doi.org/10.3390/en17071702

50. Zedan, M., Nour, M., Shabib, G., Nasrat, L., & Ali, A.-A. (2024). Review of peer-to-peer energy trading: Advances and challenges. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 10, Article 100778. https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100778

51. Li, L., & Yang, X. (2025). A framework for coordinating energy prosumers through multi-energy sharing and carbon responsibility sharing. iScience, 28(1), Article 111595. https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.111595

52. Arévalo, P., Ochoa-Correa, D., Villa-Ávila, E., Iñiguez-Morán, V., & Astudillo-Salinas, P. (2025). Systematic review of hierarchical and multi-agent optimization strategies for P2P energy management and electric machines in microgrids. Applied Sciences, 15(9), Article 4817. https://doi.org/10.3390/app15094817

53. Karpenko, D. S., Yevtukhova, T. O., & Novoseltsev, O. V. (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

54. 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

55. 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

56. Odintsov, O., Yevtukhova, T., Vasylkonova, E., & Kunchenko-Kharchenko, V. (2020). Influence of tax burden on economic development of agricultural enterprises in Ukraine. Journal of Eastern European and Central Asian Research (JEECAR), 7(1), 150–162. https://doi.org/10.15549/jeecar.v7i1.328

57. Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy Sets and Systems, 1(1), 3–28. https://doi.org/10.1016/0165-0114(78)90029-5

58. Acar, E., Bayrak, G., Jung, Y., Lee, I., Ramu, P., & Ravichandran, S. S. (2021). Modeling, analysis, and optimization under uncertainties: A review. Structural and Multidisciplinary Optimization, 64(5), 2909–2945. https://doi.org/10.1007/s00158-021-03026-7

59. Xia, Y., Ding, L., Liu, P., & Tang, Z. (2023). Uncertainty propagation for the structures with fuzzy variables and uncertain-but-bounded variables. Materials, 16(9), Article 3367. https://doi.org/10.3390/ma16093367

60. Warde, J. M., & Johnson, J. R. (1955). Recent developments in the technology of ceramic materials for nuclear energy service. Journal of the Franklin Institute, 260(6), 455–466.

61. Fell, M. J. (2017). Energy services: A conceptual review. Energy Research & Social Science, 27, 129–140.

62. Gillham, E., Nolden, C., Banks, N., Parrish, B., Moya Mose, T., & Sugar, K. (2023). Facilitating application of the energy service concept: Development of an analytical framework. Energy Policy, 178, Article 113584. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113584

63. Cagno, E., Franzò, S., Storoni, E., & Trianni, A. (2022). A characterisation framework of energy services offered by energy service companies. Applied Energy, 324, Article 119674. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119674

64. Hasan, A. S. M. M., Trianni, A., Shukla, N., & Katic, M. (2022). A novel characterization based framework to incorporate industrial energy management services. Applied Energy, 313, Article 118891. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118891

65. Brown, D., Hall, S., Martiskainen, M., & Davis, M. E. (2022). Conceptualising domestic energy service business models: A typology and policy recommendations. Energy Policy, 161, Article 112704. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112704

66. Poblete, L., & Halldórsson, Á. (2023). Sourcing energy services in business-to-business contexts: Practices among end-customers. Energy Efficiency, 16(3), Article 10. https://doi.org/10.1007/s12053-023-10091-y

67. De Tommasi, L., Papadelis, S., Agrawal, R., & Lyons, P. (2022). Analysis of business models for delivering energy efficiency through smart energy services to the European commercial rented sector. Open Research Europe, 2, Article 131. https://doi.org/10.12688/openreseurope.15240.1

68. European Parliament & Council of the European Union. (2023). Directive (EU) 2023/1791 of 13 September 2023 on energy efficiency (recast). Official Journal of the European Union, L 231. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L1791

69. World Trade Organization. (1998). Energy services: Background note by the Secretariat (S/C/W/52).

70. International Organization for Standardization. (2017). Energy services: Guidelines for the assessment and improvement of the energy service to users (ISO Standard No. 50007:2017).

71. European Parliament & Council of the European Union. (2012). Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency. Official Journal of the European Union, L 315, 1–56.

72. Energy efficiency services: Definitions and requirements (EN 15900:2010). (2010). Beuth Verlag.

73. Benedetti, M., Cesarotti, V., Holgado, M., Introna, V., & Macchi, M. (2015). A proposal for energy services' classification including a product service systems perspective. Procedia CIRP, 30, 251–256.

74. Nolden, C., Sorrell, S., & Polzin, F. (2016). Catalysing the energy service market: The role of intermediaries. Energy Policy, 98, 420–430.

75. Novoseltsev, O., Kovalko, O., Eutukhova, T., & Chupryna, L. (2022). Energy efficiency as an integral component of the service-oriented logic of low-carbon transition. In Renewable energy and energy efficiency in the XXI century: Proceedings of XXIII international scientific-and-practical online conference (pp. 30–32). Interservice. https://www.ive.org.ua/language/uk/tezy-konferencziyi/

76. Mayer, C., Neumann, C., Tuerk, A., Ebrahimigharehbaghi, S., Kern, K., Arko, S., & Lakic, E. (2025). Integration of flexibilities to energy performance contracting business

models. In M. Schrenk, T. Popovich, P. Zeile, P. Elisei, C. Beyer, J. Ryser, & U. Trattnig (Eds.), REAL CORP 2025 proceedings (pp. 1133–1137). CORP. https://doi.org/10.48494/REALCORP2025.4014

77. International Energy Agency. (n.d.). Energy service companies (ESCOs): ESCO contracts. https://www.iea.org/reports/energy-service-companies-escos-2/esco-contracts

78. Moles-Grueso, S., Bertoldi, P., & Boza-Kiss, B. (2023). Energy performance contracting in the EU—2020–2021. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/751957

79. International Energy Agency. (2026c). Why the growth of energy service companies is uneven globally. https://www.iea.org/commentaries/why-the-growth-of-energy-service-companies-is-uneven-globally

80. Податковий кодекс України (редакція зі змінами від 28 травня 2026 року). (2026). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text

81. Vargo, S. L., & Lusch, R. F. (2004). Evolving to a new dominant logic for marketing. Journal of Marketing, 68(1), 1–17. https://doi.org/10.1509/jmkg.68.1.1.24036

82. Grönroos, C., & Voima, P. (2013). Critical service logic: Making sense of value creation and co-creation. Journal of the Academy of Marketing Science, 41(2), 133–150. https://doi.org/10.1007/s11747-012-0308-3

83. Tzani, D., Exintaveloni, D. S., Stavrakas, V., & Flamos, A. (2023). Devising policy strategies for the deployment of energy efficiency pay-for-performance programmes in the European Union. Energy Policy, 178, Article 113593. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113593

84. Grönroos, C. (2008). Service logic revisited: Who creates value? And who co-creates? European Business Review, 20(4), 298–314.

85. Kovalko, O. M., Kovalko, N. M., & Novoseltsev, O. V. (2018). Result-oriented investment management system for targeted energy efficiency programs. Scientific Bulletin of National Mining University, 3(165), 160–166.

86. Boza-Kiss, B., Bertoldi, P., & Economidou, M. (2017). Energy service companies in the EU. Publications Office of the European Union.

87. The energy services market 2022. (2015). MPW Institute. URL: mpw-net.de

88. Morley, J. (2018). Rethinking energy services: The concept of ‘meta-service’ and implications for demand reduction and servicizing policy. Energy Policy, 122, 563–569.

89. Making market systems work better for the poor (M4P): An introduction to the concept [Discussion paper prepared for ADB–DFID]. (2005). BEAM Exchange. beamexchange.org.

90. Diaz Ruiz, C. A. (2012). Theories of markets: Insights from marketing and the sociology of markets. The Marketing Review, 12(1), 61–77. https://doi.org/10.1362/146934712X13286274424316.

91. Ford, D., & Hakansson, H. (2006). IMP—Some things achieved: Much more to do. European Journal of Marketing, 40(3/4), 248–258.

92. Vargo, S. L., & Lusch, R. F. (2008). Service-dominant logic: Continuing the evolution. Journal of the Academy of Marketing Science, 36(1), 1–10.

93. Gray, D., & Vander Wal, T. (2012). The connected company. O’Reilly Media.

94. Wilden, R., Akaka, M. A., Karpen, I. O., & Hohberger, J. (2017). The evolution and prospects of service-dominant logic: An investigation of past, present, and future research. Journal of Service Research, 20(4), 345–361.

95. Asian Development Bank. (2015). Business models to realize the potential of renewable energy and energy efficiency in the Greater Mekong Subregion.

96. Hofer, K., Limaye, D., & Singh, J. (2016). Fostering the development of ESCO markets for energy efficiency. World Bank.

97. Nour El-Din, M., Poças Martins, J., Ramos, N. M. M., & Pereira, P. F. (2024). The role of blockchain-secured digital twins in promoting smart energy performance-based contracts for buildings. Energies, 17(14), Article 3392. https://doi.org/10.3390/en17143392

98. Про енергетичну ефективність (Закон України № 1818-IX від 21 жовтня 2021 року). (2021). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20

99. Про запровадження нових інвестиційних можливостей, гарантування прав та законних інтересів суб’єктів підприємницької діяльності для проведення масштабної енергомодернізації (Закон України № 327-VIII від 9 квітня 2015 року). (2015). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/327-19

100. Про внесення змін до Закону України «Про публічні закупівлі» щодо запровадження енергосервісних договорів (Закон України № 1980-VIII від 23 березня 2017 року). (2017). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1980-19

101. Cebekhulu, B. M. B., Mathaba, T. N. D., & Mbohwa, C. (2024). Identifying trends and research gaps in ESCO research: A systematic literature review. Energy Strategy Reviews, 55, Article 101516. https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101516

102. Awwad, R., Dwyer, S., & Trianni, A. (2025). Unpacking market barriers to energy efficiency in emerging economies: Policy insights and a business model perspective from Jordan. Energies, 18(11), Article 2944. https://doi.org/10.3390/en18112944

103. Guo, J., Shen, Y., & Xia, Y. (2024). Research on the driving factors for the application of energy performance contracting in public institutions. Sustainability, 16(10), Article 3883. https://doi.org/10.3390/su16103883

104. Wacinkiewicz, D., & Słotwiński, S. (2023). The statutory model of energy performance contracting as a means of improving energy efficiency in public sector units as seen in the example of Polish legal policies. Energies, 16(13), Article 5060. https://doi.org/10.3390/en16135060

105. Wen, Y., Huang, X., Zheng, S., Yuan, J., & Pu, Y. (2026). A comparative study on energy service policy development and effectiveness in China and United States. Energy Strategy Reviews, 63, Article 101996. https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101996

106. Capper, T., Kuriakose, J., & Sharmina, M. (2024). Facilitating domestic demand response in Britain's electricity system. Utilities Policy, 89, Article 101768. https://doi.org/10.1016/j.jup.2024.101768

107. Mihalache, A.-E., Hampton, S., & Darby, S. (2024). Domesticating energy flexibility. Learning from Great Britain's 2022–2023 demand flexibility service. Energy Efficiency, 17(8), Article 88. https://doi.org/10.1007/s12053-024-10268-z

108. Singh, M., Kesselring, A., Klobasa, M., Quaresma, N., & De Almeida, A. (2025). Servitization of demand-side energy services: Perspective and insights from energy service providers. Energy Strategy Reviews, 61, Article 101845. https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101845

109. Organisation for Economic Co-operation and Development. (2023). Energy savings insurance: First international focus group discussion [Discussion paper]. https://www.oecd.org/en/events/2023/03/energy-savings-insurance-first-international-focus-group-discussion.html

110. Soussi, A., Zero, E., Bozzi, A., & Sacile, R. (2024). Enhancing energy systems and rural communities through a system of systems approach: A comprehensive review. Energies, 17(19), Article 4988. https://doi.org/10.3390/en17194988

111. Zhou, G., Bai, M., Li, H., Li, J., Li, Q., Liu, J., & Yu, D. (2024). Multi-objective station-network synergy planning for regional integrated energy system considering energy cascade utilization and uncertainty. Energy Conversion and Management, 301, Article 118073. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118073

112. Zhao, R., & Chen, X. (2024). Optimization configuration strategy for regional energy systems based on multiple uncertainties and demand response. Energy Informatics, 7(1), Article 58. https://doi.org/10.1186/s42162-024-00362-y

113. Zhang, Z., Wang, C., Wu, Q., & Dong, X. (2024). Optimal dispatch for cross-regional integrated energy system with renewable energy uncertainties: A unified spatial-temporal cooperative framework. Energy, 292, Article 130433. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130433

114. Блінов, І., Парус, Є., Шиманюк, П., & Ворушило, А. (2024). Модель оптимізації функціонування мікромережі з СЕС та установкою зберігання енергії. Технічна електродинаміка, 5, 69–78. https://doi.org/10.15407/techned2024.05.069

115. Bilous, I., Biriukov, D., Karpenko, D., Eutukhova, T., Novoseltsev, O., & Voloshchuk, V. (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

116. 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, Article 1502794. https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1502794

117. 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

118. Akkoç, H. N., Onaygil, S., Acuner, E., & Cin, R. (2023). Implementations of energy performance contracts in the energy service market of Turkey. Energy for Sustainable Development, 76, Article 101303. https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101303

119. Luo, Z., Yuan, G., Zhang, Q., Pan, H., & Deng, M. (2025). Study on critical success factors of the energy performance contracting program in petrochemical industry under the dual carbon background. Energy, 332, Article 137149. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137149

120. Henner, N., & Howard, B. (2022). Utilities and energy efficiency as a service: The potential for win-win partnerships. American Council for an Energy-Efficient Economy. https://www.aceee.org/resource/u2203/

121. Trianni, A., Leak, J., & Hasan, A. S. M. M. (2025). Switching on ESCOs: Barriers, challenges and opportunities for the development of Australia's ESCO market. Energy Policy, 199, Article 114546. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114546

122. International Energy Agency. (2025). Energy efficiency 2025. https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025

124. Fan, S., Xu, G., Chen, Z., Xing, H., Gao, Y., & Ai, Q. (2024). Carbon-embedded energy coordination strategy in park-level integrated energy system considering time-varying carbon emission measurement. Journal of Cleaner Production, 434, Article 139967. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139967

125. Dong, W., Chen, C., Fang, X., Zhang, F., & Yang, Q. (2024). Enhanced integrated energy system planning through unified model coupling multiple energy and carbon emission flows. Energy, 307, Article 132799. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132799

126. Li, J., Zhou, Z., Wen, B., Zhang, X., Wen, M., Huang, H., Yu, Z., & Liu, Y. (2024). Modeling and analysis method for carbon emission flow in integrated energy systems considering energy quality. Energy Science & Engineering, 12(6), 2405–2425. https://doi.org/10.1002/ese3.1747

127. Jia, J., Li, H., Wu, D., Guo, J., Jiang, L., & Fan, Z. (2024). Multi-objective optimization study of regional integrated energy systems coupled with renewable energy, energy storage, and inter-station energy sharing. Renewable Energy, 225, Article 120328. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120328

128. Su, Z., Zheng, G., Wang, G., Mu, Y., Fu, J., & Li, P. (2025). Multi-objective optimal planning study of integrated regional energy system considering source-load forecasting uncertainty. Energy, 319, Article 134861. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134861

129. Shafiei, K., Seifi, A., & Hagh, M. T. (2025). A novel multi-objective optimization approach for resilience enhancement considering integrated energy systems with renewable energy, energy storage, energy sharing, and demand-side management. Journal of Energy Storage, 115, Article 115966. https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115966

130. Xu, R., Liu, J., Li, J., Yang, K., & Zio, E. (2024). TSoSRA: A task-oriented resilience assessment framework for system-of-systems. Reliability Engineering & System Safety, 248, Article 110186. https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110186

131. Qu, J., Xu, K., Hou, K., Liu, Z., Wu, H., Jia, H., & Zhu, L. (2025). Reliable and economic operation of regional-community integrated energy systems: A hybrid game approach based on state similarity. Energy, 336, Article 137983. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137983

132. Roald, L. A., Pozo, D., Papavasiliou, A., Molzahn, D. K., Kazempour, J., & Conejo, A. J. (2023). Power systems optimization under uncertainty: A review of methods and applications. Electric Power Systems Research, 214, Article 108725. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108725

133. Feng, S., Ren, H., & Zhou, W. (2023). A review of uncertain factors and analytic methods in long-term energy system optimization models. Global Energy Interconnection, 6(4), 450–466. https://doi.org/10.1016/j.gloei.2023.08.006

134. Varathan, G., & Belwin Edward, J. (2024). A review of uncertainty management approaches for active distribution system planning. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 205, Article 114808. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114808

135. Denysiuk, S., Derevianko, D., & Bielokha, H. (2023). Synthesis of models of the complex electric power systems. In O. Kyrylenko, S. Denysiuk, D. Derevianko, I. Blinov, I. Zaitsev, & A. Zaporozhets (Eds.), Power systems research and operation (pp. 107–131). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_6

136. Paredes-Vergara, M., Palma-Behnke, R., & Haas, J. (2024). Characterizing decision making under deep uncertainty for model-based energy transitions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 192, Article 114233. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114233

137. Rodriguez-Matas, A. F., Linares, P., Perez-Bravo, M., & Romero, J. C. (2024). Improving robustness in strategic energy planning: A novel decision support method to deal with epistemic uncertainties. Energy, 292, Article 130463. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130463

138. Chen, R., Hobbs, B. F., Lu, Z., Qiao, Y., & Shi, R. (2026). Cost-effective and reliable power system transitions under deep uncertainty: A multi-scenario multi-objective robust decision making framework. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 177, Article 111766. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2026.111766

139. Haugen, M., Farahmand, H., Jaehnert, S., & Fleten, S.-E. (2023). Representation of uncertainty in market models for operational planning and forecasting in renewable power systems: A review. Energy Systems. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s12667-023-00600-4

140. Plaga, L. S., & Bertsch, V. (2023). Methods for assessing climate uncertainty in energy system models — A systematic literature review. Applied Energy, 331, Article 120384. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120384

141. Qiu, H., Gu, W., Liu, P., Sun, Q., Wu, Z., & Lu, X. (2022). Application of two-stage robust optimization theory in power system scheduling under uncertainties: A review and perspective. Energy, 251, Article 123942. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123942

142. Yazdanie, M., Dramani, J. B., & Orehounig, K. (2025). Strengthening energy system resilience planning under uncertainty by minimizing regret. Renewable and Sustainable Energy Transition, 6, Article 100093. https://doi.org/10.1016/j.rset.2024.100093

143. Usher, W., Barnes, T., Moksnes, N., & Niet, T. (2023). Global sensitivity analysis to enhance the transparency and rigour of energy system optimisation modelling. Open Research Europe, 3, Article 30. https://doi.org/10.12688/openreseurope.15461.1

144. Yliruka, M., Moret, S., & Shah, N. (2023). Detail or uncertainty? Applying global sensitivity analysis to strike a balance in energy system models. Computers & Chemical Engineering, 177, Article 108287. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108287

145. Wang, B., Wang, X., Zhang, X.-P., Huang, J., Song, Z., Zhang, L., & Li, Y. (2024). Application of decision-dependent uncertainty in power system planning and operation analyses: A state-of-the-art review. Electric Power Systems Research, 233, Article 110458. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110458

146. Блінов, І., Парус, Є., & Артемчук, В. (2026). Модель планування роботи активного споживача на роздрібному ринку електричної енергії. Технічна електродинаміка, 1, 50–61. https://doi.org/10.15407/techned2026.01.050

147. Tan, T., Yang, M., Xie, R., Cao, Y., & Chen, Y. (2025). Adjustable robust optimization with decision-dependent uncertainty for power system problems: A review. Energy Conversion and Economics, 6(3), 155–169. https://doi.org/10.1049/enc2.70010

148. Li, H., Ren, Z., Fan, M., Li, W., Xu, Y., Jiang, Y., & Xia, W. (2022). A review of scenario analysis methods in planning and operation of modern power systems: Methodologies, applications, and challenges. Electric Power Systems Research, 205, Article 107722. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107722

149. Xiao, H., Long, F., Zeng, L., Zhao, W., Wang, J., & Li, Y. (2023). Optimal scheduling of regional integrated energy system considering multiple uncertainties and integrated demand response. Electric Power Systems Research, 217, Article 109169. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109169

150. Chen, L., Yang, D., Cai, J., & Yan, Y. (2024). Robust optimization based coordinated network and source planning of integrated energy systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 157, Article 109864. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109864

151. Liu, J., Tang, Z., Yu, M., Ren, P., Zeng, P., & Jia, W. (2024). Robust expansion planning model of integrated energy system with energy hubs integrated. Electric Power Systems Research, 226, Article 109947. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109947

152. Zhang, Z., Shen, X., & Chang, M. (2025). Dual stochastic multi-stage robust optimization of integrated energy system considering long medium and short-term uncertainties. Applied Energy, 400, Article 126573. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126573

153. Faridpak, B., & Musilek, P. (2024). Resilient operation strategies for integrated power-gas systems. Energies, 17(24), Article 6270. https://doi.org/10.3390/en17246270

154. Zhou, J., Li, R., Li, Y., & Shi, L. (2024). Aggregation modeling for integrated energy systems based on chance-constrained optimization. Processes, 12(12), Article 2672. https://doi.org/10.3390/pr12122672

155. Gao, L., Yang, S., Chen, N., & Gao, J. (2024). Integrated energy system dispatch considering carbon trading mechanisms and refined demand response for electricity, heat, and gas. Energies, 17(18), Article 4705. https://doi.org/10.3390/en17184705

156. Amiri, M. M., Ameli, M. T., Strbac, G., Pudjianto, D., & Ameli, H. (2024). The role of flexibility in the integrated operation of low-carbon gas and electricity systems: A review. Energies, 17(9), Article 2187. https://doi.org/10.3390/en17092187

157. Zhou, Y., Li, X., Han, H., Wei, Z., Zang, H., Sun, G., & Chen, S. (2024). Resilience-oriented planning of integrated electricity and heat systems: A stochastic distributionally robust optimization approach. Applied Energy, 353, Article 122053. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122053

158. Zhang, M., Wang, B., & Wei, J. (2024). The robust optimization of low-carbon economic dispatching for regional integrated energy systems considering wind and solar uncertainty. Electronics, 13(17), Article 3480. https://doi.org/10.3390/electronics13173480

159. Wang, K., Wang, J., Su, P., & Zhang, S. (2024). Coordinated reconfiguration with energy storage system for load restoration in integrated electric and heating systems. Electronics, 13(10), Article 1931. https://doi.org/10.3390/electronics13101931

160. Wu, J., Gu, J., Liu, S., & Jin, Z. (2023). Strategies for improving resilience of regional integrated energy systems in the prevention–resistance phase of integration.

Protection and Control of Modern Power Systems, 8(1), Article 29. https://doi.org/10.1186/s41601-023-00299-6

161. Державна служба статистики України. (n.d.). Енергетичний баланс [Набір даних]. https://stat.gov.ua/uk/datasets/enerhetychnyy-balans

162. Акціонерне товариство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом». (n.d.). Філія «ВП «Хмельницька АЕС». https://www.energoatom.com.ua/branch/xmelnicka-aes

163. Хмельницька обласна державна адміністрація. (2025). Хмельницька область [Інформаційно-аналітичні матеріали]. https://www.adm-km.gov.ua/?page_id=1501

164. Хмельницька обласна рада. (2025). Стратегія регіонального розвитку Хмельницької області на 2021–2027 роки (оновлена редакція, затверджена рішенням № 13-26/2025 від 18 червня 2025 року). https://km-oblrada.gov.ua/programi-regionalnogo-rozvitku/

165. International Energy Agency. (2024). Empowering Ukraine through a decentralised electricity system: A roadmap for Ukraine's increased use of distributed energy resources towards 2030. https://iea.blob.core.windows.net/assets/1cb1324f-e145-41c3-b0c2-d78561b4f1fd/EmpoweringUkraineThroughaDecentralisedElectricitySystem.pdf

166. European Commission. (2025). EU energy security: Evaluating the EU's security of electricity and gas supply (SWD(2025) 435 final). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52025SC0435

167. Pan, W., Li, Y., Guo, Z., & Zhang, Y. (2024). Interdependent expansion planning for resilient electricity and natural gas networks. Processes, 12(4), Article 775. https://doi.org/10.3390/pr12040775

168. Hu, R., Zhou, K., Yang, J., & Yin, H. (2024). Management of resilient urban integrated energy system: State-of-the-art and future directions. Journal of Environmental Management, 363, Article 121318. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121318

169. Liu, Y., Li, Y., Rong, Y., Li, G., Wang, R., & Zhou, H. (2023). Benefit allocation of electricity–gas–heat–hydrogen integrated energy system based on Shapley value. Clean Energy, 7(6), 1381–1390. https://doi.org/10.1093/ce/zkad062

170. Pröstl Andren, F., Widl, E., Heussen, K., Rikos, E., Strasser, T. I., & Raussi, P. (2025). Holistic smart energy system validation. In T. I. Strasser, M. Calin, & L. E. Ramos Perez (Eds.), European guide to smart energy system testing (pp. 9–21). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-99451-7_2

171. Riedmaier, S., Danquah, B., Schick, B., & Diermeyer, F. (2021). Unified framework and survey for model verification, validation and uncertainty quantification. Archives of Computational Methods in Engineering, 28(4), 2655–2688. https://doi.org/10.1007/s11831-020-09473-7

172. Østergaard, P. A., Lund, H., Thellufsen, J. Z., Sorknæs, P., & Mathiesen, B. V. (2022). Review and validation of EnergyPLAN. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 168, Article 112724. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112724

173. Prabhakaran, P., Graf, F., Koeppel, W., & Kolb, T. (2023). Modelling and validation of energy systems with dynamically operated power to gas plants for gas-based sector coupling in de-central energy hubs. Energy Conversion and Management, 276, Article 116534. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116534

174. Perisic, A., & Perisic, B. (2024). Digital twins verification and validation approach through the quintuple helix conceptual framework. Electronics, 13(16), Article 3303. https://doi.org/10.3390/electronics13163303

175. Strasser, T. I., Calin, M., & Ramos Perez, L. E. (2025). Towards energy system validation. In T. I. Strasser, M. Calin, & L. E. Ramos Perez (Eds.), European guide to smart energy system testing (pp. 1–7). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-99451-7_1

176. Kamsamrong, J., Widl, E., Schwarz, J. S., Heussen, K., Raussi, P., Arnold, G., De Paola, A., Feng, Z., Werth, O., Pham, M. C., & Tran, Q. T. (2025). Enhanced validation methods and benchmark. In T. I. Strasser, M. Calin, & L. E. Ramos Perez (Eds.), European guide to smart energy system testing (pp. 23–33). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-99451-7_3

177. Фонд енергоефективності. (2020). Порядок верифікації проєктів/заходів з енергоефективності, що здійснюються за участю державної установи «Фонд енергоефективності» (затверджено рішенням Наглядової ради від 30 липня 2020 року). https://eefund.org.ua/wp-content/uploads/2023/07/poryadok-veryfikacziyi-proektiv-v-ramkah-programy-energodim-2.pdf

178. Sargent, R. G. (2010). Verification and validation of simulation models. In Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (pp. 166–183). IEEE. https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5679166

179. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008). https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E

180. Василевський, О. М., & Кучерук, В. Ю. (2012). Основи теорії невизначеності вимірювань. ВНТУ. https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/221/405/446-1?inline=1

181. Токарчук, Т. (2018). Особливості макроекономічного прогнозу. Національний банк України. https://events.bank.gov.ua/uchallenge2020/src/files/2020/3_Tokarchyk_02102020.pdf

182. Horner, M. (2026). An overview of the ASME V&V 40-2018 standard. In M. Horner, J. E. Bischoff, & P. Afshari (Eds.), Computational modeling and simulation of medical devices (pp. 75–90). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-09180-2_5

183. Loulou, R., Lehtila, A., Kanudia, A., Remme, U., & Goldstein, G. (2016). Documentation for the TIMES model: Part II. Reference manual (updated 2026). https://github.com/etsap-TIMES/TIMES_Documentation/blob/master/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-II.pdf

184. American Society of Mechanical Engineers. (n.d.). VVUQ 60 verification, validation, and uncertainty quantification of computational modeling in energy systems. https://cstools.asme.org/csconnect/CommitteePages.cfm?Committee=102109418

185. Sharma, S. K., & Singh, S. (2025). Synthesis of fuzzy sets and their practical applications. In S. Jana, B. Basu Mallik, A. Sarkar, & C. Jana (Eds.), Applications of fuzzy

logic in decision making and management science (pp. 117–129). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-77719-6_7

186. Li, F., & Shen, Q. (2024). Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy inference systems. In Fuzzy rule-based inference (pp. 1–15). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0491-0_1

187. International Energy Agency & International Renewable Energy Agency. (2017). Perspectives for the energy transition: Investment needs for a low-carbon energy system. https://www.irena.org/publications/2017/Mar/Perspectives-for-the-energy-transition-Investment-needs-for-a-low-carbon-energy-system

188. Hutajulu, J. (2024). Current energy and energy-related services negotiations viewed from developing countries legal protection. Indonesian Journal of International Law, 21(3), 559–592. https://doi.org/10.17304/ijil.vol21.3.4

189. Bellman, R. (2002). Dynamic programming. Princeton University Press. https://dokumen.pub/dynamic-programming-reprintnbsped-0486428095-9780486428093.html

190. Wang, I., Becker, C., Van Parys, B., & Stellato, B. (2025). Mean robust optimization. Mathematical Programming, 213(1–2), 1235–1277. https://doi.org/10.1007/s10107-024-02170-4

191. Bertsimas, D., & Sim, M. (2004). The price of robustness. Operations Research, 52(1), 35–53. https://doi.org/10.1287/opre.1030.0065

192. Savage, L. J. (1951). The theory of statistical decision. Journal of the American Statistical Association, 46(253), 55–67. https://doi.org/10.1080/01621459.1951.10500768

193. Bacci, S., & Chiandotto, B. (2020). Introduction to statistical decision theory: Utility theory and causal analysis. Chapman & Hall. https://www.routledge.com/Introduction-to-Statistical-Decision-Theory-Utility-Theory-and-Causal-Analysis/Bacci-Chiandotto/p/book/9781032091754

194. Marchau, V. A. W. J., Walker, W. E., Bloemen, P. J. T. M., & Popper, S. W. (Eds.). (2019). Decision making under deep uncertainty: From theory to practice. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2

195. Shapley, L. S. (1953). A value for n-person games. In H. W. Kuhn & A. W. Tucker (Eds.), Contributions to the theory of games II (pp. 307–317). Princeton University Press. https://doi.org/10.1515/9781400881970-018

196. Кириленко, О. В., Блінов, І. В., Парус, Є. В., & Трач, І. В. (2021). Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. Технічна електродинаміка, 4, 44–54. https://doi.org/10.15407/techned2021.04

197. Adham, M., Keene, S., & Bass, R. B. (2025). Distributed energy resources: A systematic literature review. Energy Reports, 13, 1980–1999. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.01.026

198. Stekli, J., Bai, L., Cali, U., Halden, U., & Dynge, M. F. (2022). Distributed energy resource participation in electricity markets: A review of approaches, modeling, and enabling information and communication technologies. Energy Strategy Reviews, 43, Article 100940. https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100940

199. Блінов, І., Мірошник, В., & Лоскутов, С. (2023). Зниження витрат на покриття небалансів учасників балансуючої групи виробників електричної енергії з відновлюваних джерел. Технічна електродинаміка, 1, 62–66. https://doi.org/10.15407/techned2023.01.062

200. Miah, M. S., Shah, R., Aslam, M. U., Amjady, N., Walker, S., Terzija, V., Dehghan, S., & Mithulananthan, N. (2026). Providing ancillary services by aggregated distributed energy resources of active distribution systems for the upstream grid: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 233, Article 116858. https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.116858

201. Парус, Є., & Блінов, І. (2025). Оптимізація використання доступних енергоресурсів мікромережі за умов підтримки готовності до ізольованого режиму. Технічна електродинаміка, 5, 56–69. https://doi.org/10.15407/techned2025.05.056

202. Lukač, L., Antić, T., & Capuder, T. (2026). Changing the paradigm of distribution networks planning and operation: A systematic review of the distributed energy resources impact. Sustainable Energy, Grids and Networks, 45, Article 102070. https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.102070

203. Burger, S., Chaves-Ávila, J. P., Batlle, C., & Pérez-Arriaga, I. J. (2017). A review of the value of aggregators in electricity systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77, 395–405. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.014

204. Huang, Q., Lv, C., Feng, Q., & Tu, S. (2026). Virtual power plants for DER integration: A comprehensive review of aggregation, control, market participation and revenue allocation. Energy Strategy Reviews, 67, Article 102356. https://doi.org/10.1016/j.esr.2026.102356

205. Nadeem, T. B., Siddiqui, M., Khalid, M., & Asif, M. (2023). Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies. Energy Strategy Reviews, 48, Article 101096. https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101096

206. 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

207. Eutukhova, T., & Novoseltsev, O. (2024). Virtual energy management system for energy supply of regional infrastructure. System Research in Energy, 2a(78), 10–12. https://systemre.org/index.php/journal/article/view/840

208. Strezoski, L. (2023). Distributed energy resource management systems—DERMS: State of the art and how to move forward. WIREs Energy and Environment, 12(1), e460. https://doi.org/10.1002/wene.460

209. Kudzin, A., Takayama, S., & Ishigame, A. (2025). Energy management systems (EMS) for a decentralized grid: A review and analysis of the generation and control methods impact on EMS type and topology. IET Renewable Power Generation, 19(1), Article e70008. https://doi.org/10.1049/rpg2.70008

210. International Organization for Standardization. (2018). Energy management systems: Requirements with guidance for use (ISO Standard No. 50001:2018). https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/cdaae761-502f-44b6-be64-6d602d9d87fc/iso-50001-2018

211. Mousa, H. H. H., Mahmoud, K., & Lehtonen, M. (2024). Recent developments of demand-side management towards flexible DER-rich power systems: A systematic

review. IET Generation, Transmission & Distribution, 18(13), 2259–2300. https://doi.org/10.1049/gtd2.13204

212. International Energy Agency. (2026b). Scaling up demand flexibility. https://www.iea.org/reports/scaling-up-demand-flexibility

213. International Energy Agency. (2022). Unlocking the potential of distributed energy resources. https://www.iea.org/reports/unlocking-the-potential-of-distributed-energy-resources

214. Дерев'янко, Д., & Швірські, К. (2024). Побудова моделей оптимальної взаємодії джерел розосередженої генерації та систем акумулювання енергії у межах Microgrid систем. Технічна електродинаміка, 1, 53–60. https://doi.org/10.15407/techned2024.01.053

215. Дерев'янко, Д. Г., & Воробель, В. В. (2023). Підвищення ефективності функціонування Microgrid систем з накопичувачами. Енергетика: економіка, технологія, екологія, 4, 22–28. https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290885

216. Efficiency Valuation Organization. (2022). International performance measurement and verification protocol (IPMVP): Core concepts 2022 (EVO 10000–1:2022). https://evo-world.org/fr/library/download-protocol-documents-mainmenu-en

217. U.S. Department of Energy. (2025). M&V guidelines: Measurement and verification for performance-based contracts (Version 5.0). https://www.energy.gov/cmei/femp/articles/mv-guidelines-measurement-and-verification-performance-based-contracts-version-0

218. Köhlke, J., Brüning-Pfeiffer, A., Dmitriyev, V., Tucci, F., & Asswad, J. (2026). Towards energy efficiency: A framework for measuring, reporting and verifying energy data from smart buildings. Energies, 19(4), Article 1002. https://doi.org/10.3390/en19041002

219. GSA, Clean Energy Division. (2025). Electric service, natural gas, energy management service and/or services provided under the appropriate regulatory authority. https://www.gsa.gov/system/files?file=Duke%2047PA0425D0023%20Award.pdf

220. Sukhonos, M., Dymchenko, O., Smachylo, V., Rudachenko, O., & Tararuiev, I. (2023). Sustainable development of entrepreneurship entities in Ukraine: National and regional aspects. In O. Arsenyeva, T. Romanova, M. Sukhonos, I. Biletskyi, & Y. Tsegelnyk

(Eds.), Smart technologies in urban engineering (pp. 38–49). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46877-3_4

221. European Parliament & Council of the European Union. (2023). Directive (EU) 2023/1791 of 13 September 2023 on energy efficiency (recast). Official Journal of the European Union, L 231. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L1791

222. European Commission. (2024). Commission Recommendation (EU) 2024/2476 of 13 September 2024 setting out guidelines for the interpretation of Article 29 of Directive (EU) 2023/1791 as regards energy services. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202402476

223. Iria, J., & Soares, F. (2023). An energy-as-a-service business model for aggregators of prosumers. Applied Energy, 347, Article 121487. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121487

224. Martín-Martínez, F., Boal, J., Sánchez-Miralles, Á., Becker Robles, C., & Rodríguez-Vilches, R. (2024). Technical deployment of aggregator business models. Heliyon, 10(9), Article e30101. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30101

225. Ruan, G., Qiu, D., Sivaranjani, S., Awad, A. S. A., & Strbac, G. (2024). Data-driven energy management of virtual power plants: A review. Advances in Applied Energy, 14, Article 100170. https://doi.org/10.1016/j.adapen.2024.100170

226. Kaiss, M., Wan, Y., Gebbran, D., Unsihuay Vila, C., & Dragičević, T. (2025). Review on virtual power plants/virtual aggregators: Concepts, applications, prospects and operation strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 211, Article 115242. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115242

227. Khojasteh, M., Faria, P., Lezama, F., & Vale, Z. (2023). A novel adaptive robust model for scheduling distributed energy resources in local electricity and flexibility markets. Applied Energy, 342, Article 121144. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121144

228. Schwidtal, J. M., Agostini, M., Coppo, M., Bignucolo, F., & Lorenzoni, A. (2023). Optimized operation of distributed energy resources: The opportunities of value stacking for power-to-gas aggregated with PV. Applied Energy, 334, Article 120646. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120646

229. Gržanić, M., & Capuder, T. (2023). Collaboration model between distribution system operator and flexible prosumers based on a unique dynamic price for electricity and flexibility. Applied Energy, 350, Article 121735. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121735

230. Lee, H. P. (2026). Integrating distributed energy resources in power distribution systems: A comprehensive review of impacts, challenges, and opportunities from a distribution system operator's perspective. Applied Energy, 403, Article 127052. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127052

231. Khudiakov, I., Sukhonos, M., Starostina, A., Ushakova, S., & Drobotova, Y. (2023). District heating network design and optimization models as decision-making support instruments: A comparative analysis. In O. Arsenyeva, T. Romanova, M. Sukhonos, I. Biletskyi, & Y. Tsegelnyk (Eds.), Smart technologies in urban engineering (pp. 338–349). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46877-3_30

232. Das, S., Dutta, R., De, S., & De, S. (2024). Review of multi-criteria decision-making for sustainable decentralized hybrid energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 202, Article 114676. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114676

233. Khudiakov, I., & Sukhonos, M. (2023). An adaptive decision-making support model in the management of engineering infrastructure reconstruction programs and projects. Municipal Economy of Cities, 4(178), 2–9. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-2-9

234. Yu, N., Zhang, S., Qin, J., Hidalgo-Gonzalez, P., Dobbe, R., Liu, Y., Dubey, A., Wang, Y., Dirkman, J., Zhong, H., Lu, N., Ma, E., Ding, Z., Cao, D., Zhao, J., & Gao, Y. (2025). Data-driven control, optimization, and decision-making in active power distribution networks. Applied Energy, 397, Article 126253. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126253

235. Дерев'янко, Д. Г., & Перегуда, О. В. (2024). Особливості побудови систем Smart-моніторингу Microgrid систем. Енергетика: економіка, технологія, екологія, 1, 57–64. https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.298816

ДОДАТОК А. Копії актів впровадження результатів роботи

НАЦІОНАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ
СТРАТЕГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

вул. Пирогова, 7-а, м. Київ, 01030, Україна
тел. (044) 234-50-07, факс (044) 234-41-03

NATIONAL INSTITUTE
FOR STRATEGIC STUDIES

7 A Pyrohova St., Kyiv 01030, Ukraine
tel. (044) 234-50-07, fax (044) 234-41-03

16.06.2026 № 293/390

Інститут загальної енергетики
Національної академії наук

АКТ
про використання результатів дисертаційної роботи

Національний інститут стратегічних досліджень (НІСД) є базовою науково-дослідною установою науково-аналітичного супроводження діяльності Президента України та Ради національної безпеки і оборони України. Інститут здійснює науково-аналітичні та прогнозні дослідження проблем розвитку України, її національної безпеки, розробляє науково обґрунтовані пропозиції щодо їх вирішення.

Одним із таких перспективних напрямів наукових досліджень та пріоритетів забезпечення національної безпеки, який був започаткований в НІСД, є дослідження проблем забезпечення безпеки і стійкості критичної інфраструктури, зокрема стійкості енергетичної інфраструктури. Інститут продовжує розвивати даний напрям наукових досліджень та надавати науково-методичну допомогу органам державної влади у реалізації завдань визначених законодавством у цій сфері.

НІСД, у рамках даного напряму, досліджує також питання трансформації енергетичної системи України відповідно до вимог безпекового середовища. У 2025-2026 роках, Інститут ініціював широку наукову дискусію щодо визначення принципів та підходів розбудови нової енергетичної системи України у післявоєнний період.

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України (ІЗЕ НАН України), активно долучався до заходів ініційованих НІСД. Інститут також ознайомлений із дослідженнями ІЗЕ НАН України з питань розбудови нової енергетичної системи України, зокрема у частині розвитку регіональної архітектури енергетики як одного з стратегічних елементів забезпечення енергетичної безпеки держави.

НІСД розглянув результати дисертаційного дослідження докторантки ІЗЕ НАН України Євтухової Тетяни Олександрівни на тему: «Методологічні засади сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем» спрямованого на підвищення ефективності, самодостатності, стійкості та гнучкості функціонування регіональних енергосистем в умовах невизначеності, кризових явищ та децентралізації енергетики.

Фахівці НІСД відзначають високий науковий рівень дослідження і його практичну значущість для подальшого розвитку енергетичної політики країни, трансформації енергетичної системи України та забезпечення стійкості надання енергетичних послуг. Запропонований у дисертації підхід доповнює традиційні методи оцінювання енергетичної безпеки, що застосовуються у стратегічному аналізі загроз на державному рівні, шляхом формалізації параметрів стійкості енергетичних систем як здатності інфраструктури адаптуватися до порушень функціонування, підтримувати безперервність надання енергетичних послуг та забезпечувати відновлення після кризових впливів.

Інститут підтримує дисертаційне дослідження Євтухової Тетяни Олександрівни. У рамках досліджень проблематики енергетичної безпеки держави та забезпечення стійкості критичної енергетичної інфраструктури НІСД використано окремі результати дослідження Євтухової Т.О., зокрема:

- методичні підходи до оцінювання стійкості регіональних енергетичних систем як складової забезпечення життєво важливих функцій держави;
- підходи до інтегрованого аналізу впливу розвитку розподіленої генерації на функціонування енергетичної інфраструктури.

Директор Олександр БОГОМОЛОВ

Олександр Суходоля: т. 0974331243

ДЕРЖАВНА ІНСПЕКЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО НАГЛЯДУ УКРАЇНИ
(ДЕРЖЕНЕРГОНАГЛЯД)

вул. Дорогожицька, 11/8, м. Київ, 04112, тел. (073) 957-20-28
e-mail: bureau@sies.gov.ua, сайт: sies.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 42578602

08.05.2026 № 7/12-7970-26 на № 268/100-2 від 23.04.2026

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

АКТ
про використання результатів дисертаційної роботи

Відповідно до Положення про Державну інспекцію енергетичного нагляду України, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 14 лютого 2018 року № 77, Держенергонагляд є центральним органом виконавчої влади, який реалізує державну політику у сфері нагляду (контролю) у галузях електроенергетики та теплопостачання, а також на ринку природного газу.

Держенергонагляд у своїй діяльності керується Конституцією та законами України, указами Президента України та постановами Верховної Ради України, актами Кабінету Міністрів України, іншими актами законодавства.

Відповідно до частини другої статті 19 Конституції України органи державної влади та органи місцевого самоврядування, їх посадові особи зобов'язані діяти виключно на підставі, в межах повноважень та у спосіб, що передбачені Конституцією та законами України.

Держенергонагляд також здійснює співпрацю з Інститутом загальної енергетики Національної академії наук України відповідно до Меморандуму про партнерство та співпрацю, укладеного з метою розвитку сучасних підходів до управління енергетичними системами, забезпечення стійкого функціонування електроенергетичної системи, систем теплопостачання та ринку природного газу, удосконалення державної політики у сфері енергетичного нагляду (контролю), а також залучення наукового потенціалу до підготовки аналітичних, методичних та практичних рішень у сфері енергетичної безпеки та сталого розвитку енергетичного сектору України.

Сертифікат 6FA97849F1B2570D040000004264010019 9F0400
Підписувач Замулко Анатолій Ігорович
Дійсний з 20.09.2024 9:34:00 по 20.09.2026 9:34:00

Держенергонагляд
7/12-7970-26 від 08.05.2026

З урахуванням необхідності забезпечення стійкості функціонування енергетичної інфраструктури в умовах воєнного стану, розвитку розподіленої генерації, інтеграції відновлюваних джерел енергії, підвищення рівня енергетичної безпеки регіонів та реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної стійкості, зокрема відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 20 березня 2026 року № 393 «Про реалізацію експериментального проєкту щодо створення умов для швидкого та ефективного здійснення заходів комплексних планів стійкості регіонів і окремих міст», Держенергонаглядом опрацьовано *результати дисертаційного дослідження Євтухової Тетяни Олександрівни на тему: «Методологічні засади сервіс-орієнтованої трансформації регіональних енергетичних систем».*

Дисертаційне дослідження присвячене розробленню теоретико-методологічних засад сервіс-орієнтованої трансформації регіональних енергетичних систем, спрямованих на підвищення ефективності, стійкості, самодостатності та надійності функціонування регіональних енергосистем в умовах невизначеності, кризових явищ та децентралізації енергетики.

Під час підготовки аналітичних, інформаційних та методичних матеріалів Держенергонаглядом використано окремі наукові положення, методичні підходи та практичні результати дисертаційної роботи, зокрема:

- методичні підходи до оцінювання рівня стійкості регіональних енергосистем;
- систему показників оцінювання ефективності функціонування електро- та теплопостачальних систем;
- підходи до аналізу технічної готовності об'єктів розподіленої генерації до роботи в енергосистемі;
- рекомендації щодо підвищення надійності функціонування регіональної енергетичної інфраструктури в умовах децентралізації енергетики.

У подальшому результати дисертаційної роботи планується використовувати під час підготовки аналітичних та методичних матеріалів, а також при реалізації заходів відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 05 лютого 2026 року № 192 «Про деякі заходи щодо невідкладного подолання наслідків надзвичайної ситуації в електроенергетичних системах».

Цей акт не є підставою для отримання будь-яких матеріальних виплат, премій чи інших видів винагороди від Державної інспекції енергетичного нагляду України.

Т.в.о. Голови **Анатолій ЗАМУЛКО**

Дідух Ірина, тел. (073) 957-20-13 (вн. 410)

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

03057, м. Київ - 57, вул. Марії Капніст, 2а

тел. +38(044) 456-62-82
факс: +38 (044) 456-60-91
E-mail: admin@ittf.kiev.ua

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE

INSTITUTE OF ENGINEERING THERMOPHYSICS

2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine

Tel. +38(044) 456-62-82
Fax: +38 (044) 456-60-91
E-mail: admin@ittf.kiev.ua

18.06.26 № 173-06/01-14
на № _____

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Інститут технічної теплофізики НАН України (ІТТФ) є базовою науково-дослідною установою Відділення енергетики та енергетичних технологій НАН України, що здійснює науково-аналітичні та прогнозні теплофізичні дослідження у теплоенергетичному устаткуванні при використанні традиційних, відновлюваних та альтернативних джерел енергії, розробляє методи підвищення ефективності, надійності та екологічної безпеки енергетичного сектору країни. Виконані дослідження дозволили визначити найбільш актуальні напрями енергозбереження, насамперед у комунальній енергетиці, та розробити основи системного моделювання екологічних процесів розвитку теплоенергетики.

Одним із перспективних напрямів наукових досліджень, започаткованих в Інституті, є проблематика забезпечення сталого розвитку регіональної інфраструктури. Відповідні напрацювання ІТТФ стали основою для подальшого нормативно-правового визначення завдань державної політики у цій сфері. ІТТФ продовжує розвивати зазначений напрям досліджень та надавати науково-методичну підтримку органам державної влади та місцевого самоврядування.

ІТТФ бере активну участь у формуванні наукових засад і підходів до розбудови нової енергетичної системи України, зокрема в частині розвитку регіональної архітектури енергетики як одного зі стратегічних елементів забезпечення енергетичної безпеки держави.

У межах співпраці з Інститутом загальної енергетики НАН України ІТТФ опрацьовано результати дисертаційного дослідження Євтухової Тетяни Олександрівни на тему: «Методологічні засади сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем», спрямованого на підвищення ефективності,

самодостатності, стійкості та гнучкості функціонування регіональних енергосистем в умовах невизначеності, кризових явищ та децентралізації енергетики. Запропонований у дисертації підхід доповнює традиційні механізми взаємодії виробників енергії, споживачів, прос'юмерів, агрегаторів, операторів мереж і сервісних компаній та створює методологічне підґрунтя для впровадження нових моделей управління регіональними енергосистемами.

Під час підготовки проєктів нормативно-правових актів, програмних документів та матеріалів науково-аналітичного характеру, що визначають концептуальні засади розвитку комунальної теплоенергетики та систем теплопостачання, ІТТФ використано окремі науково-прикладні положення дисертаційної роботи, зокрема:

– методичний підхід до обґрунтування пріоритетних напрямів розвитку регіональних енергосистем, який дозволяє визначати раціональну структуру енергетичних сервісів з урахуванням критеріїв ефективності, самодостатності та стійкості енергозабезпечення регіонів;

– підхід до інтегрального оцінювання рівня енергетичної самодостатності регіонів, що дає можливість кількісно оцінювати ступінь залежності від зовнішніх енергетичних ресурсів та визначати пріоритетні напрями підвищення енергетичної безпеки;

– методичні положення щодо сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем, які можуть бути використані при формуванні стратегій модернізації та відновлення об'єктів комунальної енергетики, а також під час розроблення регіональних програм підвищення енергетичної стійкості.

Результати дисертаційної роботи мають науково-практичне значення та можуть бути використані при подальшому вдосконаленні науково-методичного забезпечення розвитку систем комунальної теплоенергетики та регіональних енергетичних систем України.

Цей акт не є підставою для отримання будь-яких матеріальних виплат, премій чи інших видів винагороди від Інституту технічної теплофізики НАН України.

Директор
Інституту технічної теплофізики НАН України
член-кор. НАН України, професор,
доктор технічних наук



Борис БАСОК

ІНСТИТУТ ПРОМИСЛОВОЇ ЕКОЛОГІЇ

03057 м. Київ, вул. М. Капніст, 2-А
Код ЄДРПОУ 16400894
Тел. (044) 453 28 62, тел/факс(044) 456 92 62
e-mail: **office@engecology.com**

26.06.2026 № 12 /3 -26

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи

ТОВ «Інститут промислової екології» розробляє програми підвищення енергоефективності об'єктів, проєкти модернізації систем централізованого теплопостачання та впровадження сучасних енергетичних технологій, схеми теплопостачання міст України.

У процесі виконання робіт, пов'язаних з оцінюванням стану та перспектив розвитку систем теплопостачання, підготовкою пропозицій до регіональних і місцевих енергетичних планів, а також розроблення заходів щодо підвищення енергоефективності та енергетичної безпеки, нами опрацьовано результати дисертаційного дослідження Євтухової Тетяни Олександрівни на тему: «Методологічні засади сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергосистем».

Результати дисертаційної роботи використано при підготовці матеріалів та рекомендацій щодо розвитку систем централізованого теплопостачання м. Миколаєва, підвищення енергетичної стійкості міста, впровадження локальних джерел енергії та формування пропозицій до модернізації системи.

У схемі теплопостачання використано науково-прикладні положення дисертаційної роботи, зокрема:

– методичний підхід до комплексного оцінювання та обґрунтовування пріоритетних напрямів модернізації систем централізованого теплопостачання;

– підхід до інтегрального оцінювання перспектив залучення місцевих і відновлюваних джерел енергії;

– підходи до оцінювання ефективності, стійкості та гнучкості енергозабезпечення при підготовці рекомендацій щодо підвищення надійності функціонування систем теплопостачання та обґрунтуванні заходів з їх реконструкції;

– рекомендації щодо інтеграції розподілених джерел енергії, когенераційних установок, теплових насосів, систем накопичення енергії та інших енергетичних сервісів у єдину структуру.

Вважаємо, що використання результатів дисертаційної роботи сприяло підвищенню якості виконання схеми теплопостачання м. Миколаєва.

Директор _____ к.т.н., дійсний член АБУ Сігал О.І.

Вик. Павлюк Н.Ю.
050 387 9070

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Виконавець
ТОВ "САХАРА"
_____ Сергій ДАНИЛІВ
«19» січня 2026 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора наук
Євтухової Тетяни Олександрівни

Ми, що підписалися нижче, виконавець ТОВ "САХАРА Сергій ДАНИЛІВ разом з провідним науковим співробітником Інституту загальної енергетики НАН України (ІЗЕ НАН України), д.т.н., ст. досл. Олегом ДЕКУШЕЙ та докторантом ІЗЕ НАН України Тетяною ЄВТУХОВОЮ склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Тетяни ЄВТУХОВОЇ впроваджені у ТОВ «САХАРА».

Найменування впровадженого результату	**Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект**
Метод і модель оцінювання стійкості енергозабезпечення	Метод і модель оцінювання стійкості енергозабезпечення, що базуються на інтегральному показнику стійкості дозволяє визначати економічну вартість його підвищення, зокрема через показник прихованої вартості стійкості. Отримані результати забезпечують підвищення обґрунтованості проєктних рішень, вибору енергоефективного обладнання Це сприяє зниженню прогнозованого споживання енергоресурсів, підвищенню ефективності систем, покращенню якості енергосервісних послуг.

Виконавець
ТОВ "САХАРА"
_____ Максим ДРАНІК

Старший науковий співробітник, к.т.н, доцент
_____ *Тетяна* ЄВТУХОВА

Директор Навчально-наукового
інституту енергетики, автоматики
та енергозбереження Національного
університету біоресурсів і
природокористування України
д-р техн. наук, проф.

11.06.2026 N 06/1061

_____ Віктор КАПЛУН

«___»_____2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук у освітній процес

Даний акт складений про те, що результати дисертаційної роботи Євтухової Тетяни Олександрівни на тему: «Методологічні засади сервіс-орієнтованого розвитку регіональних енергетичних систем», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.01 «Енергетичні системи та комплекси», було впроваджено у навчальну програму при викладанні дисципліни «Математичні методи моделювання в електроенергетиці» за освітніми програмами «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка» та «Інжиніринг електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами» при підготовці фахівців ОКР «Магістр» у Національному університеті біоресурсів і природокористування України впродовж 2025-2026 рр., де використовувалась запропонована методологія розвитку регіональних енергетичних систем в умовах децентралізації та недопостачання енергії під впливом кризових явищ.

Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій,
кандидат технічних наук, доцент Олександр ОКУШКО

ДОДАТОК Б. 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)**.

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)**

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)**

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)**.

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.

ДОДАТОК В. Відомості про апробацію 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.

Форма участі у всіх перелічених заходах – доповіді з презентаціями основних результатів.