

УДК 621.3

Сергій Денисюк, д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-6299-3680>

Галина Белоха*, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4277-367X>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський просп., 37, м. Київ, 03056, Україна

*Автор-кореспондент: pointage13@gmail.com

ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ЯК СКЛADOVІ РЕАЛІЗАЦІЇ КОНЦЕПЦІЇ «РОЗУМНІ МЕРЕЖІ»

Анотація. Глобальні цілі декарбонізації викликали серію фундаментальних змін в електроенергетичних системах у розвинутих країнах. Необхідні нові підходи та концепції побудови модернізованих електричних мереж для підвищення ефективності, надійності та стійкості енергосистем. Енергетичний сектор України особливо потребує нових підходів до побудови електроенергетичних систем з впровадження відновлюваних та розосереджених джерел. Згідно з Дорожньою картою Концепції впровадження «розумних мереж» відновлення пошкоджених російськими атаками об'єктів планується здійснювати із застосуванням «розумних» технологій. Транзактивна енергія є новим підходом для ефективної та надійної інтеграції розосереджених енергетичних ресурсів та задоволення вимог споживачів електроенергії. Ще одним варіантом нової організації енергетики майбутнього є Інтернет енергії – тип децентралізованої електроенергетичної системи, де реалізовано інтелектуальне розподілене управління. У статті представлено огляд та аналіз транзактивної енергетики та Інтернету енергії, концепції побудови енергетичної системи на основі енергетичних комірок. Такі системи є децентралізованими, можуть працювати без підключення до централізованих електромереж і задовольняти потреби споживачів за рахунок оптимального використання енергії розосереджених енергетичних ресурсів (відновлюваних джерел, розосереджених джерел та систем зберігання). Транзактивну енергетику можна вважати вільним ринком електроенергії із підтримкою Інтернету, де всі учасники можуть безпечно торгувати за «розумною» ціною та розрахунками майже в реальному часі. Продемонстровано функціонування децентралізованої транзактивної системи в усталених та перехідних режимах роботи. Розглянута побудова енергосистеми відповідає концепції «розумних мереж», має високий потенціал впровадження в Україні, що збільшить частку ВДЕ, пришвидшить декарбонізацію, зростання стійкості та надійності енергосистеми України та призведе до розвитку локальних ринків електричної енергії.

Ключові слова: Інтернет енергії, транзактивна енергетика, енергетична комірка, відновлювані джерела енергії, розподілена генерація, розумна мережа, декарбонізація.

1. Вступ

Майбутнє енергетики вимагає застосування нових технологій та формування нових систем для трансформації виробництва, розподілу та споживання енергії. Інтернет енергії (ІоЕ) як нова концепція змінює спосіб виробництва, постачання та споживання енергії через «розумну» мережу промислових виробників і споживачів енергії [1–2]. Необхідність розробки нової архітектури енергосистем визначається тим, що ефективний розвиток електроенергетики в рамках головної парадигми централізованих енергосистем стає неможливим. Централізована архітектура електромережі вичерпала свої можливості щодо задоволення вимог споживачів та забезпечення зростання ефективності енергосистем. Швидкий розвиток та масове впровадження рішень розподіленої енергетики будується на новій парадигмі, що пропонує близькість генерації до споживача, локалізацію енергетичних балансів, зміну ролей споживачів та появу в енергосистемах нових типів суб'єктів, що поєднують властивості генераторів та споживачів – просюмерів (активних споживачів). З точки зору задоволення бажань споживачів та забезпечення економічної ефективності енергопостачання розподілена енергетика, особливо при правильному поєднанні з традиційною, часто виявляється більш ефективною, ніж централізоване електропостачання [1–4].

У децентралізованій енергосистемі присутні розподілена генерація та споживачі, які у тому числі мають можливість керувати своїм споживанням. Між усіма цими суб'єктами підтримується вільний енергообмін, що забезпечується енергетичною інфраструктурою, та двосторонній обмін інформацією, необхідний для енергообміну та взаємної торгівлі, що здійснюється на тих чи інших ринкових майданчиках.

Без нової архітектури побудови енергосистем подальше суттєве зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в них є практично неможливим. До того ж зростання цієї частки призводить до зниження системної надійності централізованих енергосистем.

Цифровізація енергетики, навпаки, відкриває технологічні можливості для реалізації розподіленої енергетики в рамках нового архітектурного підходу, оскільки створює необхідні для цього інформаційні потоки та визначає необхідну кількість цифрових керованих пристроїв, у тому числі на стороні споживачів, зокрема цифровий облік електроенергії та віддалений доступ до електроустановок споживачів.

Україна має курс на створення нових генеруючих потужностей на базі ВДЕ. Зростаюча генерація потребуватиме нових потужностей з передачі, розподілу та зберігання електроенергії. Саме тому заплановано розбудову нових ліній електропередачі високої та середньої напруги, інтерконекторів на кордоні з Румунією, Словаччиною та Польщею, а також стійких розподільних ліній [5].

Подальший розвиток відновлюваної енергетики в Україні відбуватиметься на конкурентних та ринкових засадах, створюючи належні умови для залучення приватних інвестицій.

Розподілена генерація та енергетичні системи на її основі здатні забезпечити низку переваг для українських енергосистем, основні з яких [6]:

- стимулювання національної економіки щодо місцевого виробництва обладнання та послуг, пов'язаних із встановленням та обслуговуванням об'єктів розподіленої генерації електроенергії;
- стійкість до ворожих атак;
- зменшення втрат електричної енергії під час передачі;
- забезпечення додаткових регулюючих потужностей в енергосистемі;
- зменшення залежності власників розподіленої генерації від зовнішнього електропостачання, їх захист від ринкових ризиків і нестабільності цін;
- економія коштів або додатковий дохід від продажу надлишку електроенергії.

Аналіз сучасного стану енергосистеми України показує, що для розвитку розподіленої генерації на базі відновлюваних джерел необхідно [6]:

- розробити і прийняти програму розвитку розподіленої генерації в Україні та інші нормативно-правові акти;
- в усіх програмах і стратегіях забезпечити пріоритетність розвитку розподіленої генерації в Україні на основі ВДЕ і природного газу;
- створити умови для забезпечення вигідності приватних інвестицій в розподілену електричну і теплову генерації;
- забезпечити активну взаємодію і інтеграцію місцевої влади і бізнесу для швидкої реалізації проєктів розподіленої генерації.

Шлях до використання всіх можливостей, що сприяють енергетичному переходу, лежить через залучення громадян (активних споживачів) та енергетичних спільнот до використання відновлюваних джерел енергії. Четвертий Енергопакет «Чиста енергія для всіх європейців» увів термін Енергетичні спільноти: «Енергетичні спільноти громадян» (Citizen energy communities) та «Спільноти відновлюваної енергетики» (Renewable energy communities). За даними досліджень CE Delft, до 2050 року майже половина всіх домогосподарств ЄС може бути залучена до виробництва відновлюваної енергії. Відмічається в [7], що близько 83 % домогосподарств ЄС потенційно можуть бути залученими до виробництва відновлюваної енергії, реагування на попит та/або зберігання енергії. У майбутньому така тенденція може стосуватись також України.

В Україні прийнята «Концепція впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року» і план заходів з її реалізації (Розпорядження КМУ від 14.10.22 № 908-р), які задають рамку для реалізації сучасних технологій в українській електроенергетиці, у тому числі в процесі відбудови та відновлення енергетичної інфраструктури [6]. Розумні мережі згідно з Законом України «Про енергоефективність» [9] – це електричні мережі, що об'єднують в економічно доцільний спосіб учасників ринку електричної енергії та дозволяють керувати передачею енергії та її споживанням з метою підвищення надійності електропостачання та безвідмовності роботи енергетичної системи.

Згідно з Дорожньою картою впровадження «розумних мереж» відновлення пошкоджених російськими атаками об'єктів планується здійснювати із застосуванням «розумних» технологій. Зокрема, технології «мікромереж», які є більш стійкими до воєнних факторів та природних лих [10].

Глобальні цілі декарбонізації викликали серію фундаментальних змін в електроенергетичних системах у розвинутих країнах. Зростаюча потреба в електроенергії в поєднанні з інтеграцією відновлюваних джерел енергії в електромережу викликала еволюцію розумних мереж. Розробляються нові підходи та концепції при побудові модернізованих електричних мереж з використанням передових технологій.

Транзактивна енергія (TE) є новим підходом для ефективної та надійної інтеграції розподілених енергетичних ресурсів та задоволення вимог споживачів електроенергії [11, 12].

У 2011 році GridWise® Architecture Council (GWAC) визначила поняття TE як систему економічних механізмів і механізмів керування, які дозволяють динамічно балансувати попит і пропозицію в усій електричній інфраструктурі, використовуючи вартість як ключовий робочий параметр [11–14].

Споживачі збалансовують потреби та бажання з ціною, доступністю та зручністю використання електроенергії та відповідних пристроїв, а також збалансовують економічні цілі своїх організацій із фізичними, нормативними та ринковими обмеженнями.

Транзактивні системи в загальному випадку складаються з системи генерації, акумулювання та споживачів. Власне генератори є керованими, споживачі можуть бути як керовані, так і некеровані; для споживачів передбачається можливість застосування механізмів керування попитом. Ці системи можуть бути повністю децентралізованими або з можливістю підключення до централізованої мережі.

У 2015 році GWAC узагальнили застосовність транзактивної енергії в чотирьох сумісних зонах мережі:

1) **житлові будинки**: нові можливості вибору споживачів (клієнти можуть вибрати: брати участь у адаптації попиту для зниження загальних витрат на енергію, виробляти та продавати надлишкову енергію та послуги, купувати енергію з багатьох джерел, користуватися перевагами нових енергетичних послуг).

2) **мікромережа**: стійкі електричні мережі (вдосконалена автоматизація та керування – від підстанцій і проводів до будинків, будівель, автомобілів і приладів – дозволяють створювати гнучкі мікромережі, які підвищують місцеву та регіональну стійкість).

3) **локальний**: розширені послуги (новий обмін даними відкриває можливості для нових послуг для клієнтів).

4) **регіональний**: покращена регіональна інтеграція (підвищена сумісність між регіональними та місцевими ринками координує використання енергетичних ресурсів для підвищення ефективності та надійності). На регіональному рівні оптові ринки забезпечують надійність і ефективність, призначаючи фінансову цінність збалансованості попиту та пропозиції, а також вимірюючи фінансові витрати на невизначеності, притаманні обом сторонам постачання електроенергії. Ці ринкові структури та структури надійності дозволяють інтегрувати ВДЕ та системи зберігання, зберігаючи доступність, стабільність та надійність.

Одним з варіантів нової організації енергетики майбутнього є Інтернет енергії – тип децентралізованої електроенергетичної системи, де реалізовано інтелектуальне розподілене управління, здійснюване за допомогою енергетичних транзакцій між її користувачами. Енергосистема,

побудована на основі нової архітектури, має стати транзактивною, інтелектуальною, стійкою та гнучкою. Множина енергетичних транзакцій, які відбуваються в Інтернеті енергії між енергетичними комірками, формує децентралізоване економічне та технологічне управління енергосистемою Інтернету енергії [1, 15].

Україна потребує моделей нових децентралізованих електроенергетичних систем, які б були енергоефективні, екологічні та дозволили підвищити її надійність і стійкість.

Метою даної статті є аналіз сучасних концепцій побудови децентралізованих електроенергетичних систем з точки зору їх розвитку в Україні в рамках реалізації положень «Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року».

2. Методи та матеріали

У 2022 році GWAC запропонувала модель концепції транзактивної енергії, яка встановлює загальний набір визначень (термінів) для систем транзактивної енергії з метою сприяння обміном інформацією між зацікавленими сторонами (рис. 1) [16].

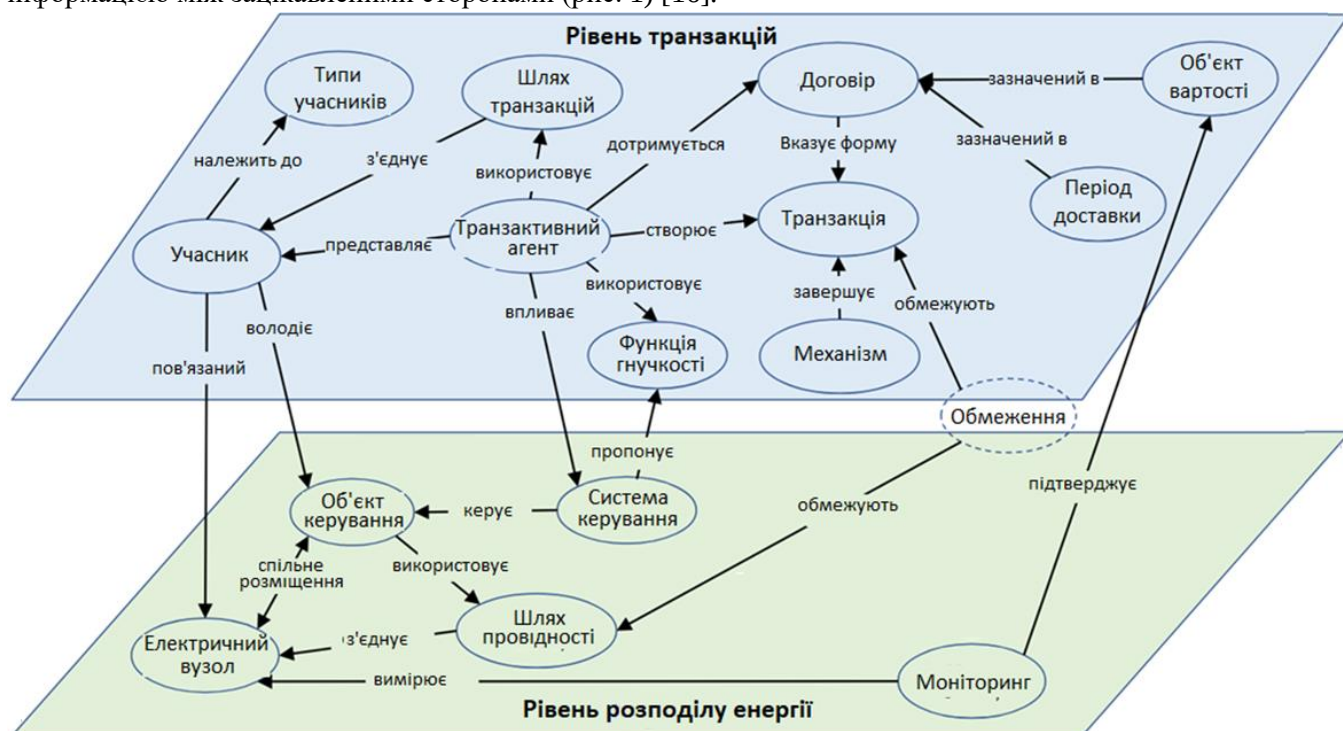


Рисунок 1. Модель концепції транзактивної енергії

Моделлю концепції транзактивної енергії є представлення архітектури транзактивної системи, яка узгоджується з принципами розподіленого прийняття рішень і базовою функціональністю транзактивних енергетичних систем:

- модель складається з термінів, визначень і вільних зв'язків між ними;
- поняття охоплюють елементи, загальні для опису транзактивних енергетичних систем;
- модель не передбачає як проектувати систему – вона не є нормативною, а є архітектурою.
- модель охоплює концепції високого рівня з урахуванням, що розробники транзактивних енергетичних систем використовують різні методології проектування.

Модель складається з двох рівнів: рівень транзакцій та рівень розподілення енергії.

Складові рівня транзакцій:

Договір фіксує відносини між учасниками, які оформлені угодою, охоплює очікувані показники ефективності та звірку за невиконання для остаточного розрахунку між учасниками.

Період доставки – часовий інтервал, протягом якого обмінюються об'єктами вартості транзакції, як зазначено в угоді.

Опція гнучкості є набором можливостей роботи контролера пристрою, які можуть бути використані транзактивним агентом для конкретної транзакції.

Механізм – це цикл взаємодії між транзактивними агентами, результатом якого є завершені транзакції для кожного періоду доставки в угоді. Це можуть бути двосторонні обміни, аукціони.

Учасник транзактивної системи взаємодіє з іншими учасниками за допомогою шляхів транзакцій. Учасник використовує транзактивного агента для взаємодії в транзактивній системі шляхом створення транзакцій від свого імені з іншими учасниками та їхніми транзактивними агентами.

Транзакція включає щонайменше два різних типи учасників. Учасник може діяти за різними типами в різних транзакціях. Тип учасника необхідний, щоб описати, як працюють транзакції. Прикладами типів учасників можуть бути покупець, продавець, агрегатор, аукціоніст тощо.

Транзакція фіксує обмін цінними об'єктами між двома учасниками. Угода визначає форму кожної транзакції, яка об'єднує кількості об'єкта вартості, які підлягають обміну протягом періоду поставки.

Шлях транзакцій використовується для обміну інформацією між транзактивними агентами.

Транзактивний агент, або його можна назвати агрегатор, взаємодіє з іншими транзактивними агентами, використовуючи шляхи транзакцій для створення транзакцій від імені свого учасника. Транзактивний агент має високий ступінь автономії, дотримуючись умов угоди. На основі завершення транзакції він впливає на систему керування для керування пов'язаним об'єктом відповідно до умов угоди. Транзактивний агент враховує бажані стратегії учасника щодо постачання та розподілу електроенергії та може мати варіанти перевизначення учасника під час роботи. Для цього він використовує опцію гнучкості, запропоновану системою керування.

Згідно з законом України «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України» [17] також виділені поняття агрегатора та агрегованої групи, що можуть бути транзактивними агентами. Агрегатор – учасник ринку електроенергії, який здійснює діяльність з агрегації, тобто діяльність на ринку електричної енергії, що здійснює суб'єкт господарювання, пов'язану з об'єднанням електроустановок, призначених для виробництва та/або споживання, та/або зберігання електричної енергії з метою купівлі-продажу електричної енергії, надання допоміжних послуг та/або послуг з балансування на ринку електричної енергії. У свою чергу, агрегована група – це учасники ринку електричної енергії, електроустановки яких входять до однієї одиниці агрегації та агрегуються агрегатором.

Об'єкт вартості – це обумовлена в угоді річ, якою обмінюються учасники і яка фіксується в угодах. Приклади включають кількість енергії на період постачання або резервування енергії, яка буде зберігатися на період постачання та запитуватись за потреби. У транзактивній системі об'єкт вартості зазвичай обмінюється на об'єкт грошової винагороди. Продуктивність доставки об'єкта вартості, визначеного в транзакції, перевіряється за допомогою системи моніторингу.

Рівень розподілу електроенергії:

Об'єкт керування споживає або генерує електроенергію та розміщується разом із електричним вузлом для виконання транзакцій. Об'єкти керування використовують шляхи провідності для обміну електрикою.

Система керування представляє аспекти керування операціями пристрою, керує об'єктом і представляє стан і характеристики, які визначають його робочу гнучкість.

Моніторинг (система вимірювання) – лічильники та системи моніторингу, що вимірюють електричні характеристики в електричному вузлі та використовуються для перевірки ефективності розподілу електроенергії та умов транзакцій.

Ще одним варіантом нової організації енергетики майбутнього є Інтернет енергії, відмінними рисами якого є [15, 18]:

- децентралізований характер енергосистеми, в якій на рівні розподільних мереж є як велика кількість розподілених споживачів, так і велика кількість розподілених виробників електроенергії;
- наявність двонаправлених потоків потужності та можливості динамічної зміни користувачами

ролі в енергосистемі;

- наявність між електроенергетичним обладнанням не тільки електричних зв'язків та взаємодії, що забезпечуються електричними мережами, але також інформаційних зв'язків та взаємодії;

- реалізація повністю децентралізованого інтелектуального управління, яке здійснюється за рахунок міжмашинної (M2M) взаємодії (M2M дозволяє мережевим пристроям взаємодіяти без втручання людини, зв'язок здійснюється від однієї машини до іншої. При використанні у виробничій промисловості він зазвичай поєднується з іншими технологіями, такими як SCADA);

- наявність децентралізованого ринку, на якому укладаються peer-to-peer контракти як на купівлю-продаж електроенергії, так і на надання системних послуг;

- реалізація всіх процесів та керування ними за допомогою прямих транзакцій між користувачами.

Об'єднання електроенергетичного обладнання користувачів Інтернету енергії, що має загальну точку приєднання до електричних мереж та інформаційних каналів, що забезпечують зв'язок з Інтернетом енергії, утворюють структурну одиницю Інтернету енергії – енергетичну комірку. Незалежно від складу та складності своєї внутрішньої структури в Інтернеті енергії енергетична комірка взаємодіє з іншими енергетичними комірками як єдине ціле.

Типологія енергетичних комірок: генератор електричної енергії (потік лише позитивний – вихідний), маневрений генератор, стохастичний генератор, генератор та споживач (потік може бути як позитивним, так і негативним – вихідним або вхідним), просюмер, споживач електричної енергії (потік лише негативний – вхідний), пасивний споживач, активний споживач.

Користувачі Інтернету енергії за допомогою своїх енергетичних комірок можуть відігравати різні динамічно змінюючі ролі в енергосистемі, надаючи один одному різноманітні послуги, такі як продаж (постачання) електричної енергії, участь у керуванні режимами роботи системи (у тому числі участь у підтримці частоти та рівня напруги), надання енергетичного обладнання в оренду або тимчасове віддалене користування, забезпечення резерву потужності на завантаження та розвантаження та будь-які інші види послуг, що створюються в електроенергетиці.

Архітектура Інтернету енергії має забезпечувати можливість реалізації енергетичних транзакцій та можливість управління енергетичними комірками за рахунок міжмашинної взаємодії, нарешті, забезпечувати можливість такого розподіленого режимного управління в реальному часі, що дозволяє підтримувати баланс потужності в енергосистемі та її статичну та динамічну стійкість. Власне, Інтернет енергії являє собою систему систем (System of Systems, SoS), архітектура якої будується на особливому об'єднанні трьох систем:

- системи формування, контролю виконання та оплати смарт-контрактів Transactive energy (TE);
- системи міжмашинної взаємодії та обміну керуючими впливами між енергетичними комірками та енергетичним обладнанням Internet of Things (IoT);

- системи режимного керування, підтримання балансу потужності та забезпечення статичної та динамічної стійкості енергосистеми Neural Grid (NG).

Транзактивна енергія забезпечує [19–21]:

- формування, запис, стійке та захищене зберігання записів про параметри енергетичних транзакцій;

- функціонування цифрових гаманців користувачів, стійке та захищене зберігання їх персональних даних та фінансової інформації;

- верифікацію виконання зобов'язань щодо енергетичних транзакцій на основі даних, що отримуються від системи IoT;

- білінг та процесинг з енергетичних транзакцій, включаючи забезпечення моментального перерахування коштів за фактом виконання умов енергетичної транзакції.

Функції системи Інтернет речей (IoT) наступні:

- надання програмним агентам доступу до систем управління енергетичних комірок та електроустановок енергетичних комірок;

- забезпечення інтероперабельності програмних агентів із електроустановками енергетичних

комірок, приєднаних до Інтернету енергії;

- забезпечення інтероперабельності між електроустановками енергетичних комірок, що приєднані до Інтернету енергії;
- забезпечення стійкості та захищеності зберігання даних про енергетичні комірки та їх електроустановки.

Система Neural Grid забезпечує виконання наступних функцій [19–21]:

- підтримання статичної та динамічної стійкості енергосистеми в умовах здійснення енергетичних транзакцій;
- надання необхідних для здійснення енергетичних транзакцій впливів на режим електропередачі;
- надання необхідних для здійснення енергетичних транзакцій впливів на баланс активної та реактивної потужності в енергосистемі, енерговузлі;
- забезпечення якості електричної енергії;
- забезпечення технологічного захисту енергетичних комірок.

Основними предметами енергетичних транзакцій – ринковими цінностями (корисними властивостями) в Інтернеті енергії, які можна розглядати як первинні базові активи транзакційної енергетики в Інтернеті енергії, – виступають:

1. Електроенергія – електрична енергія як товар, що виробляється енергетичними комірками та постачається споживачам з вимірними обсягами постачання та характеристиками якості.
2. Потужність – готовність енергетичних комірок забезпечити заданий рівень активної та/або реактивної потужності свого енергетичного обладнання за заданих умов.
3. Гнучкість – динамічний вплив енергетичних комірок на баланс електроенергії та активної та/або реактивної потужності в енергосистемі, а також на параметри режиму електропередачі, що здійснюється за запитом або за заданих умов, що забезпечується маневреністю та регулюючими впливами енергетичного обладнання енергетичних комірок.

Інтернет енергії забезпечує облік та реалізацію необхідних умов виконання цих транзакцій, у тому числі формує необхідні фізичні перетікання потужності, які призводять до виконання всього сформованого пулу транзакцій.

Програмні агенти енергетичних комірок повинні мати інформаційні зв'язки із системами TE та IoT.

Програмний агент енергетичної комірки повинен вміти виконувати такі функції:

- представлення користувача та його енергетичної комірки в Інтернеті енергії;
- забезпечення участі енергетичної комірки в сервісах;
- взаємодія з іншими програмними агентами енергетичних комірок та додатками сервісів;
- диспетчеризація участі енергетичної комірки в сервісах з метою виключення колізій в умовах обмеженості ресурсів енергетичної комірки;
- передача параметрів енергетичних транзакцій до системи TE;
- передача команд системам управління енергетичними осередками та електроустановками енергетичних комірок за допомогою системи IoT;
- передача даних про параметри енергетичних транзакцій до системи NG через систему IoT.

Транзактивну енергетику можна вважати вільним ринком електроенергії із підтримкою Інтернету, де всі учасники можуть безпечно торгувати за розумною ціною та розрахунками майже в реальному часі для вирішення своїх спільних проблем. Локальний енергетичний ринок в системі розподілу виконує дві основні функції – послуги гнучкості та енергетичні послуги. Різниця між цими послугами полягає в тому, як сторони беруть участь у ринку. Коли потрібно лише енергопостачання, то це є енергетичними послугами. Але якщо, наприклад, використовується реагування на попит, то це можна вважати послугою гнучкості [18–21].

Розвиток локальних енергетичних ринків має економічні, соціальні та технічні впливи на всіх учасників транзактивних систем. Економічні впливи – це впливи на рахунки споживачів за

електроенергію та доходи від продажу енергії. До впливів соціальних категорій належать: вплив на спосіб життя, культуру, добробут і навколишнє середовище. Технічний вплив локальних енергетичних ринків на систему розподілу електроенергії можна спостерігати у змінах схеми мережі, підходах до планування та експлуатації мережі, методах електричного аналізу мережі, програмах обслуговування, технічних навичках персоналу.

3. Результати

Система, що розглядається, складається з розосереджених ресурсів електроенергії: джерел сонячної генерації, вітряної генерації, системи зберігання енергії, дизель-генераторів, мережі та навантажень змінного струму, постійного струму та електромобілей. Кожна з цих складових транзактивної системи є енергетичною коміркою.

Система побудована та функціонує за наступними основними принципами:

- децентралізований характер;
- реалізація всіх процесів та керування ними відбувається за допомогою прямих транзакцій між учасниками;
- формування та підтримка локальних балансів потужності та самостійного балансування системи на всіх рівнях;
- реалізація двонаправлених потоків потужності між енергетичними комірками;
- динамічна зміна типів учасників в транзактивній системі;
- наявність між електроенергетичним обладнанням не тільки електричних зв'язків та взаємодії, що забезпечуються електричними мережами, але також інформаційних зв'язків та взаємодії;
- реалізація повністю децентралізованого інтелектуального керування;
- наявність децентралізованого ринку електроенергії;
- наявність зв'язків та взаємодії з централізованою електроенергетичною системою та її суб'єктами, за яких забезпечується оптимальне для користувачів поєднання традиційної централізованої та розподіленої енергетики.

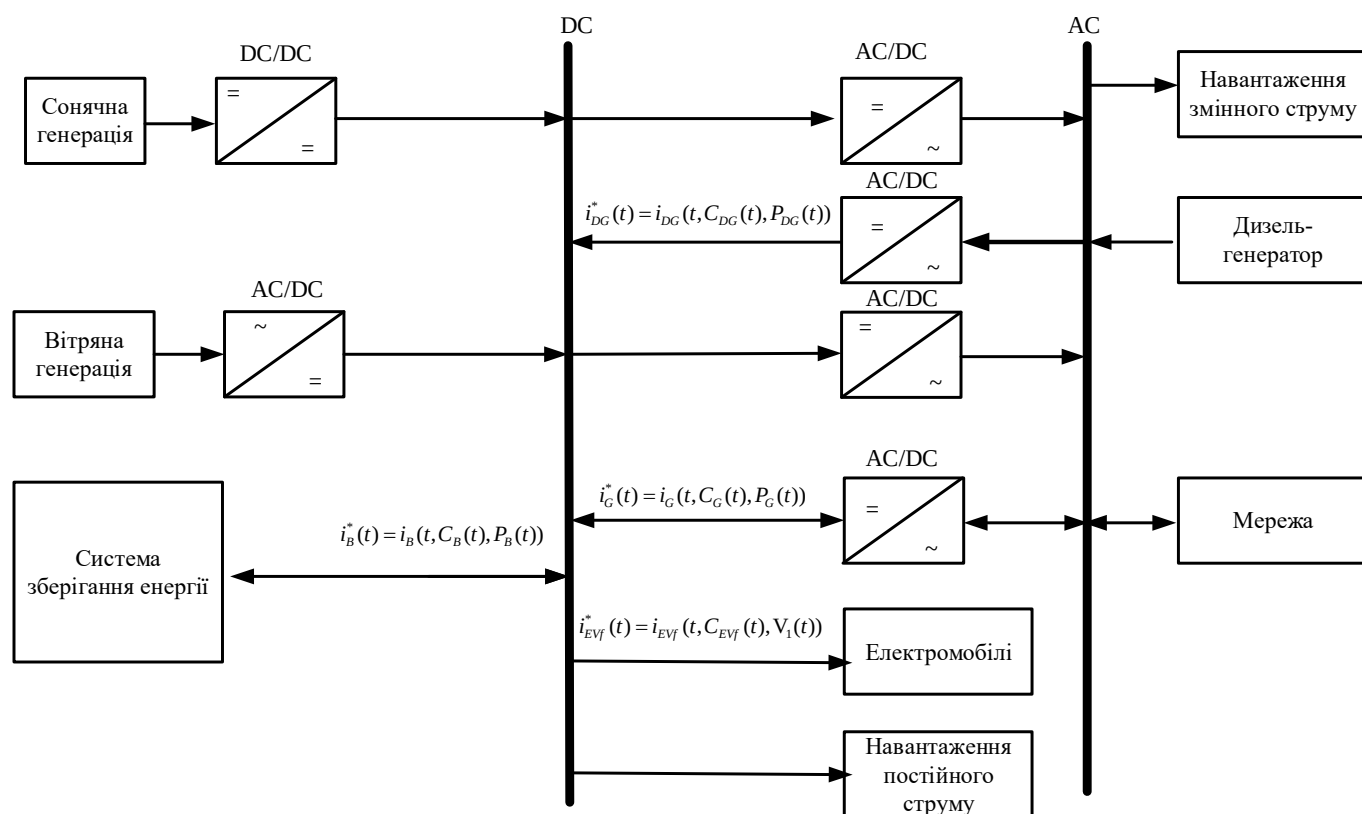


Рисунок 2. Транзактивна система

Обмін енергіями між енергетичними комірками відбувається при розподіленні потужності системою керування між генераторами.

Цільовою функцією є мінімізація загальних витрат:

$$C_{sum} = f(t, P, C). \quad (1)$$

Обмеження, які накладаються при вирішенні цільової функції:

Зі сторони системи зберігання

$$0.2 \cdot SOC_{ESS_max} \leq SOC_{ESS}(t) \leq 0.9 \cdot SOC_{ESS_max}, \quad (2)$$

де SOC_{ESS_max} – максимальне значення заряду, $SOC_{ESS}(t)$ – поточне значення заряду.

Зі сторони генераторів

$$P_{DGmin} \leq P_{DG} \leq P_{DGmax}; \quad (3)$$

$$P_{DERmin} \leq P_{DER} \leq P_{DERmax}, \quad (4)$$

де P_{DER} – поточне значення потужності відновлюваних джерел живлення, P_{DG} – поточне значення потужності дизель-генераторів.

Миттєве значення струму кожної енергетичної комірки залежить від потужності, цінової функції та часу доби.

Струм мережі

$$i_G^*(t) = i_G(t, C_G(t), P_G(t)), \quad (5)$$

струм відновлюваних джерел

$$i_{DER}^*(t) = i_{DER}(t, C_{DER}(t), P_{DER}(t)), \quad (6)$$

струм дизель-генераторів

$$i_{DG}^*(t) = i_{DG}(t, C_{DG}(t), P_{DG}(t)), \quad (7)$$

струм системи зберігання

$$i_{ESS}^*(t) = i_{ESS}(t, C_{ESS}(t), P_{ESS}(t)), \quad (8)$$

де $P_G(t)$, $P_{DER}(t)$, $P_{ESS}(t)$, $P_{DG}(t)$ – миттєве значення потужностей; $C_G(t)$, $C_{DER}(t)$, $C_{ESS}(t)$, $C_{DG}(t)$ – функції залежності вартості електричної енергії для окремих енергетичних комірок.

Баланс струмів по шині постійного струму

$$i_G^*(t) + i_{DER}^*(t) \pm i_{ESS}^*(t) = i_{EV}^*(t) + i_{dload}^*(t), \quad (9)$$

де i_{EV} – струм заряду електромобіля; $i_{dload}^*(t)$ – струм навантаження постійного струму.

Баланс струмів шини змінного струму

$$i_G^*(t) + i_{DER}^*(t) \pm i_{ESS}^*(t) = i_{acload}^*(t), \quad (10)$$

де $i_{acload}^*(t)$ – струм навантаження змінного струму.

Для вирішення цільової функції використовується розроблений алгоритм розподілу потужностей по всіх енергетичних комірках транзактивної системи. Основні концепції алгоритму для різного складу електроенергетичних систем відображені в роботах авторів [23–29].

Для аналізу транзактивної системи обрано добовий сумарний графік навантажень постійної та змінної напруги, представлений на T інтервалах по 15 хв. кожний (всього 96 інтервалів) (рис. 3). Транзактивна система працює в острівному режимі (система від'єднана від мережі).

Система розподілу працює таким чином, що відбір потужності енергії сонячних джерел є пріоритетним. Залежно від цінових функції, часу доби, обмежень обирається оптимальний розподіл відбору потужностей від вітряних джерел, системи зберігання та дизель-генератора (використовується, коли недостатньо енергії відновлюваних джерел та системи зберігання).

Результатами розрахунку є графіки розподілу (рис. 4), які демонструють потужність сонячного джерела, вітряного, та графік потужностей системи зберігання на кожному інтервалі. Знак «+» показує віддачу енергії до навантаження, знак «-» залишкову потужність відновлюваних джерел, що йде на заряд системи зберігання.

Графік витрат у відносних одиницях C^* (в.о.) від $C_{сер}$ (рис. 5).

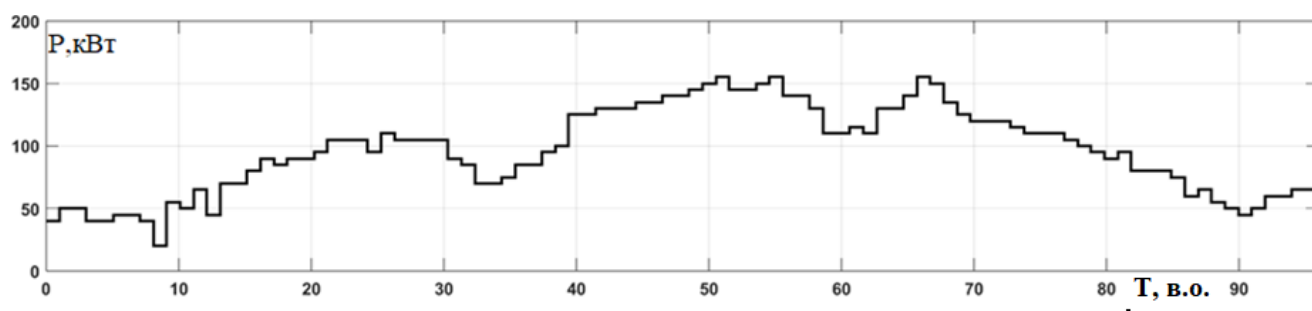


Рисунок 3. Добовий графік навантаження

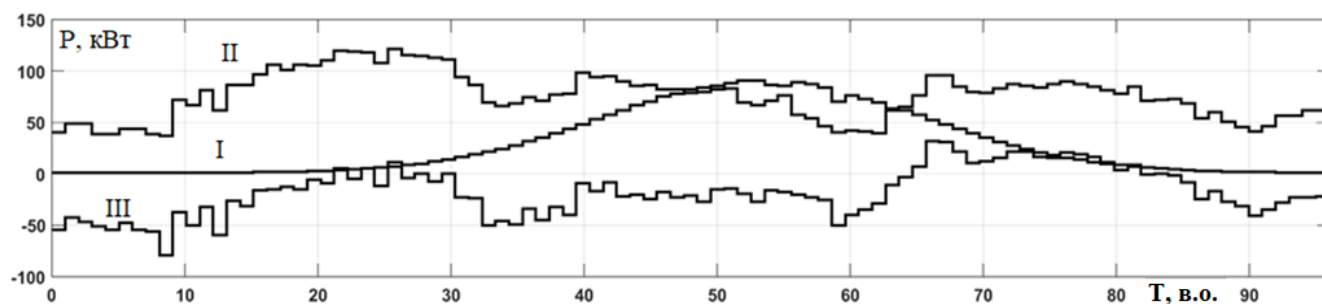


Рисунок 4. Розподіл потужностей по генераторах
I – сонячний генератор, II – вітрогенератор, III – система зберігання

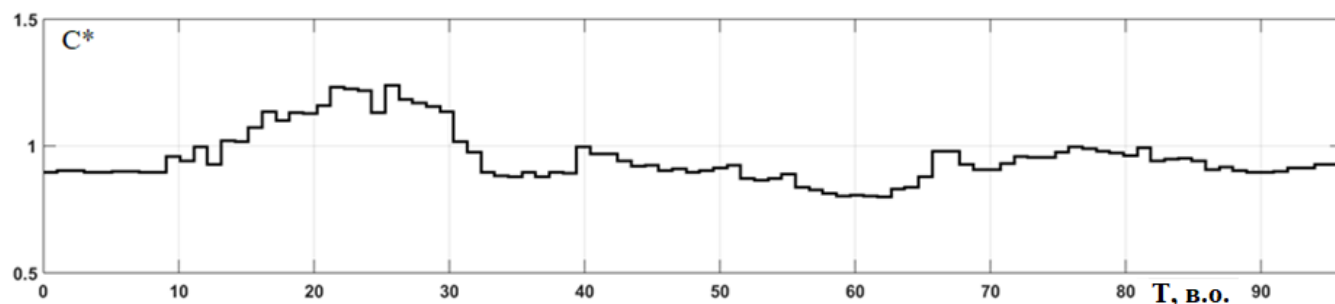


Рисунок 5. Витрати C^*

Транзактивна система стикається з перехідними умовами роботи, такими як перемикання великого навантаження, замикання на землю, перемикання режимів поза мережею та підключення до мережі. На відміну від традиційної енергосистеми стабільність транзактивної системи має свої характеристики. Транзактивна система є нелінійною системою, що ускладнює аналіз перехідних режимів та стійкість системи. Крім того, транзактивна система має складні динамічні характеристики через інерційність та великі постійні часу.

Для дослідження перехідних процесів представимо графік електричних навантажень у вигляді неперервної функції. При перемиканні навантаження в ньому відбуваються перехідні процеси, які спричиняють підвищенні витрати.

В якості прикладу представлено графік навантаження з 5 ділянками, перехідні процеси представлені різними видами перехідних функцій, описаними типовими динамічними ланками (рис. 6):

I – ділянка:

$$P_I(t) = P_1 \quad (11)$$

II – ділянка:

$$P_{II}(t) = P_2 - a_1 e^{-b_1 t} \sin(\sigma_1 t + \nu_1) \quad (12)$$

III – ділянка:

$$P_{III}(t) = P_3 - a_2 e^{-b_2 t} \quad (13)$$

IV – ділянка:

$$P_{IV}(t) = P_4 - a_3 e^{-b_3 t} \sin(\sigma_2 t + \nu_2) \quad (14)$$

V – ділянка:

$$P_V(t) = P_5 + a_4 e^{-b_4 t} \sin(\sigma_3 t + \nu_3) \quad (15)$$

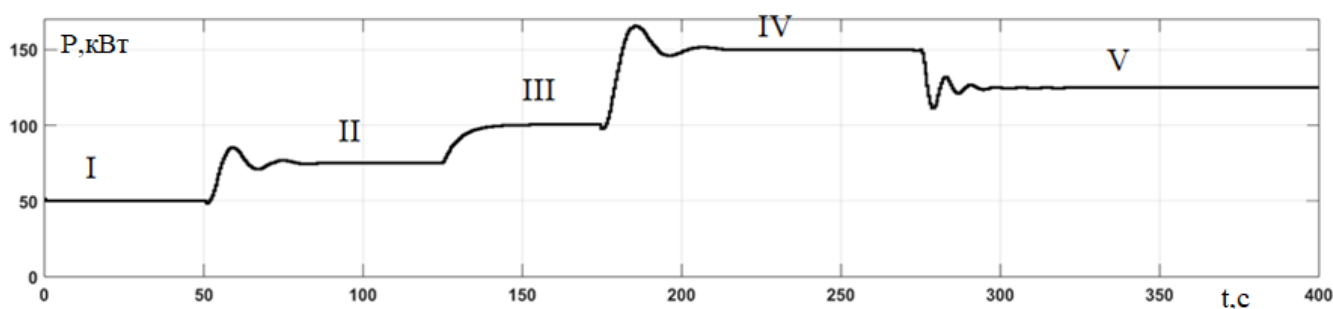


Рисунок 6. Графік навантажень

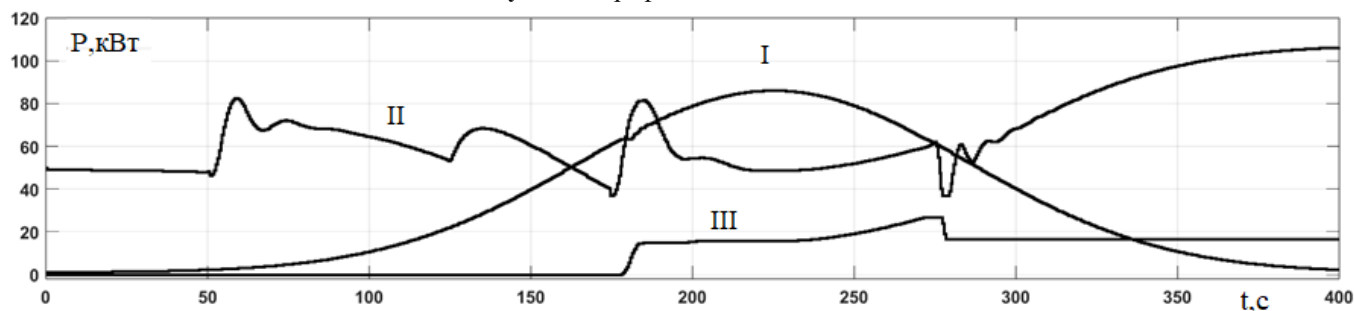


Рисунок 7. Розподіл потужностей по генераторах

I – сонячний генератор, II – вітрогенератор, III – система зберігання

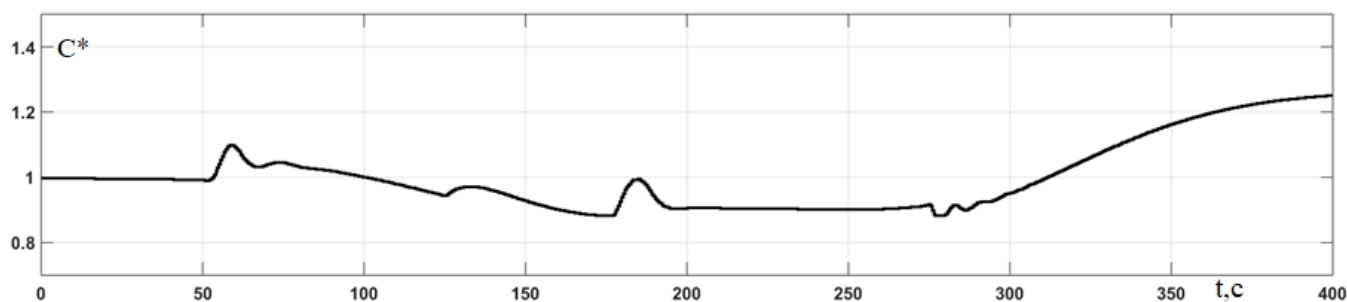


Рисунок 8. Витрати C^*

Значення витрат на кожному інтервалі представлено на рис. 8. При дії перехідних процесів зростають сумарні витрати генераторів. В процесі аналізу також було розраховано витрати при зміні навантаження стрибком, виявлено, що витрати збільшуються до 3 % для представленого прикладу.

4. Висновки

Під час відбудови енергетичного сектору України необхідні нові системи. Прийнята концепція «розумних мереж» вимагає використання сучасної концепції побудови децентралізованих електроенергетичних систем в Україні з впровадження відновлюваних та розосереджених джерел. Одною з таких систем є розглянута концепція транзактивної енергетики та представлення об'єктів енергетичної системи у вигляді енергетичних комірок та використання Інтернету енергій, що дозволить:

- модернізувати енергетичну інфраструктуру;
- збільшити частку ВДЕ;
- пришвидшити декарбонізацію завдяки розвитку відновлюваних та розосереджених джерел;
- збільшити стійкість та надійність енергосистеми України;
- демонополізувати ринок електричної енергії, вплинути на розвиток локальних ринків електричної енергії, платформ торгівлі концепції Інтернет енергія;
- використовувати нову систему тарифоутворення, що забезпечить фінансові вигоди для всіх учасників транзактивних систем;
- розумно споживати електричну енергію;
- забезпечити кібербезпеку енергетичних систем за допомогою можливостей Інтернету енергій.

Наразі необхідно формувати нормативно-правову базу для впровадження нових енергетичних систем, проводити аналіз та дослідження концепції побудови електроенергетичних систем.

Посилання

1. Honarmand M. E., Hosseinneshad V., Hayes B., Siano P. Local Energy Trading in Future Distribution Systems. *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 11. 3110. <https://doi.org/10.3390/en14113110>
2. Orumwense E., Abo-Al-Ez K. Internet of Things for smart energy systems: A review on its applications, challenges and future trends. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*. 2022. Vol. 7. Iss. 1. P. 50—74. <https://doi.org/10.3934/electreng.2023004>
3. Long-term ways of decarbonization of the electricity sector of Ukraine. URL: <https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2024/03/report-full1.pdf> (дата звернення: 12.04.2024).
4. Kostenko G., Zaporozhets A. Enhancing of the Power System Resilience Through the Application of Micro Power Systems (microgrid) with Renewable Distributed Generation. *System Research in Energy*. 2023. No. 3(74). P. 25—38. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.025>
5. Для зміцнення енергосистеми та її відновлення: триває інтеграція енергетичних ринків та секторальні реформи. *Урядовий портал*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/dlia-zmitsnennia-enerhosystemy-ta-ii-vidnovlennia-tryvaie-intehratsiia-enerhetichnykh-rynkiv-ta-sektoralni-reformy> (дата звернення: 13.04.2024).
6. Домбровський О. Як запустити розподілену генерацію в Україні. *Українська правда*. 11.04.2024. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2024/04/11/712293/> (дата звернення: 16.04.2024).
7. Створення спільнот «зеленої» енергетики в Україні: практичний посібник. За ред. В.І. Вострякової, О.О. Рубаненко. Вінниця: «Нілан-ЛТД», 2023. 108 с. ISBN 978-617-558-072-1
8. Про схвалення Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 14.10.2022 р. № 908. *Офіційний сайт Верховної Ради України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-%D1%80#Text> (дата звернення: 13.04.2024).
9. Про енергетичну ефективність: Закон України. *Офіційний сайт Верховної Ради України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (дата звернення: 13.04.2024).
10. Міненерго схвалило Дорожню карту розвитку «розумних мереж»: втрати в енергосистемі зменшаться на 6 млрд кВт*годин. *Урядовий портал*. 19.05.2024. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/minenerho-skhvalylo-dorozhniu-kartu-rozvytku-rozumnykh-merezh-vtraty-v-enerhosystemi-zmenshatsia-na-6-mlrd-kvthodyn> (дата звернення: 22.05.2024).
11. GridWise Architecture Council's Transactive Energy Framework. URL: https://gridwiseac.org/pdfs/te_framework_report_pnnl-22946.pdf (дата звернення: 10.04.2024).
12. The Erich Gunther Memorial Fund commemorates the continuing work of the GWAC. URL: <https://www.ieefoundation.org/erichgunther> (дата звернення: 10.04.2024).

13. GridWise Architecture Council's Transactive Energy infographic. URL: https://www.gridwiseac.org/pdfs/te_infographics_061014_pnnl_sa_103395.pdf (дата звернення: 10.04.2024).
14. GridWise Architecture Council's Transactive Energy Roadmap. URL: https://gridwiseac.org/pdfs/pnnl_26539_gwac_te_roadmap_overview.pdf (дата звернення: 10.04.2024).
15. Joseph A., Balachandra P. Energy Internet, the Future Electricity System: Overview, Concept, Model Structure, and Mechanism. *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 16. 4242. <https://doi.org/10.3390/en13164242>
16. Transactive Energy Concept Model Overview. A SEPA Transactive Energy Working Group Work Product. URL: <https://gridwiseac.org/pdfs/2022%20SEP%20SEW%20TECM-Overview-GWAC2022-09-14.pdf> (дата звернення: 17.04.2024).
17. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України: Закон України від 30.06.2023 р. № 3220-IX. Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-IX#Text> (дата звернення: 15.05.2024).
18. Zhou H., Li B., Zong X., Chen D. Transactive energy system: Concept, configuration, and mechanism. *Frontiers in Energy Research*. 2023. Vol. 10. 1057106. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1057106>
19. Khorasany M., Azuatalam D., Glasgow R., Liebman A., Razzaghi R. Transactive Energy Market for Energy Management in Microgrids: The Monash Microgrid Case Study. *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 8. <https://doi.org/10.3390/en13082010>
20. Kabiri-Renani Y., Daneshvar M., Mohammadi-Ivatloo B. Transactive energy revolution: Innovative leverage for reliable operation of modern energy networks—A critical review. *IET Renewable Power Generation*. 2022. Vol. 16. Iss. 15. P. 3161—3444. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12536>
21. Eyre N. Energy demand in the energy transition. *Energy World*. 2019. No. 479. P. 14—15.
22. GB power system disruption on 9 August 2019. Energy Emergencies Executive Committee (E3C): Final report. H.M. Government Department of Business, Energy & Industrial Strategy, 2020.
23. Bielokha H., Chupryna L., Denisyuk S., Eutukhova T. Novoseltsev O. Hybrid Energy Systems and the Logic of Their Service-Dominant Implementation: Screening the Pathway to Improve Results. *Energy Engineering*. 2023. Vol. 120. Iss. 6. P. 1307—1323. <https://doi.org/10.32604/ee.2023.025863>
24. Денисюк С., Белоха Г., Дерев'янюк Д. Оптимізація витрат первинного палива на локальних ринках електроенергії в системах з дизель-генераторами. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 1. С. 56—61. <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.056>
25. Денисюк С.П., Дерев'янюк Д.Г., Белоха Г.С. Підвищення якості електропостачання у Energy smart community з джерелами розосередженої генерації. *Вісник ВПІ*. 2021. Вип. 5. С. 64—70. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-64-70>
26. Белоха Г.С., Тараба М. Транзактивні локальні електроенергетичні системи: особливості функціонування та перспективи розвитку. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 4(74). С. 29—37. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290888>
27. Белоха Г.С. Оптимізація техніко-економічних показників локальних систем електроживлення з транзактивним керуванням [Електронний ресурс]: монографія. Електронні текстові дані: 1 файл: 4,01 Мбайт. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 127 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/56855> (дата звернення: 10.04.2024).
28. Denysiuk S., Derevianko D., Bielokha H. Synthesis of Models of the Complex Electric Power Systems. In Kyrylenko O., Denysiuk S., Derevianko D., Blinov I., Zaitsev I., Zaporozhets A. (Eds.). *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 220. P. 107—131. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_6
29. Bielokha H., Taraba M. Optimal Transactive Energy System for Hybrid Renewable Energy Systems. In Kyrylenko O., Denysiuk S., Strzelecki R., Blinov I., Zaitsev I., Zaporozhets A. (Eds.). *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. Vol. 512. P. 247—262. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_11

References

1. Honarmand, M. E., Hosseinneshad, V., Hayes, B., & Siano, P. (2021). Local Energy Trading in Future Distribution Systems. *Energies*, 14(11), 3110. <https://doi.org/10.3390/en14113110>
2. Orumwense, E., & Abo-Al-Ez, K. (2022). Internet of Things for smart energy systems: A review on its applications, challenges and future trends. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 7(1), 50—74. <https://doi.org/10.3390/en14113110>
3. Long-term ways of decarbonization of the electricity sector of Ukraine. URL: <https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2024/03/report-full1.pdf> (Last accessed: 12.04.2024).
4. Kostenko, G., & Zaporozhets, A. (2023). Enhancing of the Power System Resilience Through the Application of Micro Power Systems (microgrid) with Renewable Distributed Generation. *System Research in Energy*, 3(74), 25—38. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.025>

5. To strengthen the energy system and restore it: integration of energy markets and sectoral reforms are ongoing. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/dlia-zmitsnennia-enerhosystemy-ta-ii-vidnovlennia-tryvaie-intehratsiia-enerhetychnykh-rynkyv-ta-sektoralni-reformy> (Last accessed: 13.04.2024) [in Ukrainian].
6. Dombrovskiy O. (2024, April 11). How to launch distributed generation in Ukraine. *Ukrainska Pravda*. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2024/04/11/712293/> (Last accessed: 16.04.2024) [in Ukrainian].
7. Creation of "green" energy communities in Ukraine: a practical guide/edited. (2023). In V.I. Vostryakova & O.O. Rubanenko (Eds.). Vinnytsia: "Nilan-LTD" (108 p.) [in Ukrainian]. ISBN 978-617-558-072-1
8. On the approval of the Concept of the implementation of "smart grids" in Ukraine until 2035: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 908 dated 14.10.2022. *Official website of the Verkhovna Rada of Ukraine*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-%D1%80#Text> (Last accessed: 13.04.2024) [in Ukrainian].
9. On Energy Efficiency: Law of Ukraine. *Official website of the Verkhovna Rada of Ukraine*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (Last accessed: 13.04.2024) [in Ukrainian].
10. Ministry of Energy approves Roadmap for the Development of Smart Grids: losses in the power system will be reduced by 6 billion kWh. (2024, May 19). *Government portal*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/minenerho-skhvalylo-dorozhniu-kartu-rozvytku-rozumnykh-merezh-vtraty-v-enerhosystemi-zmenshatsia-na-6-mlrd-kvthodyn> (Last accessed: 22.05.2024) [in Ukrainian].
11. GridWise Architecture Council's Transactive Energy Framework. URL: https://gridwiseac.org/pdfs/te_framework_report_pnnl-22946.pdf (Last accessed: 10.04.2024).
12. The Erich Gunther Memorial Fund commemorates the continuing work of the GWAC. URL: <https://www.ieeefoundation.org/erichgunther> (Last accessed: 10.04.2024).
13. GridWise Architecture Council's Transactive Energy infographic. URL: https://www.gridwiseac.org/pdfs/te_infographics_061014_pnnl_sa_103395.pdf (Last accessed: 10.04.2024).
14. GridWise Architecture Council's Transactive Energy Roadmap. URL: https://gridwiseac.org/pdfs/pnnl_26539_gwac_te_roadmap_overview.pdf (Last accessed: 10.04.2024).
15. Joseph, A., & Balachandra, P. (2020). Energy Internet, the Future Electricity System: Overview, Concept, Model Structure, and Mechanism. *Energies*, 13(16), 4242. <https://doi.org/10.3390/en13164242>
16. Transactive Energy Concept Model Overview. A SEPA Transactive Energy Working Group Work Product. URL: <https://gridwiseac.org/pdfs/2022%20SEP%20SEW%20TECM-Overview-GWAC2022-09-14.pdf> (Last accessed: 17.04.2024).
17. On making changes to some laws of Ukraine regarding the restoration and "green" transformation of the energy system of Ukraine Law of Ukraine dated 30.06.2023 No. 3220-IX. *Official website of the Verkhovna Rada of Ukraine*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-IX#Text> (Last accessed: 15.05.2024) [in Ukrainian].
18. Zhou, H., Li, B., Zong, X., & Chen, D. (2023). Transactive energy system: Concept, configuration, and mechanism. *Frontiers in Energy Research*, 10, 1057106. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1057106>
19. Khorasany, M., Azuatalam, D., Glasgow, R., Liebman, A., & Razzaghi, R. (2020). Transactive Energy Market for Energy Management in Microgrids: The Monash Microgrid Case Study. *Energies*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/en13082010>
20. Kabiri-Renani Y., Daneshvar, M., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2022). Transactive energy revolution: Innovative leverage for reliable operation of modern energy networks—A critical review. *IET Renewable Power Generation*, 16(15), 3161–3444. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12536>
21. Eyre, N. (2019). Energy demand in the energy transition. *Energy World*, 479, 14–15.
22. GB power system disruption on 9 August 2019. (2020). Energy Emergencies Executive Committee (E3C): Final report. H.M. Government Department of Business, Energy & Industrial Strategy.
23. 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>
24. Denysiuk, S., Bielokha, H., & Derevianko, D. (2023). Optimization of consumption of primary fuel in local electricity markets for systems using diesel generators. *Technical electrodynamics*, 1, 56–61 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/technd2023.01.056>
25. Denysiuk, S., Derevianko, D., & Bielokha, H. (2021). Improving the quality of electricity supply in the Energy smart community with sources of distributed generation. *Visnyk VPI*, 5, 64–70 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-64-70>
26. Bielokha, H., & Taraba, M. (2023). Transactive local electrical energy systems: functioning features and development prospects. *Power Engineering: economics, technique, ecology*, 4(74), 29–37 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290888>
27. Bielokha, H. (2023). Optimization of technical and economic indicators of local power supply systems with transactional control [Electronic resource]: monograph. Electronic text data (1 file: 4.01 MB). Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (127 p.). URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/56855> (Last accessed: 10.04.2024) [in Ukrainian].
28. 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. Studies in Systems, Decision and Control*, 220 (pp. 107–131). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_6
29. Bielokha, H., & Taraba, M. (2024). Optimal Transactive Energy System for Hybrid Renewable Energy Systems. In O. Kyrylenko, S. Denysiuk, R. Strzelecki, I. Blinov, I. Zaitsev & A. Zaporozhets (Eds.). *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*, 512 (pp. 247–262). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_11

DECENTRALIZED ELECTRICITY SYSTEMS AS COMPONENT IMPLEMENTATIONS OF THE "SMART GRIDS" CONCEPT

Serhii Denysiuk, Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-6299-3680>

Halyna Bielokha*, PhD (Engin.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-4277-367X>

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine

*Corresponding author: pointage13@gmail.com

Abstract. *The global decarbonization goals have caused a series of fundamental changes in the power systems in developed countries. New approaches and concepts for constructing modernized electrical grids are needed to increase energy systems' efficiency, reliability, and sustainability. Ukraine's energy sector is in particular need of new approaches to the construction of power supply systems with the introduction of renewable sources and distributed sources. According to the Roadmap Concept for the Implementation of the "Smart Grid", the restoration of facilities damaged by Russian attacks will be carried out using "smart" technologies. Transactive energy is a new approach for efficient and reliable integration of distributed energy resources and meeting the demands of electricity consumers. Another variant of the new energy organization of the future is the Internet of Energy – a type of decentralized power supply system where intelligent distributed management is implemented. The article presents an overview and analysis of transactive energy and the Internet of Energy, the concept of building an energy system based on energy cells. Such systems are decentralized, can work without a network, and satisfy the needs of consumers due to the optimal use of energy from distributed energy resources (renewable sources, distributed sources, and storage systems). Transactive energy can be considered a free Internet-enabled electricity market, where all participants can safely trade at a reasonable price and with real-time calculations. The operation of a decentralized transactive system in steady-state and transient modes of operation has been demonstrated, as an example. The considered construction of the power system corresponds to the concept of "smart grids", showing a high potential for implementation in Ukraine, which will increase the share of RES, accelerate decarbonization, increase the stability and reliability of the power system of Ukraine, and lead to the development of local electricity markets.*

Keywords: Internet of energy, transactive energy, energy cell, renewable energy sources, distributed generation, smart grid, decarbonisation.

Надійшла до редакції: 18.06.2024