

## ТРАНЗАКТИВНІ ЛОКАЛЬНІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ: ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Через глобальні занепокоєння щодо зміни клімату, розгортання розподілених енергетичних ресурсів і впровадження систем зберігання електричної та теплової енергії було прискорено, щоб мінімізувати викиди CO<sub>2</sub>. Крім того, було наголошено на необхідності оптимального енергетичного менеджменту цих енергетичних ресурсів, щоб зменшити потребу в нових енергетичних ресурсах. Поняття транзактивної енергії та, відповідно, транзактивних систем було введено для сучасних енергосистем як системи економічних і керуючих механізмів, які дозволяють динамічно балансувати попит і пропозицію у всій електричній інфраструктурі з використанням вартості як ключового показника. Це забезпечує економічно ефективну інтеграцію ВДЕ та створює стимули для інвестицій та інноваційного оновлення місцевих енергетичних систем, що дозволяє управляти як пропозицією, так і попитом на електроенергію. В статті розглянуто архітектуру транзактивних систем, її складові. Основною цільовою функцією транзактивних систем є мінімізація загальних річних витрат на локальну систему, що підтримує безперервність енергопостачання. Для оцінки поточної собівартості електроенергії необхідно мати інформацію щодо розподілу інвестицій, вкладених в проект перед початком його реалізації, між періодами реалізації проекту. Розглянуті критерії оптимізації, використання яких залежить від конкретних цілей. Важливо використовувати багатокритеріальну оптимізацію та методи керування для визначення структури системи та оптимального розподілу енергії, отриманої з різних джерел, щоб максимізувати ефективність усієї системи, одночасно сприяючи максимальному скороченню викидів у навколишнє середовище, і при цьому мінімізуючи витрати на виробництво енергії.

**Ключові слова:** транзактивна енергія, Microgrid, локальні енергетичні ринки, відновлювані джерела, розосереджені джерела

**Вступ.** Щодня кількість нових виробників електроенергії з відновлюваних джерел енергії, що підключаються до світової електромережі, продовжує зростати. Кількість активів, необхідних для підтримки балансу між попитом і пропозицією в цій колективній мережі, також зростає. Вони все більше покладаються на інтелектуальну та інтерактивну мережеву систему, засновану на економічних та ринкових принципах, де транзакції використовуються для регулювання мережі та підтримки надійності та ефективності [1].

Для управління енергією в Microgrid можуть бути реалізовані різні підходи, які можна класифікувати як пасивне, активне та транзактивне управління енергією. Деталі різних механізмів керування енергією показано на рисунку 1 [2].

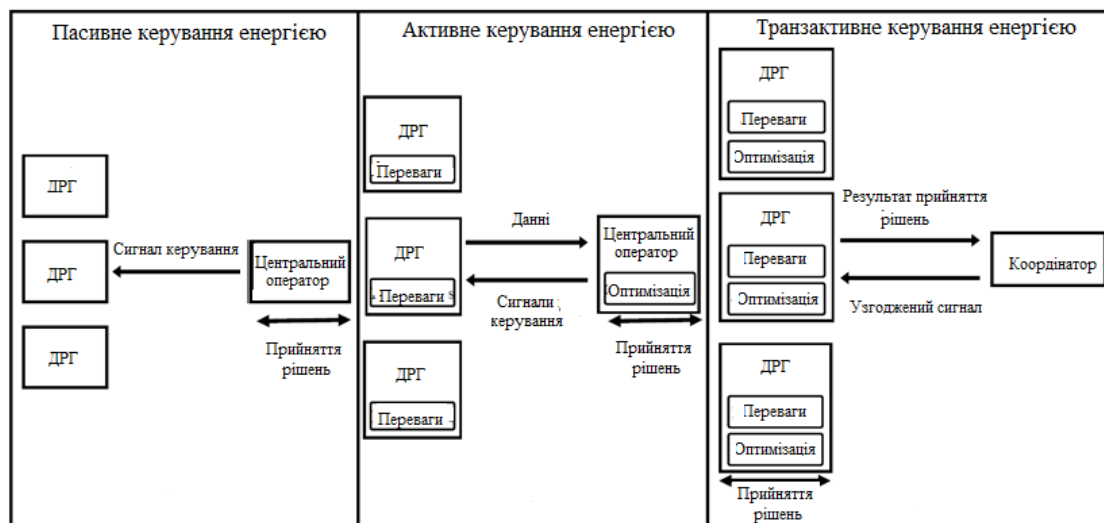


Рисунок 1- Механізми керування енергією

У пасивному управлінні енергією центральний оператор керує всіма пасивними джерелами розосередженої генерації (ДРГ). Програма прямого контролю навантаження є прикладом пасивного управління енергією, де навантаження споживачів і гнучкість контролюються безпосередньо центральним оператором. Пасивне управління енергією не враховує переваги ДРГ, і всі рішення приймаються централізовано. Отже, комунікація в пасивному управлінні є однонаправленою від центрального оператора до пасивних споживачів.

В активному управлінні енергією система оптимізації перевіряє всі навантаження, щоб визначити найкраще рішення для системи, беручи до уваги дані ДРГ, щоб включити їхні переваги в централізовану оптимізацію. Отже, для обміну інформацією необхідний двонаправлений зв'язок, що викликає занепокоєння щодо конфіденційності приватних даних ДРГ кінцевого використання [3].

Як у пасивному, так і в активному підходах до управління енергією, центральний оператор приймає рішення для всієї системи. Третій підхід до енергоменеджменту — транзактивне енергетичне управління, яке дозволяє як попиту, так і пропозиції активно вести переговори щодо обміну енергією.

Microgrid виникли з ідеєю самозабезпечення своїх об'єктів; однак цей сценарій швидко змінився з усвідомленням того, що транзакційні методи можуть бути використані стратегічно для отримання економічних переваг [2]. У цьому контексті програми реагування на попит та транзактивної енергетики стали широко обговорюватися в дослідженнях, спрямованих на збалансування споживання та виробництва в енергосистемі [3]. ТЕ включає в себе характеристики, які дозволяють системі розподілу функціонувати з урахуванням гнучкості як споживачів, так і виробників у балансі між попитом та пропозицією. Енергетичний сектор розвивається завдяки залученню розподілених енергетичних ресурсів [6] та прогресу в галузі інформаційних технологій [7].

Застосування такої концепції, як транзактивна енергія (ТЕ) в поєднанні з Microgrid, створило нові парадигми для вивчення в цьому секторі. З цієї причини теоретичні дослідження на цю тему є дуже актуальними, особливо щодо інтересу енергетичного ринку до систем, які інтегрують відновлювані джерела енергії (ВДЕ) та пропонують рішення екологічних проблем; отже, МГ стали ще більш привабливою альтернативою [8].

Взаємодія між системами з кількома носіями енергії дає можливість досягти доступної та чистої енергії, використовуючи енергетичні ресурси більш ефективним способом. У [11] запропоновано оптимальне керування енергією кількох енергетичних вузлів, кожен з яких є енергетичною системою з кількома рівнями управління енергією на добу наперед, щоб спланувати профілі попиту на електроенергію та управляти своїми внутрішніми енергетичними ресурсами для зменшення загальних витрат енергії та рівень викидів CO<sub>2</sub>.

За наявності системи ТЕ мережа може полегшити комунікацію між усіма точками попиту і пропозиції; таким чином, це забезпечить створення середовища взаємодії, в якому кожна точка може обмінюватися енергетичною інформацією і, по суті, обговорювати вартість енергії в будь-який час [4].

#### **Мета та задачі.**

**Мета** – проаналізувати основні аспекти енергосистеми на основі використання концепції транзактивної енергії.

#### **Матеріал і результати досліджень**

У майбутній енергосистемі механізми координації повинні забезпечити активну участь великої кількості пристроїв, що споживають або виробляють енергію, які зараз лише пасивно підключені до енергетичної інфраструктури, у виконанні завдань координації як на локальному, так і на загальносистемному рівні. Транзактивна енергетика була запропонована як спосіб вирішення цієї проблеми, який є масштабованим, ефективним і передбачуваним у своїй роботі, забезпечуючи при цьому конфіденційність і право вибору для споживача. Через проблеми, що виникають в електроенергетичній інфраструктурі, дослідження і розробки, пов'язані з ТЕ, переважно спрямовані на координацію в електроенергетичній системі. Таким чином, основна література також орієнтована на електроенергетику.

У [5] дається наступна характеристика системи ТЕ: "в системі управління транзактивною енергією на рівні розподілу середні та малі пристрої, що споживають або виробляють енергію, автоматично домовляються про свої дії один з одним, з пристроями у фізичній мережі та з диспетчерськими системами постачальників енергії через сучасні та масштабовані алгоритми електронного ринку". У США Рада з архітектури GridWise Architecture прийняла наступне визначення транзактивної енергії: "сукупність економічних механізмів та механізмів управління, які дозволяють динамічно балансувати попит та пропозицію по всій електричній інфраструктурі, використовуючи вартість як ключовий операційний параметр" [6].

Ключовими елементами цього визначення є:

-Вартість як ключовий операційний параметр: Це означає, що "операційні рішення приймаються шляхом обміну вартісною інформацією, зафіксованою в транзакціях між учасниками" [5].

-Поєднання управління системою та використання економічних механізмів: транзакції між учасниками ведуть до управління пристроями, які споживають, виробляють або зберігають електроенергію.

-Використання від рівня передачі з його великими обсягами виробництва і транспортування електроенергії до системи розподілу і різноманітних підключених споживачів [5]. Зауважимо, що там, де існують добре функціонуючі ринки оптової торгівлі електроенергією та послуг системи передачі, рівень передачі електроенергії вже функціонує як транзитивна енергетична система. Завдання полягає в тому, щоб запровадити ТЕ і на рівні розподілу електроенергії в електроенергетичній системі. Мережі розподілу електроенергії демонструють вищий рівень складності з набагато більшою кількістю мережевих вузлів та підключених споживачів.

-Динамічний баланс попиту та пропозиції.

Модель транзактивної енергетичної системи (ТЕС) має чотири основні підсистеми: фізична система, інформаційна система, система транзакцій і система регулювання (рис.2). Фізична система включає виробництво, зберігання, передачу та розподіл енергії разом із розумними пристроями кінцевого користувача. Інформаційна система побудована для збору, обробки, організації та передачі інформації як в енергосистемі, так і на енергетичних ринках. Система транзакцій керує різними видами енергетичних транзакцій для створення ефективного енергетичного ринку. Система регулювання захищає від економічних зловживань і порушення правил. Це також забезпечує безпеку та надійність ринку. ТЕС пропонує метод забезпечення надійності та безпеки енергосистеми з одночасним підвищенням ефективності шляхом координації зростаючої кількості ВДЕ.

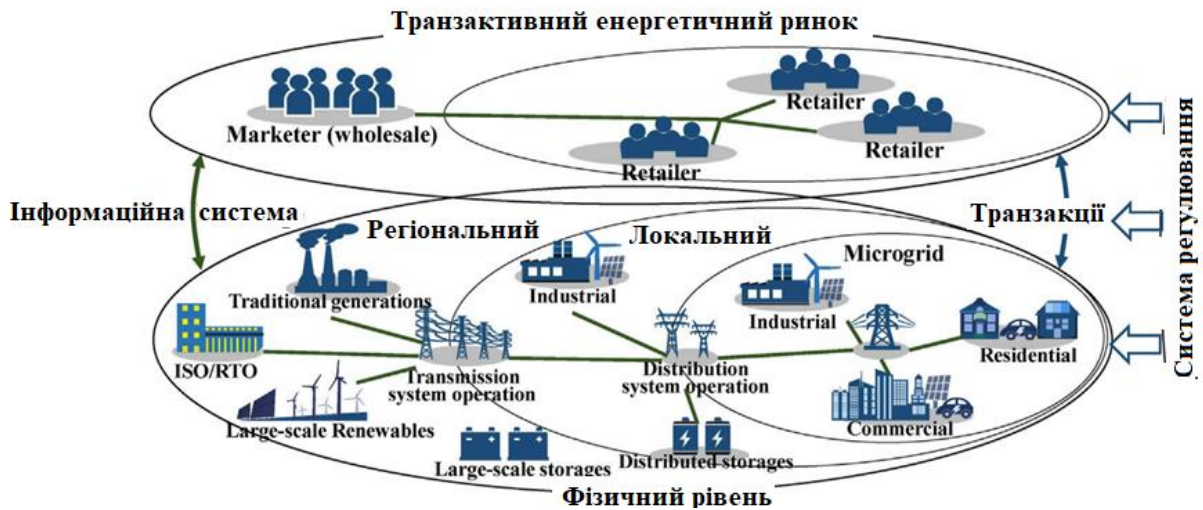


Рисунок 2 - Схематичне зображення транзактивної енергосистеми

**Архітектура транзактивної енергетичної системи**

Архітектура транзактивної енергетичної системи має децентралізовану форму, основною ідеєю якої є досягнення операційних та економічних цілей за допомогою скоординованої інтеграції виробників, споживачів. Ключовою особливістю ТЕС є зменшення проблеми переривчастості ВДЕ за рахунок залучення більш активних споживачів та прос'юмерів до енергетичних транзакцій [9]. Різні дослідники пропонують архітектури ТЕС з різних точок зору, як показано на рис. 4.

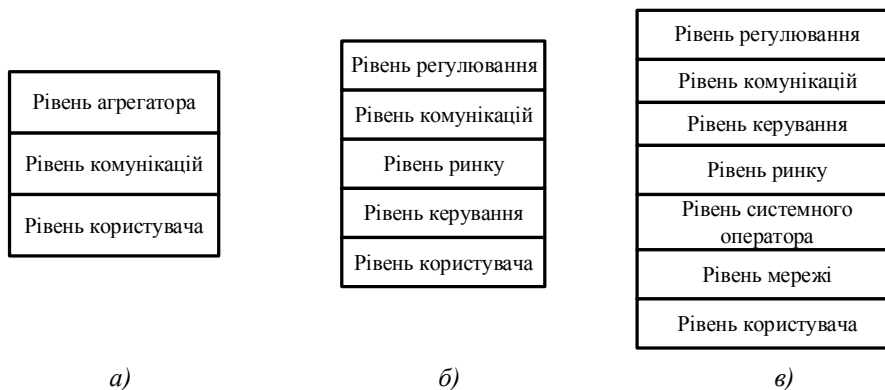


Рис. 4 Архітектура ТЕС: 3-рівнева (а) [11], 5-рівнева [12] (б), 7-рівнева [13] (в).

Трирівнева архітектура була запропонована в [10], та має у складі агрегатор, комунікаційний рівень та рівень користувача. Енергетичні транзакції виконуються на рівні користувача, де користувачі можуть задавати свої вподобання та цілі. Комунікаційний рівень займається зв'язком учасників та серверів, які, в свою чергу, залежать від наявності такої інфраструктури. Рівень агрегатора включає центр обробки даних, який аналізує дані для віртуального обміну енергією. Однак він не включає визначення ціни на енергію або регулювання рівнів електромереж і має спрощений підхід.

У [11] було запропоновано п'ятирівневу ТЕС, яка містить комунікаційний рівень, ринковий рівень, рівень регулювання, рівень енергоменеджменту та рівень користувача. На рівні користувача технологія розподіленого реєстру та комунікаційні пристрої використовуються учасниками для надсилання своїх заявок та пропозицій, які використовуються системою енергоменеджменту для запуску енергетичних транзакцій. Рівень управління енергією має справу з операційними та економічними цілями системи, що забезпечує динамічний баланс між попитом та пропозицією.

Ринковий рівень ініціює енергетичні транзакції, розглядаючи енергетичні заявки для знаходження локальної оптимальної мінімальної клірингової ціни. Комунікаційний рівень необхідний для полегшення обміну інформацією з використанням бездротових та дротових комунікаційних платформ.

Регулювання та управління роботою ТЕС здійснюється на рівні регулювання, який необхідний для забезпечення прозорості енергетичних транзакцій. У п'ятирівневій системі ТЕС відсутній рівень мережі, який необхідний для врахування втрат і перевантажень на лініях передачі та розподілу; для цього в роботі [9] запропоновано семирівневу систему ТЕС. Вона складається з рівня користувача, який взаємодіє з іншими учасниками за допомогою технології розподіленого реєстру. Мережевий рівень складається з комунікаційної та енергетичної мережі, що відповідає за динамічний баланс попиту та пропозиції.

За моніторинг роботи, аналіз та зберігання даних під час енергетичних транзакцій відповідає рівень системного оператора.

**Трансактивний енергетичний ринок** був запропонований для торгівлі енергією між мікромережами (МГ) і досяг балансу місцевого виробництва та споживання енергії. На трансактивному енергетичному ринку МГ-учасники зі своїми спеціальними профілями виробництва та споживання енергії можуть використовувати ринкові сигнали для обміну енергетичними послугами в мережі розподілу електроенергії. Торгівля енергією може стимулювати МГ до повного використання місцевого виробництва енергії для забезпечення доступною енергією для своїх споживачів. Трансактивний енергетичний ринок може сприяти використанню реагування на попит, коли наявні енергетичні ресурси не можуть повністю забезпечити місцеві навантаження, а імпортна енергосистема є дорогою. Відповідно, МГ можуть зміщувати некритичні навантаження для підтримки місцевого балансу електроенергії за найнижчих витрат на трансактивному енергетичному ринку.

Конфігурація Microgrids може бути визначена виходячи з потреб користувача та можливості керування режимами виробництва електроенергії.

Щоб розробити трансактивний місцевий енергетичний ринок, спочатку необхідно представити його компоненти.

Загалом компоненти поділяються на три загальні категорії: місцеві джерела енергії, структура системи розподілу та інформаційна система.

Місцеві джерела енергії: На рівні розповсюдження існує кілька можливостей розвитку та використання місцевих джерел енергії. Ці джерела енергії можуть включати різні відновлювані та невідновлювані джерела на низькому або середньому рівні напруги, а також кінцевого споживача як споживача або незалежну одиницю. Ці ресурси можуть брати участь у торгівлі енергією залежно від типу виробництва, діапазону доступності та стану мережі.

Крім того, різні системи зберігання можуть бути доступні на низькому або середньому рівні напруги як локальні джерела енергії, залежно від ситуації. Електромобілі — ще одна категорія місцевих джерел енергії, які можуть впливати на місцеві енергетичні операції. Необхідно ідентифікувати всі ці джерела енергії в різних місцях і на різних рівнях напруги системи розподілу, а також слід розглянути їхній потенціал для обміну енергією.

Структура системи розподілу: Загалом розподільчі мережі працюють на двох рівнях низької та середньої напруги. Структура більшості розподільчих мереж також радіальна. Тому використання умов живлення з двох або більше напрямків у проєкті таких мереж не розглядалося. Експлуатація структури, що живиться від місцевих джерел енергії, вимагає високих навичок, досвіду та готовності та може підвищити рівень автоматизації розподільної мережі. Ізольована робота є ще однією проблемою, з якою можна зіткнутися в мережі розподілу. Структура системи розподілу часто не готова до таких ситуацій, і якщо вона працює в автономному режимі, необхідно вжити відповідних запобіжних заходів. Довга розподільна мережа, низький коефіцієнт навантаження фідерів, відносно низька надійність мережі, сильний вплив умов навколишнього середовища та навіть серйозні зміни попиту є основними характеристиками мережі, які слід враховувати при проєктуванні місцевого ринку. операції.

Інформаційна система: Інформаційний рівень є одним із важливих компонентів впровадження місцевого ринку. При розробці такого ринку слід враховувати підготовку та передачу даних, обробку та надсилання команди точки прийняття рішень, а також належне планування. Це дозволить точно та виявити будь-які проблеми при здійсненні ринкових операцій на рівні розподілу. У делікатних і критичних ситуаціях або у випадках збоїв особи, які приймають рішення, маючи правильну інформацію, можуть запропонувати найкраще рішення для виходу з проблем, тому передача потрібного обсягу даних, які необхідно підготувати в будь-який момент або в критичні моменти, буде дуже важливою. Зважаючи на розмір розподільчої мережі, різноманітність джерел енергії та великий обсяг миттєвих даних, обов'язки постачальників даних у кожному секторі мають бути визначені таким чином, щоб під час збою та, як наслідок, час для прийняття рішень, були правильні судження та дії виконано.

Одним із ключових аспектів у вирішенні цих проблем є впровадження моніторингу та встановлення інтелектуальних лічильників. Інтелектуальні лічильники дозволяють постійно контролювати споживання електроенергії, виробництво та інші критичні параметри на рівні споживача. Збираючи та аналізуючи ці детальні дані, мережеві оператори та учасники ринку отримують глибше розуміння обмежень, характерних для слабких мереж.

Використовуючи дані інтелектуальних лічильників, оператори ринку можуть краще зрозуміти тонкощі слабких мереж і включити ці обмеження в процес оптимізації.

**Оптимізація транзактивних систем.**

Критерії, за якими оптимізується локальні системи, які входять до транзактивних систем, в основному поділяються на дві категорії: економічні критерії та критерії надійності [14]. Розробник системи вирішує, яким критеріям слід надати пріоритет, і вибрати рівень допуску для кожного критерію. Економічні критерії в основному стосуються вартості системи або, в деяких випадках, розміру системи, тоді як критерії надійності надають пріоритет продовженню живлення навантаження. Незважаючи на те, що перспективи мати Microgrid як чисте та екологічно чисте джерело енергії з дуже низькими витратами на технічне обслуговування та експлуатацію, початкові інвестиції, необхідні для встановлення Microgrid, є дуже високими, що робить вартість енергії (COE) і час окупності дуже високими [15].

Тому оптимізація його вартості стає основним критерієм для системного планувальника, особливо для країни, що розвивається. Встановлення великої потужності відновлюваних генеруючих одиниць для пікового навантаження (може тривати короткочасно) спричиняє значне збільшення вартості системи, оскільки потужність генеруючих одиниць збільшується, а також збільшується потужність системи зберігання. Таким чином, відповідно до попиту на навантаження, розташування та типу, можна зробити компроміс між вибраними економічними критеріями та критеріями надійності. Критерії оптимізації наведені в таблиці 1 [11, 14,15].

Таблиця 1. – критерії оптимізації

Критерій оптимізації	Математична функція	Застосування
ACS	$ACS=(TSC)\times CRF$ $TSC=\sum_{install\_k}^c + \sum_{M\&O\_k}^c$ $CRF = \frac{i(1+i)^L}{(1+i)^L - 1}$ <p><i>TSC</i> – загальна вартість системи, включаючи технічне обслуговування та встановлення, <i>C<sub>install_k</sub></i> – вартість встановлення всіх компонентів системи, <i>C<sub>M&amp;O_k</sub></i> – вартість обслуговування та експлуатації компонентів, <i>i</i> – ставка дисконтування, <i>L</i> – загальний термін служби системи.</p>	<p>Економічний критерій:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-вказує на щорічну вартість системи з урахуванням її технічного обслуговування, вартості встановлення та терміну служби;</li> <li>-найкраще підходить для великомасштабних локальних систем, де початкові інвестиції високі та більшість їх фінансується.</li> </ul>
LCE/COE	$LCE = \frac{ACS}{E_{tot}}$ <p><i>E<sub>tot</sub></i> — загальна очікувана вироблена енергія</p> $COE = \left[ \left( \frac{i \times (1+i)^L}{(1+i)^L - 1} \right) \times \left( \frac{P}{8760} \right) \right] + (M \& O)$ <p>де <i>P</i> — загальна встановлена потужність, <i>M&amp;O</i> — витрати на обслуговування та експлуатацію системи.</p>	<p>Економічний критерій:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-показує вартість кожної одиниці енергії (кВт-год), виробленої локальною системою.</li> <li>-найкраще підходить для середніх і малих, підключених до мережі, щоб оцінити кількість енергії, яку потрібно запозичити від комунального підприємства, щоб зменшити розміри компонентів локальної системи, тим самим зменшуючи вартість системи та COE</li> </ul>

Таблиця 1 (продовження)

Критерій оптимізації	Математична функція	Застосування
NPC (чиста приведена вартість)	$NPC = \sum^{NP} C_{sale\_k} + \sum^{NP} C_{end\_k} - C_{invest} - \sum^{NP} C_{replace\_k} - \sum^{NP} C_{M\&O\_k}$ <p><math>NPC_{sale\_k}</math> — дохід, отриманий від продажу компонентів, які підлягають заміні (для підключеної до мережі системи він також включає дохід від енергії, проданої в мережу),  <math>NPC_{end\_k}</math> — дохід, отриманий від продажу компонентів ЛЕС наприкінці життєвого циклу системи,  <math>C_{invest}</math> — загальна вартість інвестицій, <math>NPC_{replace\_k}</math> — вартість заміни компонентів, протягом життєвого циклу установки, а <math>NPCM\&amp;O\_k</math> — вартість обслуговування та експлуатація всіх компонентів.</p>	<p>Економічний критерій:                      -вказує на чисту вартість гібридної системи після закінчення належного терміну служби, що включає витрати на технічне обслуговування та експлуатацію, витрати, збережені шляхом продажу компонентів системи, а також вартість заміни компонентів системи протягом терміну служби.                      -підходить для всіх локальних систем Це допомагає системному планувальнику визначити, чи можна відшкодувати вартість системи для певного навантаження, якщо ні, якою буде кінцева вартість системи після продажу системних компонентів після закінчення терміну служби системи</p>
LLCB (вартість терміну служби батареї)	$LLCB = \frac{A_c}{A_{tot}} C_{ini-bat}$ <p><math>A_c</math> — ефективна кумулятивна Ач,  <math>A_{tot}</math> — загальна кумулятивна Ач протягом життєвого циклу,  <math>C_{ini-bat}</math> — початкова інвестиційна вартість акумуляторів</p>	<p>Критерій надійності                      -оцінює вартість акумуляторної системи накопичення включно з початковими інвестиціями та витратами на заміну батарей протягом терміну служби системи.                      -найкраще підходить для середніх і великих локальних систем, оскільки розмір і рейтинг одиниць зберігання є високими. Це також допомагає порівняти вартість акумуляторної системи накопичення з іншими варіантами зберігання, і прийняти зважене рішення щодо вибору правильного типу пристрою зберігання для локальної системи</p>
LPSP/LLP	$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T DE(t)}{\sum_{t=1}^T P_{load}(t) \Delta t}, \quad LLP = \frac{\sum_{t=1}^T DE(t)}{\sum_{t=1}^T P_{load}(t)}$ <p><math>DE</math> — дефіцит енергії,  <math>P_{load}</math> — потреба в потужності навантаження,  <math>T</math> — період часу, для якого необхідно розрахувати LPSP</p>	<p>Критерій надійності                      -вказує на ймовірність того, що локальна система не задовольняє попит на навантаження. Важливо оцінити ці критерії для локальних систем в острівному режимі роботи, особливо великомасштабні системи, що задовольняють велике навантаження.</p>
EENS	$EENS(L, P_h) = \begin{cases} L - \int_{P_{h\_min}}^{P_{h\_max}} P_h f_{P_h}(P_h) dP_h \rightarrow L > P_{h\_max} \\ \int_{P_{h\_min}}^L (L - P_h) f_{P_h}(P_h) dP_h \rightarrow P_{h\_min} \leq L \leq P_{h\_max} \\ 0 \rightarrow L > P_{h\_min} \end{cases}$ <p><math>L</math> — потреба навантаження в момент часу,  <math>P_h</math> — потужність, що генерується ЛЕС,  <math>P_{h\_max}</math> — максимальна потужність, що генерується ЛЕС,  <math>P_{h\_min}</math> — мінімальна енергія, що генерується HRES (припускається нульовою),  <math>f_{ph}(P_h)</math> — функція ймовірності. потужності від ГРЕС</p>	<p>Критерій надійності                      -він дає розрахункову енергію, що не постачається локальною системою до навантаження. Це хороший показник для оцінки того, чи слід локальній системі підключатися до мережі чи ні. Оцінюючи одиниці енергії, які потребує навантаження від комунального підприємства, можна прийняти розумне рішення щодо режиму роботи локальної системи.</p>

**Перспективи розвитку.**

Сучасні енергетичні мережі майбутнього об'єднуються з високим рівнем систем відновлюваних джерел енергії, щоб уникнути критичних проблем, пов'язаних зі звичайним електропостачанням, забезпечуючи можливість виробництва чистої електроенергії в широкому діапазоні. Крім того, що з кожним днем проникнення відновлюваних джерел енергії в систему зростає, різноманітні гібридні енергетичні системи, що виникають, вказують на необхідність взаємозалежного аналізу енергетичних мереж [16].



Таблиця 1 (продовження)

Критерій оптимізації	Математична функція	Застосування
LOL	$LOL = \sum_{t=1}^T DE(t)$	Критерій надійності -він дає точну кількість енергії, яка не постачається локальної системи до навантаження, на основі припущення, що профіль навантаження та профілі генерації ВДЕ залишаються постійними. Це найкраще підходить для невеликих систем, що обслуговують сільську місцевість. Він простий у реалізації та дає приблизну оцінку надійності системи
LA	$LA = 1 - \frac{T_{LOL}}{T_{Opt}}$ <i>T<sub>LOL</sub></i> — тривалість LOL, <i>T<sub>Opt</sub></i> — загальна тривалість роботи системи	Критерій надійності -вказує на тривалість часу, протягом якого відбувається втрата електроенергії, також базується на тих же припущеннях, що й LOL, і найкраще підходить для невеликих систем для сільських районів.
DPSP	$DPSP = \frac{\sum_{t=1}^T EPG}{\sum_{t=1}^T E_L}$ <i>EPG</i> — надлишкова вироблена потужність, <i>E<sub>L</sub></i> — електричне навантаження	Критерій надійності -виражається як відношення потужності, виробленої локальною системою, до потреби навантаження. -DPSP < 1, якщо вироблена електроенергія менша за попит, -DPSP > 1, якщо вироблена потужність перевищує попит. Це оцінюється для приєднаних до мережі локальних систем, де навантаження може зменшуватися протягом тривалого періоду часу, протягом якого DPSP > 1 і електроенергію можна продати. Повернувшись до комунального підприємства, це також допомагає спрогнозувати збільшення навантаження, яке може витримати локальна система протягом терміну служби, оскільки враховується ймовірність зміни попиту на навантаження.

Більшість доступних на даний момент методів побудови транзактивних систем представлені лише у вигляді моделей; немає реальної світової реалізації. Реалізовані тільки деякі концепції. Однак перш ніж таке впровадження може відбутися, важливо розробити відповідні платформи моделювання та інструменти для проведення поглибленого аналізу отриманих даних.

Труднощі, які пов'язані з багатьма різними ініціативами на основі ТЕ, включають наступне: систематичний ризик або сприйняття ризику, підготовка користувачів та економічна доцільність проекту.

Майбутні наукові роботи можуть бути структуровані таким чином, щоб глибоко підкреслити ефективну роль систем транзактивної енергетики у створенні можливостей впровадження гібридних енергетичних мереж на основі відновлюваних джерел енергії в реальному світі. Крім того, сучасна електрифікація під управлінням і контролем ТЕ може бути досліджена на різних ринкових рівнях системи, які належним чином приймають різних гравців з різних інфраструктур енергетичних мереж.

### Висновки

Поняття транзактивної енергії та, відповідно, транзактивних систем було введено для сучасних енергосистем як системи економічних і керуючих механізмів, які дозволяють динамічно балансувати попит і пропозицію у всій електричній інфраструктурі з використанням вартості як ключового показника. Це забезпечує економічно ефективну інтеграцію ВДЕ та створює стимули для інвестицій та інноваційного оновлення місцевих енергетичних систем, що дозволяє управляти як пропозицією, так і попитом на електроенергію.

Підхід на основі транзактивної енергії має явні переваги над іншими типами управління інтелектуальними мережами з точки зору конфіденційності, масштабованості та економічності. Крім того, використання трансакційних або ринкових механізмів запроваджує самоорганізацію в складних системах взаємодіючих суб'єктів.

Архітектура транзактивної енергетичної системи має децентралізовану форму, основною ідеєю якої є досягнення операційних та економічних цілей за допомогою скоординованої інтеграції виробників, споживачів.

#### Список використаної літератури

1. Khorasany, Mohsen, Donald Azuatalam, Robert Glasgow, Ariel Liebman, and Reza Razzaghi. 2020. "Transactive Energy Market for Energy Management in Microgrids: The Monash Microgrid Case Study" *Energies* 13, no. 8: 2010. <https://doi.org/10.3390/en13082010>
2. Widergren, S.E.; Hammerstrom, D.J.; Huang, Q.; Kalsi, K.; Lian, J.; Makhmalbaf, A.; McDermott, T.E.; Sivaraman, D.; Tang, Y.; Veeramany, A.; et al. Transactive Systems Simulation and Valuation Platform Trial Analysis; Technical Report; Pacific Northwest National Lab. (PNNL): Richland, WA, USA, 2017.
3. Melton, R. Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Project Technology Performance Report Volume 1: Technology Performance; Technical Report; Pacific Northwest National Lab. (PNNL): Richland, WA, USA, 2015.
4. Holmberg, D.G.; Hardin, D.; Melton, R.; Cunningham, R.; Widergren, S. Transactive Energy Application Landscape Scenarios; Technical Report; NIST: Gaithersburg, MD, USA, 2016.
5. Orsini, L.; Kemenade, C.; Webb, M.; Heitmann, P. Transactive Energy A New Approach for Future Power Systems. *LO3 Energy*. 2019. Available online: <https://exergy.energy/wp-content/uploads/2019/03/TransactiveEnergy-PolicyPaper-v2-2.pdf> (accessed on 27 March 2020).
6. Huang, Qi & Amin, Waqas & Umer, Khalid & Afzal, Muhammad. (2021). A review of transactive energy systems: Concept and implementation. *Energy Reports*. 7. 10.1016/j.egy.2021.05.037.
7. Honarmand, Mohammad & Hosseinezhad, Vahid & Hayes, Barry & Siano, Pierluigi. (2021). Local Energy Trading in Future Distribution Systems. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en14113110>
8. Zahraoui, Y.; Alhamrouni, I.; Mekhilef, S.; Basir Khan, M.R.; Seyedmahmoudian, M.; Stojcevski, A.; Horan, B. (2021) Energy Management System in Microgrids: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 13, 10492. <https://doi.org/10.3390/su131910492>
9. Khorasany, Mohsen & Azuatalam, Donald & Glasgow, Robert & Liebman, Ariel & Razzaghi, Reza. (2020). Transactive Energy Market for Energy Management in Microgrids: The Monash Microgrid Case Study. *Energies*. 13. 2010. <https://doi.org/10.3390/en13082010>.
10. Белоха Г.С. Оптимізація технікоекономічних показників локальних систем електроживлення з транзактивним керуванням [Електронний ресурс] : монографія / Г. С. Белоха ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,01 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 127 с <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/56855>
11. Siano, P.; De Marco, G.; Rolán, A.; Loia, V. A survey and evaluation of the potentials of distributed ledger technology for peer-to-peer transactive energy exchanges in local energy markets. *IEEE Syst. J.* 2019, 13, 3454–3466. [CrossRef]
12. Zia, M.F.; Elbouchikhi, E.; Benbouzid, M.; Guerrero, J.M. Microgrid transactive energy systems: a perspective on design, technologies, and energy markets. In Proceedings of the IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE
13. Zia, M.F.; Benbouzid, M.; Elbouchikhi, E.; Muyeen, S.; Techato, K.; Guerrero, J.M. Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis. *IEEE Access* 2020, 8, 19410–19432. [CrossRef]
14. Chen, Jun; Garcia, Humberto E. (2016). Economic optimization of operations for hybrid energy systems under variable markets. *Applied Energy*, 177, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.056>
15. S. Rehman, N. Natrajan, M. Mohandes, L. M. Alhems, Y. Himri and A. Allouhi (2020), "Feasibility Study of Hybrid Power Systems for Remote Dwellings in Tamil Nadu, India," in *IEEE Access*, 8, 143881-143890, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014164>.
16. Lin, Y., Wang, J. Realizing the Transactive Energy Future with Local Energy Market: an Overview. *Curr Sustainable Renewable Energy Rep* 9, 1–14 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40518-021-00198-0>

**H. Bielokha**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4277-367X

**M. Taraba**<sup>1</sup>, Ph. D. student, ORCID 0009-0000-0431-3942

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## TRANSACTIVE LOCAL ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS: FUNCTIONING FEATURES AND DEVELOPMENT PROSPECTS

*Due to global concerns about climate change, the deployment of distributed energy resources and electrical and thermal energy storage systems has been accelerated to minimize CO2 emissions. In addition, the need for optimal energy management of these energy resources was emphasized in order to reduce the need for new energy*



resources. The concept of transactional energy and, accordingly, transactional systems was introduced for modern energy systems as a system of economic and control mechanisms that allow for dynamic balancing of supply and demand in the entire electrical infrastructure using cost as a key indicator. This ensures cost-effective integration of renewable energy sources and creates incentives for investment and innovative renewal of local energy systems, allowing for management of both supply and demand for electricity. The article discusses the architecture of transactional systems and its components. The main objective function of transactional systems is to minimize the total annual costs of the local system, which supports the continuity of energy supply. To estimate the current cost of electricity, it is necessary to have information on the distribution of investments invested in the project before the start of its implementation, between the periods of project implementation. Considered optimization criteria, the use of which depends on specific goals. It is important to use multi-criteria optimization and control methods to determine the structure of the system and the optimal distribution of energy obtained from different sources in order to maximize the efficiency of the entire system, while contributing to the maximum reduction of emissions to the environment, while minimizing the cost of energy production.

**Keywords:** transactive energy, Microgrid, local energy markets, renewable sources, distributed sources

### References

1. Khorasany, Mohsen, Donald Azuatalam, Robert Glasgow, Ariel Liebman, and Reza Razzaghi. 2020. "Transactive Energy Market for Energy Management in Microgrids: The Monash Microgrid Case Study" *Energies* 13, no. 8: 2010. <https://doi.org/10.3390/en13082010>
2. Widergren, S.E.; Hammerstrom, D.J.; Huang, Q.; Kalsi, K.; Lian, J.; Makhmalbaf, A.; McDermott, T.E.; Sivaraman, D.; Tang, Y.; Veeramany, A.; et al. Transactive Systems Simulation and Valuation Platform Trial Analysis; Technical Report; Pacific Northwest National Lab. (PNNL): Richland, WA, USA, 2017.
3. Melton, R. Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Project Technology Performance Report Volume 1: Technology Performance; Technical Report; Pacific Northwest National Lab. (PNNL): Richland, WA, USA, 2015.
4. Holmberg, D.G.; Hardin, D.; Melton, R.; Cunningham, R.; Widergren, S. Transactive Energy Application Landscape Scenarios; Technical Report; NIST: Gaithersburg, MD, USA, 2016.
5. Orsini, L.; Kemenade, C.; Webb, M.; Heitmann, P. Transactive Energy A New Approach for Future Power Systems. *LO3 Energy*. 2019. Available online: <https://exergy.energy/wp-content/uploads/2019/03/TransactiveEnergy-PolicyPaper-v2-2.pdf> (accessed on 27 March 2020).
6. Huang, Qi & Amin, Waqas & Umer, Khalid & Afzal, Muhammad. (2021). A review of transactive energy systems: Concept and implementation. *Energy Reports*. 7. 10.1016/j.egy.2021.05.037.
7. Honarmand, Mohammad & Hosseinezhad, Vahid & Hayes, Barry & Siano, Pierluigi. (2021). Local Energy Trading in Future Distribution Systems. *Energies*. <https://doi.org/14.3110.10.3390/en14113110>
8. Zahraoui, Y.; Alhamrouni, I.; Mekhilef, S.; Basir Khan, M.R.; Seyedmahmoudian, M.; Stojcevski, A.; Horan, B. (2021) Energy Management System in Microgrids: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 13, 10492. <https://doi.org/10.3390/su131910492>
9. Khorasany, Mohsen & Azuatalam, Donald & Glasgow, Robert & Liebman, Ariel & Razzaghi, Reza. (2020). Transactive Energy Market for Energy Management in Microgrids: The Monash Microgrid Case Study. *Energies*. 13. 2010. <https://doi.org/10.3390/en13082010>.
10. Белоха Г.С. Оптимізація техніко-економічних показників локальних систем електроживлення з транзактивним керуванням [Електронний ресурс] : монографія / Г. С. Белоха ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,01 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 127 с <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/56855>
11. Siano, P.; De Marco, G.; Rolán, A.; Loia, V. A survey and evaluation of the potentials of distributed ledger technology for peer-to-peer transactive energy exchanges in local energy markets. *IEEE Syst. J.* 2019, 13, 3454–3466. [CrossRef]
12. Zia, M.F.; Elbouchikhi, E.; Benbouzid, M.; Guerrero, J.M. Microgrid transactive energy systems: a perspective on design, technologies, and energy markets. In *Proceedings of the IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE*
13. Zia, M.F.; Benbouzid, M.; Elbouchikhi, E.; Mueen, S.; Techato, K.; Guerrero, J.M. Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis. *IEEE Access* 2020, 8, 19410–19432. [CrossRef]
14. Chen, Jun; Garcia, Humberto E. (2016). Economic optimization of operations for hybrid energy systems under variable markets. *Applied Energy*, 177, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.056>
15. S. Rehman, N. Natrajan, M. Mohandes, L. M. Alhems, Y. Himri and A. Allouhi (2020), "Feasibility Study of Hybrid Power Systems for Remote Dwellings in Tamil Nadu, India," in *IEEE Access*, 8, 143881-143890, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014164>.
16. Lin, Y., Wang, J. Realizing the Transactive Energy Future with Local Energy Market: an Overview. *Curr Sustainable Renewable Energy Rep* 9, 1–14 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40518-021-00198-0>

Надійшла: 30.10.2023

Received: 30.10.2023