

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

УДК 621.316

DOI 10.20535/1813-5420.4.2021.257242

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Г.В. Мельничук, к.т.н., ORCID 0000-0002-8173-0472

Міністерство розвитку громад та територій України

І.С. Чернечук, аспірант, ORCID 0000-0001-6895-7843

В.В. Лисий, аспірант, ORCID 0000-0003-3714-7623

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ МЕХАНІЗМИ РОЗВИТКУ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ (MICROGRID)

Як напрямок розвитку концепції 3D (*Decarbonization, Decentralization, Digitalization*) та концептуальної моделі Інтернету енергії розглянуто бізнес-модель енергія як послуга (*Energy-as-a-service, EaaS*). При цьому EaaS формується у вигляді «пакетної» моделі обслуговування, в рамках якої клієнту надається апаратне і програмне забезпечення та енергетичні послуги. Рішення категорії EaaS повинні включати в себе послуги з керування споживанням і підвищення енергоефективності, сприяти впровадженню відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та інших децентралізованих джерел енергопостачання, а також оптимізувати баланс між попитом і пропозицією на ринку електроенергії. Показано, що EaaS постає широким терміном для бізнес-моделей, які керуються послугами, з інноваційним потенціалом для трансформації енергетичної галузі

Для оцінки особливостей застосування EaaS до Microgrid детально розглянуто особливості побудови та функціонування Microgrid як локальної енергосистема або система електропостачання, що є технологічним комплексом у складі об'єктів генерації (джерел енергії), джерел енергетичної гнучкості та споживачів електроенергії, які зібрані під єдиним керуванням з метою забезпечення якомога більш ефективного та зручного для споживача енергопостачання. Визначено, що технологічного запорукою ефективності сучасних Microgrid виступають можливість комплексування та оптимального поєднання різних джерел енергії та гнучкості, а також наявність єдиного контуру керування, який дозволяє якнайкраще використовувати ці джерела.

Представлено Smart Grid as a Service (SGaaS) на основі Сервісно-орієнтованої архітектури. Для ієрархічної архітектури SGaaS наведено перспективну трирівневу архітектуру, яка включає рівень інтелектуальної мережі щодо здійснення глобальної оптимізації, наприклад мінімізацію глобального захисту або глобальних витрат, рівень координації контролю для підтримки надійності та безпеки в Smart Grid та рівня Microgrid для моніторингу стану пристроїв кінцевого користувача.

Реалізація механізмів EaaS та SGaaS стимулювало розвиток Microgrid as a Service (Maas) – як послуги, яка пропонує розгортання Microgrid, зменшуючи початкову вартість інвестицій і складність. Визначено, що Maas – це новий провідний механізм фінансування, який дозволяє організаціям розгорнути Microgrid без будь-яких попередніх інвестицій, як рішення, яке не вимагає авансового капіталу для споживача енергії та яке зосереджене на результатах, таких як «енергія на місці». Механізми Maas пропонують клієнтам більше контролю над їхніми енергетичними потребами, що дозволяє їм підвищити стійкість і надійність енергозабезпечення, збалансувати використання енергії, досягти цілей «чистої» енергії та досліджувати інші інноваційні продукти та послуги.

Ключові слова: Microgrid, ефективність функціонування, бізнес-модель енергія як послуга, Smart Grid як послуга, сервісно-орієнтована архітектура, Microgrid як послуга.

Вступ

Масштабний перехід до екологічно чистої «безвуглецевої» енергетики призводить до зниження її системної ефективності, генератори зі стохастичним виробленням, що використовують енергію сонця та вітру, вимагають створення резервних генеруючих та/або накопичувальних потужностей. Як базове вирішення проблеми зростаючої неефективності енергетики бачиться перехід до децентралізованої організації потужностей, керування та енергетичних ринків, що забезпечує ефективне поєднання великої

та малої розосередженої енергетики, найкраще задоволення диференційованих та динамічно змінних вимог споживачів.

Найбільш цілісне уявлення про трансформацію енергетики дається в концепції 3D (Decarbonization, Decentralization, Digitalization) [1–3]. Decarbonization («декарбонізація») – перехід до екологічно чистої «безвуглецевої» економіки та енергетики, що виявляється у зростанні частки ВДЕ в енергетичному балансі, збільшенні частки електричного транспорту та відмови від викопних палив. Decentralization («децентралізація») – перехід до територіально розосередженої електроенергетики з великою кількістю різноманітних генераторів і споживачів, що виражається в зростанні частки, приєднаної до розподільних мереж, щодо малопотужної та різноманітної за своїм характером генерації; появі активних споживачів (prosumer) – нового типу суб'єктів електроенергетики, які є одночасно і виробниками та споживачами електроенергії, мають можливість гнучко змінювати профіль свого споживання з мережі. Digitalization («дигіталізація») – перехід до повсюдного застосування в електроенергетиці цифрових керованих пристроїв, підключених до інформаційних мереж Інтернету, на всіх рівнях енергосистеми від пристроїв генераторів та електричних мереж до кінцевих пристроїв, у тому числі побутових, споживачів електроенергії, що забезпечує можливість реалізації інтелекту керування енергосистемами, заснованого на міжмашинній взаємодії (Machine to Machine, M2M) та інтернет речей (Internet of Things, IoT).

У цій концепції «3D», складова Decarbonization вказує на причину системних трансформацій в енергетиці; Decentralization – на принцип зміни архітектури енергетичних систем; Digitalization є ключовим інструментом для ефективної трансформації. Енергосистема, побудована за новою архітектурою, має стати [4, 5]:

– трансакційною: економічна взаємодія між користувачами відбуватиметься на основі p2p-трансакцій, які дозволяють реалізувати різноманіття ролей користувачів та сервісів, що надають їм відповідні систематизовані цінності (адаптація та налаштування під окремі вимоги) [2];

– інтелектуальною: керування системою за рахунок міжмашинної взаємодії між її елементами, при якому кожен елемент може самостійно приймати рішення про реалізацію того чи іншого режиму своєї роботи та вплив на систему, забезпечить легкість інтеграції (plug&play) енергетичних пристроїв користувачів у контури керування різних сервісів;

– стійкою та гнучкою: буде забезпечена легкість технічного з'єднання пристроїв з мережею за умови гарантованої підтримки статичної та динамічної стійкості системи.

Користувач такої системи через інтерфейси інтегрується до неї та стає повноцінним учасником нових сервісів та бізнес-моделей.

Концептуальна модель Інтернету енергії (Internet of Energy, IoE) спирається на уявлення про «енергетичну хмару», введену аналітиками компанії Navigant Research [6]. Власне IoE є екосистемою технічно та економічно взаємопов'язаних користувачів. Користувачами IoE можуть бути власники будь-якого електроенергетичного обладнання (промислового, комерційного, побутового), яке може генерувати, накопичувати та споживати електроенергію, а також суб'єкти, які надають власникам електроенергетичного обладнання різноманітні послуги. Групи обладнання, що мають спільну точку приєднання до електричних мереж та інформаційних каналів, які забезпечують зв'язок з IoE, утворюють його структурну одиницю – енергетичну комірку, яка незалежно від складу та складності своєї внутрішньої структури взаємодіє з іншими енергетичними комірками, як єдине ціле. Користувачі IoE за допомогою своїх енергетичних комірок можуть відігравати різні динамічно змінні ролі в електроенергетичній системі, надаючи один одному послуги, зокрема, з постачання електричної енергії, участі у режимному керуванні, у тому числі й участі у підтримці частоти та рівня напруги, надання енергетичного обладнання у «віртуальну» оренду, забезпечення резерву потужності тощо.

У найближчому майбутньому концепція IoE сформує ринок таким чином, що електроенергетична інфраструктура стане більш розподіленою та доступною, як стільниковий зв'язок та інтернет [7]. Очікується, що розосереджена генерація, у тому числі на базі ВДЕ, найближчим часом стане домінуючим напрямком у світових інвестиціях в енергетичному комплексі.

Енергія як послуга (Energy-as-a-service, EaaS)

EaaS – це «пакетна» модель обслуговування, в рамках якої клієнту надається апаратне і програмне забезпечення та енергетичні послуги. Рішення категорії EaaS повинні включати в себе послуги з керування споживанням і підвищення енергоефективності, сприяти впровадженню відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та інших децентралізованих джерел енергопостачання, а також оптимізувати баланс між попитом і пропозицією на ринку електроенергії. Головна перевага для споживача полягає в спрощенні пакета послуг, незважаючи на їх зростаюче різноманіття.

Еволюція електроенергетичної системи у бік моделі EaaS [8]:

1. *Базовий рівень* (цифровізація основних процесів) – оптимізація наявних продуктів для існуючих клієнтів.

2. *Розширений рівень* (розширення асортименту продуктів та послуг) – договори на постачання

електроенергії; договори на підвищення енергоефективності; розподілене постачання та доставка енергії; керування та оптимізація енергоспоживання

3. *Наступний рівень* (енергія як послуга) – інтегрований енергоменеджер; координатор енергомережі.

Послуги, які можуть бути запропоновані в рамках концепції EaaS наведено в табл. 1.

На сьогодні EaaS постає широким терміном для бізнес-моделей, які керуються послугами, з інноваційним потенціалом для трансформації енергетичної галузі [8–10]. Але перш ніж досліджувати, що зараз означає EaaS для сектора, давайте коротко подивимося, з чого він почався. У традиційній моделі енергопостачання енергія, як правило, продається як одиниці кВт·год, товар, а не послуга, і, безумовно, потреби кінцевого споживача міцно розміщені в нижній частині ієрархії. Безсумнівно, що одна з найперших ітерацій EaaS виникла через потребу комерційної галузі спростити свої потреби в енергії, зосередившись на тому, щоб бути більш раціональним і економічно ефективним з варіантами стійкості. Ці організації хотіли мати можливість краще керувати накладними витратами на електроенергію на тлі різного попиту в час доби, нових цілей стійкості та коливань витрат.

Таблиця 1 – Послуги, які можуть бути запропоновані в рамках концепції EaaS

Заявка	Послуга	Технології	Приклади
Постачання енергії	Додаткові послуги	Платформа	Портал для керування розосередженими енергоресурсами, транзактивна енергія
	Накопичення та зберігання енергії	Акумулятори Електроенергія для всього (P2X)	Мікромережа, побутові та комерційні енергосховища
Передача енергії	Розосереджена генерація	ВДЕ	Сонячні електростанції, вітряні електростанції, паливні елементи, тепло-електроцентралі і т.д.
	Балансування навантаження на енергомережу	Інтерфейсний алгоритм	Послуги з моніторингу та керування навантаженням
Оптимізація енергоспоживання (попиту на електроенергію)	Енергозбереження	Інтелектуальний облік	Керування попитом, керування енергоспоживанням в будівлях, використання інтелектуальних засобів обліку, підвищення енергоефективності
	Оптимізація зовнішнього енергопостачання	Програмні додатки	P2P-торговля, ціноутворення в режимі реального часу

На ранньому етапі концепція EaaS була направлена на обмеження витрат, значній еволюції традиційних контрактів на постачання з фіксованою ціною [9, 10]. Проте протягом останніх трьох років, оскільки технології розвивалися і цінність даних вийшла на перший план, спостерігається розвиток EaaS через появу нових моделей підписки, орієнтованих на попит, які монетизують гнучкість. Для комерційних організацій вони забезпечують цінність, інтегруючи постачання енергії на основі попиту за передбачуваною фіксованою вартістю з аутсорсингом операцій, таких як контракти на технічне обслуговування та мінімальні початкові капітальні витрати. Підприємства можна стимулювати, щоб вони адаптували своє споживання енергії відповідно до пікового попиту, дозволяючи постачальникам оптимізувати використання та передавати свої власні заощадження своїм клієнтам. Модель, орієнтована на користувача, є привабливою як для клієнта, так і для постачальника, створюючи економічну синергію з обох сторін.

Бізнес-моделі «як послуга» на Заході сьогодні є звичним явищем. Вони являють собою зсув до технологічних моделей на основі підписки, перетворюючи традиційні галузі, що базуються на продуктах, у пропозиції, орієнтовані на послуги, де споживач знаходиться в самому центрі комерційної стратегії. Хоча необхідно зазначити, що передплатні послуги самі по собі не є новими [8–10]. З прискоренням хмарних обчислень і глобальним доступом до Інтернету моделі «як послуга» почали швидко розвиватися.

Починаючи спочатку з Software-as-a-Service (SaaS) – Salesforce стверджує, що це була перша в 1999 році – нові моделі регулярно з'являються майже в кожній галузі (від широкого банківського обслуговування як послуги до системи Data as a Service і навіть 3D-друк як послуга. І коли вони з'являються, вони швидко виходять за рамки простої моделі підписки, стаючи складними інноваційними платформами, які пропонують широкий спектр послуг; хоча їх основи залишаються незмінними: орієнтація на клієнта, керування технологіями та даними.

У 2019 році компанія Deloitte визначила EaaS як «наскрізне керування енергетичними активами та послугами клієнта», уявляючи його як зв'язок між технологіями (IoT, Blockchain тощо) та енергією, включаючи електронну мобільність та зрілість ВДЕ [8]. EaaS сьогодні, безумовно, виходить далеко за межі ранніх моделей, які пропонували лише економічну ефективність та керування портфелем. Наприклад, при переході в інші сектори, зокрема, комунальних послуг чи електронної мобільності кінцевому користувачеві надається набір індивідуальних інтелектуальних енергетичних послуг, щоб додати цінність і створити більш гнучку та чутливу енергетичну систему, орієнтовану на споживача. Подібно до інших моделей «як послуга», EaaS спирається на дані та розширену аналітику [8].

В основі будь-якої послуги EaaS лежать оперативні потреби клієнта, будь то житлові чи комерційні. Завдяки даним цифровізації ці компанії-піонери, які пропонують додатки EaaS, зможуть задовольнити зазначені потреби, краще розуміючи попит своїх клієнтів і використовуючи ці знання для оптимізації системи. EaaS переходить від базової моделі, коли енергетична галузь задовольняє потреби клієнтів, надаючи комплексні послуги, але яка все ще вимагає встановлення більшої кількості технологій, більшого підключення до мережі або навіть стимулювання самих споживачів змінити свою власну поведінку. Майбутнє EaaS – це фундаментальний перехід до детального розуміння того, як клієнт взаємодіє із загальною системою та світом, де алгоритми використовуються для інтеграції та маніпулювання моделями попиту, щоб уникнути піку в першу чергу без будь-якого впливу на клієнта.

Наведемо окремі приклади застосування EaaS [8].

Житловий комфорт як послуга. У житловому секторі, наприклад, ми бачимо чіткі паралелі з EaaS, коли мова йде про можливості, керовані даними, і підхід до підключеної платформи, який EaaS зараз пропонує новітні утиліти. Потік даних про використання з Smart лічильників дозволяє комунальним підприємствам не тільки покращувати свої власні операційні процеси, але й надавати своїм клієнтам інноваційні персоналізовані послуги, що ґрунтуються на попиті, такі як нові тарифи або цифрові рахунки, для своїх клієнтів на одній платформі. Відходячи від стягнення плати з користувачів лише за те, скільки енергії вони споживають, комунальні підприємства натомість зосереджуються на тому, як клієнти використовують цю енергію, і надають індивідуальні рішення для обслуговування.

У 2019 році британські енергетичні компанії Baxi Heating і Bristol Energy випробували Heat-as-a-Service, продавши так званий Heat Plan, в якому споживачі купували години тепла, а не кВт·год. За фінансової підтримки Департаменту бізнесу, енергетики та промислової стратегії Великої Британії, випробування запропонували домогосподарствам фіксовану ціну на основі даних про теплову ефективність їхнього будинку та основного попиту – кількість годин тепла, необхідних клієнту щотижня, у кімнатах, які вони хотіли, у потрібний час.

Основні переваги EaaS та потенціал майбутнього застосування в житлових приміщеннях передовими комунальними підприємствами: він пропонує індивідуальну та надзвичайно просту послугу, повністю засновану на потребах клієнта без будь-якої вимоги до активної участі клієнта – постійна зміна термостата, перехід на більш дешевого постачальника енергії тощо. Для комунального підприємства, що надає послугу, це дає можливість оптимізувати свою систему, забезпечуючи рівень комфорту, необхідний їхнім клієнтам, але використовуючи якомога менше енергії та вуглецю.

Енергія як послуга та зарядка електромобілів. EaaS має величезний потенціал, коли справа доходить до інтелектуальної зарядки електромобілів (EV) та її інтеграції в системи керування енергією будинку (HEMS). Інтеграція даних електромобілів із тарифами за час використання та даними Smart лічильників створює можливість розумної зарядки, від якої виграють як компанія та оператор електромережі, так і власник транспортного засобу. Контролюючи час і швидкість заряджання електромобіля на основі місцевого попиту та цін на ринку електроенергії (при цьому дотримуючись мінімальних рівнів заряду, встановлених власником), компанія, що займається інтелектуальною зарядкою, може відкрити нові потоки доходу, такі як надання послуг з балансування оператору мережі, а також оптових арбітражних можливостей на основі масової закупівлі електроенергії. Оператор мережі може збалансувати локальну мережу з більшою гнучкістю, у той час як власник транспортного засобу отримує недорого зарядку без будь-яких витрат.

Роль енергетики як послуги в децентралізації. EaaS безсумнівно надає успішні технологічні рішення для збалансування попиту та споживання і забезпечення більшого проникнення ВДЕ як у житловому, так і в комерційному секторах, де вже склалися сприятливі умови для інвестицій. Ці локальні енергетичні системи EaaS, надані з нульовими капітальними витратами, забезпечують більшу

ефективність із інтелектуальним керуванням, особливо в районах, де існуючі застарілі електромережі мають проблеми. Насправді, EaaS має відігравати важливу роль у знятті тиску з централізованих активів. Узгодження балансу електромережі на місцевому рівні за допомогою технологічних рішень для реагування на попит пропонує набагато більшу гнучкість для вирівнювання кривої навантаження та інтеграції нестабільних джерел.

Розвиток Microgrid

Створення Microgrid у всьому світі стає все більш ефективним і затребуваним рішенням з енергопостачання споживачів та все більш вагомим альтернативою традиційному підходу до розвитку енергосистем, що базується на будівництві великої централізованої генерації та електричних мереж [11–14]. Будівництво Microgrid передбачає розміщення джерел енергії та енергетичної гнучкості якомога ближче до кінцевого споживача, а також використання ресурсів гнучкості на стороні самих споживачів для досягнення оптимального вартості, автономності, екологічності або інших цільових параметрів енергопостачання. Microgrid може розглядатися як локальна енергосистема або система електропостачання, що є технологічним комплексом у складі об'єктів генерації (джерел енергії), джерел енергетичної гнучкості та споживачів електроенергії, які зібрані під єдиним управлінням з метою забезпечення якомога більш ефективного та зручного для споживача енергопостачання [11].

У загальному випадку до складу Microgrid можуть входити такі типи електроустановок [12, 14]: маневрена генерація, що диспетчеризується; генерація, що не диспетчеризується, на базі ВДЕ; системи накопичення електроенергії (СНЕ); керовані навантаження споживачів; елементи зарядної інфраструктури електричного транспорту; елементи електрифікованих систем теплопостачання, включаючи накопичувачі теплової енергії; обладнання локальних електричних мереж Microgrid.

Реалізація концепції ІоЕ передбачає створення локальної енергетичної інфраструктури (Microgrid), в яку інтегруються виробники та споживачі енергії та в рамках якої вони можуть вільно обмінюватись енергією [15]. Концепція побудована на абсолютно іншій архітектурі, яка, на відміну від традиційної, є децентралізованою електроенергетичною системою. Тут реалізовано інтелектуальне керування потоками електроенергії, яке здійснюється за рахунок однорангових енергетичних трансакцій між її користувачами. Енергетична трансакція – акт взаємодії двох і більше суб'єктів Microgrid, що складається з трьох шарів енергоінформаційного обміну: фінансово-договірної, інформаційно-керуючої та фізичного (електричного).

Для функціонування такої Microgrid необхідні програмно-апаратні комплекси з розподіленою архітектурою та системами керування, побудовані із застосуванням різних методів штучного інтелекту, які забезпечать: синтез договірних умов (смарт контракти); видачу керуючих впливів на силове обладнання, що відповідають договірним умовам та забезпечують виконання технологічних обмежень; реалізацію енергообміну в темпі реального процесу.

Ієрархічна схема керування Microgrid складається з трьох рівнів керування [11, 12]:

- перший рівень керування: забезпечення стабільності напруги, збереження стабільності частоти, розподіл потужності, пристрої захисту (період дії сигналів керування – секунди та мікросекунди);
- другий рівень керування: компенсація відхилення частоти, спричиненого первинним управлінням, синхронізація мережі, компенсація відхилення напруги, спричиненого первинним управлінням, місцевий рівень керування (період дії сигналів керування – години та секунди);
- третій рівень керування: оптимальна робота в обох режимах роботи, глобальний рівень керування (одночасно з централізованою мережею), контроль потоку потужності у вузлі мережі (період дії сигналів керування – дні та години).

Ключові досягнення технології Microgrid включають в себе «включи і працюй» системи «Microgrid в коробці», масштабовані модульні системи та програмне забезпечення для віддаленого моніторингу та керування на основі хмари [14]. Ці інновації представляють рішення "чистої енергії" під ключ, яке є технологічно здійсненним, стійким, еластичним, надійним, тиражованим (на масовій основі) та економічно ефективним. Для впровадження на ринку гнучких та масштабованих рішень Microgrid необхідна значна кількість попередніх розробок та структурування.

Особливо привабливим рішенням є створення Microgrid для енергопостачання комерційних та промислових споживачів [11, 14]. Комерційні та промислові (індустріальні) Microgrid (Commercial and Industrial Microgrid, C&I Microgrid), доповнюючи електропостачання від централізованої електромережі, дозволяють забезпечити своїм споживачам зниження витрат на електроенергію та виконання вимог щодо «безвуглецевості» («net-zero») споживаної енергії, до якості електропостачання та якості показників електроенергії. Вони в окремих випадках можуть бути більш жорсткішими у порівнянні з тими, які може забезпечити централізоване енергопостачання.

Ринок Microgrid для комерційних та промислових споживачів до 2028 року становитиме 6,3 млрд. дол. на рік, або 3,2 ГВт, а загальний обсяг ринку приєднаних до мережі Microgrid, побудованих на користь юридичних осіб, – 21,7 млрд. дол. на рік, або 11 ГВт [16].

В Україні саме сектор комерційних та промислових споживачів може стати локомотивом ринку Microgrid, оскільки, з одного боку, проблема зростання витрат на електропостачання найбільш гостро стоїть саме перед такими споживачами, і вони мають безпосередню зацікавленість у використанні можливостей розосередженої генерації. Саме ці споживачі здатні сформувати платоспроможний попит та інвестувати свої ресурси у створення Microgrid та розвиток необхідних технологій.

Економічний ефект, який Microgrid приносять споживачам, що входять до них, формується такими факторами [12, 14, 17, 18]: зниження витрат на купівлю електроенергії та потужності на роздрібному ринку; зниження витрат на оплату послуги електричних мереж з транспорту електроенергії; зниження витрат на оплату технологічного приєднання чи збільшення приєднаної потужності; підвищення надійності електропостачання та зниження втрат від знеструмлення; підвищення якості електроенергії та зниження втрат від впливу просядок та стрибків напруги на чутливе обладнання.

У зростанні економічної ефективності Microgrid ключову роль відіграв технічний прогрес у сфері малої генерації, силової електроніки та накопичувачів електроенергії. Він призвів до того, що останнім часом вартість електроенергії, отриманої за рахунок власної генерації, виявляється у багатьох випадках нижчою, ніж ціна електроенергії, купленої на роздрібному ринку та отриманої електричними мережами.

Вартість капітального будівництва Microgrid у цілому, що включає вартість як електроустановок, так і систем управління та всього інжинірингу, в даний час становить 1000–3000 дол. за кВт встановленої потужності залежно від географії проекту, складу обладнання, необхідного ступеня «вуглецевої нейтральності», інтегратора та набору вендорів (будь-яка юридична організація, підприємство, установа або фізична особа, що поставляють товари або послуги замовникам) [19, 20].

Розвиток локальних енергосистем Microgrid отримує все більшу підтримку на державному рівні. Так, у 2014 році у США на замовлення Міністерства енергетики було розроблено документ «The Advanced Microgrid. Integration and Interoperability», яким було визначено найвищий пріоритет розвитку досліджень у сфері Microgrid. Міністерство встановило, що комерційні проекти у цій галузі мають забезпечувати зниження шкідливих викидів не менше ніж на 20% та збільшувати енергоефективність не менше ніж на 20% [21]. Водночас цим документом було визначено дорожню карту подальших досліджень та установи і організації, що мають бути залучені до процесу впровадження вдосконалених Microgrid. Зокрема, дорожньою картою передбачається вже у 2025-х роках перейти до застосування динамічних Microgrid, а процес розвитку досліджень у галузі вдосконалених Microgrid має поєднувати питання впровадження Smart Grid, стандартів та протоколів, зниження витрат, безпеки та інших завдань (див. рис. 1).

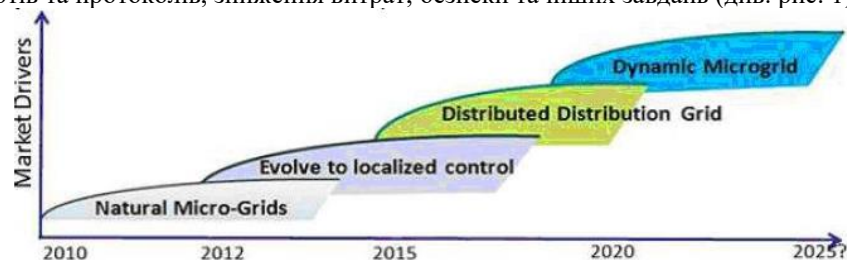


Рисунок 1 – Розвиток досліджень згідно документу «The Advanced Microgrid. Integration and Interoperability»

Причини доцільності проведення нових досліджень Microgrid [11, 12]:

- розвиток інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ);
- поширення джерел розосередженої генерації (ДРГ), у тому числі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), формування різних за типом та потужністю локальних систем енергозабезпечення;
- розвиток енергетичних кооперативів, агрегаторів навантажень та генераторів електроенергії при широкому застосуванні активних споживачів (prosumer);
- урізноманітнення навантажень при швидкому розвитку технологій перетворення та накопичення електроенергії;
- формування нових ринкових механізмів та нових бізнес-процесів з врахуванням положень клієнтоорієнтованого підходу концепції Smart Grid.

На сьогодні визначальними характеристиками вдосконалених Microgrid стали [14]: визначена певними межами локальна територія; приєднання до централізованої електромережі в одній точці та живлення від однієї центральної підстанції; здатність автоматично переходити на роботу в автономному режимі, при підключенні до мережі – забезпечувати синхронізацію, сумісність з системами керування та безпеки; наявність системи керування споживанням, включаючи системи керування виробництвом, передачею енергії, акумулюванням, розосередженими джерелами енергії, навантаженням; наявність системи двостороннього обміну енергією та інформацією в реальному часі відносно точки приєднання.

П'ять найбільших проектів, де задіяні найбільш просунуті системи Microgrid, наведено в табл. 2 [22].

Острівні енергетичні Microgrid представляють зараз 36% від усіх обсягів зберігання енергії Tesla, згідно з результатами аналізу Bloomberg New Energy Finance. Крім перерахованих п'яти проектів, з листопада 2016 р. компанія встановила свої акумулятори Powerpack першого або другого покоління на п'яти островах, чотирьох – в Тихому океані: Тау на Американському Самоа, моноліт на Фіджі і Кауаї і Гонолулу на Гаваях. П'ятий проект – на одному з островів в Північній Кароліні, в Атлантичному океані.

Функції Microgrid, які враховуються при дослідженнях, розробках, створенні прототипів і стандартизації, зведені в табл. 3 [23].

Таблиця 2 – П'ять найбільших проектів, де задіяні найбільш просунуті системи Microgrid

Об'єкт проекту	Технологія	Переваги
1. Gorona Del Viento, Канарські острови	Інтеграція вітрових установок $5 \times 2,3$ МВт з ГАЕС потужністю 11,32 МВт і дизель-генераторами на 11 МВт	Перша у світі інтеграція ГАЕС з відновлюваними джерелами, ефективне керування системою
2. Ross Island, Антарктика	Інтеграція вітрових установок 3×330 кВт з дизель-генераторами 9×125 кВт, установка стабілізатора PowerStore на 500 кВт	Мінімізація експлуатації дизель-генераторів, економія в паливі 463 тис. л / рік, зниження викидів CO ₂ на 2800 т / рік
3. Марбл-Бар, Австралія	Інтеграція фотоелектричної установки 1×300 кВт з дизель-генераторами 4×320 кВт, установка стабілізатора PowerStore на 500 кВт	Мінімізація експлуатації дизель-генераторів, економія в паливі 405 тис. л / рік, зниження викидів CO ₂ на 1100 т / рік
4. Мідний рудник ДеГросса, Австралія	Інтегроване рішення із застосуванням фотовольтаїчної установки 10,6 МВт з системою накопичення з дизель-генераторної установкою, установка стабілізатора PowerStore	Мінімізація експлуатації дизель-генераторів, економія в паливі 5 млн. л / рік
5. Острів Кадьяк, Аляска, США	Стабілізація острівної мережі	Стабілізація мережі з коливаннями 9 МВт, продовження терміну життя акумуляторних батарей

Світовий досвід свідчить, що Microgrid у певних ситуаціях можуть забезпечити зниження витрат комерційних та промислових споживачів на електропостачання до 25% і навіть більше порівняно із споживанням енергії лише з централізованої енергосистеми. Величина ефекту істотно залежить як від особливостей конкретних споживачів, і від того, які вимоги неекономічного характеру – за надійністю та екологічністю – висуваються цими споживачами. Ефект виявляється тим більшим, чим більш витратними є заходи з реконструкції та будівництва мережевої інфраструктури, необхідні для ліквідації дефіциту потужності в єдиній енергосистемі, яку споживачі відчувають або відчуватимуть у найближчому майбутньому.

Технологічною запорукою ефективності Microgrid виступають можливість комплексування та оптимального поєднання різних джерел енергії та гнучкості, а також наявність єдиного контуру керування, який дозволяє якнайкраще використовувати ці джерела.

Реалізація концепції Smart Grid показала, що основними драйверами попиту на ринку комерційних та промислових Microgrid виступають економічні причини:

- зростання ціни на електроенергію для промислових та комерційних споживачів (у тому числі багато в чому через практику перехресного субсидування);
- зростання вартості технологічного приєднання до мереж та складність виконання технічних умов на таке приєднання для промислових та комерційних споживачів.

Потенціал ринку комерційних та промислових Microgrid в основному визначатиметься перспективним попитом на потужність з боку нових промислових та комерційних споживачів та відповідним зростанням рівнів електроспоживання. Приріст електроспоживання та попиту на потужність залежать від макроекономічних умов та загальних темпів зростання економіки, але нові проекти у сфері промислового виробництва продовжать з'являтися за будь-яких загальних економічних умов.

Іншим важливим фактором для електроенергетичних систем, де ще широко не реалізуються положення концепції Smart Grid, виступає неможливість одночасно надійного та порівняно дешевого електропостачання комерційних та промислових споживачів у межах повністю ізольованих Microgrid. Цей фактор робить затребуваними Microgrid, приєднаних до електричних мереж, а отже, робить надзвичайно затребуваними розробки правових та технічних умов такого приєднання, а також взаємодії між Microgrid та систем передачі та розподілу електроенергії.

Таблиця 3 – Функції Microgrid, які враховуються при дослідженнях, розробках, створенні прототипів і стандартизації

№ з/п	Функція	Характеристика функції
1	Незалежність	Малі енергосистеми включають генерацію, накопичення і навантаження, і можуть працювати автономно у режимі підключеної енергосистеми та ізольованому. У першому випадку, мала енергосистема може самостійно оптимізувати своє виробництво і споживання електроенергії за врахування системної економічної оцінки, такої як рішення купівлі чи продажу. В обох режимах, система може звести до мінімуму викиди CO ₂ за рахунок максимізації споживання поновлюваної енергії та мінімізації генерації на основі вичерпного палива. У ізольованому режимі система здатна до узгодження джерел і навантаження і може тримати напругу системи і частоту в певних межах з відповідним контролем.
2	Стабільність	Незалежне місцеве керування джерелами, акумуляторами, і навантаженнями малих енергосистем засноване на статизмі і рівнях напруги у точці підключення кожного пристрою. Це означає, що мала енергосистема може працювати стабільним чином протягом номінальних умов експлуатації та під час подій з перехідним процесом, незалежно від того, чи більша енергомережа працює чи вийшла зі строю. (Додаткові дослідження необхідні, однак, щоб досягти високого рівня стабільності, наприклад, щоб усунути непотрібну передачу реактивної потужності між обертовими або генераторами на основі інвертора.
3	Сумісність	Малі енергосистеми повністю сумісні з існуючою місцевою електроенергетичною мережею. Вони можуть розглядатися як функціональні одиниці, які підтримують розвиток існуючої системи у економічно і екологічно чистий спосіб.
4	Гнучкість	Розширення і інтенсивність розширення малої енергосистеми не повинні дотримуватися будь-яких точних прогнозів. Підготовчо-налагоджувальний час відповідних компонентів (працюючих на вичерпному паливі та ВДЕ, накопичувальних систем та ін.) є короткими, і мала енергосистема може зростати поступово. Малі енергосистеми також є технологічно нейтральними і в змозі впоратися з різноманітною сумішшю поновлюваних і генераторів, що працюють на вичерпному паливі.
5	Розширюваність	Малі енергосистеми можуть просто зростати за рахунок встановлення додаткових генераторів, накопичувачів і навантажень. Таке розширення як правило, вимагає додаткового нового проектування малої енергосистеми і може бути виконане на паралельній і модульній основі з метою розширення до більших рівнів виробництва та споживання електроенергії.
6	Ефективність	Централізована, а також структури контрольного контролера розподільчої малої енергосистеми може оптимізувати використання генераторів, керувати зарядкою і розрядкою накопичувачів енергії, а також керувати споживанням. Таким чином, цілі управління енергоспоживанням можуть бути глибоко оптимізовані, наприклад, в економічних, а також екологічних аспектах.
7	Економічність	За даними дослідження ринку, економічна оцінка рекуперації тепла і його застосування в системах ТЕЦ (когенерації) є дуже важливим для оцінки малих енергосистем. Крім того, використання поновлюваних джерел енергії дозволить знизити витрати на паливо і викиди CO ₂ .
8	Модель з'єднання рівноправних вузлів	Малі енергосистеми можуть підтримувати справжню модель з'єднання рівноправних вузлів функціонування, керування та торгівлі енергією. Крім того, узгоджені енергетичні операції з централізованою енергосистемою також можливі з цією моделлю. Пропонована концепція не диктує розмір, розширюваність і кількість вузлів і темпи зростання малої енергосистеми.

З точки зору суб'єктів, які відповідають за надійність функціонування системного оператора та мережеских компаній такі умови не повинні погіршувати умови функціонування інших суб'єктів цих систем, у тому числі негативно впливати на та якість електропостачання та якість параметрів електроенергії.

Розвиток ринку комерційних і промислових Microgrid в Україні може забезпечити додатковий економічний ефект, обумовлений економії електроенергії на системному рівні. Ці ефекти багато в чому зумовлені тим, що локальні системи енергозабезпечення, у тому числі з використанням Microgrid, створюють конкуренцію рішенням централізованих електроенергетичних системи, зокрема, будівництву мережевої інфраструктури чи нових джерел електроенергії як складових цих систем.

Зниження витрат споживачів Microgrid на електропостачання виникає за рахунок того, що вартість електроенергії, яка виробляється в Microgrid, для споживачів виявляється нижчою, ніж вартість електроенергії, що отримується з мережі. Зниження вартості електроенергії формується переважно за рахунок зниженням плати за передачу. Зниження потреби в інвестиціях на стороні централізованої енергосистеми формується зі зниження потреби в інвестиціях мережеских компаній у технологічне приєднання та зростання приєднаної потужності абонентів, що використовують Microgrid, а також зниження потреби в інвестиціях у будівництво нових та модернізацію існуючих генеруючих потужностей при задоволенні частини перспективного попиту на потужність за рахунок Microgrid.

Крім перерахованих економічних ефектів застосування Microgrid може стати місцевими джерелами енергетичної гнучкості для електроенергетичної системи, наприклад, надаючи різним суб'єктам електроенергетики послуги гнучкості. До таких послуг, які мають пропонуватися на конкурентних підставах, відносяться: керування попитом на електроенергію; регулювання частоти в енергосистемі; забезпечення третинних резервів потужності; регулювання рівня напруги та компенсація реактивної потужності; регулювання навантаження на обладнання центрів живлення; забезпечення аварійного резерву для споживачів.

Smart Grid як послуга

Інтелектуальна мережа (Smart Grid) дозволяє інтегрувати розосереджені ВДЕ в звичайну мережу розподілу електроенергії таким чином, що цілі щодо витрат електроенергії та забруднення середовища можуть бути досягнуті за допомогою інтелектуального та ефективного узгодження між генераторами електроенергії та енергетичними навантаженнями. Smart Grid as a Service (SGaaS) не тільки дозволяє складати Smart Grid з основних сервісів, але й також дозволяє досвідченим користувачам вибирати між власними послугами на основі потреб [24].

Традиційна мережа статична, оскільки вона не знає, скільки і коли електроенергії потрібно користувачам. Smart Grid спрямована на забезпечення більш інтелектуального та ефективного узгодження між виробництвом електроенергії та потребами в електроенергії від навантаження. Таким чином, підприємства, які виробляють електроенергію, не потребують підтримки, потреби в електроенергії, які перевищують нормальну середню величину. Ці потреби можуть бути задоволені за допомогою розосереджених енергетичних ресурсів (DER) та системи зберігання енергії (ESS).

Статус-кво проектування Smart Grid ще далекий від зрілості через поточну базу інфраструктуру для комунікації та адаптації. У цій роботі ми намагаємося використовувати популярну сервісно-орієнтовану архітектуру (SOA) для заповнення цієї прогалини інфраструктури інтелектуальних мереж. SOA забезпечує більшу гнучкість у проектуванні та розробці систем, що забезпечує надійну конструкцію системи завдяки відновленню функцій шляхом повторної підписки на нові послуги або відновлення служб, які не додалися.

Сервісно-орієнтована архітектура SOA стає тенденцією в системному проектуванні завдяки численним перевагам. Наочним доказом цього є інфраструктура хмарних обчислень, заснована на трьох рівнях IaaS (інфраструктура як послуги), PaaS (платформа як послуги) та SaaS (програмне забезпечення як послуги). Подальші хмарні обчислення стають основною програмою, завдяки якій вони стають все більш мобільними. Наприклад, інформація про потужність із Smart лічильників зараз через веб-сервер завантажується на хмарі, до яких потім можна отримати доступ через відповідні сервіси.

Що стосується сервісно-орієнтованої архітектури Smart Grid, то роботи в цій сфері тільки розпочалися. У роботі [25] запропоновано архітектуру для інтелектуальних пристроїв кінцевих пристроїв, які є підключеними до розподілених систем керування енергією. Запропонована архітектура зосереджена на інтеграції пристроїв кінцевого користувача та сервісу, однак цей підхід не вирішує проблеми невідповідності інтерфейсу. Автори [26] запропонували інфраструктуру для сервісно-орієнтованого попереднього вимірювання в Smart Grid, прийняли механізм контролю доступу на основі ролей, щоб гарантувати безпечний доступ до Smart Grid. Також у [27] наведено гнучку сервісно-орієнтовану архітектуру для керування активами енергосистем. У цьому процесі використовувався алгоритм прийняття рішень про декомпозицію Бендера, щоб розкласти дуже складні процеси прийняття рішень на процеси меншої складності. Уніфікована система керування Smart Grid представлена в [28]. Вказано, що

уніфікована система керування є важливою частиною побудови середовища Smart Grid, однак в цій роботі не розглядаються питання конгломерації інформації.

Для ієрархічної архітектури SGaaS в роботі [24] запропоновано трирівневу архітектуру, включаючи рівень інтелектуальної мережі (SGL) для глобальної оптимізації, наприклад мінімізацію глобального захисту або глобальних витрат, рівень координації контролю (CCL) для підтримки надійності та безпеки в Smart Grid та рівня Microgrid (MGL) для моніторингу стану пристроїв кінцевого користувача.

Процес торгівлі є питаннями при розробці SOA Smart Grid. У SaaS підтримується три механізми торгівлі одного аукціону, відповідність та оптимізація, вибір яких можна зробити під час переговорів про угоду про рівень обслуговування на рівні Smart Grid. SaaS забезпечує гнучку структуру, яка може адаптувати метод оптимізації для різних цілей на кожному рівні.

З наведеного вище щодо дизайну Smart Grid ми бачимо, що основна архітектура потребує гнучкості та масштабованості. У роботі [24] запропоновано Smart Grid як послуги, яка використовує сервісно-орієнтовану архітектуру системи і робить її більшою гнучкою та масштабною.

Основні переваги Smart Grid включають зниження загальної вартості електроенергії (завдяки поінформованості про використання електроенергії в режимі реального часу за допомогою передової вимірювальної інфраструктури (AMI)), зменшення глобального забруднення (через зелені відновлювані енергетичні ресурси), вищу надійність електричної енергії, розподіл або менша ймовірність відключень (через інтелектуальну розширену систему автоматизації розподілу (ADAS)), більш висока ефективність розподілу енергії (через коротші шляхи розподілу та локалізовані Microgrid) та зменшення втрати електроенергії (через пікове вирівнювання виробництва електроенергії комунальними підприємствами). про розподіл вимог DER).

Хоча Smart Grid мають низку переваг як для комунального підприємства, так і для досвідчених користувачів, все ще існує низка проблем, які потребують подальшого дослідження та розробки. Деякі типові проблеми включають реструктуризацію мережі розподілу електроенергії з метою врахування зростання частки ВДЕ, проблему попиту та відповіді на Microgrid, рівні інтелектуалізації мережі, гарантію якості обслуговування (QoS) для всіх видів функціональних вимог, таких як зниження навантаження і планування навантаження, а також гнучкість і масштабованість підключення користувачів до мережі.

Рівень Microgrid. Рівень Microgrid є найнижчим рівнем в ієрархії SOA розумної мережі, і кінцеві користувачі в основному підписуються на послуги на цьому рівні. Кінцевими споживачами є енергетичні навантаження, накопичувачі енергії та генератори електроенергії. На цьому рівні є чотири типи послуг, а саме обслуговування навантаження, обслуговування зберігання, обслуговування генератора та обслуговування Microgrid: обслуговування навантаження, служба зберігання, обслуговування генератора, служба Microgrid.

Рівень контролю координації. Це середній рівень, який відповідає за підтримку обмежень на рівні мережі, таких як обмеження напруги та вимоги до підстанції. На цьому рівні існує лише одна служба, а саме координаційна служба. В основному існує дві функціональні можливості цієї служби:

- перевірка доцільності кожної торгової дії, визначеної службами верхнього рівня інтелектуальної мережі, до того, як дії будуть реалізовані сервісами рівня Microgrid;
- відповідальність за ізоляцію Microgrid (спрямовування Microgrid в острівний режим, або допомагати Microgrid відновитися з острівного режиму).

Рівень Smart Grid. Це найвищий рівень і відповідає за торгівлю між Microgrid на рівні Smart Grid. Існує дві послуги, а саме: комунальні послуги та послуги торгівлі:

- комунальні служби: ця послуга представляє комунальне підприємство, яке може безперервно постачати електроенергію, але за набагато вищою ціною в порівнянні з електроенергією від Microgrid;
- торгова служба: ця служба відповідає за узгодження потреб в електроенергії з джерелами живлення в Microgrid. Служба Microgrid може підписатися на послугу торгівлі в інтелектуальній мережі; однак, необхідно, щоб служба Microgrid також підписалася на службу координації, пов'язану з цією торговою послугою (гарантування, що всі послуги Microgrid, які підписані на торговий сервіс, дотримуються правил координації, встановлених зазначеною Smart Grid).

Метод торгівлі може бути одним із трьох, які зазвичай зустрічаються в сучасній системі: узгодження, торги чи оптимізація.

Запропонована SGaaS була розроблена як SOA та реалізована за допомогою мультиагентної системи (MAS) [24].

Архітектура SGaaS на основі MAS складається з трьох рівнів, і кожен рівень містить одну або кілька служб, які складаються з кількох агентів. Агенти мають справу з різними подіями, такими як планування використання електроенергії в житлових приміщеннях і моніторинг стану заряду (SOC) пристроїв зберігання даних. На рівні Microgrid існує чотири види послуг, а саме: обслуговування навантаження, обслуговування зберігання, обслуговування генератора та обслуговування Microgrid. На рівні координаційного контролю діє єдина координаційна служба. На рівні Smart Grid існують два типи послуг,

а саме: комунальні послуги та послуги торгівлі.

1. Рівень Microgrid (MGL)

1) Обслуговування навантаження. Силові навантаження обслуговуються через служби навантаження. Кожне енергетичне навантаження, як-от промислове підприємство, частина Smart будинку або комерційне підприємство, має підписатися на послугу навантаження, щоб задовольнити свої вимоги до електроенергії. Служба навантаження складається з чотирьох агентів, включаючи прогнозування навантаження, збір навантаження, планування навантаження та агенти керування навантаженням.

2) Служба зберігання. Ця служба відповідає за моніторинг, планування, контроль та прогнозування потужності систем зберігання енергії. Служба складається з чотирьох агентів: агент моніторингу стану зберігання/розряду; агент планування зберігання (відповідає за планування використання батареї); агент керування сховищем (відповідає за контроль та керування батареями); агент прогнозування ємності зберігання (агент відповідає за прогнозування ємності батареї).

3) Обслуговування генератора. Генератори електроенергії, такі як PV, WT, FC та MT, обслуговуються службою генератора, яка включає збір інформації про виробництво електроенергії, прогнозування кількості електроенергії, яка буде вироблена в майбутніх часових інтервалах, а також планування та керування генераторами електроенергії.

Для реалізації послуги використовуються чотири агенти:

- агент збирання електроенергії (відповідає за збір і запис інформації про виробництво електроенергії);
- агент прогнозування потужності (відповідає за прогнозування майбутнього виробництва електроенергії);
- агент планування електроенергії (відповідає за коригування та планування обсягу виробництва електроенергії);
- агент контролю потужності (відповідає за контроль над джерелами живлення, якщо вони піддаються контролю).

4) Сервіс Microgrid. Служба Microgrid відповідає за торгівлю всередині Microgrid після отримання запитів на купівлю електроенергії від служб навантаження/зберігання та запитів на продаж електроенергії від служб генерування/акумуляції. Служба Microgrid складається з трьох агентів:

- агент по збору даних всередині Microgrid (агент відповідає за збір всієї інформації про навантаження, вироблення електроенергії та зберігання в Microgrid);
- агент з торгівлі всередині Microgrid (агент відповідає за здійснення торгівлі електроенергією в Microgrid між навантаженнями, генераторами та накопичувачами);
- агент конгломерації всередині Microgrid (відповідає за конгломерат даних двох або більше інших служб).

2. Рівень контролю координації (CCL)

На середньому рівні керування координацією нашої запропонованої архітектури єдина служба координації відповідає за підтримку обмежень на рівні мережі, таких як обмеження напруги та вимоги до підстанції, такі як обмеження розташування. Послуга включає двох агентів: координаційний агент з техніко-економічного обґрунтування та агент з режиму островкування Microgrid.

3. Рівень Smart Grid (SGL)

На найвищому рівні Smart Grid є дві послуги, а саме: комунальні послуги та послуги торгівлі. Комунальна служба складається з двох агентів, а торгова служба складається з п'яти агентів. Комунальна служба: агент динамічних цін на енергію; агент за контрактом (відповідає за укладання договору між розумною мережею та комунальним підприємством). Торгова служба: агент повідомлень про торгівлю між Microgrid; агент торговельного процесу між м Microgrid; агент міжмікромережевого аукціону; агент узгодження між Microgrid; агент оптимізації між Microgrid.

Таким чином, SGaaS, використовуючи сервісно-орієнтовану архітектуру (SOA) систем, забезпечує більшу гнучкість у проектуванні та розробці системи. Це також робить конструкцію системи більш надійною завдяки простоті відновлення функцій за допомогою повторної підписки на нові послуги або відновлення служб, які не вдалися. SGaaS можна реалізувати за допомогою найсучаснішої мультиагентної технології.

Microgrid як послуга

Microgrid as a Service (MaaS) – це послуга, яка пропонує розгортання Microgrid, зменшуючи початкову вартість інвестицій і складність [29]. Це хмарна платформа, яка включає в себе програмне забезпечення, дизайн та повний набір інструментів для фінансування. Ці послуги сприяють модернізації інфраструктури за рахунок виробництва енергії за доступних операцій та витрат на управління. Він широко знайшов своє застосування в моніторингу та контролі експлуатації, інженерії та проектуванні.

Ринок послуг Microgrid as a Service оцінювався в 1,87 млрд. дол. США в 2020 році і, за прогнозами, досягне 4,78 млрд. дол. до 2028 року, зростаючи на рівні 14,64% з 2021 по 2028 рік [30].

Донедавна формування бізнес-моделей для Microgrid була значною проблемою для багатьох організацій. Будівництво та розгортання вимагали дорогих капітальних витрат, які були передані платнику податків або податків, у випадку застосування комунальних послуг чи розгортання в державному секторі, або удару в прибуток для багатьох приватних установок. Однак поява нових механізмів фінансування зменшила бар'єри для широкого застосування Microgrid. Microgrid-as-a-Service (MaaS) – це новий провідний механізм фінансування, який дозволяє організаціям розгорнути Microgrid без будь-яких попередніх інвестицій [31, 32]. Ця модель фінансування дозволяє муніципальним, районним, інституційним, комерційним об'єктам і великим будівлям стабілізувати довгострокові витрати на енергію та модернізувати критичну енергетичну інфраструктуру без капітальних витрат. Для багатьох районів це означає, що електроенергія в Microgrid може бути менш витратною, ніж електроенергія місцевих енергопостачальних підприємств.

MaaS – це новий провідний механізм фінансування, який дозволяє організаціям розгорнути Microgrid без будь-яких попередніх інвестицій. Модель MaaS усуває фінансові ризики та складність функціонування та обслуговування. На додаток до надання апаратним і програмним забезпеченням, постачальники MaaS організують фінансування та укладання угоди про експлуатацію та обслуговування, щоб зробити розгортання Microgrid доступним рішенням «під ключ». MaaS допомагає вирішити проблеми, з якими стикаються багато систем енергозабезпечення, таких як: витрати на модернізацію інфраструктури; цілодобова стійка потужність для забезпечення цілісності експлуатації, особливо для критичних об'єктів громадської безпеки; передбачувані та хеджовані витрати на електроенергію протягом тривалого періоду часу; зменшення вартості енергії за рахунок монетизації пільг із податку на акціонерний капітал для державних та інших неприбуткових організацій.

Модель фінансування MaaS впроваджує інновації щодо розгортання Microgrid, що дозволяє комунальним підприємствам і кінцевим користувачам зосередитися на вирішенні важливих проблем, викликаних новим енергетичним ландшафтом: енергетична стійкість, модернізація інфраструктури, інтеграція ВДЕ та довгострокова стабільна вартість енергії. Завдяки інноваційним фінансовим моделям та доступу до доступної відновлюваної енергії споживачі енергії мають більше можливостей використовувати Microgrid для виробництва енергії та керування її споживанням шляхом активної участі на ринку. Механізми MaaS пропонують клієнтам більше контролю над їхніми енергетичними потребами, що дозволяє їм підвищити стійкість і надійність, збалансувати використання енергії, досягти цілей чистої енергії та досліджувати інші інноваційні продукти та послуги [33]. Коли вони впроваджуються електричними компаніями або в поєднанні з ними, вони можуть допомогти електричним компаніям підвищити стійкість усієї енергетичної мережі, забезпечуючи при цьому численні суспільні переваги, які виходять за межі користувачів Microgrid, до мережі та всіх клієнтів.

Завдяки різноманітним державним ініціативам у цьому сегменті очікується подальше зростання ринку. Наприклад, у січні 2020 року в рамках програми, що фінансується Міністерством економіки США, у поєднанні з одночасним проектуванням, Pacan Street розробила житлову Microgrid під назвою The Energy Switch. Програма була однорічним планом розвитку, який включав двомісячну демонстрацію, і вона закінчилася тим, що NREL провела перевірку продуктивності третьою стороною.

У квітні 2019 року Carlyle Group і Schneider Electric оголосили про розширення свого партнерства в першу чергу для розробки нових та інноваційних інфраструктурних проектів. Результатом співпраці Schneider Electric стане використання своїх можливостей удосконаленого підключення та аналізу в режимі реального часу до поточної та майбутньої інфраструктури Carlyle та інвестицій у Microgrid. Метою цього партнерства є розробка системи, здатної виконувати великі проекти, такі як проект модернізації аеропорту JFK, який передусім використовуватиме Microgrid для перетворення аеропорту на 100% відновлювану енергію, а також модульну рішення «Енергія як послуга» з підтримкою Microgrid для комерційних та промислових клієнтів.

Сьогодні клієнти Microgrid не хочуть купувати Microgrid, вони хочуть купувати енергетичні рішення [34]. Розробка Microgrid – це не стільки створення проектів, скільки вирішення проблем клієнтів і допомога їм зрозуміти, яке рішення необхідно. Розвиток Microgrid зводиться до того, щоб мати привабливий проект та оптимізувати капітальні витрати, маючи гнучкі, але стандартизовані моделі фінансування. Ми повинні забезпечити стандартизовані та масштабовані рішення, мати гнучкість, вбудовану в цю стандартизацію, оскільки потреби кожного клієнта різні, і важливо адаптувати об'єкт стандартизованим способом. Клієнти можуть навіть не знати, яка комбінація технологій підходить для їхніх цілей.

MaaS визначається перш за все як рішення, яке не вимагає авансового капіталу для споживача енергії, і яке зосереджено на результатах, таких як енергія на місці [32–34]. Щоб розробити нову платформу для вивчення моделі енергія як послуга, групи Siemens Smart Infrastructure and Financial Services створили нову компанію під назвою Calibrant Energy. Calibrant створюватиме енергетичні рішення на місці, які забезпечать швидку економію, впевненість витрат, стійкість і недороге розширення мережі.

Технології будуть включати сонячні, інтегровані рішення для сонячних батарей, гібридні системи, автономні батареї, Microgrid, комбіноване тепло та електроенергію, а також оновлення інфраструктури централізованого опалення та охолодження. Така платформа необхідна для того, щоб пропонувати масштабовані та повторювані рішення для кількох технологій, які є впорядкованими та послідовними для клієнтів та інвесторів.

МaaS за принципом вертикалі сегментується на державні та освітні, житлові та комерційні, промислові, військові та комунальні [35]. Серед цих сегментів очікується, що ринок промислової вертикалі зросте з найвищим CAGR протягом прогнозованого періоду. Нижчі витрати на енергію, більш надійне та якісне електропостачання, стійкість мережі, доступ до електроенергії, незалежність від палива – це деякі з переваг, які сприяли поширенню технології Microgrid у промисловій вертикалі. МaaS за типом послуги сегментується на інженерні та проектні послуги, програмне забезпечення як послугу, службу моніторингу та контролю та обслуговування та обслуговування. Очікується, що програмне забезпечення як послуга зростатиме найвищими темпами протягом прогнозованого періоду, а потім – обслуговування та обслуговування. Завдяки програмному забезпеченню як послуги власники Microgrid мають єдину точку відповідальності та зменшують ризик затримок і збоїв проекту. Це призводить до безпечнішої, надійнішої та більш економічної системи Microgrid. МaaS за типом мережі розділяються на типи: підключений до мережі, віддалений або острівний.

Важливою рушійною силою зростання глобального ринку МaaS є такі фактори, як краща якість надійного електропостачання, розумні витрати енергії та незалежність від палива [33–36]. Зростання конверсії МaaS у кількох галузях, таких як оборона, медицина та віддалені райони, є основним фактором, що стимулює зростання ринку. Крім того, величезні державні інвестиції у створення інфраструктури Microgrid є ще однією особливістю, що сприяє росту ринку.

Основними гравцями на ринку МaaS є ABB Ltd (Швеція), General Electric (США), Siemens AG (Німеччина), Eaton Corp. PLC (Ірландія), Schneider Electric SE (Франція), Duke Energy Corporation (США), Northern Power system Corp. (США), Exelon Corp. (США), NRG Energy, Inc. (США), Spirae, Inc. (США).

Ключові розробки. У березні 2021 року компанія HOMER Energy вдосконалила своє програмне забезпечення HOMER Pro, щоб працювати над потужністю та гнучкістю джерела сили та підштовхувати до ідеальної зміни енергії. Нова модифікація HOMER Pro допомогла інженерам-енергетикам у плануванні та вдосконаленні незручностей стійких перехресних енергетичних систем, включаючи системи накопичення енергії, орієнтовані на сонце, вітер та акумулятори (BESS). У січні 2020 року в рамках програми, що фінансується Міністерством економіки США, пов'язаної з одночасними планами, Pecos Street створила приватну Microgrid під назвою The Energy Switch. Програма була швидкоплинним, однорічним планом просування, який включав двомісячну виставку, і вона завершилася тим, що NREL очолив схвалення виконання стороннім.

У квітні 2019 року Rolls-Royce Power Systems оголосила, що буде співпрацювати з технологічною компанією ABB для вдосконалення технологій Microgrid і передової автоматизації. Обидві компанії мають на меті створити енергоефективне рішення для Microgrid для комерційних і промислових компаній. У квітні 2019 року Carlyle Group і Schneider Electric повідомили про вдосконалення своєї організації, в основному, для стимулювання нових та креативних рамкових проектів. Скоординовані зусилля дозволять Schneider Electric застосувати свої можливості в передовій доступності та безперервних знаннях для потоку та майбутніх підприємств Carlyle Foundation та Microgrid. У листопаді 2019 року Siemens і екологічно чистий енергетичний дизайнер juwi уклали стратегічне технологічне партнерство, щоб зосередитися на Microgrid у видобувному бізнесі. Обидві організації очікують впроваджувати та послідовно створювати прогресивні системи керування Microgrid, які забезпечать послідовну координацію сил від стабільного електропостачання до аварійних джерел живлення шахти. У вересні 2019 року Honeywell і NRStor C&I оголосили про запуск першого в своєму роді найбільшого в Північній Америці відправлення запасів енергії поза лічильником. Організації планують запропонувати клієнтам у США та Канаді недорогі, підтримувані та універсальні джерела живлення.

Висновки

1. Наведена характеристика EaaS як «пакетної» моделі обслуговування, в рамках якої клієнту надається апаратне і програмне забезпечення та енергетичні послуги, а рішення категорії EaaS включає в себе послуги з керування споживанням і підвищення енергоефективності, впровадження ВДЕ та інших децентралізованих джерел енергопостачання, а також оптимізувати баланс між попитом і пропозицією на ринку електроенергії.

2. Для оцінки особливостей застосування EaaS до Microgrid детально розглянуто особливості побудови та функціонування Microgrid, а також представлено Smart Grid as a Service (SGaaS) на основі Сервісно-орієнтованої архітектури, де для ієрархічної архітектури SGaaS наведено перспективну тривірневу архітектуру, яка включає рівень інтелектуальної мережі для глобальної оптимізації, наприклад мінімізацію глобального захисту або глобальних витрат, рівень координації контролю для підтримки

надійності та безпеки в Smart Grid та рівня Microgrid для моніторингу стану пристроїв кінцевого користувача.

3. Детально проаналізовано бізнес-модель Microgrid as a Service (MaaS), як послуги, яка пропонує розгортання Microgrid, зменшуючи початкову вартість інвестицій і складність, та показано, що MaaS – це новий провідний механізм фінансування, який дозволяє організаціям розгорнути Microgrid без будь-яких попередніх інвестицій, як рішення, яке не вимагає авансового капіталу для споживача енергії, і яке зосереджено на результатах, таких як енергія на місці. При цьому механізми MaaS пропонують клієнтам більший рівень контролю над їхніми енергетичними потребами, що дозволяє їм підвищити стійкість і надійність, збалансувати використання енергії, досягти цілей «чистої» енергії.

Список використаної літератури

1. Денисюк С.П. Енергетичний перехід – вимоги до якісних змін у розвитку енергетики // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2019. – № 1. – С.7–28.
2. Денисюк С. П., Соколовський П. В. Аналіз функціонування гнучкої генерації на етапі переходу до інтелектуальних мереж Smart Grid // Електрифікація транспорту. – 2018. – № 15. – С. 31–42.
3. Холкин Д.В., Чаусов И.С. Цифровой переход в энергетике России: в поисках смысла // Энергетическая политика. – Вып. 5, 2018. – С. 7–16.
4. Transactive Energy Models. – Business and regulatory models working group, NIST, 2016.
5. Navigant research «Transactive Energy Markets», Navigant, 2018
6. Navigant research «Energy Cloud 4.0: Capturing Value through Disruptive Energy Platforms», Navigant, 2018.
7. [https://tadviser.com/index.php/Article:The_Internet_of_energy_\(MicroGrid\)_the_Small-scale_distributed_power_generation](https://tadviser.com/index.php/Article:The_Internet_of_energy_(MicroGrid)_the_Small-scale_distributed_power_generation)
8. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/energy-resources/deloitte-uk-energy-as-a-service-report-2019.pdf>
9. <http://zserials.org/zarubezhnye/johan-falk.php>
10. <https://realto.io/energy-as-a-service-hub/the-evolution-of-energy-as-a-service/>
11. Milind J. Pati, Shalaka N. Chaphekar. Control of Microgrid: Literature Review // International Journal of Engineering Innovation & Research Volume 7, Issue 2. – P.145–151.
12. Mahamad Nabab Alam, Saikat Chakrabarti, Arindam Ghosh. Networked Microgrids: State-of-the-Art and Future Perspectives // IEEE Transactions on Industrial Informatics (Volume: 15, Issue: 3, March 2019). – P. 1238 – 1250.
13. 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.
14. Martin F., Sanchez-Mirallas A., Rivier M. A Literature Review of Microgrids: A functional layer based classification // Renewable and Sustainable Energy Reviews, September 2016.
15. [https://tadviser.com/index.php/Article:The_Internet_of_energy_\(MicroGrid\)_the_Small-scale_distributed_power_generation](https://tadviser.com/index.php/Article:The_Internet_of_energy_(MicroGrid)_the_Small-scale_distributed_power_generation)
16. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/microgrid-market>
17. Денисюк С.П., Бойко І.Ю. Підвищення енергоефективності microgrid з дизель-генераторами // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2021. – № 2. – С. 15–28.
18. Денисюк С.П., Коломійчук М.О. Оцінка фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2021. – № 3(65). – С.18–39.
19. Microgrid Analysis and Case Studies Report. – California Energy Commission, 2018
20. Phase I. Microgrid Cost Study: Data Collection and Analysis of Microgrid Costs in the United States. – National Renewable Energy Laboratory, 2018
21. The Advanced Microgrid. Integration and Interoperability. – SANDIA REPORT SAND, 2014–1535, March 2014.
22. <http://smartenergysummit.ru/novosti/microgrid>
23. EU – More Microgrids. Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids. – European Research Project.
24. <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/535308/>
25. Verschuere T., Haerick W., Mets K., Develder C., De Turck F., Pollet T. Architectures for smart end-user services in the power grid // Proceedings of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS '10), pp. 316–322, Osaka, Japan, April 2010.
26. Chen S., Lukkien J., L. Zhang L. Service-oriented advanced metering infrastructure for smart grids // Proceedings of the Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC '10), pp. 1–4, March 2010.

27. Pham H.Q., Santhanam G.R., McCalley J.D., Honavar V.G. BenSOA: a flexible service-oriented architecture for power system asset management // Proceedings of the 41st North American Power Symposium (NAPS '09), Starkville, Mass, USA, October 2009.

28. Enose N. A Unified management system for Smart Grid // Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies—India (ISGT India), pp. 328–333, December 2011.

29. <https://www.verifiedmarketresearch.com/download-sample/?rid=41394>

30. <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/microgrid-as-a-service-market/>

31. <https://microgridknowledge.com/microgrids-as-a-service/>

32. Microgrids-as-a-Service: Making Resilient, Efficient and Sustainable Energy a Reality August 23, 2017
By Schneider Electric

33. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/microgrid-as-a-service-market>

34. <https://www.veckta.com/2020/12/03/microgrid-financing-with-energy-as-a-service/>

35. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/microgrid-as-a-service-market-30653958.html>

36. <https://www.verifiedmarketresearch.com/ask-for-discount/?rid=41394>

**S. Denysiuk, Dr. Sc. Sciences, Prof., ORCID 0000-0002-6299-3680
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

H. Melnychuk, Ph.D., ORCID 0000-0002-8173-0472

Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine

I. Cherneshchuk, postgraduate, ORCID 0000-0001-6895-7843

V. Lysyi, postgraduate, ORCID 0000-0003-3714-7623

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
TECHNICAL AND ECONOMIC DEVELOPMENT MECHANISMS
OF LOCAL ENERGY SUPPLY SYSTEMS (MICROGRID)**

The business model of energy as a service (Energy-as-a-service, EaaS) is considered as a direction of development of the concept of 3D (Decarbonization, Decentralization, Digitalization) and the conceptual model of the Internet of energy. At the same time, EaaS is formed in the form of a "package" service model, in which the customer is provided with hardware and software and energy services. EaaS solutions should include consumption management and energy efficiency services, promote the introduction of renewable energy sources (RES) and other decentralized energy sources, and optimize the balance between supply and demand in the electricity market. EaaS is shown to be a broad term for service-driven business models with innovative potential to transform the energy industry

To assess the specifics of EaaS application to Microgrid, the construction and operation of Microgrid as a local power system or power supply system, which is a technological complex consisting of generation facilities (energy sources), energy flexibility sources and electricity consumers, which are collected under a single management ensuring the most efficient and consumer-friendly energy supply. It is determined that the technological guarantee of the efficiency of modern Microgrid is the ability to integrate and optimally combine different energy sources and flexibility, as well as the presence of a single control loop that allows the best use of these sources.

Smart Grid as a Service (SGaaS) based on Service-Oriented Architecture is presented. The SGaaS hierarchical architecture provides a promising three-tier architecture that includes an intelligent network level for global optimization, such as minimizing global protection or global costs, a level of coordination to maintain reliability and security in the Smart Grid, and a Microgrid level to monitor end-user device status.

The implementation of the EaaS and SGaaS mechanisms has stimulated the development of Microgrid as a Service (MaaS) - as a service that offers the deployment of Microgrid, reducing the initial cost of investment and complexity. MaaS has been identified as a new flagship funding mechanism that allows organizations to deploy Microgrid without any prior investment, as a solution that does not require advance capital for energy consumers and focuses on results such as on-site energy. MaaS mechanisms offer customers more control over their energy needs, enabling them to increase the sustainability and reliability of their energy supply, balance energy use, achieve clean energy goals and explore other innovative products and services.

Keywords: Microgrid, efficiency, business model energy as a service, Smart Grid as a service, service-oriented architecture, Microgrid as a service.

References

1. Denysiuk S. Energy transition – requirements for qualitative changes in energy development // Energy: Economics, Technology, Ecology. – 2019. – № 1. – P. 7–28.

2. Denysiuk S., Sokolovskiy P. Analysis of the functioning of flexible generation at the stage of transition to Smart Grid // Electrification of transport. – 2018. – № 15. – P. 31–42.

3. Kholkin D., Chausov I. Digital transition in Russia's energy sector: in search of meaning // Energy policy. – Issue. 5, 2018. – P. 7–16.
4. Transactive Energy Models. – Business and regulatory models working group, NIST, 2016.
5. Navigant research «Transactive Energy Markets», Navigant, 2018
6. Navigant research «Energy Cloud 4.0: Capturing Value through Disruptive Energy Platforms», Navigant, 2018.
7. [https://tadviser.com/index.php/Article:The_Internet_of_energy_\(MicroGrid\)_the_Small-scale_distributed_power_generation](https://tadviser.com/index.php/Article:The_Internet_of_energy_(MicroGrid)_the_Small-scale_distributed_power_generation)
8. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/energy-resources/deloitte-uk-energy-as-a-service-report-2019.pdf>
9. <http://zserials.org/zarubezhnye/johan-falk.php>
10. <https://realto.io/energy-as-a-service-hub/the-evolution-of-energy-as-a-service/>
11. Milind J. Pati, Shalaka N. Chaphekar. Control of Microgrid: Literature Review // International Journal of Engineering Innovation & Research Volume 7, Issue 2. – P.145–151.
12. Mahamad Nabab Alam, Saikat Chakrabarti, Arindam Ghosh. Networked Microgrids: State-of-the-Art and Future Perspectives // IEEE Transactions on Industrial Informatics (Volume: 15, Issue: 3, March 2019). – P. 1238 – 1250.
13. Denysiuk S., Dereviyanko D., Beloha G. Improving the quality of electricity supply in the Energy Smart Community with sources of dispersed generation // Bulletin of VPI. – 2021. – Issue 5. – P. 64–70.
14. Martin F., Sanchez-Mirallas A., Rivier M. A Literature Review of Microgrids: A functional layer based classification // Renewable and Sustainable Energy Reviews, September 2016.
15. [https://tadviser.com/index.php/Article:The_Internet_of_energy_\(MicroGrid\)_the_Small-scale_distributed_power_generation](https://tadviser.com/index.php/Article:The_Internet_of_energy_(MicroGrid)_the_Small-scale_distributed_power_generation)
16. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/microgrid-market>
17. Denysiuk S., Boiko I. Increasing Microgrid energy efficiency with diesel generators // Energy: Economics, Technology, Ecology. – 2021. – № 2. – P. 15–28.
18. Denysiuk S., Kolomiichuk M. Evaluation of financial and technical performance of Microgrid in dynamic modes // Energy: Economics, Technology, Ecology. – 2021. – № 3(65). – P.18–39.
19. Microgrid Analysis and Case Studies Report. – California Energy Commission, 2018
20. Phase I. Microgrid Cost Study: Data Collection and Analysis of Microgrid Costs in the United States. – National Renewable Energy Laboratory, 2018
21. The Advanced Microgrid. Integration and Interoperability. – SANDIA REPORT SAND, 2014–1535, March 2014.
22. <http://smartenergysummit.ru/novosti/microgrid>
23. EU – More Microgrids. Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids. – European Research Project.
24. <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/535308/>
25. Verschueren T., Haerick W., Mets K., Develder C., De Turck F., Pollet T. Architectures for smart end-user services in the power grid // Proceedings of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS '10), pp. 316–322, Osaka, Japan, April 2010.
26. Chen S., Lukkien J., L. Zhang L. Service-oriented advanced metering infrastructure for smart grids // Proceedings of the Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC '10), pp. 1–4, March 2010.
27. Pham H.Q., Santhanam G.R., McCalley J.D., Honavar V.G. BenSOA: a flexible service-oriented architecture for power system asset management // Proceedings of the 41st North American Power Symposium (NAPS '09), Starkville, Mass, USA, October 2009.
28. Enose N. A Unified management system for Smart Grid // Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies—India (ISGT India), pp. 328–333, December 2011.
29. <https://www.verifiedmarketresearch.com/download-sample/?rid=41394>
30. <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/microgrid-as-a-service-market/>
31. <https://microgridknowledge.com/microgrids-as-a-service/>
32. Microgrids-as-a-Service: Making Resilient, Efficient and Sustainable Energy a Reality August 23, 2017 By Schneider Electric
33. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/microgrid-as-a-service-market>
34. <https://www.veckta.com/2020/12/03/microgrid-financing-with-energy-as-a-service/>
35. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/microgrid-as-a-service-market-30653958.html>
36. <https://www.verifiedmarketresearch.com/ask-for-discount/?rid=41394>

Надійшла 01.12.2021

Received 01.12.2021