

УДК 004.89;621.3;351/354;658

ISBN 978-966-554-358-9
<https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.17>



Центр безпекових досліджень
Center for Security Studies

НОВІТНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

Аналітична доповідь

Електронне наукове видання

За повного або часткового відтворення цієї публікації посилання на видання обов'язкове

О. М. Суходоля, завідувач відділу критичної інфраструктури, енергетичної та екологічної безпеки центру безпекових досліджень НІСД, д-р наук з держ. упр., професор

Новітні енергетичні технології та їх вплив на функціонування систем енергопостачання : аналіт. доп. / О. М. Суходоля. – Київ : НІСД, 2022. – 36 с. – <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.17>

Відповідальна за випуск *Т. В. Джига*
Редактор, коректор *Т. М. Філіпова*.

Виготовлювач
Національний інститут стратегічних досліджень,
вул. Пирогова, 7-а, м. Київ, 01030

Тел./факс: (044) 234-50-07; e-mail: info-niss@niss.gov.ua; <http://niss.gov.ua>

Київ 2022

© Національний інститут
стратегічних досліджень, 2022

ЗМІСТ

Вступ	3
1. Виклики існуючій моделі організації систем енергозабезпечення споживачів	5
2. Огляд новітніх енергетичних технологій	9
3. Зміни моделей організації взаємодії у системах енергозабезпечення	28
Висновки Вплив новітніх енергетичних технологій на функціонування системи електропостачання	35

ВСТУП

Енергетичні технології нового технологічного укладу є драйвером суттєвих структурних змін не тільки у системах та способах задоволення потреб споживачів в енергії, але й моделях економічного розвитку країн. Запровадження технології парового котла дозволило одержати як новий, більш ефективний спосіб отримання рушійної сили для промислового виробництва, трансформувати систему доставки вантажів (розвиток залізничного та морського транспорту), так і започаткувати процес глобалізації економічних стосунків, завдяки полегшенню поставок товарів по всьому світу.

Водночас, нові енергетичні технології створюють суттєві виклики для інфраструктурних систем, на яких базується поточний рівень технологічного та економічного укладу суспільств. Новітні технології потребують трансформації виробничих процесів, зміни звичної практики та моделей організації взаємовідносин між користувачами існуючої інфраструктури, що не завжди з готовністю сприймається суспільством. Процес упровадження нових технологій у базові інфраструктурні системи забезпечення життєдіяльності завжди потребує усвідомлення існуючих перешкод та цілеспрямованої політики.

Системи енергозабезпечення потреб країни нині перебувають на етапі переходу до використання нових енергетичних технологій. У країнах ЄС політика стимулювання зміни технологічної бази енергозабезпечення споживачів отримала назву політики «енергетичного переходу». Відмова від викопних видів палива, розширення використання відновлюваних джерел енергії, розвиток інтелектуальних мереж стали пріоритетом політики країн ЄС та акцентованого стимулювання впровадження таких технологій. Водночас, розвивається ціла низка й інших технологій, що зможуть конкурувати із такими нововведеннями або ж їх доповнювати. Технології штучного інтелекту та інноваційні цифрові бізнес-платформи у сфері енергетики не тільки компенсують недоліки відновлюваної енергетики в частині нестабільності режимів роботи, але й реалізують до цього часу не доступний потенціал управління режимами енерговикористання.

Україна також перебуває на порозі суттєвих технологічних змін в енергетиці. Це пов'язано не лише із проголошеними стратегічними пріоритетами руху до сталої та сприятливої до довкілля енергетики, але й масштабом руйнувань енергетичної інфраструктури внаслідок російської збройної агресії. У процесі післявоєнної відбудови, Україна зможе використати наявні новітні енергетичні технології як важелі структурної перебудови всієї економіки.

У доповіді дається огляд досягнутого прогресу у новітніх енергетичних технологіях з точки зору їх готовності до широкого використання на ринку. Проаналізовано вплив нових технологій на моделі функціонування енергетичних

систем, з огляду на українські реалії, та визначено пріоритетні напрями адаптації існуючих моделей регулювання діяльності суб'єктів системи електропостачання.

Аналітична доповідь стане в пригоді науковцям з точки зору пошуку розв'язання проблем, що виникають у зв'язку із розвитком нових енергетичних технологій, спеціалістам різних галузей національної економіки та персоналу підприємств, які визначають пріоритети розвитку підприємств, галузей економіки чи формують стратегії розвитку країни.

1. ВИКЛИКИ ІСНУЮЧІЙ МОДЕЛІ ОРГАНІЗАЦІЇ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПОЖИВАЧІВ

Існуючі системи енергозабезпечення, зокрема система електропостачання (Об'єднана енергетична система України), характеризуються централізованістю виробництва та однонаправленістю потоку енергії від великого виробника енергії до кінцевого споживача. Мережі передачі (магістральні лінії високої напруги; оператор – НЕК «Укренерго») та регіонального розподілу (розподільні лінії низької напруги; оператори – обленерго) розвивались відповідно до цього ж принципу. Наявну в Україні енергосистему розроблено для з'єднання відносно невеликої кількості великих електростанцій з великою кількістю споживачів.

При цьому особливістю функціонування такої енергосистеми є: нерівномірність графіків навантаження; технологічна відповідність структури генеруючих потужностей графіку навантаження, зокрема базових, напівпікових та пікових потужностей. Така нерівномірність потребує застосування окремих організаційно-технічних рішень для балансування попиту – пропозиції енергопостачання в режимі реального часу.

Нерівномірність споживання електроенергії протягом року зумовлюється змінами температури довкілля, і в загальному випадку її можна розділити на три характерні зони: зона інтенсивного обігріву (від -5°C до приблизно $+15^{\circ}\text{C}$), коли споживання енергії є найбільшим та практично лінійно залежить від температури повітря); зона комфорту (від $+15^{\circ}\text{C}$ до $+20^{\circ}\text{C}$), коли споживання є мінімальним; та зона інтенсивного охолодження (від $+20^{\circ}\text{C}$) – споживання енергії знову збільшується із зростанням температури повітря¹.

Нерівномірність споживання протягом тижня також зумовлена робочими днями, коли у понеділок – п'ятницю спостерігається максимальне споживання зі значною часткою промислового споживання. Водночас, у вихідні дні спостерігається знижений рівень споживання із високою часткою споживання населенням та комунально-побутових споживачів.

Нерівномірність профіля споживання у робочу добу зумовлюється також виробничими процесами, а також задоволенням потреб споживачів у період їх перебування у житлових помешканнях. У літній період денний пік навіть перевищує вечірній, що пояснюється зростанням потреб електроенергії на кондиціонування. При цьому відмінність між споживаною потужністю у пікові години у зимовий та літній період становить 5...6 МВт.

Така структура системи енергозабезпечення створювалася для роботи за принципово інших умов, аніж ті, в яких їй доводиться функціонувати сьогодні. Серед нових тенденцій, що впливають на функціонування систем

¹ НЕК «Укренерго». Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей (2018). URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/04/ZvitAdekvatnostiGenPotuzhnostej_31_03_2019.pdf

енергозабезпечення України сьогодні, є зміна структури споживання енергії, зокрема збільшення частки споживання побутовими та іншими непромисловими споживачами за відповідного зменшення частки решти груп споживачів (зокрема промисловості). Частка споживання промисловістю, у загальному обсязі споживання в Україні, має стійку тенденцію до зниження (для прикладу: у 2012 р. – 47 %, у 2017 р. – 43 %, у 2019 р. – 39 %), що зумовлюється падінням промислового виробництва, зокрема через руйнування промисловості внаслідок військових дій. У цей самий період частка споживання населенням зростає (у 2012 р. – 26,7 %, у 2017 р. – 29,5 %, у 2020 р. – 31,3 %), що зумовлено поступовим насиченням домогосподарств побутовими електричними приладами. Така зміна структури споживання призводить до подальшого збільшення нерівномірності графіка електричних навантажень та зменшення базового (постійного) навантаження.

Іншою тенденцією, що потребує реагування, є зростання частки «негарантованої» генеруючої потужності в енергосистемі, передусім вітрових та сонячних електростанцій (ВЕС та СЕС відповідно). Протягом останніх 20 років суттєвого розвитку набули відновлювані джерела енергії (ВДЕ). Станом на початок 2021 р., обсяг потужностей відновлюваної енергетики в Україні становив 7737 МВт². Швидке зростання частки відновлюваних джерел енергії, висока залежність від погодних умов, низька маневреність такого виду виробництва ускладнює процес прогнозування попиту та балансування роботи системи, створює труднощі у її сталій роботі. При цьому, енергетична стратегія України ставить за мету подальше зростання частки ВДЕ у структурі генерування електроенергії до рівня понад 11 % до 2035 р.

Сучасні умови диктують нові вимоги, за яких має бути забезпечена надійна та безпечна робота енергетичної системи України. Для цього щонайменше необхідне введення в експлуатацію високоманеврових потужностей з можливістю швидкого запуску (включення з нуля та вихід на номінальну потужність за 10–15 хвилин) та швидкодійних резервів на базі систем накопичення електричної енергії надаватимуть можливість забезпечити Об'єднану енергетичну систему (ОЕС) України необхідними резервами регулювання. Однак підвищення гнучкості енергосистеми у такий спосіб не вирішує проблеми тривалих профіцитів потужності, зокрема через сезонність навантаження. Її вирішення потребує впровадження систем перенесення потужності з періодів графіку електричного навантаження, де має місце профіцит енергії, до періодів, де наявний її дефіцит.

Ще однією важливою тенденцією, що формує майбутнє енергетики загалом, і систем енергозабезпечення зокрема, є розвиток цифрових технологій та їх застосування в енергетиці³. Автоматизація технологічних процесів, розвиток

² Про схвалення Стратегії енергетичної безпеки : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 4 серпня 2021 р. № 907-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/907-2021-%D1%80#Text>

³ Штучний інтелект в енергетиці: аналіт. доп. / Суходоля О. М. – К.: НІСД, 2022 р. 49 с. – <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.09>

розумних мереж (*Smart-Grids*), штучний інтелект (*Artificial intelligence*) дозволять ефективно керувати режимами постачання та споживання енергії. Цифровізація сприяє децентралізації системи енергозабезпечення та розширенню використання ВДЕ, підвищенню гнучкості реагування на потреби споживачів, суттєво впливає на функціонування існуючих централізованих систем енергозабезпечення.

Удосконалення технологій виробництва енергії на основі ВДЕ, поява стійкої тенденції до розширення частки ВДЕ в енергетичному балансі країни та зростаюча цифровізація в енергетиці потребуватимуть ухвалення стратегічних рішень щодо пріоритетів розвитку енергетики країни.

Збереження такої тенденції потребує передусім вирішення питання забезпечення балансу попиту та пропозиції енергії в системі у реальному часі. Зазначимо, що за існуючої структури системи електрозабезпечення та принципів її функціонування, завдання щодо «вирівнювання» графіків (балансування системи) покладалося на операторів системи (передачі та розподілу).

Водночас тенденції розвитку сучасних енергетичних технологій уможливають принципово інший підхід до організації процесу забезпечення потреб споживачів у енергії. Йдеться про перетворення «центральної та однонаправленої» системи на «децентралізовану та різнонаправлену» систему, де потоки енергії можуть здійснюватись у різних напрямках та обсягах.

Споживачі, постачальники енергії та виробники все частіше використовують розподілені, децентралізовані системи (DER – distributed energy resources)⁴ для доповнення або заміни енергії, що надається централізованою системою. Завдяки набору новітніх технологічних варіантів, управлінських рішень та політичних стимулів, наявності вибору постачальників у сфері технологій та послуг, роль децентралізованих систем, ймовірно, ще більше зростатиме у майбутньому.

Інтегрована децентралізована система енергозабезпечення складатиметься з більшої кількості учасників, з точки зору їх функціонального призначення (виробники, споживачі), матиме більше точок генерації та/або споживання. Відмінною характеристикою такої системи є різноспрямований потік як енергії, так і інформації (даних) між виробниками, постачальниками та споживачами, а також набір передових технологій розумної мережі (*Smart-Grid* та *AI алгоритми*), які забезпечать ефективне керування цими потоками.

Загалом такий різноспрямований потік енергії уможливорює отримання користі від використання технологій розподіленої генерації, особливо з огляду на акумулювання (накопичення) надлишкової енергії для вирівнювання графіка навантаження. Якщо ж урахувати існуючу тенденцію до зростання обсягів

⁴ Децентралізовані системи (DER) охоплюють локальні мережі, що можуть мати окрему систему управління виробництва та споживання, живляться невеликими генеруючими потужностями; невеликі генератори (на природному газі, біомасі чи інших видах палива), комбіновані тепло- та електростанції, накопичувачі електроенергії та сонячні фотоелектричні пристрої на дахах чи на окремих майданчиках окремих споживачів, вітрові електрогенератори тощо.

використання розумних енергоспоживальних пристроїв (побутова техніка, офісне обладнання, електромобілі тощо), то можливості щодо балансування виробництва та споживання електроенергії в системі суттєво зростають.

Таким чином, при проектуванні системи «майбутнього» (перспектива у 30–50 років), постає стратегічне завдання спроектувати такий набір технологічних рішень, який би забезпечував комплексний підхід щодо: задоволення потреб споживачів; забезпечення операційної надійності функціонування енергосистеми; відповідав вимогам «більшої системи» (вимоги економіки національної безпеки) та світовим трендам технологічного розвитку.

2. ОГЛЯД НОВІТНІХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Для цілей даного дослідження проаналізовано перспективні технології у системі електропостачання. Даний вибір здійснено на основі наступних міркувань: по-перше, система електропостачання є досить складна та суттєво взаємозв'язана з іншими сферами регулювання енергетичної безпеки, отже, подібний аналіз може застосовуватися до інших сфер управління; по-друге, система електропостачання нині є лідером щодо появи та практичного застосування новітніх технологічних рішень, тому такий аналіз виявить, як новітні технологічні рішення зумовлюють зміни організаційно-інституційної, функціональної структури.

Сьогодні у світі існує низка технологій, що уможливають вирішення проблеми забезпечення гнучкості (зокрема і балансування) енергосистеми й водночас поліпшують технічну можливість подальшої інтеграції ВДЕ до складу енергосистем. Розглянемо деякі з таких технологій.

- *Високоманеврова теплова генерація*, яка має швидкий запуск та широкі можливості регулювання потужності, а також пусків-зупинок упродовж доби, сезону, року;

- *системи накопичення електричної енергії (СНЕ)* для підтримання та регулювання частоти;

- *споживачі-регулятори* на основі технологій акумулювання теплової енергії;

- *малі модульні ядерні реактори (Small modular reactors – SMR)*;

- *технології утилізації профіцитів електричної енергії в енергосистемі («Power to X»)*, наприклад для використання при виробництві водню чи метану із застосуванням технології електролізу («Power to Gas»);

- *системи накопичення електричної енергії* для перенесення потужності з періодів, де наявний її профіцит, до періодів, де наявний її дефіцит («Power to Power»), які по суті є електроакумулюючими електростанціями (ГАЕС та ГЕС);

- *механічні накопичувачі електричної енергії*, які використовують сили гравітації, та низка інших методів накопичення енергії.

При цьому в багатьох випадках одні технологічні рішення (проекти) поєднуються з іншими у комплексну пропозицію як для споживачів, так і виробників енергії для зниження загальної вартості та витрат усіх учасників, підвищення рівня безпеки функціонування системи електропостачання.

Використання технології штучного інтелекту не лише розкриває нові можливості в організації процесу енергозабезпечення потреб споживачів, але й є ефективним інструментом задоволення сталого розвитку та операційної безпеки систем енергозабезпечення. Цифровізація та застосування технологій штучного інтелекту сприяє децентралізації системи енергозабезпечення й розширенню використання ВДЕ, підвищенню гнучкості реагування на зміну навантаження

в системі, створює можливість для кінцевих споживачів брати безпосередню участь у торгівлі електроенергією, що запроваджує нові бізнес моделі організації ринку електроенергії.

Розглянемо низку перспективних новітніх технології для систем електропостачання⁵, котрі вже перебувають на стадії комерційного впровадження, або їх розвиток отримає такий статус протягом найближчих десяти років. Технології узагальнено за категоріями.

Категорія технології: 1. Зберігання електроенергії (накопичувачі)

Технології зберігання електроенергії для інтеграції ВДЕ; надання допоміжних послуг; вирівнювання графіку виробництва / споживання та резервне живлення окремих споживачів (наприклад, центрів обробки даних).

Технологічні рішення. Насосні гідроакумулятори (ГАЕС) є найпоширенішою технологією зберігання на даний момент.

Технології зберігання енергії стисненого повітря – це коли навколишнє повітря, за допомогою тиску, утримують у підземних печерах. Електроенергія виробляється завдяки випуску повітря через турбогенератор. Компресорне акумулювання повітря (CAES – *Compressed air energy storage*) може досягти вищого ККД за рахунок рекуперації тепла стиснення.

Акумуляторні технології (батареї) суттєво відрізняються за дизайном та експлуатаційними характеристиками, але мають великі перспективи для збільшення використання, передусім у децентралізованих системах. Сьогодні ведуться дослідження з метою створення нових альтернатив літій-іонним батареям: поточні (flow batteries), натрієво-іонні і полівалентно-іонні батареї або конверсійні системи. Розвиваються також технології гравітаційних накопичувачів (табл. 1).

Таблиця 1

Перспективні новітні акумуляторні технології

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності ⁶								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Насосні гідроакумулятори (ГАЕС)	9									X
Накопичення стисненим повітрям	9									X
Системи стисненого повітря (CAES)	6–8				X					
Акумулятори: Літій-іонні	9									X

⁵ The Power of Change: Innovation for Development and Deployment of Increasingly Clean Electric Power Technologies. Washington, DC: *The National Academies Press*. 2016. 340 p. <https://doi.org/10.17226/21712>.

⁶ У таблиці градація рівнів технологічної готовності визначається діапазоном від 1 (початкова стадія дослідження / розробки) до 9 (рішення комерційно привабливе та використовується).

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Свинцево-кислотні	9							
Рідинно-протічні	9						X	X	X	X
Цинкові	6–9			X	X	X	X	X		
Водні гібридно-іонні	7–9							X		
Сольові	9								X	X
Рідкометалеві	6–8			X	X					

Загалом індустрія систем акумулювання енергії перетворюється із нішової галузі на активного гравця глобального ринку і одного з центральних драйверів енергетичного переходу. Цьому сприяє здешевлення і масштабування технологій акумулювання енергії⁷ у вигляді стаціонарних об'єктів великої ємності, що робить їх конкурентними із газопоршневими і газотурбінними електростанціями у періоди покриття пікових навантажень у мережі.

Паралельно зростає ринок систем акумулювання енергії невеликої ємності для приватних домогосподарств і невеликих промислових компаній, які переважно встановлюються за лічильником (behind-the-meter – BTM) і допомагають балансувати споживання домогосподарств у пікові та позапікові періоди.

Збільшується кількість комбінованих проєктів ВДЕ у поєднанні із системами акумулювання електроенергії. Якщо перші системи акумулювання були розраховані на роботу протягом 20–30 хв., то потужніші стаціонарні об'єкти, збудовані останніми роками, працюють близько 4 годин.

Американські компанії, які реалізували проєкти гібридних електростанцій (вітрових та сонячних плюс системи акумулювання), швидко розширюють перелік послуг, котрі вони готові надавати на ринку електроенергії, й збільшують прибутковість вкладених інвестицій⁸. Такі послуги охоплюють регулювання частоти, обмеження пікових навантажень, резервну потужність, управління навантаженням, реактивну потужність тощо. Сьогодні сукупні потужності таких гібридних електростанцій уже перевищують 2 ГВт, а протягом наступних трьох років законтрактовано їхнє зростання до більш ніж 8 ГВт.

Для прикладу, на одному з островів штату Гаваї (США) компанії AES Corp. та Kaua'i Island Utility Cooperative спорудили найбільшу в світі комбіновану електростанцію, яка складається з 28 МВт сонячних панелей та системи

⁷ За останні 8 років ціна на літій-іонні акумулятори знизилася на 80 %, очікується подальше її зниження через збільшення виробничих потужностей і технологічних досягнень.

⁸ Large battery systems are often paired with renewable energy power plants. URL: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=43775>

накопичення на 100 МВт-год⁹. Електростанція має високий рівень надійності електропостачання і забезпечує приблизно 11 % потреб у електроенергії острова Кауаї. AES став своєрідним лідером на ринку впровадження проєктів ВДЕ, а рішення СЕС + накопичувачі становлять половину від усіх проєктів AES Distributed Energy, що знаходяться у стадії впровадження (понад 400 МВт).

Компанія Shell Energy Europe Limited (SEEL) уклала довгостроковий контракт на придбання енергії / потужності від найбільшої в Європі системи накопичення енергії (СНЕ) потужністю у 100 МВт¹⁰. Дві батареї по 50 МВт дозволять SEEL та агрегатору з управління попитом Limejump, який належить Shell, оптимізувати використання відновлюваних джерел енергії у зазначеному регіоні.

Поєднання розумних лічильників із управлінням попитом, системами акумулювання і розподіленою генерацією формує новий дизайн енергетичного ринку – так звану енергетичну хмару (Energy Cloud, або ж virtual power plant (VPP)). Перші моделі таких ринків уже запроваджуються в окремих штатах США, Великобританії, Нідерландах і Німеччині. Компанія Tesla, з метою просування своїх накопичувачів Powerwall, приєдналася до віртуальної електростанції (VPP), оператором якої є компанія National Grid (Оператор системи передачі у США та Великобританії). Відтепер власники акумуляторів Powerwall¹¹ зможуть постачати надлишкову електроенергію у мережу й, таким чином, заробляти близько 1000 дол. США на рік. Tesla вже має подібний досвід продажу надлишкової електроенергії з акумуляторів Powerwall в Австралії. Клієнти National Grid у штаті Массачусетс або Род-Айленд тепер можуть зареєструвати свій акумулятор Powerwall у програмі – агрегатор Connected Solutions. Місцева енергетична компанія через віртуальну електростанцію (VPP) має доступ до наявних потужностей у Powerwall і зможе використовувати їх у разі необхідності.

У серпні швейцарська компанія Energy Vault залучила 100 млн дол. США інвестицій на будівництво перших гравітаційних накопичувачів енергії (EVx). Серед інвесторів SoftBank та Aramco. Першу установку вже почали будувати в США, а у 2022 р. передбачено будівництво в Європі, на Близькому Сході та в Австралії. Установка EVx є автоматичним баштовим краном з шістьма стрілами. Енергія запасується у процесі підняття на висоту 35-тонних блоків¹². Вдень та у вітряну погоду надлишок відновлюваної сонячної або вітряної енергії пускається на електромотори крана, які піднімають блоки на висоту. Їх спуск на землю під

⁹ AES and KIUC Inaugurate World's Largest PV Peaker Plant. URL: <https://www.tdworld.com/grid-innovations/generation-and-renewables/article/20972138/aes-and-kiuc-inaugurate-worlds-largest-pv-peaker-plant>

¹⁰ Shell Backs Europe's Biggest Battery in Support of Renewable Power. URL: <https://www.shell.com/business-customers/trading-and-supply/trading/shell-energy-europe/shell-energy-europe-news-and-media-releases/shell-backs-europe-biggest-battery-in-support-of-renewable-power.html>

¹¹ Tesla Powerwall owners can now earn up to \$1,000 per year with National Grid's virtual power plant. URL: <https://electrek.co/2019/06/21/tesla-powerwall-earn-national-grid-virtual-power-plant/>

¹² This tower is a massive battery and it's fueled by gravity. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=5ny6nsxqkvi>

дією гравітації запускає зворотний процес – вироблення електроенергії в електрогенераторах. Стверджується, що коефіцієнт корисної дії установки досягає 85 %. Відповідно до проєкту найбільш ефективна віддача максимальної потужності триває протягом 2–4 годин. Експлуатаційний ресурс EVx перевищує 35 років, а обслуговування кранами кількох майданчиків дозволяє масштабувати ємність, що запасасться, до кількох гігават-годин.

У подібних гравітаційних накопичувачах енергії використовують також рідини¹³ чи поплавці, заповнені повітрям, для занурення у воду¹⁴.

Категорія технологій: 2. Гідро- і морська гідрокінетична генерація

Технологічні рішення. Велика звичайна гідрогенерація з використанням потоку води великих річок є поширеною та розвиненою технологією. Перспектива використання потенціалу потоку малих річок також розширюватиметься швидкими темпами.

Інші гідрокінетичні енергетичні технології (МНК – *Marine and Hydrokinetic energy*) знаходяться на різних стадіях розвитку. Технології використання океанських течій перебувають на стадії підтвердження концепції й лабораторних демонстраційних етапів. Хвильові, припливні та океанічні теплові технології мають компоненти, досить розвинені для застосування, хоча жодна з них наразі не знайшла практичного масштабного застосування. Багато хвильових і припливних технологій ще знаходяться на етапі демонстраційних проєктів (табл. 2).

Таблиця 2

Перспективні новітні гідрокінетичні технології

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Традиційна гідро	9									X
Океанічна термальна	7–8					X				
Припливна	6–7					X				
Хвильова	7–8					X				
Океанічних течій	6–7				X	X				

Категорія технологій: 3. Удосконалена сонячна фотоелектрична (PV – панелі) технологія

¹³ Highview's liquid air energy storage (LAES) video animation. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=nl0wzd4euwu> ; Highview power storage: liquid air energy storage site visit. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=bj2jtm0ptww>

¹⁴ Underwater energy storage in Toronto. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=gicqwxbnv0> ; Underwater energy bags. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ktup6cavfgo>

Технологічні рішення. Триперехідні фотоелектричні (PV – *Photovoltaics*) пристрої дозволяють досягнути більшої ефективності (коефіцієнту перетворення) близько 43 % завдяки розвиненій технології виготовлення (найвища ефективність отримана з конструкціями на основі стеків епітаксціальних сполук III-V) (табл. 3).

Таблиця 3

Перспективні новітні фотоелектричні технології

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Удосконалена сонячна фотоелектрична	9					X	X			

Автомобілебудівні корпорації створюють спільні підприємства для розвитку електротранспорту та нових систем живлення автомобілів. Для прикладу, у 2019 р., Toyota Motor Corporation (Toyota) і Panasonic Corporation (Panasonic)¹⁵ уклали угоду про створення спільного підприємства для проведення досліджень, виробництва та реалізації систем накопичення (батареї) для електротранспорту.

Toyota також розвиває системи живлення автомобілів на сонячних батареях. Автомобіль складається з системи, яка заряджає акумулятор, коли автомобіль припаркований і коли він рухається¹⁶. Реалізуються також проекти, які сприятимуть створенню нового ринку сонячних панелей, зокрема у транспортному секторі, й віднайдуть нові вирішення проблем у енергетичній та екологічній сферах.

Китайська компанія Hanergy Glory оголосила про успішне тестування нової моделі електромобіля з тонкоплівковою сонячною електростанцією (SEC) на даху¹⁷. Електромобіль проїжджав близько 20 км щоденно протягом 30 днів без підзарядки. За твердженням розробників, автомобільна SEC здатна заряджатися навіть у хмарні дні. Електромобілі з даховими SEC вважають перспективним напрямом розвитку.

Французький уряд має намір прокласти 1000 км автомобільних доріг з фотоелектричним покриттям¹⁸. Протягом наступних 5 років Франція планує побудувати дороги з можливістю генерації за допомогою спеціального фотоелектричного покриття електроенергії, якої вистачатиме для споживання близько 5 млн або 8 % населення цієї країни. Варто зауважити, що подібна

¹⁵ Toyota and Panasonic Agree to Establish Joint Venture Related to Automotive Prismatic Batteries. URL: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/26302587.html>

¹⁶ Toyota to start public road trials of solar-powered cars. URL: <https://www.energylive.com/2019/07/05/toyota-to-start-public-road-trials-of-solar-powered-cars/>

¹⁷ Hanergy PV-Panel Electric Car Can Drive 20 km Daily for 30 Days. URL: <https://www.energytrend.com/news/20191009-15413.html>

¹⁸ France's solar road dream may be over after test fails. URL: <https://www.globalconstructionreview.com/frances-solar-road-dream-may-be-over-after-test-fails/>

ініціатива вже реалізовувалася в Нормандії, однак, у зв'язку із технічними прорахунками, проєкт зазнав невдачі.

Категорія технологій: 4. Удосконалена сонячна концентраційна технологія

Технологічні рішення. Концентрація сонячної енергії (CSP – *Concentrated solar power*) охоплює різноманітні конфігурації, зокрема з параболічними жолобами, геліостатами та лінійними системами відбивачів Френеля, розмір яких варіюється від кількох кіловат до 50 МВт і більше. Зрілість технологій також різна. Приблизно 4,8 ГВт параболічних технологій уже встановлено в усьому світі. Геліостати становлять близько 560 МВт встановленої потужності в усьому світі, тоді як лінійні системи Френеля – менше 50 МВт (табл. 4).

Таблиця 4

Перспективні новітні концентраційні сонячні технології

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Геліостатична	9							X	X	
Лінійні рефлектори	7–8						X	X		
Параболічні	9									X

Категорія технологій: 5. Удосконалені технології сонячного опалення

Технологічні рішення: Сонячне теплове опалення (CST – *concentrated solar thermal*) застосовується переважно у домогосподарствах для виробництва гарячої води, опалення приміщень і підігріву басейнів. Такі технології широко використовуються і мають значний потенціал для поширення (табл. 5).

Таблиця 5

Перспективні новітні технології сонячного опалення

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Традиційне (дешево) сонячне опалення будинків	8					X				
Сонячне опалення для промислових процесів	8						X			
Для підігріву води та опалення будинків (фотоелектрична комбінована)	8							X		
Для підігріву води для басейнів	9									X

Категорія технологій: 6. Удосконалені технології використання біомаси

Технологічні рішення. Виробництво енергії з біомаси, яку часто називають біоенергією, здійснюється з використанням таких джерел біомаси як трава, солома, лісова продукція, енергетичні культури тощо. Процеси попередньої обробки усувають шкідливі компоненти з біомаси, збільшують щільність її енергії. Завдяки цьому біомаса стає більш придатною для використання у процесі безпосереднього спалювання, або в суміші з іншим паливом. Сьогодні деревина є найпоширенішим біоенергетичним паливом для використання (табл. 6).

Таблиця 6

Перспективні новітні технології використання біомаси

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вилужнювання	8				X					
Піроліз	8					X				
Пряме спалювання	9								X	X
Спалювання сумішей	9									X

Категорія технологій: 7. Удосконалені геотермальні системи

Технологічні рішення. Традиційні геотермальні технології засновано на використанні тільки гарячих рідин із земної кори. Нова геотермальна циркуляційна система (HDR – *Hot dry rock*) є технологією вилучення теплової енергії з надр землі за допомогою примусової циркуляції теплоносія крізь товщу гарячої породи. Система HDR складається з резервуара теплоносія під високим тиском, свердловин, пробурених з поверхні, та наземних pomp для ін'єкцій рідин у теплі, але сухі товщі земної кори. Рідина (вода або надкритичний вуглекислий газ (CO₂), введені з поверхні під високим тиском) відкриває вже існуючі пори і тріщини в гірській породі та поглинає теплову енергію з високотемпературних поверхонь гірських порід. Нагріта рідина є носієм для транспортування тепла до поверхні й практичного використання. Технологія корисного застосування наявних сухих свердловин (Margin Stimulation) дозволяє вжити наявний потенціал утворених каналів / тунелів у процесі гірських розробок (розвідка корисних копалин, їх видобування тощо), що не використовувались у подальшому (вважались аварійними, неприбутковими), але містять потенціал тепла (табл. 7).

Перспективні удосконалені геотермальні системи

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hot dry Rock	7–8			X	X					
Margin Stimulation	9						X			

Категорія технологій: 8. Передові технології вітрових турбін

Технологічні рішення. Вітрогенератори оновлених технологій – це удосконалені прямопривідні генератори з постійними магнітами (ADDPMGs – *advanced direct-drive permanent magnet generators*), високотемпературні надпровідні генератори (HTSCGs – *high-temperature superconducting generators*) і надпровідні генератори кімнатної температури (RTSCGs – *room-temperature superconducting generators*). Їх розвиток може зменшити вартість генерації електроенергії, збільшити коефіцієнт використання потужності, знизити вагу генератора, а також забезпечити подальший розвиток технологій потужних вітрових платформ (у діапазоні 10–15 МВт), особливо для використання на морі (табл. 8).

Перспективні новітні технології вітрових турбін

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ADDPMGs	8					X	X			
HTSCGs	8					X	X			
RTSCGs	7		X							

Категорія технологій: 9. Передові технології уловлювання, транспортування та зберігання вуглецю

Технологічні рішення. Хоча наразі такі технології не є конкурентоспроможними за ціною, уловлювання і захоронення CO₂ може допомогти зберегти використання електростанцій на викопному паливі навіть в умовах жорсткого регулювання в рамках кліматичної політики країн. Сучасні технології наразі використовують утричі більше енергії, ніж теоретично обґрунтована мінімальна величина для уловлювання, стиснення та зберігання CO₂. Виконуються дослідження щодо істотного поліпшення таких технологій. Водночас технології транспортування CO₂ є досить зрілими: наприклад, у США існує 50 окремих трубопроводів протяжністю понад 4500 миль (табл. 9).

Перспективні новітні технології інтеграції систем розподілених ресурсів

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Уловлювання	9							X	X	
Транспортування	9									X
Зберігання	9							X	X	

Категорія технологій: 10. Удосконалені технології газових електростанцій та комбінованого виробництва електроенергії й тепла (ТЕЦ)

Технологічні рішення. Новітні технології використання природного газу для виробництва електроенергії на основі циклу Аллама (*Allam Cycle*) могли б забезпечити тепловий ККД понад 50 %. Комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (ТЕЦ) користується попитом у промислових компаній та в системах централізованого теплозабезпечення міст, тобто у споживачів, де є значний попит на теплову енергію (пару або гарячу воду). Нинішні установки майже повсюдно великі й розроблені на замовлення. Сьогодні розвиваються модульні системи «підключи і працюй» для комбінованого виробництва і споживачів з меншими потребами (табл. 10).

Таблиця 10

Перспективні новітні технології газових електростанцій та комбінованого виробництва електроенергії й тепла

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Удосконалена технологія газової генерації	9								X	X
Комбіноване виробництво електроенергії й тепла	9				X	X	X	X	X	X

Прикладом упровадження нових технологій є проект компанії NET Power, реалізований у США у 2017 р. У рамках проекту було збудовано ТЕС потужністю 50 МВт на основі використання природного газу за циклом Аллама¹⁹. Цикл Аллама передбачає повторне використання вихідних газів від первинного спалювання природного газу в камері згоряння з чистим киснем під високим тиском. Вихідний газ CO₂ по замкнутому контуру рухається через спеціальну турбіну і повертається в

¹⁹ В США запустили першу в мире ТЭС, работающую на основе цикла Аллама. URL: https://elektrovesti.net/51936_v-ssha-zapustili-pervuyu-v-mire-tes-rabotayushchuyu-na-osnove-tsikla-allama

зворотний процес. Система має КПД 58,9 % і високу ступінь уловлювання CO₂ – майже 100 %. Тобто цикл Аллама дозволяє виробляти електроенергію без викидів парникових газів у навколишнє середовище. Експериментальну ТЕС з використанням природного газу за циклом Аллама побудовано американською компанією спільно з Exelon Generation, CB&I та 8 Rivers Capital.

Категорія технологій: 11. Удосконалені технології водопостачання та відведення води

Технологічні рішення. Технології забору води та очищення стічних вод є важливими факторами у будівництві та експлуатації електростанцій.

Звичайні процеси для отримання опрісненої (та деіонізованої) води складаються зі зворотного осмосу, багатоступеневої дистиляції та багаторазового опріснення. Зворотний осмос використовує мембрани для отримання чистої води з солоної у спосіб застосування тиску вище осмотичного. Багатоступенева дистиляція та опріснення передбачають термічне випаровування води. При мембранній дистиляції нагрітий водний розчин проходить через гідрофобну мембрану, частково перетворюється на водяну пару і збирається у вигляді чистої води. Електродіаліз транспортує іони солі через іонообмінні мембрани під впливом прикладеної різниці електричних потенціалів, а прямий осмос – це осмотичний процес, в якому напівпроникна мембрана відокремлюється від розчинених речовин під градієнтом осмотичного тиску (табл. 11).

Таблиця 11

Перспективні новітні технології водопостачання та відведення води

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Зворотний осмос	9									X
Багатоступенева дистиляція	9									X
Багаторазове опріснення	9									X
Мембранна дистиляція	9				X	X				
Електродіаліз	9				X					
Прямий осмос	9				X	X				

Категорія технологій: 12. Удосконалені технології реакторів атомних електростанцій

Технологічні рішення: Удосконалені конструкції реакторів атомних електростанцій (ANR – *Advanced Nuclear Reactors*) призначені для збільшення запасу безпеки, скорочення витрат і подовження терміну експлуатації ядерних блоків. На стадії розробки перебуває велика кількість систем, зокрема таких, які

для охолодження замість води використовують газ, розплавлені солі або рідкі метали. Поточний рівень розробок знаходиться на різних рівнях технологічної готовності (1-9 за шкалою технологічної готовності). Передбачається поступове зростання готовності технологій до використання²⁰.

Китай розвиває технологію торієвого ядерного реактора²¹. Якщо експеримент виявиться успішним, Китай зможе комерціалізувати зазначену технологію й використовувати торій як паливо. Дослідницький рідкосольовий реактор вироблятиме лише 2 МВт теплової енергії (електричної – ще менше), але він стане чи не першим випробувальним.

Реактор увели в експлуатацію у вересні 2021 р., нині він працює у тестовому режимі. Рідкосольовий торієвий реактор не потребує циклу завантаження та зміни палива. Паливо у вигляді торію та невеликої частки урану завантажується безпосередньо в розплав, автоматично подається в зону реактора та виводиться з нього. Розплав солей за температури близько +450° циркулює через реактор і не містить у собі небезпеки вибуху при розгерметизації, оскільки тиск у цьому контурі набагато менший, ніж у звичайних водяних контурах сучасних атомних реакторів. Якщо технологія себе виправдає, у Китаї до 2030 р. збудують торієвий реактор потужністю 373 МВт.

США також розвивають нові ядерні технології з використанням торію. Так, ґрунтуючись на досвіді Oak Ridge National Laboratory, в США розпочато будівництво нового прототипу модульного ядерного реактора²². ThorCon – реактор на основі рідкого розплавленого сольового палива з вмістом торію та урану. Прогнозується, що прототип такого реактора побудують упродовж найближчих чотирьох років, він матиме модульну структуру потужністю близько 250 МВт.

Торію на Землі набагато більше, ніж урану. Через 100–150 років урану майже не залишиться, а торію буде дуже багато.

Категорія технології: 13. Малі модульні ядерні реактори

Технологічні рішення. Малі модульні реактори (SMR – *Small modular reactors*) є технологіями атомної генерації з потужністю блоків менше 300 МВт порівняно з базовими блоками потужністю понад 1000 МВт. Поточний рівень розробок перебуває на різних рівнях технологічної готовності (1–9 за шкалою технологічної готовності). Передбачається поступове зростання готовності технологій до використання²³.

²⁰ The Power of Change: Innovation for Development and Deployment of Increasingly Clean Electric Power Technologies. Washington, DC: The National Academies Press. 2016. 340 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/21712>

²¹ China prepares to test thorium-fuelled nuclear reactor. URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-021-02459-w>

²² ThorCon Advanced Nuclear Reactor – More Than Worth Its Weight In Salt. URL: <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2019/05/31/thorcon-advanced-nuclear-reactor-more-than-worth-its-weight-in-salt/?sh=38fbce717694>

²³ The Power of Change: Innovation for Development and Deployment of Increasingly Clean Electric Power Technologies. Washington, DC: The National Academies Press. 2016. 340 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/21712>

Останні кілька років у світі спостерігається тенденція з розробки, випробувань і ліцензування малих ядерних реакторів. З цієї точки зору 2021 р. можна назвати в певному сенсі переломним. Найбільш інтенсивно процес розробки та випробувань SMR відбувається в США, де атомну енергію вважають важливою умовою декарбонізації промисловості та життєдіяльності людства. SMR-реактор Rolls-Royce займає 40 000 м² замість 400 000 м² для традиційної установки²⁴. Утримання мініреакторів більш ефективно та гнучке, їх не потрібно підключати до місцевої електромережі. Важливим кроком у цьому процесі виявився перехід від проектування невеликих реакторів потужністю 100-300 МВт до розробки малих реакторів потужністю близько 10 МВт. Такі реактори можна буде виготовляти на заводах як готовий до використання товар і перевозити в 12 метрових контейнерах.

Комісія з ядерного регулювання США дозволила американському стартапу NuScale побудувати в штаті Айдахо (США) випробувальну атомну електростанцію. Розроблений реактор NuScale має невеликі розміри і, як стверджують його творці, набагато безпечніший, ніж будь-які сучасні ядерні реактори²⁵. Він може перебувати в межах міста і живити його електроенергією, причому без втрат при передаванні енергії на багатокілометрові відстані лініями електропередач. Завдяки невеликим розмірам у реакторі перебуває зовсім небагато ядерного палива, яке легко контролювати. Потужність NuScale становить 60 МВт, що в десятки і сотні разів менше, ніж потужність атомних станцій. У разі необхідності число реакторів можна збільшувати, отримуючи в результаті необхідну кількість енергії.

Категорія технології: 14. Технології продовження терміну експлуатації діючих блоків

Технологічні рішення. Проводяться дослідження та розробляються технології продовження терміну експлуатації діючих блоків атомних електростанцій. Приділяється увага проблемам старіння та управління життєвим циклом, рішенням щодо реконструкції, модернізації та поліпшення продуктивності. Важливим питанням є розуміння поведінки матеріалів, що використовуються у конструкції блоків, зокрема їх деградація та старіння. Відпрацьоване паливо ядерних реакторів продовжує залишатися проблемою, хоча розвиваються технології та будуються централізовані сховища відпрацьованого ядерного палива.

Поточний рівень розробок знаходиться на різних рівнях технологічної готовності (1–9 за шкалою технологічної готовності). Передбачається поступове зростання готовності технологій до використання²⁶.

²⁴ Rolls-Royce small modular reactor. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=jk8kgidunpm>

²⁵ Voygr™ unveiled as NuScale's flagship SMR plant. URL: https://newsroom.nuscalepower.com/press-releases/news-details/2021/nuscale-power-unveils-name-of-flagship-smr-plants-as-the-company-approaches-commercialization/default.aspx?utm_source=nuscalepower&utm_medium=web&utm_campaign=default-hero-1 ; Nuscale test facility tours. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=brr5j50umya>

²⁶ The Power of Change: Innovation for Development and Deployment of Increasingly Clean Electric Power Technologies. Washington, DC: The National Academies Press. 2016. 340 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/21712>

Категорія технологій: 15. Передові високовольтні технології постійного струму

Технологічні рішення. Передові високовольтні технології постійного струму (HVDC – *Advanced High-Voltage Direct Current*) засновані на використанні двох типів перетворювачів – з комутацією лінії (LCC – *Line Commutated Converters*) та з джерелом напруги (VSC – *Voltage Sourced Converters*). LCC можуть працювати на надвисокій напрузі від 800 кВ до 1000 кВ і передавати потужність у діапазоні 6000-8000 МВт. VSC можуть працювати на рівнях напруги 320 кВ, потужності передачі – 1000-1200 МВт. Привабливість VSC безперервно збільшується, технологія має значний потенціал для застосування (табл. 12).

Таблиця 12

Перспективні високовольтні технології постійного струму

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035 рік	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
LCC	9							X		
VSC	9							X		

Категорія технологій: 16. Передові технології зниження втрат в мережах електропостачання

Технологічні рішення. Використання електричної енергії в усіх технологічних процесах, разом зі зниженням втрат електроенергії при передачі та розподіленні, суттєво знижує обсяги первинного використання енергетичних ресурсів та викидів парникових газів. Сьогодні тривають дослідження з метою скорочення використання електроенергії у виробництві та втрат під час доставки електроенергії.

Перспективною технологією є розвиток систем управління енергосистемою, допоміжних силових пристроїв, оптимізації потоків енергії. Основною перевагою так званих «бездротових альтернатив» (non-wireles alternatives) для операторів мереж є зменшення потреби у розбудові та вдосконаленні інфраструктури у відповідь на швидкі зміни у структурі генерації й споживання. Натомість оператори мереж зосереджуються на управлінні попитом у години з великими обсягами виробництва електроенергії на об'єктах ВДЕ та періоди пікового споживання завдяки придбання відповідних послуг гнучкості (у власників мікромереж та надавачів послуг з управління енерговикористанням).

Поточний рівень розробок перебуває на високому рівні технологічної готовності (9 за шкалою технологічної готовності)²⁷.

Категорія технологій: 17. Передові технології Smart-Grid (модернізація мережі)

Технологічні рішення. Технології Smart-Grid передбачають встановлення лічильників, приладів вимірювання та управління потоками потужності, джерел живлення, фазорів, зміну одиниць вимірювання та автоматизацію системи. Технології Smart-Grid забезпечують систематичні та надійні комунікації між постачальниками та користувачами, що уможлиблює встановлення ціни за час використання, скорочення / вирівнювання пікового навантаження, більш плавне реагування на попит і більше проникнення змінних джерел генерації й децентралізованих систем.

Успіх переходу до розумних систем електропостачання залежить від інтеграції передових інформаційно-комунікаційних технологій з роботою енергосистеми, що є основними ознаками сучасної енергосистеми. Саме сучасна розширена технологія вимірювання (AMI – *Advanced metering infrastructure* – розширена інфраструктура вимірювання) є однією з найважливіших новітніх технологій, котра суттєво змінює режими функціонування енергосистеми та впливає на планування розвитку енергосистем.

Програма інтелектуального вимірювання Великобританії є одним із найбільших проєктів цифрової інфраструктури у новітній історії. Як один з перших кроків розгортання розумних мереж енергетичні компанії встановлюють близько 6 млн розумних лічильників (*smart meters*). Оператори електроенергетичних мереж Великобританії оприлюднили дорожню карту для розумних мереж²⁸, котра допоможе забезпечити гнучкість, необхідну для декарбонізації енергетичної системи країни. Дорожня карта, опублікована Асоціацією енергетичних мереж (ENA), визначає шість кроків для надання послуг гнучкості та описує механізм управління ринком гнучкості.

Загалом, у світі спостерігається позитивна динаміка на застосування інтелектуальних систем управління енерговикористанням. Однією з важливих складових частин таких систем є застосування інтелектуальних датчиків (*Smart meters*), які, крім функції вимірювання, виконують статистичну обробку результатів, підтримують інтерфейсні функції тощо.

Найсучасніші AMI мають вбудований двосторонній зв'язок для передачі даних у реальному часі. Комунікація між розумними енергоспоживальними пристроями у домогосподарствах і промислових підприємствах та

²⁷ The Power of Change: Innovation for Development and Deployment of Increasingly Clean Electric Power Technologies. Washington, DC: The National Academies Press. 2016. 340 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/21712>

²⁸ Grid operators map Britain's smart energy transition. URL: <https://www.smart-energy.com/renewable-energy/grid-operators-map-britains-smart-energy-transition/>

постачальниками, врахування інформації про очікувані ціни на електроенергію оптимізують попит на енергію у реальному часі.

Прикладом практичної імплементації розумних технологій є проєкт компанії Resilience Energy з штату Вірджинія (США), яка розробила комплексну сервісну послугу для власників домашніх ВДЕ, автоматизує виробництво, управління і продаж електроенергії та готова постачати таку послугу за принципом франшизи Uber²⁹. Розробники мають на меті надавати послугу домогосподарствам, що забезпечить енергетичну самодостатність власників будинків та скоротить їхні рахунки за електроенергію на 80%. Також розробники зазначають, що клієнти зможуть продавати надлишок електроенергії на спотовому ринку та пропонувати додаткову ємність наявних акумуляторів для оператора системи передач (з метою забезпечення функції балансування нерівномірності виробництва-споживання електроенергії).

Поточний рівень розробок знаходиться на розвинених рівнях технологічної готовності (4–9 за шкалою технологічної готовності). Передбачається поступове зростання готовності технологій до 9 рівня³⁰.

Категорія технологій: 18. Збільшення передачі потужності в мережах

Технологічні рішення. Збільшення потоку електроенергії на існуючих та нових лініях електропередач сприятиме ширшому використанню відновлюваної енергії, підвищенню надійності, зменшенню викидів і витрат. Кілька варіантів технологій є комерційно доступними, хоча деякі з них потребують доопрацювання.

Поточний рівень розробок перебуває на розвинених рівнях технологічної готовності (3–9 за шкалою технологічної готовності)³¹. Передбачається поступове зростання готовності технологій до 9 рівня.

Категорія технологій: 19. Удосконалена силова електроніка для інтеграції децентралізованих систем

Технологічні рішення. Збільшення проникнення змінних розподілених енергетичних ресурсів (DER – *distributed energy resources*), особливо сонячних фотоелектричних систем у електромережі, створює проблеми інтеграції для системи та операційного персоналу. Перевищення напруги потоків реактивної енергії, застосування допоміжного обладнання для регулювання параметрів електроенергії в системі створює суттєве навантаження на роботу енергосистем та персоналу. Деякі з цих технічних проблем можна вирішити, використовуючи потенціал силової електроніки, зокрема застосування перетворювачів, що

²⁹ Renewable energy firm aims to become ‘Uber of electricity’. URL: <https://www.energylive.com/2019/01/15/renewable-energy-firm-aims-to-become-uber-of-electricity/>

³⁰ The Power of Change: Innovation for Development and Deployment of Increasingly Clean Electric Power Technologies. Washington, DC: The National Academies Press. 2016. 340 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/21712>

³¹ Там само.

сполучають такі джерела з мережею. Силова електроніка має функціональні можливості підтримки мережі, зокрема регулює реактивну потужність, напругу, частоту, знижує втрати у системі передачі та розподілу, поліпшує стабільність її роботи та, отже, підвищує швидкість впровадження технологій ВДЕ.

Поточний рівень розробок знаходиться на розвинених рівнях технологічної готовності (6–7 за шкалою технологічної готовності). Передбачається поступове зростання готовності технологій до 9 рівня³².

Прикладом застосування таких технологій є досвід компанії San Diego Gas & Electric³³, яка розпочала перетворювати власну централізовану систему електропостачання у сукупність мікромереж, котрі максимально орієнтовані на використання місцевої розподіленої генерації, систем акумуляування і управління попитом, метеорологічні станції та автоматичну систему управління, спроможну в режимі реального часу здійснювати балансування мережею і, у разі потреби, відключати обмежену кількість споживачів.

Територіальні громади та місцева влада також розглядають можливості для оптимізації енергоспоживання. Лондон запускає найбільший у світі проєкт vehicle-to-grid³⁴. Майже сто електробусів BYD ADL Enviro400EV, кожен з яких має залізно-фосфатну батарею на 382 кВт-год, візьмуть участь у пілотному проєкті, постачатимуть у мережу 1,1 МВт електроенергії у вигляді послуг з балансування.

Компанія Siemens розпочала тестування спеціального пристрою для обліку електроенергії, що споживається для зарядки електромобілів³⁵. Meter Integrated Charger (MIC) – вбудований зарядний пристрій лічильника – інтегрується у стандартні системи обліку з дистанційною передачею даних і визначає вартість зарядки електромобіля та сукупні витрати протягом визначеного періоду часу. Запровадження MIC оптимізує зарядку електротранспорту та змістить його на позапікові періоди доби, що розвантажить мережі й збереже значні фінансові ресурси споживачів. Siemens eMobility використовуватиме розетку лічильника такого типу, що практично є у кожному будинку, зі стандартною, комерційно доступною, зарядною станцією для електромобілів.

Категорія технологій: 20. Передові технології інтеграції розподілених ресурсів

³² Там само.

³³ Disruptors Wanted: PG&E Shows Why Infrastructure Innovation Is Imperative. URL: <https://www.forbes.com/sites/ellistalton/2019/10/16/disruptors-wanted-pge-shows-why-infrastructure-innovation-is-imperative/?sh=3d94c8ff1148>

³⁴ BYD electric buses used in 'world's largest vehicle-to-grid' project, in London. URL: <https://www.energy-storage.news/byd-electric-buses-used-in-worlds-largest-vehicle-to-grid-project-in-london/>

³⁵ Siemens to Test Solution for Measuring EV Charging Consumption in New York. URL: <https://www.tdworld.com/test-and-measurement/article/21139422/siemens-mobility-division-intelligent-traffic-systems-siemens-to-test-solution-for-measuring-ev-charging-consumption-in-new-york>

Технологічні рішення. Інтеграція великої кількості децентралізованих систем (DER) у мережу потребує нових інструментів і методів. Варто розуміти впливи DER на функціонування енергосистеми та її складових частин, планувати розвиток систем (з метою забезпечення їх спроможності сприймати значні обсяги негарантованої у часі генерації), розробити операційні інструменти, необхідні для управління такою генерацією (передусім вітрової та сонячної фотоелектричної енергії) (табл. 13).

Таблиця 13

Перспективні новітні технології інтеграції систем розподілених ресурсів

Категорії технологій	Перспективний рівень станом на 2035	Поточний рівень технологічної готовності								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
DER малої потужності	8–9						X	X		
DER великої потужності (понад 50 МВт) для ВДЕ	9								X	X

Одним із найбільш несподіваних факторів, що зумовлює зростання інтересу до децентралізованих систем є зміни клімату. Постійні зміни погодних умов, екстремальні погодні явища (лісові пожежі, урагани тощо) призводять до тривалих відключень електроенергії через пошкодження ліній електропередач чи порушення роботи великих генеруючих потужностей. Споживачі все частіше шукають «власні» рішення, поєднуючи власні джерела енергії із системами накопичення для вирівнювання графіків навантаження, фактично формуючи мікромережі зі складним апаратним та програмним забезпеченням, наданим такими компаніями, як Eaton, GE, Hitachi Energy, Schneider Electric та Siemens Energy та іншими.

В окремих регіонах комплекси автономного енергопостачання є фактично безальтернативним напрямом формування системи електрозабезпечення, враховуючи розвиток енергетичних технологій та зміну економічних моделей організації роботи енергетичних ринків (лібералізація та децентралізація). Зокрема це стосується віддалених регіонів, малих об'ємів споживання енергії та недостатнього поточного розвитку централізованих систем електрозабезпечення. Енергетичні компанії, які пропонують комплекси автономного енергопостачання, є лідерами за обсягами зростання і залучення інвестиційних ресурсів³⁶. Так, британська компанія ВВОХХ отримала 50 млн дол. США від Mitsubishi на розвиток бізнесу в Африці та Азії й сьогодні забезпечує енергопостачання близько 1 млн споживачів за допомогою понад 200 тис. комплексів, які надаються за принципом «оплата спожитої електроенергії».

³⁶ Mitsubishi Leads \$50 Million Investment In Off-Grid Utility BBOXX. URL: <https://www.forbes.com/sites/johnparnell/2019/08/28/mitsubishi-leads-50-million-investment-in-off-grid-utility-bboxx/?sh=6295ce996777#205045336777>

Електротехнічна компанія Schneider Electric та інвестиційна компанія Huck Capital створили спільне підприємство 5D Energy, яке займатиметься постачанням комплексного енергозабезпечення за принципом «енергія як послуга»³⁷. Технологічною базою стане модульна мікромережа, яку підприємство зможе пропонувати за визначену в довгостроковому контракті абонентську плату зацікавленим сторонам. Максимальна потужність такої мікромережі може досягати 5 МВт, технічно вона може бути розміщена на об'єктах замовника. Такі системи дозволяють легко створити локальну мережу виробників електроенергії з ВДЕ і забезпечити її ефективну взаємодію як з споживачами, так і з ринком електроенергії в цілому, а також пропонувати для споживачів можливості заробляти на ринках допоміжних послуг, управління гнучкістю попиту, ринку потужності тощо.

Загалом, потужність мікромереж продовжує швидко зростати по всьому світу, що свідчить про попит на системи децентралізованого енергозабезпечення. У 2019 р. загальна їх потужність уже сягала 20 ГВт. Такі дані наводить дослідження американської дослідної платформи Navigant Research, яке виявило 2258 одиниць мікромереж загальною потужністю 19 575 МВт по всьому світу, переважно в Північній Америці, Азії та Африці³⁸. До кінця 2025 р., передбачається, що потужність подібних систем у світі зросте до 400 ГВт³⁹.

Категорія технологій: 21. Технології використання електроенергії в будівлях і промисловості

Технологічні рішення. З'являються технології, що підвищують ефективність використання електроенергії в будівлях і промисловості. Йдеться про опалення, вентиляцію та кондиціонування повітря (HVAC – *heating, ventilation, and air conditioning*). Технології системи HVAC зі змінною швидкістю використовуються для підігріву води, освітлення, у роботі теплових pomp, водонагрівачів; розумних термостатів і навіть у промислових процесах.

Поточний рівень розробок перебуває на різних рівнях технологічної готовності (1-9 за шкалою технологічної готовності). Передбачається поступове зростання готовності технологій до використання⁴⁰.

³⁷ Schneider Electric and Huck Capital Launch 'Energy-as-a-Service' Microgrids for the Mass Market. URL: https://www.greentechmedia.com/articles/read/schneider-electrics-energy-as-a-service-to-bring-modular-microgrids-to-mass-markets?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+greentechmedia%2Fnews+%28Greentech+Media%3A+News%29

³⁸ Navigant Research Identifies 2,258 Microgrid Projects, Representing Nearly 20 GW of Capacity. URL: <https://www.navigantresearch.com/news-and-views/navigant-research-identifies-2258-microgrid-projects-representing-nearly-20-gw-of-capacity>

³⁹ Virtual Power Plant – for distributed energy sources. URL: <https://www.tdworld.com/distributed-energy-resources/article/21212528/virtual-power-plants-some-assembly-required>

⁴⁰ The Power of Change: Innovation for Development and Deployment of Increasingly Clean Electric Power Technologies. Washington, DC: The National Academies Press. 2016. 340 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/21712>

3. ЗМІНИ МОДЕЛЕЙ ОРГАНІЗАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ У СИСТЕМАХ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Використання новітніх технологій спричинила зміни в організації функціонування систем енергозабезпечення (децентралізація виробництва, розподілення енергії та електрифікація різноманітних технологічних процесів).

Технології можуть підтримувати функціонування систем енергозабезпечення, з урахуванням існуючих тенденцій технологічного розвитку та трансформації моделей організації роботи енергетичних ринків кількома способами, а саме: ліпший моніторинг, досконаліші системні операції та контроль у реальному часі; впровадження нових моделей енергетичних ринків та бізнес-моделей тощо (табл. 14)⁴¹.

Таблиця 14

Технологічний розвиток та трансформація моделей організації роботи енергетичних ринків

Новітні технології	Бізнес-моделі	Дизайн ринку	Особливості роботи системного оператора
Перетворення відновлюваної енергії в інші форми енергії: у тепло (<i>power-to-heat</i>), у газ (<i>power-to-hydrogen / methane</i>) ⁴²	Агрегатори ⁴³ , наприклад віртуальні електростанції (<i>Virtual power plants – VPPs</i>)	Скорочення періодичності фіксації значень (<i>time granularity</i>) даних щодо трансакцій на ринку (деталізація даних у часі) ⁴⁴	Майбутня роль оператора системи розподілу
Перетворення відновлюваної енергії у «накопичену енергію» (<i>power-to-power</i>) для зміщення поточного профіциту енергії у період дефіциту енергії ⁴⁵	Пірингова торгівля (<i>peer-to-peer (P2P)</i>)	Збільшення деталізації даних у просторі (<i>space granularity</i>) щодо трансакцій на ринку ⁴⁶	Співпраця між операторами систем передачі та розподілу

⁴¹ Складено за: Innovation landscape for a renewable-powered future: solutions to integrate variable renewables. IRENA. 2019. p. 164. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Innovation_Landscape_2019_report.pdf

⁴² Your natural choice for hydrogen. URL: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>

⁴³ Посередники між малими гравцями та ринком, які дозволяють споживачам продавати свої керовані навантаження та електроенергію, яку вони генерують та/або накопичують у засобах накопичення.

⁴⁴ Ціни змінюються у часі (коливання добові, тижневі, сезонні, тривалі), чим частіше здійснюють вимірювання значень, тим точніше можна вираховувати вартість об'ємів передачі енергії та точність розрахунків.

⁴⁵ Для прикладу: технології стисненого газу, кінетичні акумулятори (гідро- та механічні).

⁴⁶ Ціни змінюються в залежності від місця виробництва / постачання (об'єми контрактів, об'єми ринків, відстань транспортування, спроможність мереж), чим більше / детальніше охоплення за географічним розміщенням та кількістю трансакцій, тим точніше можна вираховувати вартість об'ємів передачі енергії.

Новітні технології	Бізнес-моделі	Дизайн ринку	Особливості роботи системного оператора
Акумуляторні батареї ⁴⁷ на боці споживача (за лічильником)	Енергія як послуга (<i>Energy-as-a-service – EaaS</i>)	Інноваційні рішення ринку допоміжних послуг	Віртуальні повітряні лінії
Акумуляторні батареї промислового рівня	Моделі оплати у міру використання (<i>Pay-as-you-go - PAYG</i>)	Переформатування ринку потужності	Удосконалене прогнозування генерації ВДЕ
Розумні зарядки електромобіля	Моделі власності громад (енергетичні кооперативи)	Ринкова інтеграція децентралізованих енергетичних систем (<i>distributed energy resources</i>)	Інноваційна робота гідроакмулюючих насосних станцій
Розумне обладнання (<i>Internet of Things</i>)		Регіональні/ локальні ринки	Зміна пропускної спроможності ліній (<i>Dynamic line rating – DLR</i>)
ШІ та великі бази даних (<i>Artificial intelligence and big data</i> ⁴⁸)		Чистий розрахунок (<i>Net billing schemes</i>)	Віртуальні лінії передач (<i>Virtual power lines – VPLs</i>)
Блокчейн (<i>Blockchain</i>)		Багатозонні тарифи (<i>Time-of-use tariffs</i>)	
Мікромережі ВДЕ ⁴⁹			
Розумні мережі (<i>Smart Grids</i>)			

Водночас, нові моделі організації взаємовідносин між учасниками процесу енергозабезпечення та нові моделі організації взаєморозрахунків потребують готовності не тільки всієї сукупності технологічних елементів системи енергопостачання (наприклад, оснащення споживачів чи вузлів розподілу інтелектуальними лічильниками), але й готовності споживачів до використання нових можливостей.

Суб'єкти, долучені до функціонування енергосистем та постачання енергії, повинні володіти необхідним рівнем знань та навичок для впровадження нових технологій, моделей роботи енергетичних ринків, бізнес-моделей тощо.

⁴⁷ Energy Storage / IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-storage>

⁴⁸ Системи ШІ можуть змінювати власну поведінку без явного перепрограмування. Вони роблять це, збираючи та аналізуючи великі набори даних. Інтелектуальні інструменти допомагають керувати складними енергосистемами, отримуючи для цього необхідну інформацію, обробляючи великі бази даних. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_AI_Big_Data_2019.pdf

⁴⁹ Інтегрована енергетична інфраструктура, заснована на розподіленій генерації електроенергії (вітрова, сонячна, гідроенергія), формує локальні міні-мережі, потужність яких може варіюватися від кіловат (кВт) до понад 100 мегават (МВт). Хоча зазвичай такі міні-мережі автономні, вони можуть підключатися до основної мережі. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Renewable_mini-grids_2019.pdf

Розуміючи складності процесу впровадження нових технологій у повсякденну практику користувачів інфраструктурних систем, існуючих перешкод та потенційно тривалого терміну їх впровадження, спробуємо розкрити зміст та принципи роботи нових технологій.

Blockchain⁵⁰ (Блокчейн). Загалом Блокчейн є децентралізованим (розподіленим) публічним (відкритим) цифровим реєстром, який записує будь-які транзакції цінностей – гроші, товари, майно, робота, голоси тощо. Це також взаємопов'язаний і постійно розширюваний список записів, які надійно зберігаються в одноранговій мережі. Кожен учасник з доступом може одночасно переглядати інформацію без жодної точки збою, створюючи довіру до системи в цілому.

В енергетиці блокчейн – це базові цифрові платформи, завдяки яким будуються автоматичні, децентралізовані програми обліку⁵¹.

Таким чином, технологія blockchain дає можливість реалізувати розумні контракти (*Smart Contracts*, що виконуються автоматично за встановленим алгоритмом), які можна використовувати для фіксації операцій купівлі-продажу енергії багатьох учасників без посередника, для ліпшого керування енергосистемами та інтеграції більшої частки ВДЕ.

Virtual Power Plant (VPP) (Віртуальна електростанція) – хмарна розподілена електростанція, яка об'єднує потужності мережі децентралізованих, середніх енергоблоків, а також гнучких споживачів і систем зберігання електроенергії з метою збільшення її виробництва, а також торгівлі або продажу її на ринку електроенергії⁵².

Така система децентралізованих генеруючих потужностей лише віртуально пов'язана та керується єдиною централізованою системою управління. До системи входять виробники електроенергії (наприклад, вітряні, біогазові, сонячні, гідроелектростанції або ТЕЦ), споживачі електроенергії (просьюмери), накопичувачі електроенергії (акумулятори) або установки, що працюють за принципом перетворення «енергія в X» (наприклад, електроенергія-тепло та електроенергія-газ)⁵³.

Найбільші нинішні віртуальні електростанції вже перевищили сукупну потужність найбільших атомних електростанцій.

⁵⁰Building Block(chain)s or a Better Planet. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Building-Blockchains.pdf

⁵¹ Increased power sector complexity requires greater intelligence transparency and automation. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Landscape_Blockchain_2019.pdf

⁵² Aggregators. Innovation Landscape Brief. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Innovation_Aggregators_2019.PDF

⁵³ What is a Virtual Power Plant. URL: <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/what-is-a-virtual-power-plant>

Demand Side Management⁵⁴ (регулювання попиту) може бути використано у різний спосіб. Найчастіше послугу продають як гарантію «стабільності» графіку споживання. Її надають великі промислові компанії, які компенсують фактичну нерівномірність графіку регулюванням обладнання. Також послугу управління попитом пропонують постачальники енергії завдяки використанню механізмів (цінових стимулів) оптових ринків та ринків потужності, що застосовуються до споживачів, примушуючи їх змінювати обсяги споживання. Розширення використання механізмів регулювання попиту можна досягти у спосіб заохочення нових бізнес-моделей, котрі формуються завдяки уведенню цифрових технологій та встановлення стандартів керованості розумного обладнання та приладів.

Peer-to-Peer trading (P2P)⁵⁵ (Пірингова торгівля) – модель онлайн-торгівлі, де споживачі можуть торгувати електроенергією між собою без посередників за узгодженою ціною. Це модель, де споживачі-просьюмери можуть ділитися надлишками наявної / виробленої ними енергії з іншими споживачами в межах децентралізованої мережі, до якої вони належать, ще більше заохочуючи споживання та розгортання розподіленої відновлюваної генерації.

Energy-as-a-service (EaaS)⁵⁶ (Енергія як послуга) – бізнес-модель, за якої клієнти платять за енергетичні послуги без необхідності робити будь-які авансові капіталовкладення. Моделі EaaS зазвичай мають форму підписки на електричні пристрої, що належать сервісній компанії, або управління використанням енергії для надання бажаної енергетичної послуги.

Pay-as-you-go (PAYG)⁵⁷ (Модель оплати в міру використання) – хмарна модель оплати спожитої енергії, яка нараховує плату залежно від використання ресурсів, тобто, коли обчислюються тільки фактично необхідні ресурси. Така модель позбавляє клієнтів на ринках від тягаря повного відшкодування вартості інвестицій у генеруючі потужності наперед. Натомість право власності на енергогенеруюче обладнання (для освітлення чи приготування їжі) передається споживачеві з часом, за узгодженим планом періодичних фіксованих платежів.

⁵⁴ Digital Demand-Driven Electricity Networks Initiative – IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/demand-response> ; <https://www.iea.org/programmes/digital-demand-driven-electricity-networks-initiative>

⁵⁵ Malaysia's 1st Pilot Run of Peer-to-Peer (P2P) Energy Trading. URL: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Peer-to-peer_trading_2020.pdf

⁵⁶ Energy-as-a-Service: A Business Model for Expanding Deployment of Low-Carbon Technologies. URL: <https://www.rff.org/publications/issue-briefs/energy-service-business-model-expanding-deployment-low-carbon-technologies/>

⁵⁷ PAYG can provide affordable energy access from renewable sources to off-grid communities, using available technologies to facilitate payment by installments. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Pay-as-you-go_models_2020.pdf?la=en&hash=7A2E7A7FF8B5BAB7748670876667628A39DE40D5

Internet of Things (IoT)⁵⁸ (Розумне обладнання) – розумні пристрої, які відстежують, передають та інтерпретують інформацію з оточення в режимі реального часу. Інтернет речей (IoT) дає змогу збирати значущі дані та оптимізувати систему, уможлиблює створення розумних мереж (*Smart Grids*), оскільки поліпшує видимість енергосистем, що стають дедалі складнішими, децентралізованими та підвищують швидкість реагування на зміну режимів роботи пристроїв, підключених до мережі.

Smart Grids⁵⁹ (Розумні мережі) – електрична мережа, яка використовує цифрові та інші передові технології для моніторингу й керування постачанням електроенергії з усіх джерел для задоволення різноманітних потреб кінцевих споживачів електроенергії. Розумні мережі координують потреби та можливості всіх виробників електроенергії, операторів мереж, кінцевих користувачів та зацікавлених сторін ринку електроенергії, щоб забезпечити якомога ефективнішу роботу всіх складових частин системи, мінімізуючи витрати в мережі та вплив на навколишнє середовище, максимізуючи надійність, стійкість та стабільність системи.

Distributed Energy Resources (DER)⁶⁰ – (Розподілені енергетичні ресурси) – ресурси невеликі або середні за обсягом (об'ємом), які потенційно можуть надавати послуги енергосистемі, і безпосередньо підключені до місцевої розподільчої мережі або до мереж кінцевого споживача. DER складаються з розподіленої генерації (ВДЕ), накопичувачів енергії в кінцевого споживача (акумулятори за лічильником) і послуги регулювання навантаження (управління обсягами споживання), що реалізується реагуванням режимів роботи розумного обладнання, побутової техніки, використанням електромобілів з розумною зарядкою (ЕМ), систем опалення (теплові насоси, електричні котли, увімкнені за допомогою розумних лічильників та сервісів передачі даних) тощо.

Dynamic line rating (DLR)⁶¹ (Динамічний рейтинг ліній електропередач). DLR визначає фактичну (а не передбачувану) пропускну спроможність ліній передач з урахуванням реальних погодних умов (температура довкілля, сонячне опромінення, швидкість та напрям вітру, вологість тощо) у поєднанні з

⁵⁸ Smart devices monitor, communicate and interpret information from their surroundings in real time. The resulting Internet of Things (IoT) enables meaningful data gathering and system optimisation. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Internet_of_Things_2019

⁵⁹ Smart Grids: Infrastructure deep dive. Tracking report – September 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/smart-grids>

⁶⁰ Market Integration of Distributed Energy Resources. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Market_integration_distributed_system_2019.pdf?la=en&hash=2A67D3A224F1443D529935DF471D5EA1E23C774A

⁶¹ Dynamic Line Rating. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Dynamic_line_rating_2020.pdf?la=en&hash=A8129CE4C516895E7749FD495C32C8B818112D7C

моніторингом стану ліній у реальному часі. Технологія DLR зменшує перевантаження на лініях електропередач, оптимізує використання активів, підвищує ефективність і знижує витрати. Оператор мережі аналізує DLR постійно в режимі реального часу з метою мінімізації перевантажень у мережі⁶²:

Net billing schemes⁶³ (Чистий розрахунок) – система ціноутворення, спосіб стягнення плати, а також компенсації споживачам на основі фактичної ринкової вартості електроенергії, яка балансує те, що вони споживають, і те, що вони вливають у мережу.

Virtual power lines (VPLs)⁶⁴ (Віртуальні лінії передач). VPL забезпечують широкомасштабну інтеграцію сонячної та вітрової енергії без перевантаження мережі або перерозподілу, дозволяють уникнути великих інвестицій у розвиток мереж через приєднання ВДЕ. VPL складаються із систем накопичення енергії місцевої постачальної компанії, підключених до мережі в двох основних точках: одна – на боці пропозиції, що зберігає надлишки генерації з відновлюваних джерел, які не могли бути передані через перевантаження мережі; інша – на боці попиту, заряджається, коли дозволяє потужність мережі, а потім розряджається, коли це необхідно.

Time-of-use tariffs⁶⁵ (Багатозонні тарифи) – система тарифів, що змінюються в часі (в українській термінології – зонні тарифи), стимулюють коригування навантаження, чи то ручне, чи то автоматичне. Така система тарифів дає можливість клієнтам заощадити на витратах на енергію, одночасно приносячи користь системі.

Energy Storage⁶⁶ (Накопичувачі енергії, акумуляторні батареї) – технології, що можуть накопичувати надлишок енергії у мережі виробника в один момент часу та повертати її у мережу споживача в інший. Технології допомагають вирівнювати графік навантаження системи та створювати ліпші умови інтеграції ВДЕ в систему.

⁶² Динамический рейтинг линии: расширение пропускной способности сетей.

URL: <https://leg.co.ua/stati/dinamicheskiy-reyting-linii-rasshirenie-propusknoy-sposobnosti-setey.html>

⁶³ Net Billing Schemes. Incentivise prosumers to better interact with the grid. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Net_billing_2019.pdf?la=en&hash=DD239111CB0649A9A9018BAE77B9AC06B9EA0D25

⁶⁴ Virtual Power Lines. Storage systems used as VPLs. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Virtual_power_lines_2020.pdf?la=en&hash=C58043124D596D1CF75395066817C38B55AC1983

⁶⁵ Tariffs that change with time of use enable demand response. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Innovation_ToU_tariffs_2019.pdf?la=en&hash=36658ADA8AA98677888DB2C184D1EE6A048C7470

⁶⁶ Energy storage system for PV – Battery manufacturer's outlet. URL: <https://www.irena.org/costs/Power-Generation-Costs/Energy-Storage>

Сьогодні промислові стаціонарні батареї великої ємності використовуються великими підприємствами та розподільчими мережами для балансування попиту та пропозиції енергії. Батареї (у приміщеннях / на території споживача) підключаються за лічильником промислових або побутових споживачів, насамперед з метою економії коштів клієнтів та зменшення їх рахунків за електроенергію.

ВИСНОВКИ

Вплив новітніх енергетичних технологій на функціонування системи

Проаналізувавши відомі сьогодні напрацювання у сфері виробництва, передачі, розподілу та споживання електроенергії, зробимо висновок щодо перегляду базової вимоги до проектування та функціонування системи енергозабезпечення.

Загальний огляд енергетичних технологій дозволяє сформувавши загальне усвідомлення контексту майбутнього та можливу трансформацію взаємовідносин у системі енергозабезпечення споживачів:

- майбутня система енергозабезпечення кінцевих споживачів буде більш децентралізованою, порівняно з існуючою системою;
- джерела енергії (генеруючі потужності) матимуть меншу одиничну встановлену потужність та розміщуватимуться ближче до центрів споживання;
- сформується нова категорія учасників енергоринку – просьюмери⁶⁷, які заповнять значну частку ринку та потребуватимуть окремих механізмів взаємодії з іншими учасниками;
- вирівнюватимуться графіки навантажень за рахунок розвитку технологій управління енерговикористанням (збереження енергії, її акумулювання, зміщення піків / провалів енергії, сезонне переміщення потужності);
- зростатиме цифровізація управління енерговикористанням, що балансуватиме виробництво відповідно до споживання, зменшуватиме втрати при передачі, скорочуватиме потреби виробництва енергії;
- знижуватиметься завантаженість розподільчих мереж, що формуватиме готовність «віддалених» центрів споживання до утворення локальних децентралізованих центрів виробництва / споживання з метою зменшення втрат при розподілі енергії.

Новітні енергетичні технології, невідворотно сформуують і нові виклики функціонування систем енергозабезпечення. Для адекватного реагування на виклики необхідно буде вжити ряд технічних, організаційних та управлінських рішень від усіх учасників системи: оператора системи передачі, системи розподілу, споживача, виробника тощо.

Розглянемо трансформацію завдань та відповідальності учасників системи, відповідно до нових умов та можливостей, що зумовлюються використанням новітніх технологій:

- *оператор системи передачі* – забезпечення операційної безпеки функціонування енергосистеми, балансування виробництва – споживання, мінімально-необхідного рівня зв'язаності (мережі високої напруги) території

⁶⁷ Учасники ринку, які одночасно зможуть бути споживачами та виробниками енергії. За наявності надлишку доступної йому енергії просьюмер може спрямовувати надлишок назад у мережу для використання іншим споживачем в іншому місці системи.

країни для централізованого забезпечення надання життєво-важливих функцій та послуг, що визначають рівень національної безпеки, підтримання транскордонних перетоків;

– *оператор системи розподілу* – підвищення продуктивності та надійності системи, зокрема у місцевостях, де зростає частка децентралізованих систем, розвиток планів та ресурсно-технічних спроможностей забезпечення життєво-важливих функцій та послуг, що визначають на рівні регіонів;

– *децентралізовані системи, мікромережі, компанії-агрегатори, інтегровані рішення (віртуальні)* – забезпечення координації між споживачами, виробниками, просьюмерами, операторами систем передачі / розподілу та «власником» децентралізованої системи для взаємодії, обміну інформацією і розрахунків, підтримки надійної роботи системи;

– *«власник» децентралізованої системи* – реалізація заходів, які можуть бути використані на боці споживача (за лічильником), у спосіб встановлення технологій або заходів оперативного реагування для балансування виробництва та споживання.

– *оператори системи обміну інформацією та взаєморозрахунків* – взаємодія між учасниками системи відповідно до нових моделей ринку;

– *оператори сервісного обслуговування технологій, розробники та виробники енергетичних технологій, інвестори* – забезпечення розробки та маркетинг технологічних рішень, сервісна підтримка функціонування системи;

– *державні інституції та регулятори* – здійснюють заходи забезпечення безпеки та стійкості функціонування системи енергозабезпечення (для прикладу: стандарти операційної безпеки, кібербезпека, захист інформації).