

**ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РИНОК
СПОЛУЧЕНИХ ШТАТІВ АМЕРИКИ:
СТРУКТУРА, РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЕКОНОМІКА ГАЛУЗІ**

Голоцукова Т. Г.

ВСТУП

Аналіз ринку електроенергії США є важливим кроком для розуміння економічної ситуації, конкурентних умов, можливостей для бізнесу, розуміння динаміки енергетичної галузі країни, її основних гравців, конкурентних сил та регуляторних впливів. Сполучені Штати мають один з найбільших та найскладніших ринків електроенергії у світі, що поєднує різноманітні джерела енергії – від традиційних викопних палив до відновлювальних джерел, таких як сонячна, вітрова енергія та геотермальні ресурси.

Особливу роль у розвитку ринку США відіграє процес декарбонізації, що призводить до значних змін у структурі енергетичних джерел. Тому для розуміння сучасних тенденцій на ринку енергетики важливо враховувати як традиційні підходи, так і інновації у галузі відновлювальної енергетики, а також зміни в політиці та законодавстві, які сприяють переходу до сталого розвитку.

Важливим етапом у трансформації енергетичних ринків в США було запровадження процесу дерегуляції – створення умов для конкуренції та реформування традиційної системи, де вертикально інтегровані компанії мали контроль над всіма компонентами постачання електроенергії від виробництва до споживання. Це дозволило розділити різні функції між окремими суб'єктами, стимулюючи ефективність енергетичного сектору.

В рамках дослідження розглянемо та проаналізуємо основні принципи та наслідки політики дерегуляції, роль декарбонізації та збільшення частки відновлювальних джерел, а також можливість застосування різних інновацій в сфері енергетики. Структурно ринок електроенергії поділимо відповідно до його функціоналу на такі компоненти, як генерація, передача, розподіл, оптовий та роздрібний ринок, регулювання та безпека, інтеграція з ринками капіталу.

1.1. Генерація та передача електроенергії в США

У 2024 році США зайняла друге місце у світовому рейтингу найбільших виробників електроенергії з генерацією в 4304 TWh¹ вдвоє більше тільки у Китаю.

Генерація електроенергії США має як традиційні електростанції, так і бере участь у глобальному збільшенні частки відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), керуючись рекомендаціями розробленими Міжнародним агентством з ВДЕ (International Renewable Energy Agency, IRENA) – REmap 2030, що передбачають розширення використання ВДЕ для досягнення цілей сталого розвитку². А саме таких цілей, що стосуються енергетики як: всезагальний доступ до сучасних послуг стабільного, надійного і недорогого енергопостачання; скорочення кількості відходів та їх рециркуляція; раціональне використання ресурсів; збільшення частки ВДЕ; збільшення енергоефективності. Для усунення «цифрового розриву» ставиться ціль збільшити використання інформаційно-комунікаційних технологій та глобальної взаємозв'язності науково-технічних інновацій в галузі енергетики^{3, 4}.

Ринок США має високу конкуренцію між незалежними виробниками. Виробники електроенергії поділяються на: приватні електростанції (Investor-Owned Utilities, IOUs) перебувають у власності інвесторів і функціонують з метою отримання прибутку, зазвичай у регульованих ринках володіють всіма сегментами енергетичного ланцюга: генерацією, передачею та розподілом (Duke Energy, Southern Company та ін.), в дерегульованих займаються передачею і розподілом, купуючи електроенергію на ринку у незалежних виробників (Independent Power Producers, IPPs); IPPs, в свою чергу, це приватні енергетичні компанії, некомунальні виробники, які володіють генеруючими потужностями та виробляють електроенергію для продажу комунальним підприємствам, постачальникам або на відкритому ринку (NRG Energy тощо); громадські

¹ U.S. Energy Information Administration. (б.д.). Electric Power Monthly. URL: https://eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_1_1

² IRENA. (2015). Renewable Energy Prospects: United States of America, REmap 2030 analysis. Abu Dhabi: IRENA. URL: <https://www.irena.org/publications>

³ Генеральна Асамблея Організації Об'єднаних Націй. (2015). Резолюція. Глобальні цілі сталого розвитку до 2030 року. URL: https://undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ua/Agenda2030_UA.pdf

⁴ Голоцукова, Т., & Ламонов, П. (2024). Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації, VI науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України. Цифрове підприємство та цифрові двійники: виклики та можливості інтеграції 87-90. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України.

(Public Power), некомерційні комунальні підприємства, які належать і управляються громадою (наприклад, Los Angeles Department of Water and Power)⁵; розробники відновлюваної енергетики (Renewable Energy Developers) компанії, які займаються розробкою, будівництвом і експлуатацією проектів у сфері ВДЕ, таких як сонячні, вітрові, гідро- та біоенергетичні станції (наприклад, NextEra Energy); Федеральні гідроелектростанції (Federal Hydropower), наприклад дамба Grand Coulee Dam власником якої є Bonneville Power Administration⁶.

Загалом Штати генерують електроенергію за допомогою різних джерел енергії: природний газ, ядерна енергія, вугілля, гідро- та геотермальна енергія, сонячна енергія (фотоелектрична, термічна), вітер, енергія біомаси (включаючи відходи, звалищний газ та ін.), викопний газ, нафта (підини та кокс) та інші.

За даними Міжнародної енергетичної агенції (International Energy Agency, IEA) у 2023 році в США виробили 4412 TWh електроенергії. Генерація з ВДЕ становила 958 TWh, зокрема сонячна – 212 TWh, вітрова – 430 TWh. Ядерна генерація склала – 808 TWh, генерація з природного газу – 1858 TWh, а вугільна генерація – 744 TWh⁷.

У 2024 році, за даними Управління енергетичною інформацією США (U.S. Energy Information Administration, EIA) вироблено 4304 TWh електроенергії. Генерація з ВДЕ становила 981 TWh (сонячна – 218,5 TWh, гідроелектростанція – 242 TWh). Ядерна генерація склала – 782 TWh, генерація з природного газу – 1864 TWh, а вугільна генерація – 652 TWh. Якщо подивитись відомості 2015 року, то показник вугільної генерації був – 1352 TWh, а ВДЕ – 543 TWh⁸, що відображає тенденцію на спад вугільної генерації та збільшення частки ВДЕ майже вдвоє за 10 років.

В енергетичній інфраструктурі важливу роль відіграють Інтернет речей (IoT) та смарт-лічильники (Smart Meters), вони дозволяють збирати дані в реальному часі для покращення моніторингу споживання та автоматизації управління енергетичними потоками. Смарт-лічильники

⁵ American Public Power Association. (2016). What is Public Power? URL: https://publicpower.org/system/files/documents/municipalization-public_power_for_your_community.pdf

⁶ Bonneville Power Administration. (2022). Generators like new again at nation's largest hydroelectric producer. URL: <https://bpa.gov/about/newsroom/news-articles/2022/20220302-generators-like-new-again-at-nations-largest-hydroelectric-producer>

⁷ International Energy Agency. (2024). World Energy Outlook 2024. IEA. URL: <https://iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

⁸ U.S. Energy Information Administration. (б.д.). Electric Power Monthly. URL: https://eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_1_1

забезпечують точний облік та оперативну реакцію на зміни в мережі, що сприяє ефективнішому використанню ресурсів та зниженню витрат. Завдяки інтеграції цих технологій, смарт-мережі (Smart Grids) дозволяють створювати адаптивні енергетичні системи, які управляють потоками енергії в реальному часі, підтримують стабільність мережі та оптимізують розподіл енергії, включаючи ВДЕ та енергозберігаючі рішення⁹. Наприклад, на сайті EIA, можна отримати дані в реальному часі погодинного моніторингу електромережі¹⁰.

У контексті швидких змін у енергетичній сфері новітні тенденції в генерації електроенергії відіграють важливу роль у забезпеченні сталого розвитку. Інновації дозволяють підвищити ефективність, знизити викиди вуглецю та забезпечити більшу гнучкість у використанні енергетичних ресурсів¹¹. ВДЕ та нові моделі, як-от віртуальні електростанції (Virtual Power Plant, VPP), наприклад, Powerwall від Tesla¹², відкривають нові можливості для споживачів, які стають активними учасниками енергетичних процесів. Споживачі тепер можуть продавати надлишки згенерованої ними енергії іншим споживачам, таким чином утворюючи взаємодію споживач – споживач.

Американською компанією LO3 Energy розроблена така платформа LO3, відома як Pando. Вона спрощує облік розподілених енергоресурсів і створює локальні ринки енергії. Через мобільний додаток, платформа надає можливість налаштовувати параметри користувачам, визначаючи, як і коли використовувати доступні їм енергетичні ресурси, а також дозволяє вибирати конкретні джерела постачання електроенергії. Хоча передача енергії здійснюється через звичайну мережу, приватна блокчейн-система відстежує її джерело та автоматизує процеси оплати. Рішення LO3 охоплює різні сфери: хеджування ризиків на ринку, управління віртуальними електростанціями, однорангову торгівлю енергією, регулювання попиту та динамічну зарядку електромобілів. Pando перейшла в 2020 році на відкриту блокчейн-платформу для енергетичного сектору (Energy Web Chain). Завдяки цьому тепер можливо

⁹ Свдокімов, В., Борукаєв, З., & Остапченко, К. (2024). Комп'ютерна система моделювання процесів ціноутворення на оптовому ринку електроенергії. *Технічна електродинаміка*, (2), 72-81. DOI: 10.15407/techned2024.02.072

¹⁰ U.S. Energy Information Administration. (б.д.). Hourly Electric Grid Monitor. URL: https://eia.gov/electricity/gridmonitor/dashboard/electric_overview/US48/US48

¹¹ Gorbachuk, V., Dunaievsky, M., & Batih, L. (2021). New energy and economic changes. *Changes. Adaptation. New economy. Paradigmatic shifts in the 21-st century economic theory*, 45-47.

¹² Tesla. (б.д.). Powerwall. URL: <https://tesla.com/powerwall>

купувати та продавати енергію та її атрибути безпечно, через блокчейн-транзакції. Такі зміни сприяють інтеграції розподілених ресурсів та розвитку децентралізованих ринків, наближаючи енергетику до низьковуглецевого майбутнього¹³.

Регулювання в сфері генерації здійснюється такими нормативно правовими актами, як: Federal Power Act (FPA)¹⁴, Public Utility Regulatory Policies Act (PURPA)¹⁵.

Політика США у сфері передачі електроенергії змінювалася від політики підтримки обмеженої кількості відокремлених оптових операцій з електроенергією в умовах домінування вертикально інтегрованих комунальних підприємств до більш пізніх політик, які сприяли розвитку конкурентних оптових і роздрібних ринків електричної енергії.

Існує дві глобальні синхронні електромережі в межах Північної Америки: Східна (Eastern Interconnection), Західна (Western Interconnection). А також дві другорядні у США: Техаська (Texas Interconnection) та Аляска (Alaska Interconnection). Східна, Західна та Техаська в різних точках з'єднані між собою, що дозволяє передавати електроенергію по всій суміжній території США, частинах Мексики та Канади.

В Штатах функціонує кілька типів організацій, що здійснюють операції та управління енергетичними мережами, зокрема характерне управління незалежними системними операторами (Independent System Operator, ISO) та регіональними організаціями передачі електроенергії (Regional Transmission Organization, RTO), також існують традиційні оператори мережі (Traditional Network Operator, TNO), які ще не перейшли від вертикально інтегрованих підприємств до моделей, де функції генерації, передачі та постачання електроенергії розподіляються між окремими учасниками ринку. Окремо виділимо власників мережі (Transmission Owner, TO). Кожен з них виконує специфічні функції у забезпеченні надійності та стабільності енергетичної системи, а також відіграє важливу роль у розвитку та експлуатації інфраструктури передачі електроенергії.

¹³ Collins, W., & Bronski, P. (2020). LO3 Energy Updates Pando Platform, Migrates To Energy Web Chain. URL: <https://medium.com/energy-web-insights/lo3-energy-updates-pando-platform-migrates-to-energy-web-chain-d709ae0e5311>

¹⁴ U.S. Congress. (2018). Federal Power Act. URL: https://ferc.gov/sites/default/files/2021-04/federal_power_act.pdf

¹⁵ U.S. Congress. (2013). Public utility regulatory policies act of 1978. URL: <https://ferc.gov/sites/default/files/2021-04/Public-Utility-Regulatory-Policies-Act-of-1978.pdf>

ISO – незалежна організація, що займається управлінням енергетичними системами в межах певних регіонів. ISO координує та забезпечує балансування попиту та пропозиції на ринку електричної енергії, управляє розподілом енергії між різними учасниками ринку та забезпечує стабільність та надійність енергетичної мережі. ISO відповідає за організацію та моніторинг операцій на ринку, а також за розподіл ресурсів для забезпечення безперебійного постачання електроенергії. ISO не володіє інфраструктурою. Наприклад, New York ISO (NYISO) – це незалежний системний оператор, який відповідає за управління енергетичною мережею та ринками електричної енергії в штаті Нью-Йорк; California ISO (CAISO) – Каліфорнійська незалежна система управління енергетикою.

Окремою інституцією, є Енергетична рада Техасу (Electric Reliability Council of Texas, ERCOT) – це ISO, але з унікальними особливостями. ERCOT не підпорядковується напряму Federal Energy Regulatory Commission (FERC), і Техас функціонує, в основному, як автономна система без федерального контролю, оскільки має обмежене взаємоз'єднання через п'ять ліній постійного струму з іншими ринками США та Мексики¹⁶. ERCOT все одно підлягає нагляду з боку North American Electric Reliability Corporation (NERC) та FERC для забезпечення надійності. Контролюючим органом є – Public Utility Commission of Texas (PUCT). ERCOT займається координацією та управлінням ринком електричної енергії, балансуванням попиту і пропозиції, а також забезпеченням надійності мережі.

RTO є підтипом ISO, але з додатковими обов'язками, пов'язаними з управлінням великими регіональними енергетичними мережами, що охоплюють кілька штатів. Це дозволяє йому координувати більше учасників і більші обсяги енергетичних потоків. Як і ISO, RTO відповідає за стабільність енергетичної системи та взаємодію учасників ринку, однак його роль також включає в себе здійснення більш детального контролю за роботою енергосистем на території, що охоплює кілька штатів або регіонів. Наприклад, планування, диспетчеризація, управління перевантаженнями, управління добровільними громадськими спотовими ринками енергії, потужності та допоміжних послуг (у тому числі послуг з балансування енергії), взаємоз'єднання генераторів, планування передачі та оцінка потреб в інвестиціях у передачу та пропозицій, регіональне

¹⁶ Cramton, P. (2017). Electricity market design. *Oxford Review of Economic Policy*, 33(4), 589-612. DOI: 10.1093/oxrep/grx041

адміністрування тарифів на передачу, планування інтерконекторів та інвестицій у мережі. Як і ISO, RTO не володіє інфраструктурними об'єктами мережі. До RTO відносяться: PJM Interconnection – охоплює північно-східні штати США; Midcontinent Independent System Operator (MISO) – незалежний системний оператор Середнього континенту, охоплює 15 штатів; Southwest Power Pool (SPP) – керує електричною мережею та оптовим ринком електроенергії в центральних штатах; ISO New England (ISO-NE) – незалежна система управління енергетикою на північному сході США, в регіоні Нова Англія, який включає шість штатів: Мен, Нью-Гемпшир, Вермонт, Массачусетс, Род-Айленд та Коннектикут;

ISO/RTO всієї Північної Америки об'єднані в раду IRC (ISO/RTO Council). IRC та його комітети об'єднують представників від кожного ISO/RTO для координації, що дозволяє оперативно балансувати виробництво електроенергії з попитом. Завдяки чому створюються умови для стабільного енергопостачання, які забезпечують надійність, доступність і сталість електроенергії на оптових ринках¹⁷.

ТО – це організація, яка володіє інфраструктурою мережі передачі електричної енергії, такою як лінії передачі, підстанції та інші компоненти енергетичної мережі. Основною функцією ТО є забезпечення належного технічного стану та обслуговування цієї інфраструктури. ТО відповідає за інвестиції в розвиток мережі, ремонт і модернізацію обладнання, а також за підтримку надійності і безпеки фізичної інфраструктури. ТО у своїй діяльності підпорядковується ISO або RTO. Прикладами можна назвати: Xcel Energy, American Electric Power і т.д.

TNO – це організація, яка володіє та керує мережею передачі електричної енергії в межах певного регіону, де відсутні ISO або RTO. Основною функцією TNO є забезпечення стабільності та надійності енергетичної інфраструктури через управління та експлуатацію ліній електропередачі, підстанцій та іншої відповідної інфраструктури. TNO відповідає за оперативне управління енергетичними мережами, забезпечення їх безперебійної роботи, моніторинг і контролювання потоків електричної енергії, а також за планування та виконання технічного обслуговування мережі. Оскільки TNO діє в регіонах без ISO або RTO, він не підпорядковується цим організаціям і зазвичай має відповідальність за забезпечення безпеки та стабільності мережі на рівні

¹⁷ The ISO/RTO Council. (2017). Emerging Technologies: How ISOs and RTOs can create a more nimble, robust bulk electricity system. URL: <https://isorto.org/wp-content/uploads/2024/08/PUBLIC-IRC-Emerging-Technologies-Report-FINAL-IRC-CEO.pdf>

штату або місцевих органів влади. TNO – це таке ТО яке в додаток виконує функцію оператора мережі. Має часткове регулювання FERC, на відміну від повного в ISO та RTO. Наприклад, до TNO відносяться: Tennessee Valley Authority (TVA), Pacific Gas and Electric (PG&E), Southern California Edison (SCE) та ін.

В законодавстві США окремим державним регуляторним органом виокремлено Адміністрацію долини Теннессі (Tennessee Valley Authority, TVA) – це федеральна електрична компанія, яка охоплює Теннессі, частини Міссісіпі, Кентуккі, Алабами, та невеликі частини Північної Кароліни, Джорджії та Вірджинії. Хоча TVA федеральна компанія, вона не отримує фінансування від платників податків і працює так само, як приватна комерційна компанія. TVA є великим постачальником електроенергії та найбільшою комунальною компанією в країні. TVA володіє та керує однією з найбільших мереж у Сполучених Штатах, яка складається приблизно з 26 100 км ліній. Мережа входить до Східної мережі електропередачі Північної Америки та підпорядковується Південно-Східній раді з надійності електро-енергетики (Southeastern Electric Reliability Council, SERC)¹⁸.

Регулювання діяльності в сфері передачі електроенергії здійснюється відповідно таким нормативно-правовим актам, як: Energy Policy Act of 2005¹⁹, Federal Power Act²⁰.

1.2. Оптовий ринок, ціноутворення та розподіл електроенергії

Оптовий ринок електроенергії в США розділений на кілька регіональних ринків, тобто він децентралізований. Ці ринки керуються ISO та RTO. Вони забезпечують прозорість, конкурентність та відповідають за організацію ринку, балансування системи та проведення торгів.

Традиційні комунальні підприємства, які є балансуєчими органами, керують економічною диспетчеризацією в межах своїх зон обслуговування, тоді як ISO та RTO визначають економічну диспетчеризацію за допомогою ринків на основі заявок, де покупці та продавці роблять ставки на пропозиції або генерують пропозиції. Процес

¹⁸ Tennessee Valley Authority. (б.д) *Transmission*. URL: <https://www.tva.com/energy/transmission>

¹⁹ U.S. Congress. (2005). Energy policy act of 2005. URL: <https://congress.gov/109/plaws/publ58/PLAW-109publ58.pdf>

²⁰ U.S. Congress. (2018). Federal Power Act. URL: https://ferc.gov/sites/default/files/2021-04/federal_power_act.pdf

диспетчеризації відбувається у два етапи: ринок «на добу наперед» (Day-Ahead Market, DAM) – ціни визначаються за добу до реального постачання, що дозволяє учасникам планувати споживання та виробництво; внутрішньодобовий ринок (Real-Time Market, RTM) – балансування попиту та пропозиції здійснюється в режимі реального часу²¹.

В межах CAISO окрім роботи оптового ринку електроенергії на добу наперед у своїй зоні балансуючих повноважень існує західний ринок енергетичних дисбалансів (Western Energy Imbalance Market, WEIM). WEIM дозволяє передавати енергію між різними зонами, забезпечуючи доступ до дешевої електроенергії в більшому західному регіоні. Це особливо корисно під час погодних явищ, коли один регіон може мати нестачу енергії, а інший – надлишок. У таких випадках надлишок енергії продається в зону, що потребує постачання. Така координація допомагає знизити витрати, забезпечити стабільність і уникнути надзвичайних ситуацій²².

Регулювання та контроль відбувається за допомогою: Federal Power Act (FPA)²³, Energy Policy Act of 2005 (EPAAct)²⁴. FERC яка встановлює правила та забезпечує конкурентні умови.

Кожен ISO та RTO має ринки електроенергії та допоміжних послуг, на яких покупці та продавці можуть подавати заявки на купівлю чи продаж електричної енергії. ISO та RTO використовують ринки на основі заявок для визначення економічної диспетчеризації. Хоча значні частини країни працюють у рамках більш традиційних ринкових структур, майже дві третини енергетичного навантаження обслуговуються в регіонах RTO.

Торги здійснюються на біржі електроенергії (Power Exchanges) – це такі платформи, на яких проводяться торги енергоресурсами (як правило, оптовими), де учасники можуть купувати та продавати електроенергію або її атрибути (наприклад, сертифікати

²¹ U.S. Department of Energy. (б.д.). State, Local, Tribal, and Territorial Program. URL: https://energy.gov/sites/default/files/2023-08/Balancing%20Authority%20Background_2022-Formatted_041723_508.pdf

²² CAISO. (2024). Western Energy Imbalance Market. URL: <https://caiso.com/Documents/western-energy-imbalance-market-fact-sheet.pdf>

²³ U.S. Congress. (2018). Federal Power Act. URL: https://ferc.gov/sites/default/files/2021-04/federal_power_act.pdf

²⁴ U.S. Congress. (2005). Energy policy act of 2005. URL: <https://congress.gov/109/plaws/publ58/PLAW-109publ58.pdf>

поновлювальної енергії – Renewable Energy Certificate (REC)). Такими біржами є PJM Market, ERCOT Market та ін.²⁵.

Ціноутворення. Оптовий ринок електроенергії працює за допомогою різних моделей ціноутворення від штату до штату. Вони впливають як на роздрібних постачальників електроенергії, так і на споживачів. Існує вузлове та зональне ціноутворення.

Локальне граничне (Locational marginal pricing, LMP) або вузлове (Nodal) ціноутворення – це складна модель ціноутворення на електроенергію. В цій моделі ціни визначаються в певних вузлах електромережі, тобто в конкретних місцях. Зазвичай, в цих вузлах вводиться або відбирається електроенергія. Витрати на перевантаження електроенергією та попит на шляхи передачі в електромережі являються основними причинами різниці в ціноутворенні між різними вузлами.

За своєю суттю LMP – це ціна доставки наступного мегават (MW) електроенергії до певного місця. Його розрахунок базується на трьох ключових складових:

1. Маржинальна вартість енергії – це основна ціна виробництва наступного мегавата електроенергії. Вона єдина для всієї системи та відображає вартість найдешевшого доступного ресурсу для покриття попиту.

2. Маржинальна вартість втрат – під час передавання електроенергії через мережу частина її втрачається через опір. Ця складова враховує витрати на компенсацію таких втрат, які змінюються залежно від відстані та ефективності маршруту передачі.

3. Маржинальна вартість перевантажень – обмеження в мережі виникають, коли недостатня пропускна здатність не дозволяє передати дешеву електроенергію в регіони з високим попитом. Ця складова відображає різницю в цінах, що виникає через такі обмеження²⁶.

Для розрахунку LMP DAM та RTM різні ISO використовують такі показники: генерація та резерви (MWh), навантаження на вузлах мережі (MWh), втрати при передачі (MWh), штрафні коефіцієнти (\$/MWh), потоки через перевантажені лінії (MWh), тарифи диспетчеризації (\$/MWh), резерви реального часу (MWh) та графіки зовнішніх транзакцій

²⁵ Federal Energy Regulatory Commission. (б.д.). Electric Power Markets. URL: <https://ferc.gov/electric-power-markets>

²⁶ PCI Energy Solutions (2025). Understanding Locational Marginal Pricing (LMP) & Congestion in ISO Markets. URL: <https://pcienergysolutions.com/2025/01/17/understanding-locational-marginal-pricing-lmp-congestion-in-iso-markets/>

у реальному часі (MWh). Це забезпечує точне визначення вартості електроенергії в кожній точці системи.

В якості прикладу наведемо правила розрахунку LMP в регіоні ISO-NE. Для обчислення LMP DAM або розрахунку LMP RTM (і резервних клірингових цін) використовується метод лінійної оптимізації. Розрахунок DAM використовує енергетичні пропозиції та ставки, заплановані на DAM від усіх учасників ринку для всіх відповідних місць. Розрахунок LMP RTM використовує енергетичну пропозицію кожного учасника ринку від генеруючого ресурсу, купівлю ресурсу зовнішньої транзакції та ресурсу попиту, пов'язаного з активами, що підлягає відправці, згідно з інструкціями щодо економічної диспетчеризації.

Розрахунок LMP DAM ґрунтується на: пропозиції та попиту ресурсів; зобов'язанні одиниці з найменшою вартістю та обмеженням безпеки; віртуальні пропозиції; віртуальні ставки; умови системи, що впливають із специфікацій навантаження учасників ринку; модельні потоки; зовнішні транзакції, подані до ISO та заплановані на енергетичному ринку DAM. А LMP на внутрішньодобовому ринку: спільно оптимізованому економічному розподілі енергії та визначенні операційного резерву з використанням цін енергетичних пропозицій і заявок, а також коефіцієнтів штрафу за обмеження резерву (тобто встановлених адміністративно лімітів на витрати, які система зазнає для дотримання обмежень резерву при повторному розподілі), якщо це можливо.

Метою розрахунків є мінімізації витрат на такі компоненти: енергію, перевантаження, витрат при передачі (враховуючи заплановані умови системи, перебої у передачі та обмеження передачі), які можуть існувати для LMP DAM; енергію, перевантаження, витрат при передачі та робочий резерв (враховуючи фактичні умови системи), набори енергетичних пропозицій і заявок, обов'язкові обмеження передачі та робочого резерву для LMP RTM.

В підсумку розрахунок визначає:

1. Вплив на втрати при передачі через збільшення навантаження та генерації.

2. Ціну за яку учасник ринку забезпечує додатковий: приріст енергії з ресурсу та зменшення споживання з ресурсу для LMP DAM; Приріст енергії з ресурсу для LMP RTM.

3. Вплив на витрати на перевантаження передачі (позитивний/негативний) пов'язаний із такими умовами:

3.1. Збільшенням продуктивності ресурсу або зменшенням споживання ресурсу (засновані на ефекті збільшення виробництва або зменшеного споживання з цього ресурсу на навантаження лінії електропередачі). Для LMP DAM та LMP RTM.

3.2. Підвищена вимога до оперативного резерву (заснована на впливі повторного розподілу ресурсу на навантаження на лінію електропередачі) та дефіцит операційного резерву (заснований на впливі факторів штрафу за обмеження резерву) для LMP RTM.

Граничну ціну за такими розрахунками визначає енергетична пропозиція/ пропозиції та ставка/ ставки на енергію, які можуть обслуговувати приріст навантаження на вузлі/ зовнішньому вузлі за найнижчої вартості, для DAM. А для RTM граничну ціну визначає – енергетична пропозиція/ пропозиції та ставка/ ставки на енергію, які можуть обслуговувати приріст навантаження та приріст вимог до операційного резерву в місці з найнижчими витратами на цьому вузлі або зовнішньому вузлі²⁷.

Використання моделі вузлового ціноутворення дає такі переваги:

1. *Деталізація.* Модель точно відображає фактичні витрати на доставку електроенергії до конкретних точок. Вона дозволяє визначити витрати, пов'язані з перевантаженням і втратами в мережі передачі.

2. *Ефективність.* Відображаючи реальні умови попиту та пропозиції в кожній точці мережі, сприяє ефективному виробництву й споживанню електроенергії. Це мотивує генераторів виробляти енергію саме там, де вона найбільш затребувана, а споживачів – коригувати використання відповідно до місцевих цінових сигналів.

3. *Прозорість.* За допомогою точної та прозорої інформації про ціни, учасники ринку можуть приймати зважені рішення.

Але така модель має не тільки переваги, але і недоліки:

1. *Можливість маніпулювання ринком.* Якщо в певному регіоні існує невелика кількість генераторів, це може спонукати окремих учасників використовувати ринкову владу для штучного впливу на ціни.

2. *Складність.* Деталізована структура вузлового ціноутворення робить його впровадження та розуміння складнішим. Для точної роботи в реальному часі потрібна високотехнологічна інфраструктура та складне програмне забезпечення.

²⁷ ISO New England. (б.д.). FAQs: Locational Marginal Pricing. URL: <https://iso-ne.com/participate/support/faq/lmp>

3. *Волатильність*. Ціни на енергоносії можуть різко змінюватися за короткий проміжок часу через коливання місцевого попиту та пропозиції. Для постачальників і споживачів такі коливання створюють невизначеність і ускладнюють планування витрат.

Вузлове ціноутворення застосовується на ринках CAISO, PJM і ISO-NE, ERCOT. В звіті Ove Arup and partners Limited 2023 року зазначається, що такі ринки передають ренту від генераторів до споживачів²⁸.

Щодо зонального ціноутворення (Zonal pricing, ZP), то така модель спрощує ринок електроенергії, розподіляючи мережу на більші зони, де встановлюється, на основі сукупного попиту і пропозиції всієї зони, єдина ціна в межах цієї зони. Перевагами зонального ціноутворення назвемо:

1. *Зменшення ринкової влади*. Оскільки ціни усереднюються по більшій території, це може зменшити вплив маніпулювання ринком з боку окремих виробників.

2. *Стабільність*. Більш стабільні та менш коливні ціни, ніж в LMP моделі. Надає переваги для планування та бюджетування підприємствам та роздрібним постачальникам електроенергії.

3. *Простота*. Таку модель ціноутворення легше зрозуміти та запровадити, якщо порівнювати з LMP моделлю. Проста структура ціноутворення більш доступна для споживачів і учасників ринку.

Недоліки зонального ціноутворення:

1. *Брак точності*. На відміну від LMP, ZP менш деталізоване і може маскувати локальні перевантаження або неефективність в окремих регіонах. Така модель призводить до менш оптимального розподілу електроенергії, а також негативно впливати на споживачів які знаходяться у більш ефективних зонах, оскільки вони можуть платити таку ж ціну, як і споживачі в менш ефективних, перевантажених регіонах.

2. *Обмежена прозорість*. Оскільки модель менш деталізовано надає інформацію про місцевий ринок, це перешкоджає учасникам ринку приймати виважені рішення.

3. *Неефективність*. ZP модель не відображає реальні витрати на доставку електроенергії до конкретної точки, оскільки ціна єдина для всієї зони. Це може спричиняти нераціональне споживання та виробництво електроенергії.

²⁸ Ove Arup and Partners Limited. (June 2023). Electricity market design – evidence from international markets. Department for Energy Security and Net Zero. URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65e3a2b42f2b3bbc587cd764/1-arup-evidence-from-international-markets.pdf>

Вплив LMP на споживачів у США варіюється. На деяких ринках споживачі менш чутливі до змін вузлових цін, оскільки постачальниками використовуються зональні або середні ціни, наприклад, на ринках PJM, CAISO і ISO-NE вузлові ціни стосуються лише генераторів. ERCOT є винятком, він значною мірою піддає своїх споживачів впливу вузлових цін. Зменшений вплив вузлових цін (як в першому варіанті) обмежує можливості для ефективної реакції з боку попиту, адже без чітких сигналів про зміни цін на різних вузлах мережі споживачі менш схильні реагувати на коливання цін, що може зменшити ефективність розподілу електроенергії. Використання фінансових прав на передачу (Financial Transmission Rights, FTR) та обов'язкових зобов'язань з хеджування може знижувати ризик різких коливань цін для споживачів.

Дані CAISO свідчать, що впровадження LMP ринків не мали суттєвого негативного впливу на інвестиції, вони продовжували надходити навіть під час тривалого періоду реалізації. В ERCOT і CAISO спостерігалось значне зростання ВДЕ та низьковуглецевої генерації. Однак домінація теплової генерації у PJM та інших вузлових ринках США не узгоджується з цілями вуглецевої нейтральності. Структура генерації більше залежить від того, які державні або ринкові стимули, субсидії чи інші політичні ініціативи сприяють їх розвитку, а не від того, як саме спроектовано ринок електроенергії. Тобто, якщо уряд або політика підтримує розвиток ВДЕ, це призводить до їх зростання, навіть якщо ринкові механізми не стимулюють цього напрямку²⁹.

В США існує децентралізована система розподілу, де місцеві компанії (utilities) законодавчо регулюються штатними комісіями State Public Utility Commissions (PUCs), але федеральні закони також впливають на цю сферу, такі як EPCA та PURPA.

Розподільчі компанії (Distribution Utilities: IOUs, Public Owner Utilities (POU) & Cooperative) – це компанії, які володіють та обслуговують розподільні мережі (нижча напруга), транспортують електроенергію від високовольтних мереж до кінцевих споживачів. Вони працюють у регульованих умовах і стягують тариф за послуги розподілу, незалежно від того, хто є постачальником електроенергії (Con Edison, Florida Power & Light.)³⁰.

²⁹ IRENA. (2015). Renewable Energy Prospects: United States of America, REmap 2030 analysis. Abu Dhabi: IRENA. URL: <https://www.irena.org/publications>

³⁰ U.S. Energy Information Administration. (2019). Investor-owned utilities served 72% of U.S. electricity customers in 2017. URL: <https://eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=40913>

1.3. Роздрібний ринок, залучення ринків капіталу та інвестицій, регулювання та захист в сфері енергетики США

Постачальники електроенергії (Energy Suppliers або Retail Electric Providers, REPs) закуповують електроенергію на оптовому ринку (через біржі, двосторонні контракти тощо) і продають її кінцевим споживачам – домогосподарствам, бізнесу, промисловим підприємствам (Electric Consumer).

У дерегульованих ринках постачальники не володіють місцевими лініями електропередач, вони належать комунальним компаніям, які відповідають за обслуговування, доставку та виставлення рахунків. Проте, постачальники можуть володіти генеруючими станціями, а є багато таких, що володіють власним виробництвом електроенергії. Також, на таких ринках США споживачі можуть обирати собі постачальника, і конкуренція між ними впливає на ціни та умови контрактів. У регульованих ринках постачальником є єдина комунальна компанія (utility), яка також відповідає за розподіл і продаж електроенергії.

Постачальники для кінцевих споживачів: конкурентні постачальники електроенергії (Retail Electricity Suppliers) – це приватні компанії, які пропонують енергетичні послуги кінцевим споживачам у конкурентному середовищі. Constellation (1,415,543 клієнтів) та Direct Energy Business (671,381 клієнтів) є прикладами таких постачальників³¹; державні комунальні підприємства та кооперативи (Public Utilities & Cooperative) – це постачальники, які надають енергетичні послуги певним територіям або групам користувачів, зазвичай за меншою ціною та під управлінням місцевих органів влади або кооперативів. Austin Energy є прикладом муніципального постачальника; постачальники послуг за замовчуванням – це постачальники, які забезпечують електроенергію для споживачів, які не вибрали альтернативного постачальника на конкурентному ринку. В таких випадках застосовуються регульовані тарифи для населення, що встановлюються державними органами для захисту інтересів споживачів. Такі послуги доступні в деяких штатах, де це передбачено законодавством, але споживачі обирають активніше шукати постачальників за кращими умовами³².

³¹ Diversegy. (б.д.). Retail Energy Supplier Defined. URL: <https://diversegy.com/energy-brokers/retail-energy-supplier/>

³² Takemura, A. (2022). Electric utilities 101: A breakdown of the basics on US power providers. URL: <https://canarymedia.com/articles/guides-and-how-tos/power-by-people-glossary-bundle>

У США був введений обов'язок постачальників через Стандарти відновлювальної енергетики (Renewable Portfolio Standards, RPS). Цей стандарт визначає мінімальну частку енергопостачання, яка має бути отримана від ВДЕ. Політика орієнтована на електрогенераторів і варіюється від штату до штату. RPS на ринку США призвели до значного збільшення потужностей ВДЕ в системах. У регіоні ERCOT спостерігається суттєве збільшення потужностей вітрової генерації, а подібні тенденції можна спостерігати і для сонячної генерації на ринку CAISO. Додаткові політики допомогли підключити ВДЕ до мережі. Також існують механізми для підтримки балансу в системі, які вирішують потреби щодо стабільності для таких змінних джерел енергії. Крім того, як у ERCOT, так і в CAISO, є багато сонячних годин, а в ERCOT є також постійні вітри, що дозволяє знизити змінність генерації. Дослідження показують, що RPS на даний момент забезпечили зростання частки ВДЕ при низькому відсотку витрат для споживачів. Однак витрати на виконання схеми зростають, і ймовірно, що це збільшення буде продовжуватись³³.

Регулювання роздрібного ринку здійснюється на рівні штату за допомогою штатних PUCs та їх законів. Серед нормативно-правових актів федерального рівня, що впливають на роздрібний ринок є PUNCA – частина закону EРАct 2005³⁴. Роздрібні постачальники електроенергії зобов'язані виконувати вимоги PUCs та FERC і бути членами електричних мереж, в межах яких вони мають намір здійснювати продаж енергії.

В електроенергетичній галузі США існує цілий комплекс субсидій, які охоплюють різноманітні сфери підтримки енергетичного сектору та споживачів. Серед них можна виділити податкові пільги, що надаються як для підприємств, так і для інвесторів, які здійснюють проекти в галузі енергетики. Крім того, існують субсидії, що сприяють проведенню наукових досліджень і розробок нових технологій, а також пільгові тарифи для виробників відновлювальної енергії, що стимулюють перехід на більш екологічні джерела енергії. Окрему увагу приділено і підтримці соціально вразливих груп населення, зокрема домо-господарств з низьким

³³ Ove Arup and Partners Limited. (June 2023). Electricity market design – evidence from international markets. Department for Energy Security and Net Zero. URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65e3a2b42f2b3bbe587cd764/1-arup-evidence-from-international-markets.pdf>

³⁴ U.S. Congress. (2005). Energy policy act of 2005. URL: <https://congress.gov/109/plaws/publ58/PLAW-109publ58.pdf>

рівнем доходу, яким надаються фінансові засоби для покриття витрат на електроенергію. Система субсидій є досить різноманітною, при цьому деякі програми мають загальнодержавний характер, а інші обмежуються певними штатами або регіонами, що дозволяє адаптувати підтримку до місцевих потреб та умов.

Ринок потужності (Capacity Market, CM). В деяких регіонах, таких як ERCOT працює Energy-Only Market – оплата лише за продану енергію. А в регіонах PJM, ISO-NE, NYISO працює CM – це механізм у енергетичному ринку, який забезпечує достатню генерацію в майбутньому, гарантуючи, що електростанції отримують компенсацію не тільки за вироблену електроенергію, але й за готовність виробляти її за потреби. Оплата йде не за фактичне виробництво електроенергії, а за резервування потужності. CM працює паралельно з основним оптовим ринком електроенергії^{35, 36}.

Ринок електроенергії в США має високу інтеграцію з фінансовим ринком. Великі енергетичні компанії активно випускають акції та облігації, залучаючи капітал для розвитку інфраструктури та технологій у сфері енергетики, наприклад: NextEra, Dominion Energy та ін. А деривативні інструменти дозволяють хеджувати ризики. Діяльність регулюється такими законодавчими актами, як: Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act³⁷, Securities Exchange Act of 1934³⁸.

Інвестиції здійснюються як державними організаціями (наприклад, DOE), так і приватними компаніями. Приватний капітал активно залучається через зелені облігації, інвестиційні фонди та інші фінансові інструменти. Брокери та трейдери енергії можуть купувати енергетичні товари (такі як електроенергія, нафта, природний газ) на оптовому ринку і продавати їх на фінансових ринках.

Енергетичні деривативи (Energy Derivatives) – це фінансові інструменти, які дозволяють учасникам ринку управляти ризиками, пов'язаними з цінами на енергію. Це можуть бути: ф'ючерсні контракти на купівлю або продаж енергії (електричної енергії, природного газу, нафти) за фіксованою ціною в майбутньому; опціони, які дають право

³⁵ Cramton, P., Ockenfels, A., & Stoft, S. (2013). Capacity Market Fundamentals. *Economics of Energy and Environmental Policy*, 2(2). DOI:10.5547/2160-5890.2.2.2

³⁶ Cramton, P. (2017). Electricity market design. *Oxford Review of Economic Policy*, 33(4), 589-612. DOI:10.1093/oxrep/grx041

³⁷ U.S. Congress. (2010). Dodd-frank wall street reform and consumer protection act. USA. URL: <https://congress.gov/111/plaws/publ203/PLAW-111publ203.pdf>

³⁸ U.S. Congress. (2022). Securities Exchange Act of 1934. URL: <https://govinfo.gov/content/pkg/COMPS-1885/pdf/COMPS-1885.pdf>

(але не обов'язок) купити чи продати енергію за визначеною ціною на певну дату в майбутньому; свопи – контракти, за якими учасники обмінюються грошовими потоками на основі змінних цін на енергію. Ці інструменти дозволяють енергетичним компаніям, постачальникам, споживачам та інвесторам хеджувати потенційні збитки від коливань цін на енергоресурси. Вони також забезпечують ліквідність і ефективність ринку, дозволяючи знижувати загальний ризик в енергетичних операціях, а також заробити на зміні цін. Найбільш популярні торгові майданчики (фінансові ринки) для енергетичних деривативів – це New York Mercantile Exchange та Chicago Mercantile Exchange дочірні підприємства CME Group, де торгуються ф'ючерсні контракти на енергію, природний газ, нафту тощо.

Відповідальним за реалізацію національної енергетичної політики в США є Міністерство енергетики (Department of Energy, DOE). У структурі DOE є окремий підрозділ з кібербезпеки, енергетичної безпеки та кризового реагування (Office of Cybersecurity, Energy Security, and Emergency Response, CESER)³⁹. Він відповідає за енергетичну політику з питань забезпечення кіберзахисту та стійкості енергетичної інфраструктури країни. При DOE також діє Ініціатива модернізації електромережі (Grid Modernization Initiative, GMI), яка працює над над різними аспектами розвитку та вдосконалення електромереж для майбутнього (розробка концепцій, технологій і інструментів для вимірювання, прогнозування, аналізу, контролю та захисту електричних мереж) з метою підвищення їх ефективності, надійності та гнучкості.

Також в структурі DOE існує Управління енергетичної інфраструктури (Energy Information Administration, EIA), яка створила Національну енергетичну систему моделювання (National Energy Modeling System, NEMS) – це аналітична модель, у вигляді комп'ютерної програми для проектування виробництва, споживання, перетворення, імпорту, експорту і ціноутворення на енергію. NEMS використовують для створення річного енергетичного прогнозу, для одноразових аналітичних репортажів і матеріалів, а також для спеціальних запитів пов'язаних з аналізом екологічних та економічних наслідків енергетичної політики або змін у її структурі. Енергетичні ресурси, ціни, стандарти послуг і загальні умови ринку значно відрізняються в різних регіонах США. Щоб врахувати ці відмінності, система NEMS побудована як регіональна

³⁹ U.S. Department of Energy. (б.д.). Office of Cybersecurity, Energy Security, and Emergency Response. URL: <https://energy.gov/ceser/office-cybersecurity-energy-security-and-emergency-response>

модель. Розподіл за регіонами в кожному модулі залежить від доступності даних, специфіки аналізу місцевих тенденцій, геологічних особливостей і загальноприйнятих методів оцінки політики. Це дозволяє точніше досліджувати ринок та ефективніше формувати енергетичну політику⁴⁰.

В сфері ВДЕ схожою програмою є Система регіонального розгортання енергетики (Regional Energy Deployment System, ReEDS), розроблена Національною лабораторією з відновлюваної енергії (National Renewable Energy Laboratory, NREL). Ця модель аналізує як може розвиватися ВДЕ в США, враховуючи географію, економіку та технологічні обмеження від сьогодні до 2050 року або пізніше⁴¹.

Щодо організації надійності електрозабезпечення та захисту критичної інфраструктури, в тому числі кіберзахисту, створена окрема організація – Північноамериканська корпорація електричної надійності (North American Electric Reliability Corporation, NERC). NERC – це міжнародна некомерційна регуляторна організація з надійності енергопостачання (Electric Reliability Organization, ERO), головна мета якої – ефективне зниження ризиків для стабільності та безпеки енергосистеми. Вона розробляє та впроваджує стандарти надійності, здійснює щорічні оцінки сезонної та довгострокової стійкості мережі, відстежує стан системи передачі електроенергії через систему моніторингу, а також займається підготовкою, навчанням і сертифікацією фахівців галузі. В її структурі, використовуючи такі інструменти, як Програма обміну інформацією про ризики кібербезпеки (Cybersecurity Risk Information Sharing Program, CRISP), діє інформаційно-аналітична платформа, яка надає практичну допомогу учасникам енергетичного ринку у підготовці та зменшенні кібер- та фізичних загроз безпеці (Electricity Information Sharing and Analysis Center, E-ISAC).

Зона відповідальності NERC охоплює континентальні США, Канаду та північну частину Нижньої Каліфорнії в Мексиці. Існують регіональні організації NERC, такі як: організація надійності Середнього Заходу (Midwest Reliability Organization, MRO); Північно-Східна енергетична координаційна рада (Northeast Power Coordinating Council, NPCC); Перша рада з надійності (Reliability First, RF); Південно-Східна Рада з надійності електроенергетики (SERC Reliability Corporation, SERC); Техаська організація з надійності (Texas Reliability Entity, Texas RE); Західна

⁴⁰ U.S. Energy Information Administration. (2023). The National Energy Modeling System: An Overview. URL: [https://eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581\(2023\).pdf](https://eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581(2023).pdf)

⁴¹ Gagnon, P., Pham, A., & Cole, W. (2024). 2023 Standard Scenarios Report. National Renewable Energy Laboratory. URL: <https://nrel.gov/docs/fy24osti/87724.pdf>

координаційна рада з електроенергетики (Western Electricity Coordinating Council, WECC). NERC діє під наглядом Федеральної комісії з регулювання енергетики (FERC) і відповідних органів Канади^{42, 43}.

Реформування ринку електроенергії в США було поступове і значно прискорилося після ухвалення ключових актів FERC. ORDER 888 (1996) – встановлює відкритий доступ до магістральних мереж (власники мереж надають рівноправний доступ до інфраструктури всім учасникам ринку). ORDER 889 (1996) – вимагав створення інформаційної системи для прозорого обміну даними між споживачами та постачальниками з доступом у «той самий час» (Open Access Same-time Information System, OASIS). Та ORDER 2000 (1999) – сприяв добровільному створенню RTOs та ISOs, що змінило ринок електроенергії на більш конкурентний та підвищило його ефективність⁴⁴.

В свою чергу, FERC відповідає за передачу електроенергії між різними штатами та за регулювання тарифів на оптовому ринку, нагляд за ISO та RTO, ліцензування та контроль за гідроелектростанціями на федеральному рівні, тощо. FERC має відповідний підрозділ, який надає допомогу та відстежує дотримання учасниками ринку вимог щодо кіберзахисту (Office of Energy Infrastructure Security, OEIS).

У зв'язку зі швидким розвитком цифрових технологій у США було посилено вимоги до підготовки критичної інфраструктури до можливих загроз. 12 травня 2021 року президент Джо Байден підписав розпорядження щодо вдосконалення федеральної кібербезпеки, для покращення обміну інформацією про загрози між урядом і компаніями-постачальниками кіберпослуг, підвищення стандартів безпеки у федеральних установах, впровадження багатофакторної автентифікації та шифрування, зміцнення безпеки постачання програмного забезпечення та вдосконалення системи реагування на кіберінциденти. Також створено Раду з огляду рівня кібербезпеки (Cyber Safety Review Board), яка займатиметься моніторингом ризиків і стану кіберзахисту.

Існують також штатні Комісії з комунальних послуг (Public Utility Commissions, PUCs) – це штатний регуляторний орган (State Regulatory

⁴² North American Electric Reliability Corporation. (2024). ERO enterprise long-term strategy. URL: <https://nerc.com/AboutNERC/StrategicDocuments/ERO%20Enterprise-Long-Term-Strategy--Board-Approved-12-10-24.pdf>

⁴³ Nevius, D. (2020). The History of the North American Electric Reliability Corporation. URL: <https://nerc.com/AboutNERC/Resource%20Documents/NERCHistoryBook.pdf>

⁴⁴ Joskow, P. (2005). Transmission Policy in the United States. *Utilities Policy*, 13(2), 95-115. DOI:10.1016/j.jup.2004.12.005

Authority), який здійснює регулювання на місцевому рівні і відповідає за контроль над комунальними послугами в певному штаті, включаючи енергетичні послуги, водопостачання, газ та інші послуги для споживачів. Законодавчі акти, що встановлюють діяльність регуляторних органів: Federal Power Act (FPA)⁴⁵, Energy Policy Act of 2005 (EPA) та його частина Public Utility Holding Company Act (PUHCA)⁴⁶ та інші закони на рівні окремого штату.

Якщо попит перевищує пропозицію, це може призвести до зниження частоти в енергетичній мережі, що загрожує пошкодженням обладнання. У випадку, якщо зниження частоти продовжується, багато генераторів автоматично відключаються, що погіршує ситуацію. Щоб запобігти аварії та відключенням, органи балансування (наприклад, ERCOT) можуть вжити різних заходів, таких як відключення навантаження або заклик до споживачів зменшити використання енергії. Якщо ці заходи недостатні, може бути оголошений надзвичайний стан в енергетиці для зниження навантаження і стабілізації ситуації.

У таких випадках існує ринок допоміжних послуг (Ancillary services) – це спеціалізовані послуги, що надаються для підтримки стабільності енергосистеми. Кожен ринок електроенергії має свій унікальний набір допоміжних послуг. Визначення, вимоги та ринкові механізми можуть суттєво відрізнятися на різних ринках. Ці послуги включають регулювання частоти, резервування потужностей, відновлення після збоїв та інші механізми, що забезпечують безперебійну роботу мережі. Наприклад, використання спінінгових резервів дозволяє швидко підключити додаткові потужності, щоб компенсувати дефіцит енергії, зберігаючи стабільність частоти в мережі. Інші послуги, як регулювання частоти та не синхронізовані резерви, можуть бути активовані для швидкої реакції на зміни навантаження, що допомагає уникнути відключень і зменшити ризик для обладнання. Крім того, резерви на реагування на попит, що включають в себе скорочення споживання енергії з боку споживачів, можуть стати ефективним інструментом для балансування навантаження в критичних ситуаціях, знижуючи потребу щодо додаткових генеруючих потужностей⁴⁷.

⁴⁵ U.S. Congress. (2018). Federal Power Act. URL: https://ferc.gov/sites/default/files/2021-04/federal_power_act.pdf

⁴⁶ U.S. Congress. (2005). Energy policy act of 2005. URL: <https://congress.gov/109/plaws/publ58/PLAW-109publ58.pdf>

⁴⁷ Zhou, Z., Levin, T., & Conzelmann, G. (2016). Survey of U.S. Ancillary Services Markets. Argonne National Laboratory. URL: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2016/01/124217.pdf>

ВИСНОВКИ

Ринок електроенергії в США лібералізований та децентралізований, конкурентний на всіх його рівнях. Штати займають друге місце у світовому рейтингу виробників електроенергії, генеруючи понад 4300 TWh на рік. Країна активно збільшує частку ВДЕ, що відповідає глобальним цілям сталого розвитку. Виробництво електроенергії базується як на традиційних джерелах (природний газ, ядерна енергетика, вугілля), так і на зростаючій генерації ВДЕ (сонячна, вітрова, гідроенергія). Однією з важливих тенденцій є скорочення вугільної генерації та впровадження Smart grids, які забезпечують ефективне управління потоками енергії та зниження витрат. Впровадження цифрових технологій, таких як IoT і блокчейн, сприяє децентралізації енергетики, дозволяючи споживачам брати активну участь у процесі виробництва та продажу електроенергії.

Енергетичний ринок США включає виробників різних типів власності – приватні, незалежні, громадські підприємства, а також компанії, що займаються розвитком ВДЕ. Оптовий ринок електроенергії в США здебільшого є децентралізованим і поділений на кілька регіональних ринків, керованих ISO та RTO, хоча також ще залишається низка традиційних операторів. ISO та RTO забезпечують прозорість торгів, балансування попиту та пропозиції, а також оптимізацію економічної диспетчеризації через ринки «на добу наперед» та внутрішньодобові ринки. Особливу роль відіграє західний ринок енергетичних дисбалансів (WEIM), що сприяє ефективному розподілу електроенергії між регіонами, знижуючи витрати та покращуючи стабільність системи. Ринок зберігає значну автономію на рівні окремих штатів, де можуть існувати різні регулятори та правила, що створює певну фрагментацію в управлінні енергетичною інфраструктурою.

У той час як ISO і RTO мають незалежний статус і підпорядковуються FERC, деякі оператори, зокрема традиційні, наприклад такі, як TVA, не підпорядковуються безпосередньо таким структурам, що дозволяє штату або федерації здійснювати контроль без централізованого управління. Така багаторівнева та гнучка організаційна структура забезпечує адаптивність до різних регіональних потреб, однак водночас створює складнощі в координації та узгодженні між учасниками ринку.

Важливим є розуміння формування ціни на оптовому ринку електроенергії. Здебільшого ціноутворення на ринках США базується на вузловій моделі, але в деяких регіонах використовується і зональне (особливо в регульованих). LMP дозволяє забезпечити точніші

розрахунки вартості електроенергії, оптимізуючи її розподіл та знижуючи ризики перевантаження мережі. Впровадження таких механізмів сприяє ефективному функціонуванню ринку, стабільності енергопостачання та забезпеченню конкурентного середовища. Дерегульованість дозволяє споживачам обирати постачальників, що сприяє зниженню цін та підвищенню ефективності. Зокрема, політика обов'язку постачальників енергії в RPS була ефективною для сприяння розвитку відновлювальних технологій, хоча витрати на виконання вимог зростають, водночас це поступово знижує залежність від традиційних енергоресурсів.

Регулювання енергетичного сектора здійснюється через низку законодавчих актів та організацій (таких як, DOE, FERC, NERC та їх відомств, тощо), що управляють передачею електроенергії в межах чотирьох електромереж які покривають територію США. Зокрема, застосовуються програмні інструменти (платформи) для виконання різноманітних функцій, такі як NEMS, ReEDS, CRISP та інші.

Фінансові інструменти відіграють ключову роль у функціонуванні енергетичного ринку. Використання деривативів допомагає компаніям хеджувати ризики, а залучення інвестицій через облігації та фонди сприяє розвитку інфраструктури. Ринки США характеризуються високою ліквідністю, а PJM вважається одним із найліквідніших у світі. Значну роль у цьому відіграло впровадження обов'язкового хеджування та використання FTR. Незалежно від ринкової моделі, необхідно забезпечувати політики адекватності генеруючих потужностей, що включає у себе не лише забезпечення достатнього рівня генерації для задоволення попиту, але й ефективне управління резервами потужностей, які можуть бути залучені в разі пікових навантажень чи непередбачуваних збоїв в мережі⁴⁸.

⁴⁸ Дослідження здійснено в рамках проекту «Розвиток розподіленої енергетики в умовах ринку електричної енергії України з використанням технологій та систем цифровізації», що виконується за напрямом використання бюджетних коштів «підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок» бюджетної програми КПКВК 6541230 в НАН України.

The research was conducted as part of the project 'Development of Distributed Energy in the Context of the Ukrainian Electricity Market Using Digitalization Technologies and Systems,' implemented under the state budget program 'Support for Priority Scientific Research and Scientific-Technical (Experimental) Developments of National Importance' (CPCEL 6541230) at the National Academy of Sciences of Ukraine.

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджуються структура, регулювання та економічні аспекти енергетичного ринку США. Розглянуто ключові складові галузі, зокрема генерацію, передачу, розподіл і збут електроенергії, а також функціонування оптового та роздрібного ринків. Аналізуються моделі ціноутворення, роль незалежних системних операторів (ISO) і регіональних операторів передачі (RTO), а також діяльність традиційних операторів. Окрему увагу приділено федеральному регулюванню та регулюванню на рівні штатів, політиці лібералізації енергетичного сектору та механізмам залучення капіталу в інфраструктурні проекти. Розглядаються сучасні виклики та тенденції, включаючи інтеграцію відновлюваних джерел енергії, розвиток розумних мереж (Smart grids) і вплив новітніх технологій на ринок електроенергії.

Література

1. ISO New England. (б.д.). FAQs: Locational Marginal Pricing. URL: <https://iso-ne.com/participate/support/faq/lmp>
2. American Public Power Association. (2016). What is Public Power? URL: https://publicpower.org/system/files/documents/municipalization-public_power_for_your_community.pdf
3. Bonneville Power Administration. (2022). Generators like new again at nation's largest hydroelectric producer. URL: <https://bpa.gov/about/newsroom/news-articles/2022/20220302-generators-like-new-again-at-nations-largest-hydroelectric-producer>
4. CAISO. (2024). *Western Energy Imbalance Market*. URL: <https://caiso.com/Documents/western-energy-imbalance-market-fact-sheet.pdf>
5. Collins, W., & Bronski, P. (2020). *LO3 Energy Updates Pando Platform, Migrates To Energy Web Chain*. URL: <https://medium.com/energy-web-insights/lo3-energy-updates-pando-platform-migrates-to-energy-web-chain-d709ae0e5311>
6. Cramton, P. (2017). Electricity market design. *Oxford Review of Economic Policy*, 33(4), 589-612. DOI:10.1093/oxrep/grx041
7. Cramton, P., Ockenfels, A., & Stoft, S. (2013). Capacity Market Fundamentals. *Economics of Energy and Environmental Policy*, 2(2). DOI:10.5547/2160-5890.2.2.2
8. Diversegy. (б.д.). Retail Energy Supplier Defined. URL: <https://diversey.com/energy-brokers/retail-energy-supplier/>

9. Federal Energy Regulatory Commission. (б.д.). Electric Power Markets. URL: <https://ferc.gov/electric-power-markets>
10. Gagnon, P., Pham, A., & Cole, W. (2024). 2023 Standard Scenarios Report. National Renewable Energy Laboratory. URL: [nrel.gov/docs/fy24osti/87724.pdf](https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/87724.pdf)
11. Gorbachuk, V., Dunaievsky, M., & Batih, L. (2021). New energy and economic changes. *Changes. Adaptation. New economy. Paradigmatic shifts in the 21-st century economic theory*, 45-47.
12. International Energy Agency. (2024). *World Energy Outlook 2024*. IEA. URL: <https://iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
13. IRENA. (2015). *Renewable Energy Prospects: United States of America, REmap 2030 analysis*. Abu Dhabi: IRENA. URL: <https://www.irena.org/publications>
14. Joskow, P. (2005). Transmission Policy in the United States. *Utilities Policy*, 13(2), 95-115. DOI:10.1016/j.jup.2004.12.005
15. Nevius, D. (2020). The History of the North American Electric Reliability Corporation. URL: <https://nerc.com/AboutNERC/Resource%20Documents/NERCHistoryBook.pdf>
16. North American Electric Reliability Corporation. (2024). ERO enterprise long-term strategy. URL: <https://nerc.com/AboutNERC/StrategicDocuments/ERO%20Enterprise-Long-Term-Strategy--Board-Approved-12-10-24.pdf>
17. Ove Arup and Partners Limited. (June 2023). *Electricity market design – evidence from international markets*. Department for Energy Security and Net Zero. URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65e3a2b42f2b3bbc587cd764/1-arup-evidence-from-international-markets.pdf>
18. PCI Energy Solutions. (2025). Understanding Locational Marginal Pricing (LMP) & Congestion in ISO Markets. URL: <https://pcienergysolutions.com/2025/01/17/understanding-locational-marginal-pricing-lmp-congestion-in-iso-markets/>
19. Takemura, A. (2022). *Electric utilities 101: A breakdown of the basics on US power providers*. URL: <https://canarymedia.com/articles/guides-and-how-tos/power-by-people-glossary-bundle>
20. Tennessee Valley Authority. (б.д.) *Transmission* URL: <https://www.tva.com/energy/transmission>
21. Tesla. (б.д.). *Powerwall*. URL: <https://tesla.com/powerwall>
22. The ISO/RTO Council. (2017). Emerging Technologies: How ISOs and RTOs can create a more nimble, robust bulk electricity system.

URL: <https://isorto.org/wp-content/uploads/2024/08/PUBLIC-IRC-Emerging-Technologies-Report-FINAL-IRC-CEO.pdf>

23. U.S. Congress. (2010). Dodd-frank wall street reform and consumer protection act. USA. URL: <https://congress.gov/111/plaws/publ203/PLAW-111publ203.pdf>

24. U.S. Congress. (2005). Energy policy act of 2005. URL: <https://congress.gov/109/plaws/publ58/PLAW-109publ58.pdf>

25. U.S. Congress. (2013). Public utility regulatory policies act of 1978. URL: <https://ferc.gov/sites/default/files/2021-04/Public-Utility-Regulatory-Policies-Act-of-1978.pdf>

26. U.S. Congress. (2018). Federal Power Act. URL: https://ferc.gov/sites/default/files/2021-04/federal_power_act.pdf

27. U.S. Congress. (2022). Securities Exchange Act of 1934. URL: <https://govinfo.gov/content/pkg/COMPS-1885/pdf/COMPS-1885.pdf>

28. U.S. Department of Energy. (б.д.). Office of Cybersecurity, Energy Security, and Emergency Response. URL: <https://energy.gov/ceser/office-cybersecurity-energy-security-and-emergency-response>

29. U.S. Department of Energy. (б.д.). State, Local, Tribal, and Territorial Program. URL: https://energy.gov/sites/default/files/2023-08/Balancing%20Authority%20Backgroundunder_2022-Formatted_041723_508.pdf

30. U.S. Energy Information Administration. (2019). *Investor-owned utilities served 72% of U.S. electricity customers in 2017*. URL: eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=40913

31. U.S. Energy Information Administration. (2023). The National Energy Modeling System: An Overview. URL: [eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581\(2023\).pdf](https://eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581(2023).pdf)

32. U.S. Energy Information Administration. (б.д.). Electric Power Monthly. URL: https://eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_1_1

33. U.S. Energy Information Administration. (б.д.). *Hourly Electric Grid Monitor*. URL: eia.gov/electricity/gridmonitor/dashboard/electric_overview/US48/US48

34. Zhou, Z., Levin, T., & Conzelmann, G. (2016). Survey of U.S. Ancillary Services Markets. Argonne National Laboratory. URL: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2016/01/124217.pdf>

35. Генеральна Асамблея Організації Об'єднаних Націй. (2015). Резолюція. *Глобальні цілі сталого розвитку до 2030 року*. URL: <https://undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ua/Agenda2030-UA.pdf>

36. Голоцукова, Т., & Ламонов, П. (2024). Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації, VI науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України. *Цифрове підприємство та цифрові двійники: виклики та можливості інтеграції* 87-90. Київ : ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України.

37. Євдокімов, В., Борукаєв, З., & Остапченко, К. (2024). Комп'ютерна система моделювання процесів ціноутворення на оптовому ринку електроенергії. *Технічна електродинаміка* (2), 72-81. DOI: 10.15407/techned2024.02.072

Information about the author:

Tamila Golotsukova

Lead Software Engineer

at the Department of Intelligent Information Technologies,

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics

of the National Academy of Sciences,

40, Academician Glushkov Avenue, 03187, Ukraine