

БАГАТОРІВНЕВІ ПІДХОДИ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ

Горбачук В.М., Бардадим Т.О.

ВСТУП

Багаторівневі (зокрема дворівневі) моделі¹ для децентралізованих енергетичних мереж² відіграють вирішальну роль³ у просуванні глобального сталого розвитку⁴, враховуючи його соціально-економічний та екологічний виміри⁵, забезпечуючи витончену структуру для оптимізації складних енергетичних систем⁶, фундаментальних для досягнення багатьох із 17 Цілей сталого розвитку (Sustainable Development Goals (SDGs)), визначених ООН у 2015 р.⁷ Дворівневі моделі енергетики⁸ допомагають досягати SDG 7 «Доступна та чиста енергія» та завдання 7.1 «До 2030 року забезпечити загальний доступ до недорогих, надійних та сучасних енергетичних послуг».

¹Горбачук В. М., Гаркуша Н. І. Багаторівневі моделі та методи обчислюваної загальної рівноваги. *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. 2009. № 3. С. 121–126.

²Горбачук В. М., Ніколенко Д. І., Пустовойт М. М., Рибачок Д. О., Сабадаш Є. О. До цифрової децентралізації енергетики. *Кібербезпека енергетики* (29 травня 2024 р., Київ, Україна). Київ: Інститут проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є.Пухова НАН України, 2024. С. 37–40.

³Gorbachuk V., Lupey M., Suleimanov S.-B. Global decentralized mechanisms of data management. *Digitalization and Information Society. Selected Issues*. A. Ostenda, T. Nestorenko (eds.) Katowice, Poland: University of Technology, Katowice, 2022. P. 373–385. (in Ukrainian)

⁴Kyrylov Y., Hranovska V., Savchenko V., Kononenko L., Gai O., Kononenko S. Sustainable rural development in the context of the implementation of digital technologies and nanotechnology in education and business. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. 20 (S8). P. 297–323.

⁵Грановська В., Кононенко Л., Савченко В. Функціонування дорадчих служб у контексті забезпечення сталого сільського розвитку. *Економіка та суспільство*. 2024. № 69. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-69-111>

⁶Горбачук В. М. Децентралізація е-уряду та зростання. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: економічні науки*. 2015. Вип. 11. С. 161–167.

⁷Кирилов Ю. Є., Грановська В. Г., Кононенко Л. В. Агроконсалтинг як інструмент забезпечення реалізації сталого сільського розвитку. *Економічний простір*. 2024. № 193. С. 102–108.

⁸Gorbachuk V. M. Simple descent algorithm without subproblems for a class of nonsmooth bilevel programming. *Discrete and Global Optimization. International Conference in Honor of 50-th Anniversary of Glushkov Institute of Cybernetics* (July 31 – August 2, 2008, Yalta, Ukraine). Kyiv: V.M. Glushkov Institute of Cybernetics; Texas A&M University; University of Florida, 2008. P. 14.

Дворівневі моделі сприяють більшому впровадженню відновлюваної енергії⁹, оптимізуючи інтеграцію в мікромережі та локальні мережі¹⁰ таких розподілених енергетичних ресурсів (Distributed Energy Resources (DERs)), як сонячні, вітрові та накопичені в батареях джерела енергії¹¹: лідер (наприклад, оператор мікромережі) може оптимізувати максимальне використання відновлюваних джерел енергії¹², а послідовники (споживачі) коригують своє споживання чи генерацію¹³, реагуючи на стратегію лідера¹⁴. Таким чином, досягається завдання 7.2 «До 2030 року суттєво збільшити частку відновлюваної енергії у світовому енергетичному балансі».

Дворівневі моделі дозволяють здійснювати витончений менеджмент¹⁵ з боку попиту й енергетичний арбітраж¹⁶, розробляючи динамічні схеми ціноутворення чи стимули¹⁷, які заохочують споживачів перенаправляти споживання енергії на години поза піковими навантаженнями або на години більшого виробництва енергії з відновлюваних

⁹Горбачук В. М., Єрмольєв Ю. М., Єрмольєва Т. Ю. Двоетапна модель еколого-економічних рішень. *Вісник Одеського національного університету. Економіка*. 2016. Т. 21. Вип. 9. С. 142–147.

¹⁰Горбачук В. М., Кошулько А. І., Сирку А. А. Розподілені децентралізовані мережі сенсорів для спостережень Землі. *16-th Ukrainian Conference on Space Research* (August 22–27, 2016, Odesa, Ukraine). Kyiv: State Space Agency of Ukraine, 2016. P. 192.

¹¹Gorbachuk V. M., Bardadaym T. O., Osypenko S. P. The problem of decentralized decision making for modern cloud services. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Physical and Mathematical Sciences*. 2024. 2021 (2). P. 32–38.

¹²Горбачук В. М., Гаркуша Н. І. Задачі дворівневого прийняття рішень. *PDMU-2006* (21–25 травня 2006 р., Східниця, Україна). Київ: Київський національний університет імені Т. Шевченка, 2006. С. 178–180.

¹³Горбачук В. М. Метод дворівневого страхування для визначення оптимальних часток центрального та регіонального бюджетів на безпеку регіонів. *Теорія прийняття рішень* (29 вересня – 4 жовтня 2008 р., Ужгород, Україна). Ужгород : УжНУ, 2008. С. 69–70.

¹⁴Великий А. П., Горбачук В. М., Єрмольєв Ю. М., Кнопов П. С. Взаємодія централізації і децентралізації у міждисциплінарній кібернетичі академіка Глушкова. *Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку* (12–13 вересня 2013 р., Київ, Україна). Київ : Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, 2013. С. 241–243.

¹⁵Горбачук В. М., Дунаєвський М. С. Математичні моделі підвищення ефективності децентралізованих систем та їх застосування. *Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності* (11–12 жовтня 2022 р., Вінниця, Україна). Вінниця : Вінницький національний політехнічний університет, 2022. С. 65–77.

¹⁶Gorbachuk V., Dunaievskiy M., Suleimanov S.-B. Modeling of agency problems in complex decentralized systems under information asymmetry. *IEEE Conference on Advanced Trends in Information Theory* (December 18–20, Kyiv, Ukraine). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2019. P. 449–454.

¹⁷Горбачук В. М. Втрати і виграші у децентралізованих системах. *Контроль і управління в складних системах* (14–16 жовтня 2014 р., Вінниця, Україна). Вінниця : ВНТУ, 2014. С. 30.

джерел¹⁸, тим самим підвищуючи загальну ефективність економічної системи та зменшуючи марнотратство¹⁹. Отже, досягається завдання 7.3 «До 2030 року подвоїти глобальні темпи підвищення енерго-ефективності».

Децентралізовані енергетичні мережі, особливо міні-мережі та автономні (позамережеві) рішення, є життєво важливими для забезпечення електроенергією недостатньо обслуговуваних або віддалених громад²⁰, де розширення основної мережі є економічно недоцільним²¹. Дворівневі моделі можуть оптимізувати проектування, експлуатацію та розміщення ресурсів енергосистем²², щоб гарантувати їх доступність, надійність та стійкість для місцевого населення, допомогати визначати оптимальні інвестиційні стратегії для нових DERs та інфраструктури²³. Таким чином, досягається завдання 7.b «До 2030 року розширити інфраструктуру та модернізувати технології для забезпечення сучасних і самопідтримуваних енергетичних послуг для всіх у країнах, що розвиваються, зокрема найменш розвинених країнах, малих острівних державах, що розвиваються, та країнах, що розвиваються, що не мають виходу до моря, відповідно до їхніх відповідних програм підтримки».

1. Методи моделювання регіонального спотового енергоринку

За даними Міжнародного енергетичного агентства (заснованого у 1974 р.), у 2023 р. 35% викидів парникових газів світу припадало на Китай, де основним джерелом таких викидів є енергетика. Водночас Китай розвиває регіональний спотовий ринок електроенергії (regional electricity spot market (RESM))²⁴. Порівняння результатів, отриманих при

¹⁸Горбачук В. М., Дунаєвський М. С. До економічної організації децентралізації. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем* (20–22 листопада 2019 р., Дніпро). Дніпро : ДНУ імені О. Гончара, 2019. С. 69–70.

¹⁹Горбачук В. М., Ляшко В. І., Сирку А. А. Питання децентралізованого консенсусу блокчейнів. *Інфраструктура ринку*. 2019. 34. С. 325–332.

²⁰Горбачук В. М., Гудима А. В. Регіональний перерозподіл за централізації та децентралізації. *Науковий вісник Чернівецького університету. Економіка*. 2012. С. 179–184.

²¹Горбачук В. М., Толубко І. Є., Пелехов С. П. Глобальні децентралізовані системи підтримки прийняття рішень. *Досвід та перспективи застосування загальнодержавних автоматизованих систем управління в соціально-економічній сфері* (28 листопада 2013 р., Київ, Україна). Київ : НТУУ «КПІ», 2013. С. 48–51.

²²Горбачук В. М., Гаркуша Н. І. Перерозподіл за централізації і децентралізації. *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. 2011. № 3. С. 129–132.

²³Горбачук В. М. Часткова децентралізація як інструмент системної стійкості. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія: економіка та менеджмент*. 2015. Вип. 11. С. 317–321.

²⁴Li Y., Zhang L., Cong Y., Chen H., Zhang F. Designing a clearing model for the regional electricity spot market based on the construction of the provincial electricity market: a case study

експлуатації RESM в різних провінціях (областях), із спостереженнями, отриманими без експлуатації RESM, показало для регіонів значне зменшення середньої вартості закупівлі електроенергії на добу, виявляючи також істотне зменшення середніх загальних викидів вуглецю на добу та на кіловат-годину; зберігаючи при цьому ймовірність відключення електроенергії не вище 5%.

У січні 2024 р. у м. Шанхай (КНР) відбулася стартова нарада з побудови ринку електроенергії в дельті р. Янцзи, а Національне енергетичне управління Китаю (започатковане у 1988 р. як Міністерство енергетики) оголосила про початок побудови ринку електроенергії у дельті р. Янцзи. Цей ринок включає електромережі десятків міст чотирьох провінцій Аньхой, Цзянсу, Чжецзян, Шанхай. У 2017 р. уряд Китаю розпочав першу партію пілотних проєктів для спотового ринку електроенергії у вибраних восьми регіонах (південна енергомережа Китаю, західна енергомережа Внутрішньої Монголії, Чжецзян, Шаньдун, Фуцзянь, Сичуань, Ганьсу, Гуандун)²⁵. Після кількох років науково-практичних робіт ці регіони поступово перейшли до етапу довгострокових розрахункових експериментальних операцій²⁶. Для подальшого поглиблення реформи ринку електроенергії та розширення масштабів пілотних проєктів для спотового ринку електроенергії було вибрано інші шість провінцій (Шанхай, Цзянсу, Аньхой, Ляонін, Хенань і Хубей), де послідовно ініціювалися імітаційні експериментальні операції, створюючи міцний фундамент для офіційних операцій²⁷.

По-перше, у багаторівневій системі менеджменту диспетчеризації та відповідальності на рівні областей за гарантування постачання і безпеки електрики в Китаї організація диспетчеризації структурується на п'ять рівнів, де на національні, регіональні та обласні диспетчерські інституції електромереж покладаються завдання диспетчеризувати мережі електропередач на відповідних рівнях. Муніципальні та окружні диспетчерські інституції відповідають за диспетчеризацію розподільчих мереж усіх рівнів. Регіональні диспетчерські інституції відіграють

of the Yangtze river delta regional electricity market in China. *Processes*. 2025. 13 (2). 492. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13020492>

²⁵Chen Y.; Zhang W.; Zhang C.; Wu P. Operation mechanism of inter-provincial and intra-provincial spot market for promoting new energy consumption. *Automation of Electric Power Systems*. 2021. Vol. 45 (14). P. 104–113.

²⁶Chen Y.; Wang H.; Yan Z.; Xu X.; Zeng D.; Ma, B. A two-phase market clearing framework for inter-provincial electricity trading in Chinese power grids. *Sustainable Cities and Society*. 2022. 85 104057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104057>

²⁷Du F.; Hu R.; Liu Z.; Zhang X.; Zhang R. Research on regional spot market clearing model considering subregional power exchange constraints. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. 2592. 012069. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2592/1/012069>

вирішальну роль у підтримці безпечної та стійкої роботи регіональних електромереж, а обласні диспетчерські інституції відповідають за баланс електроенергії у межах своїх областей. В цьому контексті, існуючі механізми глобального ринку електроенергії не можуть повністю інтегруватися із системою диспетчеризації електроенергії в Китаї. Отже, при проектуванні RESM важливо брати до уваги самоузгодженість і взаємодію між розробкою ринкового механізму та системою диспетчерського управління електроенергетикою. Крім того, обласні диспетчерські агентства надають пріоритет забезпеченню безпечного та надійного електропостачання в своїх областях. Тому кожна обласна енергомережа бере активну участь у розбудові RESM лише за передумови гарантування своєї власної безпеки електропостачання.

По-друге, розбудова RESM поступово просувається на основі існуючих досягнень у розбудові обласного ринку електроенергії в Китаї, починаючи з 2017 р., коли Китай оголосив про першу групу пілотних областей для розбудови обласних спотових ринків. Сьогодні 14 пілотних областей стійко рухаються у розбудові своїх ринків, а 9 областей визначено ключовими для просування спотового ринку. Ці зусилля генерують значні економічні вигоди за рахунок раціонального розміщення ресурсів. Розбудова регіонального ринку враховує завершені обласні спотові ринки, капіталізуючи великі попередні витрати на них, включаючи витрати людських і матеріальних ресурсів. Таким чином, при проектуванні RESM необхідно враховувати існуючі досягнення розбудови обласного енергетичного ринку та спадкоємність стратегічних дій.

Сьогодні немає міжнародного стандарту, застосовного до міжобласної спотової торгівлі, яка може безпосередньо запроваджуватися в Китаї. Наприклад, ринок електроенергії у США між штатами Пенсільванія, Нью-Джерсі, Меріленд (Pennsylvania–New Jersey–Maryland (PJM)) має масштаб ринку та структуру мережі, дещо подібні до південного регіонального ринку електроенергії в Китаї. Проте окремі штати у США мають відносно високий ступінь незалежності. Більшість їх пропозицій та попиту на електроенергію балансується на місцевому рівні, що веде до низького попиту для широкого розміщення енергії. В результаті ринок PJM управляється та диспетчеризується одним системним оператором без багаторівневої диспетчерської структури, а міжрегіональної системи передачі та торгівлі не було встановлено. На регіональному енергоринку в Північній Європі був встановлений уніфікований механізм оптимізації клірингу для транскордонної спотової торгівлі електроенергією. Проте, оскільки перенавантаження в Скандинавській (Нордичній) енергосистемі в основному відбуваються

в транскордонних і міжрегіональних зонах, їх модель клірингу не враховує обмеження дрібніших потоків у кожному регіоні. Тому така модель не підходить для регіонального ринку електроенергії Китаю, де перенавантаження є значною проблемою. Від 2005 р. спотовий ринок електроенергії Великобританії зазнав серйозних реформ, спрямованих на створення уніфікованої та ефективної системи торгівлі електроенергією. Ці реформи включають впровадження: єдиного механізму трансакцій, балансів і розрахунків; стандартизацію ціноутворення на передачу електроенергії та контрактів на право користування енергомережею; сприяння ринковій конкуренції та розвитку відновлюваної енергетики. Ці заходи значно знизили операційні витрати, подолали ринкові монополії та підвищили ринкову конкурентоспроможність. Водночас реформа сприяла ефективному використанню відновлюваної енергетики та зниженню витрат, спрямовуючи розвиток ринку електроенергії Великобританії у більш відкритому, ефективному та самопідтримуваному напрямку.

Загалом ринок PJM у США, Нордичний енергоринок та енергоринок Великобританії мають унікальні характеристики щодо своїх операційних механізмів, ринкових структур і торгових режимів. Ринок PJM спирається на централізовану торгівлю та вузлове ціноутворення; Нордичний ринок зосереджується на транскордонній торгівлі та ринковій інтеграції, а ринок Великобританії покладається в основному на двосторонні контракти, доповнювані централізованою торгівлею. Вищезазначені ринки відображають особливості реформ і шляхи розвитку енергоринків у різних країнах та регіонах. Таким чином, розвинені структурні механізми для об'єднаних систем спотового ринку електроенергії у США, Північній Європі та Великобританії тісно пов'язуються зі своїми інституційними засадами, які важко безпосередньо переносити на інші країни. Враховуючи суттєві відмінності між Європою та США за системами енергозабезпечення, за мотиваціями побудови ринків та за цілями (що демонструють системи диспетчерського управління електроенергетикою та інші граничні умови), можна припустити нежиттєздатність простої реплікації аналогічних структурних механізмів у Китаї. Отже, вищезазначений досвід розбудови типового зрілого ринку електроенергії (у США, Північній Європі та Великобританії) не відповідає фактичній ситуації з розбудови регіонального ринку електроенергії в Китаї.

Починаючи з 2020-х рр. поглиблювалися дослідження з координації міжобласних та обласних спотових енергоринків. Висуваються ключові питання та рішення для координованої роботи міжобласних та обласних спотових ринків електроенергії у майбутній регіональній енергомережі,

основаній на наявних розробках вітчизняного спотового ринку. При цьому встановлюється механізм оптимізації та координації між ринками для сприяння впорядкованому з'єднанню декількох обласних і міжобласних ринків. Вивчається пілотний приклад операцій спотового ринку провінції Гуандун для оцінювання ефективності спотового ринку електроенергії Китаю, використовуючи широкі фактичні (ex post) ринкові дані. На основі фактичних даних регіонального ринку електроенергії Пекін–Тяньцзінь–Таншань досліджується вплив трьох структур ринку електроенергії (вертикальна монополія, слабка монополія, монополістична конкуренція) на впровадження відновлюваної енергетики. Пропонується дворівнева модель, яка поєднує обмеження обміну електроенергією в субрегіоні. Граничні умови цієї моделі, основані на результатах задачі керування генеруючими потужностями у кліринговій моделі кожного субрегіону, використовуються для клірингу регіонального спотового ринку.

Щоб повною мірою скористатися енергоресурсами, багато місцевих електромереж обласного рівня Китаю долучилися до міжобласної торгівлі електроенергією. У даний час у Китаї поступово розвиваються дослідження щодо формування цін міжобласної торгівлі електроенергією, механізмів трейдингу та клірингових моделей. Починаючи з 2022 р., вводяться поняття пробної експлуатації та ефективності міжобласного спотового ринку електроенергії для аналізу механізму міжобласної спотової торгівлі з точки зору ринкової структури, механізму клірингу та механізму декларування. Аналізуються переваги децентралізованого міжобласного збалансованого ринку в питаннях викривлення цін, розміщення ресурсів, підтримання постійного балансу попиту і пропозиції електроенергії, сприяння інтеграції відновлюваної енергетики. Пропонується двоетапна ринкова клірингова структура для сприяння міжобласній торгівлі електроенергією. На першому етапі проводиться попередня обробка кривої ставок. На другому етапі вводиться дворівнева модель процесу клірингу ринку, де верхній рівень призначений для міжобласних трансакцій, а нижній – для місцевих трансакцій.

Пропонується дворівнева модель прийняття рішень для клірингу місцевого ринку²⁸. На верхньому рівні оптимізується місцевий ринок за допомогою моделі односторонніх торгів, де мінімізуються операційні витрати на ринку електроенергії. Водночас на нижньому рівні оптимізуються закупівлі електроенергії шляхом мінімізації витрат на

²⁸Горбачук В. М., Русанов И. А. Декомпозиция для решения двухуровневой задачи. *Компьютерная математика*. 2011. № 1. С. 120–128.

придбання місцевої відновлюваної енергії. Для зменшення обчислювальних ресурсів, яких потребує модель дворівневої рівноваги, пропонується обчислювально ефективна модель однорівневої рівноваги, де виробники та споживачі пропонують (заявляють) як обсяги, так і ціни електроенергії²⁹. В наявних дослідженнях клірингу спотового ринку електроенергії пропонуються моделі клірингу місцевого ринку, а в окремих дослідженнях також розвиваються дворівневі оптимізаційні клірингові моделі, де враховуються міжобласні та обласні трансакції електроенергії. Однак сучасні моделі не враховують належним чином кілька своєрідних факторів: поточний стан розбудови спотового ринку електроенергії в Китаї; багаторівневу систему диспетчерського управління електроенергетикою; відповідальність за гарантування безпеки місцевої мережі; міжобласну координацію та оптимізацію мережі³⁰. Розроблені моделі дозволяють оптимізувати стратегії роботи енергоблоків на місцевому ринку та регулюють інтерактивну потужність між місцевими мережами під час оптимізації міжобласних трансакцій електроенергії, але не можуть коригувати стратегії роботи місцевих енергоблоків під час оптимізації міжобласної мережі (серед місцевих ринків)³¹. Як наслідок, ці моделі не можуть ефективно з'ясовувати питання перенавантаження регіональної мережі та її безпечної роботи. В цілому існуюча за кордоном система ринку електроенергії не підходить для розбудови RESM у Китаї.

Крім того, існуюча оптимізаційна модель регіонального ринку електроенергії, як правило, є загальною моделлю, для якої відомі багато розв'язувачів³², але яка не відповідає фактичному стану з оптимізацією RESM у Китаї. Існуючі клірингові моделі здебільшого зосереджуються на конкретних сценаріях, шаблонах, технологіях трейдингу, не враховуючи особливості енергосистеми та вимоги енергобезпеки в цілому³³. Тому для підтримки розбудови та ефективної роботи RESM у Китаї спочатку необхідно дослідити ієрархічну оптимізаційну модель, основу на елементах механізму RESM.

²⁹Горбачук В. М. Методы с усреднением для решения класса задач двухуровневого программирования. *Компьютерная математика*. 2008. № 2. С. 127–134.

³⁰Горбачук В. М., Ненахова С. Г. Метод решения задачи многоуровневого программирования. *Теорія оптимальних рішень*. 2005. № 4. С. 73–79.

³¹Горбачук В. М. Параллельные методы решения задач двухуровневого программирования и их применения. *Компьютерная математика*. 2008. № 1. С. 159–165.

³²Горбачук В. М., Гаркуша Н. І. Необхідні умови першого порядку для задач дворівневої оптимізації. *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. 2010. № 2. С. 116–119.

³³Горбачук В. М. Дворівневе лінійне дробове програмування. *Теорія прийняття рішень* (27 вересня – 1 жовтня 2010 р., Ужгород, Україна). Ужгород : УжНУ, 2010. С. 65–66.

З урахуванням стану розбудови RESM у Китаї, пропонуються механізми клірингу та оптимізації для RESM на обласному та регіональному рівнях. Будується ієрархічна модель клірингу ринку, що враховує оптимальну стратегію керування генеруючими потужностями енергоблоків на обласному ринку та гарантує економічну, безпечну, низьковуглецеву експлуатацію регіональної електромережі³⁴. Крім того, пропонується швидкий метод пошуку розв'язків для клірингової моделі. Потім проводиться імітаційний аналіз, оснований на фактичних даних RESM у дельті р. Янцзи в Китаї.

По-перше, розробляється дворівнева клірингова схема й оптимізаційна модель RESM. Враховуючи безпрецедентні виклики при розбудові RESM у Китаї, запроваджується дворівнева оптимізаційна схема клірингу й експлуатації, яка включає попередній кліринг на місцевому ринку та оптимізацію з коригуванням на регіональному ринку. Модель нижнього рівня слугує в якості моделі попереднього клірингу для обласного спотового ринку електроенергії, де оптимізується стратегія поєднання енергоблоків, з урахуванням обмежень експлуатації енергоблоків і безпеки місцевої електромережі. Модель верхнього рівня є кліринговою оптимізаційною моделлю RESM, де оптимізується клірингова ціна, коригується стратегія експлуатації енергоблоків, формується трейдингова стратегія на міжобласному ринку електроенергії, враховуючи обмеження безпеки ліній сполучення міжобласної електромережі.

По-друге, у якості прикладу імітується RESM, що складається з електромереж регіону дельти р. Янцзи в Китаї. Аналіз зосереджується на робочому стані електромережі після впровадження RESM, оцінюючи безпекові переваги й еколого-економічні вигоди. Для безпекових переваг аналіз зосереджується на кількості періодів перенавантаження лінії, кількості перенавантажених ліній та величині перенавантаження ліній. Для економічних вигод оцінюються загальні витрати на купівлю електроенергії. Для екологічних вигод аналізуються такі індикатори, як викиди вуглецю на одиницю електроенергії, величина і темп скорочення відновлюваної енергії.

2. Системна структура й операційний механізм RESM

Досліджувана RESM формується шляхом фізичного з'єднання та координованої роботи обласних спотових ринків електроенергії. Оператор регіонального спотового ринку (regional market operator

³⁴Горбачук В. М. Про метод Банаха–Кнастера–Штейнгауза пошуку рівноважних децентралізованих рішень. *Обчислювальна та прикладна математика* (8–9 жовтня 2015 р., Київ). Київ : Київський національний університет імені Т. Шевченка, 2015. С. 41–43.

(RMO)) електроенергії виступає організатором та координатором функціонування RESM, тоді як оператор обласного ринку електроенергії (provincial market operator (PMO)) виконує роль безпосереднього учасника.

До складу учасників обласного спотового ринку входять виробники електроенергії від вітрових, фотоелектричних, гідроенергетичних і теплових вугільних джерел, а також оптові споживачі електроенергії та компанії, які постачають енергію. Функціональним органом обласного спотового ринку електроенергії є відповідний РМО, на якого покладається організація проведення ринкових трансакцій між виробниками та споживачами енергії в межах області, а також звітність перед RMO (оператором RESM) про оптимізовану стратегію управління генеруючими потужностями та відповідні параметри оптимізації. RMO відповідає за кліринг електроенергії в RESM і коригування стратегії роботи, виходячи з обласних котирувань та інформації про потужність, які надходять від РМО, гарантуючи економну і безпечну роботу RESM.

Системна структура RESM складається з центру трейдингу RESM та обласних центрів трейдингу енергоринків (набору РМОs), які отримують результати клірингу від центру трейдингу RESM і надають йому результати міжобласного попереднього клірингу. Кожний РМО отримує від обласних виробників електроенергії (з вітрових, фотоелектричних, гідроенергетичних і теплових вугільних джерел) заявки на генерацію електроенергії, а від обласних споживачів електроенергії (оптових споживачів електроенергії, компаній з продажу електроенергії) – інформацію про попит енергонавантаження. У свою чергу, кожний РМО надає своїм обласним виробникам і споживачам електроенергії результати ринкового клірингу.

Щоб глибше розуміти практичні питання і особливості у процесі розбудови RESM у Китаї, забезпечувати методологічну основу та підтримку для проєктування операційного механізму RESM і побудови моделі клірингу електроенергії (розрахунків за електроенергію), слід проаналізувати вплив цих особливостей на побудову RESM.

На основі проведеного аналізу пропонується стратегія вирішення проблеми, яка полягає у поетапному підході попереднього клірингу обласного ринку та оптимізації з коригуванням клірингу міжобласного ринку.

Аналіз ключових чинників впливу при проєктуванні RESM у Китаї включає ринкову ситуацію з відповідними існуючими проблемами, а також поточні оптимальні рішення. Ринкова ситуація задається операційним механізмом електромережі та досягненнями в ринковій розбудові.

Операційний механізм електромережі включає систему управління з диспетчеризації електромережі, зокрема 5 різних рівнів інституцій менеджменту, і відповідальність областей за гарантування місцевого енергопостачання. Звідси впливають проблеми перенавантаження в регіональній електромережі внаслідок регіональної суперпозиції результатів клірингу на кожному обласному ринку, яка зберігає певний потенціал для поліпшення соціального добробуту спотових енергоресурсів³⁵.

Досягнення в ринковій розбудові включають конструкцію швидкого резервування на обласному ринку електроенергії і співіснування централізованого та децентралізованого спотових ринків електроенергії. Звідси впливають проблеми повного використання досягнень конструкції обласного спотового ринку як необхідної основи та підтримки для єдиного національного спотового ринку електроенергії.

Поточними оптимальними рішеннями є оптимізація попереднього клірингу обласного ринку та оптимізація з коригуванням клірингу регіонального ринку.

Беручи до уваги, що підсумковий кліринг RMO після клірингу RMO вестиме до серйозних перенавантажень, проблем з безпекою та суттєвих економічних втрат у регіональній електромережі, запроваджується концепція попереднього клірингу. Тут попередній кліринг визначається як процес прийняття рішень на рівні обласного ринку. У пропонуваній стратегії RMO шляхом оптимізації попереднього клірингу формує стратегію поєднання енергоблоків на обласному рівні та звітує про це перед RMO. Далі RMO визначає ціну, виходячи з фактичного стану роботи регіональної електромережі. Такий підхід суттєво відрізняється від наявних моделей клірингу RESM.

При аналізі впливу багаторівневої системи управління диспетчеризацією електромережі Китаю виділяють 5 рівнів організацій з диспетчеризації: національна; організації на рівні муніципалітету, автономного регіону, кількох областей; організації на рівні муніципалітету, автономного регіону, області; організації на рівні муніципалітету; організації на рівні округу (району, повіту).

Серед них організації на національному, регіональному та обласному рівнях відповідають за диспетчеризацію магістральних ліній електропередач, а організації на рівні муніципалітетів і округів здійснюють диспетчеризацію розподільчих мереж. Регіональний диспетчерський рівень гарантує безпечну та стійку роботу регіональної електромережі,

³⁵Горбачук В. М., Макаренко О. С. Особливості прийняття рішень людиною для розв'язання складних міждисциплінарних проблем. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2017. № 3. С. 73–87.

обласний диспетчерський рівень відповідає за енергобаланс у межах відповідної області. Розбудова спотових ринків потребує координації диспетчеризації на вищезазначених рівнях 1) держави, регіонів, областей, 2) окремих регіонів, 3) окремих областей.

Національна організація з диспетчеризації відповідає за безпечну експлуатацію міжобласних і міжрегіональних ліній електропередачі постійного струму (direct current (DC)), регіональна – за безпечну експлуатацію ліній електропередачі змінного струму (alternating current (AC)) напругою 500 кВ у межах регіону, а обласна – за безпечну експлуатацію ліній змінного струму напругою 220 кВ у межах області.

У межах однієї регіональної електромережі кілька обласних електромереж з'єднуються між собою лініями електропередачі змінного струму. Як наслідок, потоки електроенергії на лініях електропередачі області залежать не лише від виробництва електроенергії в межах даної області, але й від виробництва електроенергії в інших областях регіону. Після проведення незалежного клірингу кожного обласного ринку лінії електропередачі стають менш вразливими до перенавантаження. Проте перенавантаження може виникати, коли потоки електроенергії від різних областей надходять у спільну мережу, оскільки в процесах клірингу обласних спотових ринків не повністю враховуються мережеві обмеження.

Тому регіональний ринок потребує проведення верифікації безпечної експлуатації та менеджменту перенавантаженнями на основі результатів ринкового клірингу в кожній області. У Китаї кожна область несе відповідальність за безпечне та надійне електропостачання в межах своєї власної юрисдикції. Це означає, що для кожної області пріоритет уникнення безпекових ризиків для свого власного енергопостачання є вищим, ніж пріоритет підтримки регіонального розвитку. Кожна область має надавати вищий пріоритет безпеці свого власного енергопостачання, залучаючись до взаємної допомоги та обміну ресурсами з іншими областями регіону.

Для гарантування безпечного та надійного енергопостачання для кожної області передбачаються певні права:

а) Право оцінювати свої власні ситуації та визначати загальні структури для ринкових пропозицій, попиту, імпорту та експорту. Це вимагає від кожної області формування прийнятних планів імпорту та експорту, гарантуючи прийнятні обмеження на імпорт або експорт електроенергії. Обмеження енергобалансу кожної області має враховувати ці плани імпорту та експорту.

б) Право приймати рішення про склад своїх власних генеруючих енергоблоків. Області мають визначати склад своїх генеруючих

енергоблоків заздалегідь, звітувати про це до регіонального рівня проводити ринковий кліринг в межах визначеної конфігурації, оптимізуючи обсяги виробництва генеруючих енергоблоків. Водночас цільова функція оптимізації на регіональному рівні не враховує витрати на запуск і зупин генеруючих енергоблоків, оскільки ці рішення залишаються в компетенції областей.

с) Право фіксувати обсяги виробництва певних генеруючих енергоблоків, що звужує коло генеруючих енергоблоків, робота яких може оптимізуватися на регіональному ринку.

Крім того, ці положення визначають не детальну клірингову модель RESM, а окреслюють її структуру, виділяючи поділ обов'язків і повноважень між обласними та регіональними електромережами.

Починаючи з вересня 2017 р., коли Національна комісія з розвитку і реформ та Національне енергетичне управління оголосили склад першої групи пілотних провінцій, Китай активно впроваджує розбудову обласних спотових ринків електроенергії. Сьогодні 14 пілотних провінцій поступово просуваються у розвитку своїх ринків, а 9 провінцій визнаються ключовими зонами для розбудови спотових ринків. Деякі провінції (Шаньсі, Внутрішня Монголія, Гуандун) запровадили свої провінційні спотові ринки, генеруючи значні економічні вигоди та досягаючи раціональної оптимізації ресурсів.

Розбудова регіональних ринків не має підривати завершену конструкцію провінційних спотових ринків, не вести до марнування попередніх незворотніх інвестицій (sunk costs) і до значних людських та матеріальних втрат. Розвиток регіональних ринків виявляє залежність від шляху попереднього розвитку (path dependence) і має спиратися на досягнення конструкції провінційних спотових ринків. На цьому фундаменті необхідно встановлювати ефективні зв'язки з провінційними спотовими ринками, щоб усувати міжобласні бар'єри та досягати оптимізованого розміщення ресурсів на більшому просторі. Тоді застосовним є хронологічний підхід до аналізу впливів, згідно з яким спочатку відбувається кліринг обласних ринків, а потім – регіональних. Важливим є аналіз впливу поточного етапу реформування ринку електроенергії, на основі обласних ринків.

З огляду на те, що обласні спотові ринки можуть бути як централізованими, так і децентралізованими, проектування регіональних ринків має враховувати сценарії, де кожний обласний ринок може бути централізованим, децентралізованим або змішаним. Оскільки на централізованих ринках середньо- та довгострокові контракти є фінансовими за своєю природою, а не фізичними, то кліринг спотового ринку їх не потребує. Однак на децентралізованих ринках більшість

таких контрактів є фізичними за своєю природою і передбачають фізичне втілення. При клірингу спотових ринків коригування вихідної генерації електроенергії вгору і вниз залежить від витрат на цю генерацію. Отже, цільові функції оптимізації для клірингу регіонального ринку мають включати дві складові: на централізованих ринках витрати генерації мають враховувати лише витрати на коригування вихідної генерації електроенергії вгору, виходячи з мінімальної вихідної потужності активних енергоблоків і рішень областей про склад своїх власних генеруючих енергоблоків; на децентралізованих ринках витрати генерації мають враховувати витрати на коригування вихідної генерації електроенергії вниз і вгору, виходячи з наявних обласних планів виробництва для генеруючих енергоблоків. Оскільки кожна область має звітувати про свій склад генеруючих енергоблоків перед регіональним ринком, то централізовані ринки, на відміну від децентралізованих, мають проводити спочатку попередній кліринг.

3. Дворівнева модель енергоринку

У поширеній дворівневій моделі ринкового клірингу стратегія роботи енергоблоку (генератора), визначена після клірингу провінційного ринку, часто не враховується для коригування при подальшій оптимізації клірингу міжпровінційної енергомережі на верхньому рівні. Тому безпечну роботу ліній сполучення гарантують лише шляхом оптимізації плану трансакцій між провінційними енергомережами. Згадане коригування обмежене та недостатнє для задоволення вимог експлуатаційної безпеки RESM у Китаї.

Виходячи з існуючих досліджень факторів впливу для проектування та аналізу механізму роботи RESM, сформулюємо комплексну дворівневу модель оптимізації роботи RESM.

Нижній рівень включає модель попереднього клірингу оператора РМО (provincial (electricity spot) market operator) провінційного спотового ринку електроенергії. Ця модель оптимізує стратегію зобов'язань (планування пусків і зупинів) енергоблоку, ретельно враховуючи баланс попиту та пропозиції на провінційному ринку електроенергії, обмеження безпеки й економічні вигоди.

Верхній рівень включає модель оптимізаційного клірингу РМО в рамках RESM, яка відповідає за коригування стратегій економічного диспетчеризації. Враховуючи безпечність, екологічність та економічну роботу регіональної енергомережі, ця модель оптимізує клірингові ціни та міжпровінційні стратегії трейдингу, а також точно налаштовує стратегії роботи енергоблоків різноманітних провінційних ринків для гарантування безпечної роботи регіональної енергомережі.

У моделі попереднього клірингу оператора РМО на нижчому рівні мінімізується значення його цільової функції – очікувані експлуатаційні витрати провінційного ринку

$$\sum_{s=1}^S \rho_s O_{C,s},$$

де: ρ_s – ймовірність стану сценарію (scenario) $s = 1, \dots, S$;

S – загальна кількість сценаріїв;

$O_{C,s}$ – експлуатаційні витрати (operating cost) провінційного ринку у сценарії s .

Ці витрати на централізованому ринку становлять

$$\sum_{t=1}^T \left\{ p_t^{IP} P_{D,t}^{IP} + \sum_{n=1}^N [\omega_{t,s}^n C_{start,t,s}^n + \theta_{t,s}^n C_{on,t,s}^n + g_{t,s}^n C_{off,t,s}^n + (o_G^n + o_R^n) P_{G,t,s}^n + o_R^n P_{R,t,s}^n] \right\},$$

де: p_t^{IP} – клірингова ціна (price) міжпровінційного (inter-provincial) ринку протягом періоду часу (time) $t = 1, \dots, T$;

$P_{D,t}^{IP}$ – обсяг електроенергії, придбаної міжпровінційними трейдерами (попит (demand)) на міжпровінційному ринку протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$;

$C_{start,t,s}^n, C_{on,t,s}^n, C_{off,t,s}^n$ – витрати при перемиканні до режиму запуску (startup), включення (on), виключення (off) відповідно, для генератора $n = 1, \dots, N$ у період часу $t = 1, \dots, T$;

$\omega_{t,s}^n, \theta_{t,s}^n, g_{t,s}^n$ – булева керуюча змінна (прийняття рішень), рівна 1 при перемиканні до режиму запуску, включення, виключення (зупину) відповідно, для генератора $n = 1, \dots, N$ у період часу $t = 1, \dots, T$, і рівна 0 в решті випадків;

$P_{G,t,s}^n$ та $P_{R,t,s}^n$ – це клірингова потужність та резервна (reserve) потужність відповідно генератора (generator) $n = 1, \dots, N$ у провінції за сценарієм $s = 1, \dots, S$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$;

N – кількість генераторів у даній провінції;

o_G^n та o_R^n – заявлена ціна на потужність електроенергії та заявлена ціна на резервну потужність відповідно для генератора $n = 1, \dots, N$ (у даній провінції);

o_o^n – коефіцієнт експлуатаційних (operating) витрат для генератора $n = 1, \dots, N$.

Експлуатаційні витрати децентралізованого провінційного ринку у сценарії $s = 1, \dots, S$ становлять

$$O_{C,s} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NI} \sum_{b=1}^{NB} (\Delta P_{t,i,b}^+ C_{t,i,b}^+ + \Delta P_{t,i,b}^- C_{t,i,b}^-),$$

де: NB – загальна кількість сегментів (sections, blocks) підвищення/зниження котирування даного енергоблоку $i = 1, \dots, NI$ у сценарії $s = 1, \dots, S$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$;

$\Delta P_{t,i,b}^+$ – верхня величина регулювання (коригування котирування) енергоблоку $i = 1, \dots, NI$ на сегменті $b = 1, \dots, NB$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$;

$\Delta P_{t,i,b}^-$ – (від’ємна) нижня величина регулювання енергоблоку $i = 1, \dots, NI$ на сегменті $b = 1, \dots, NB$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$ (керуюча змінна);

$C_{t,i,b}^+$ – коригування котирування енергоблоку $i = 1, \dots, NI$ на сегменті $b = 1, \dots, NB$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$;

$C_{t,i,b}^-$ – (додатне) коригування зниження котирування енергоблоку $i = 1, \dots, NI$ на сегменті $b = 1, \dots, NB$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$.

Звернімо увагу на умови обмежень клірингу централізованого провінційного ринку для: а) балансу потужності; б) резервної потужності; в) зростання потужності енергоблоків; г) вихідної потужності енергоблоків; д) запуску чи зупину енергоблоків (децентралізований ринок не включає таке обмеження); е) роботи ліній сполучення.

а) Обмеження балансу потужності в межах провінційного ринку задається рівнянням

$$P_{D,t}^{IP} + \sum_{n=1}^N P_{G,t,s}^n = \sum_{m=1}^M P_{D,t,s}^m, \quad t = 1, \dots, T,$$

де: $P_{D,t,s}^m$ – навантаження попиту споживачів $m = 1, \dots, M$ електроенергії протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$ у сценарії $s = 1, \dots, S$;

M – кількість споживачів електроенергії в даній провінції.

б) Обмеження резервної потужності в межах провінційного ринку задається нерівностями

$$\sum_{n=1}^N P_{G,t,s}^n \geq \alpha \sum_{m=1}^M P_{D,t,s}^m, \quad t = 1, \dots, T,$$

де α – коефіцієнт резервування (standby) провінційної енергомережі.

в) Обмеження на зростання потужності енергоблоків у межах провінційного ринку задається двосторонніми нерівностями

$$P_{G,t,s}^n - P_G^{n,down} \leq P_{G,t+1,s}^n \leq P_{G,t,s}^n + P_G^{n,up}, t = 1, \dots, T, n = 1, \dots, N,$$

де $P_G^{n,down}$ та $P_G^{n,up}$ – відповідно нижня та верхня межа темпу (ramp) зміни потужності енергоблоку n .

г) Обмеження вихідної потужності енергоблоків у межах провінційного ринку задається двосторонніми нерівностями

$$\underline{P}_G^n \leq P_{G,t,s}^n + P_{R,t,s}^n \leq \overline{P}_G^n, t = 1, \dots, T, n = 1, \dots, N,$$

де $\underline{P}_G^n$ та $\overline{P}_G^n$ – відповідно нижня та верхня межа вихідної потужності енергоблоку n .

д) Обмеження запуску чи зупину енергоблоків у межах провінційного ринку задається нижніми нерівностями для загального часу безперервної роботи чи безперервного простою енергоблоку $n = 1, \dots, N$ у сценарії $s = 1, \dots, S$.

е) Обмеження роботи ліній сполучення (tie lines) задається двосторонніми нерівностями

$$\underline{P}_{L,t,s}^n + P_{L,t,s}^n \leq \overline{P}_{L,t,s}^n, t = 1, \dots, T, n = 1, \dots, N,$$

де: $P_{L,t,s}^n$ – потужність лінії сполучення енергоблоку n ;

$\underline{P}_{L,t,s}^n$ та $\overline{P}_{L,t,s}^n$ – відповідно нижня та верхня межа робочої потужності лінії сполучення енергоблоку n .

На відміну від традиційної моделі оптимізації роботи RESM, пропонується модифікована модель оптимізації роботи RESM враховує адаптацію RMO до стратегій роботи енергоблоків у рамках моделі. Оскільки сьогодні в електроенергетиці присутні як централізовані, так і децентралізовані ринки, то від RMO вимагається враховувати коригування до стратегій роботи енергоблоків на ринках різного типу в рамках однієї (модифікованої) моделі оптимізації роботи RESM, підвищуючи надійність і точність результатів для оптимізації роботи всіх енергоблоків. Модель оптимізації клірингу верхнього рівня RESM оцінює, насамперед, попит на енергію на провінційних спотових ринках електроенергії за обмеження безпечної роботи регіональної енергомережі. Ця модель оптимізує плани закупівлі електроенергії провінцій та потоки електроенергії через міжпровінційні лінії сполучення в межах RESM.

У процесі клірингу на регіональному ринку верхнього рівня, для результатів попереднього клірингу централізованого ринку, стратегія

оптимізації включає коригування вихідних потужностей пускових енергоблоків у бік збільшення від їх мінімальних рівнів виходу. Для результатів клірингу децентралізованого ринку, стратегія оптимізації включає коригування вихідних потужностей пускових енергоблоків як у бік збільшення, так і зменшення, враховуючи всі відповідні спеціальні фактори. Тому в моделі оптимізації клірингу оператора RMO на верхньому рівні мінімізується значення його цільової функції – витрати на коригування

$$\lambda_1 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NI} \sum_{a=1}^A (\Delta g_{t,i,a}^+ P_{t,i,a}^+ + \Delta g_{t,i,a}^- P_{t,i,a}^-) + \lambda_1 \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{b=1}^B \Delta g_{t,j,b}^+ P_{t,j,b}^+ + \lambda_2 \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R g_{t,r}^{cut},$$

де: $\Delta g_{t,i,a}^+$ та $\Delta g_{t,i,a}^-$ – (невід’ємна) спроможність пропозиції (bidding power) коригування потужності енергоблоку $i = 1, \dots, NI$ (децентралізованого провінційного спотового ринку) вгору та вниз відповідно в сегменті $a = 1, \dots, A$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$;

A – кількість сегментів оптимізації;

$P_{t,i,a}^+$ та $P_{t,i,a}^-$ – котирування (quotation) на коригування потужності енергоблоку $i = 1, \dots, NI$ вгору та вниз відповідно в сегменті $a = 1, \dots, A$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$;

$\Delta g_{t,j,b}^+$ – (невід’ємна) спроможність пропозиції коригування теплового енергоблоку $j = 1, \dots, J$ (централізованого провінційного спотового ринку) вгору в сегменті $b = 1, \dots, B$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$;

B – кількість сегментів коригування;

J – кількість теплових енергоблоків;

$P_{t,j,b}^+$ – котирування на коригування потужності теплового енергоблоку $j = 1, \dots, J$ вгору в сегменті $b = 1, \dots, B$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$;

$g_{t,r}^{cut}$ – (невід’ємна) залишена потужність нового енергоблоку $r = 1, \dots, R$;

R – кількість нових енергоблоків;

λ_1 та λ_2 – деякі додатні вагові коефіцієнти.

Експлуатаційні умови мають місце для: є) вихідної потужності теплових енергоблоків; ж) вихідної потужності нового енергоблоку; з) вихідної потужності гідроакumuлюючих агрегатів; і) балансу потужності; ї) резервної енергії для кожної провінції/регіону; й) зростання енергетичного розриву для кожної провінції.

є) Обмеженнями вихідної потужності теплових енергоблоків у межах децентралізованого провінційного спотового ринку електроенергії є:

$$\begin{aligned}
 g_{t,i} &= g_{t,i}^0 + \sum_{a=1}^A (\Delta g_{t,i,a}^+ + \Delta g_{t,i,a}^-), \\
 -H_{t,i}^{down} &\leq g_{t,i} - g_{t-1,i} \leq H_{t,i}^{up}, \\
 \underline{G}_i &\leq g_{t,i} \leq \bar{G}_i, \\
 \underline{G}_j &\leq g_{t,j} \leq \bar{G}_j, \\
 -H_{t,j}^{down} &\leq g_{t,j} - g_{t-1,j} \leq H_{t,j}^{up}, \\
 g_{t,j} &= \sum_{b=1}^B \Delta g_{t,j,b}^+,
 \end{aligned}$$

де: $g_{t,i}^0$ та $g_{t,i}$ – відповідно контрольна (benchmark) та кінцева вихідна потужність теплового енергоблоку $i = 1, \dots, I$ на децентралізованому провінційному спотовому ринку електроенергії протягом періоду $t = 1, \dots, T$;

$g_{t,j}$ – потужність теплового енергоблоку $j = 1, \dots, J$ на централізованому провінційному спотовому ринку електроенергії протягом періоду $t = 1, \dots, T$;

$\underline{G}_i$ та $\bar{G}_i$ – відповідно мінімальна та максимальна потужність теплового енергоблоку $i = 1, \dots, I$ на децентралізованому провінційному спотовому ринку;

$\underline{G}_j$ та $\bar{G}_j$ – відповідно мінімальна та максимальна потужність теплового енергоблоку $j = 1, \dots, J$ на централізованому провінційному спотовому ринку;

$H_{t,i}^{down}$ та $H_{t,i}^{up}$ – максимальний темп зміни (climbing rate) (між послідовними періодами часу) потужності вниз (downhill) та вгору (uphill) відповідно теплового енергоблоку $i = 1, \dots, I$ на децентралізованому провінційному спотовому ринку електроенергії;

$H_{t,j}^{down}$ та $H_{t,j}^{up}$ – максимальний темп зміни потужності вниз та вгору відповідно теплового енергоблоку $j = 1, \dots, J$ на централізованому провінційному спотовому ринку електроенергії.

ж) Обмеженнями вихідної потужності нового енергоблоку є

$$g_{t,r}^{cut} = g_{t,r}^0 - g_{t,r} \leq g_{t,r}^0,$$

де $g_{t,r}^0$ та $g_{t,r}$ – відповідно контрольна (передбачена) та кінцева вихідна потужність ((невід’ємна) спроможність пропозиції потужності в межах ринку) нового енергоблоку $r = 1, \dots, R$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$.

з) Обмеженнями вихідної потужності гідроакумулюючих агрегатів є:

$$\begin{aligned} g_{t,k} &= U_{t,k}^{out} g_{t,k}^{out} - U_{t,k}^{in} g_{t,k}^{in}, \\ 0 &\leq g_{t,k}^{out} \leq \bar{G}_k^{out}, \\ 0 &\leq g_{t,k}^{in} \leq \bar{G}_k^{in}, \\ U_{t,k}^{out} \times U_{t,k}^{in} &= 0, \\ \underline{E}_k &\leq E_{t,k} = E_{t-1,k} + (\eta U_{t,k}^{in} g_{t,k}^{in} - U_{t,k}^{out} g_{t,k}^{out}) \Delta t \leq \bar{E}_k, \\ E_{0,k} &= E_{T,k}, \end{aligned}$$

де: $g_{t,k}^{in}$, $g_{t,k}^{out}$, $g_{t,k}$ – потужність накачування, генерування, кінцевого виходу відповідно гідроакумулюючого агрегату $k = 1, \dots, K$ протягом періоду $t = 1, \dots, T$;

$U_{t,k}^{in}$ та $U_{t,k}^{out}$ – (булеві) змінні стану для накачування та генерування відповідно гідроакумулюючого агрегату $k = 1, \dots, K$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$;

$E_{t,k}$ – накопичена енергія гідроакумулюючого агрегату $k = 1, \dots, K$ протягом $t = 1, \dots, T$ ($t = 0$) відповідає початкова накопичена енергія, а $t = T$ – кінцева);

$\underline{E}_k$ та $\bar{E}_k$ – відповідно мінімальна та максимальна накопичена енергія гідроакумулюючого агрегату $k = 1, \dots, K$ протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$;

$\bar{G}_k^{in}$ та $\bar{G}_k^{out}$ – максимальна потужність накачування та генерування відповідно гідроакумулюючого агрегату $k = 1, \dots, K$;

η – частка потужності накачування протягом Δt в накопиченій енергії.

і) Обмеженнями балансу потужності є:

$$\begin{aligned} D_t &= \sum_{i=1}^I g_{t,i} + \sum_{j=1}^J g_{t,j} + \sum_{k=1}^K g_{t,k} + \sum_{r=1}^R g_{t,r} + \sum_{q=1}^Q g_{t,q} + \sum_{\mu=1}^M g_{t,\mu}, \\ -\bar{F}_{t,l} &\leq \sum_{i=1}^I f_{l,i} g_{t,i} + \sum_{j=1}^J f_{l,j} g_{t,j} + \sum_{k=1}^K f_{l,k} g_{t,k} + \sum_{r=1}^R f_{l,r} g_{t,r} + \sum_{q=1}^Q f_{l,q} g_{t,q} + \sum_{\mu=1}^M f_{l,\mu} g_{t,\mu} \leq \bar{F}_{t,l}, \\ -H_{t,q}^{down} &\leq g_{t,q} - g_{t-1,q} \leq H_{t,q}^{up}, \end{aligned}$$

$$\underline{G}_q \leq g_{t,q} \leq \overline{G}_q,$$

де: D_t – загальний попит (demand) системи протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$;

$g_{t,q}$ – фіксована потужність енергоблоку $q = 1, \dots, Q$;

$H_{t,q}^{down}$ та $H_{t,q}^{up}$ – максимальний темп зміни фіксованої потужності вниз та вгору відповідно енергоблоку $q = 1, \dots, Q$;

$\underline{G}_q$ та $\overline{G}_q$ – відповідно мінімальна та максимальна фіксована потужність енергоблоку $q = 1, \dots, Q$;

$g_{t,\mu}$ – потужність за рахунок міжрегіональних ліній електропередачі $\mu = 1, \dots, M$;

$g_{t,i}$, $g_{t,j}$, $g_{t,k}$, $g_{t,r}$ визначаються обмеженнями є), є), з), ж) відповідно;

$f_{l,i}$, $f_{l,j}$, $f_{l,k}$, $f_{l,r}$, $f_{l,q}$, $f_{l,\mu}$ – коефіцієнт передачі для потужності $g_{t,i}$, $g_{t,j}$, $g_{t,k}$, $g_{t,r}$, $g_{t,q}$, $g_{t,\mu}$ відповідно;

$\overline{F}_{t,l}$ – максимальна пропускна здатність лінії електропередачі (transmission line).

ї) Обмеженнями резервної енергії для кожного провінційного ринку z та регіонального спотових електроенергії є:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{I(z)} \min\{H_{t,i}^{up}; \overline{G}_i - g_{t,i}\} + \sum_{j=1}^{J(z)} \min\{H_{t,j}^{up}; \overline{G}_j - g_{t,j}\} + \sum_{q=1}^{Q(z)} \min\{H_{t,q}^{up}; \overline{G}_q - g_{t,q}\} \geq SR_{t,z}^{up}, \\ & \sum_{i=1}^{I(z)} \min\{H_{t,i}^{down}; g_{t,i} - \underline{G}_i\} + \sum_{j=1}^{J(z)} \min\{H_{t,j}^{down}; g_{t,j} - \underline{G}_j\} + \\ & + \sum_{q=1}^{Q(z)} \min\{H_{t,q}^{down}; g_{t,q} - \underline{G}_q\} \geq SR_{t,z}^{down}, \\ & \sum_{i=1}^I \min\{H_{t,i}^{up}; \overline{G}_i - g_{t,i}\} + \sum_{j=1}^J \min\{H_{t,j}^{up}; \overline{G}_j - g_{t,j}\} + \sum_{q=1}^Q \min\{H_{t,q}^{up}; \overline{G}_q - g_{t,q}\} + \\ & + \sum_{k=1}^K (\overline{G}_k^{out} - g_{t,k}) \geq SR_t^{up}, \\ & \sum_{i=1}^I \min\{H_{t,i}^{down}; g_{t,i} - \underline{G}_i\} + \sum_{j=1}^J \min\{H_{t,j}^{down}; g_{t,j} - \underline{G}_j\} + \sum_{q=1}^Q \min\{H_{t,q}^{down}; g_{t,q} - \underline{G}_q\} + \\ & + \sum_{k=1}^K (g_{t,k} + \overline{G}_k^{in}) \geq SR_t^{down}, \end{aligned}$$

де: $SR_{t,z}^{down}$ та $SR_{t,z}^{up}$ – максимальний темп зміни резервної енергії вниз та вгору відповідно провінційного спотового ринку з електроенергії;

SR_t^{down} та SR_t^{up} – максимальний темп зміни резервної енергії вниз та вгору відповідно регіонального спотового ринку електроенергії.

й) Обмеженнями зростання енергетичного розриву $V_{t,z}$ (між пропозицією та попитом) провінції з протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$ є

$$V_{t-1,z} - H_{t,z}^{down} \leq V_{t,z} \doteq \sum_{i=1}^{I(z)} g_{t,i} + \sum_{j=1}^{J(z)} g_{t,j} + \sum_{r=1}^{R(z)} g_{t,r} + \sum_{q=1}^{Q(z)} g_{t,q} - D_{t,z} \leq V_{t-1,z} + H_{t,z}^{up},$$

де: $D_{t,z}$ – загальний попит провінції з (протягом періоду часу $t = 1, \dots, T$);

$H_{t,z}^{down}$ та $H_{t,z}^{up}$ – максимальний темп зміни енергетичного розриву провінції з.

АНОТАЦІЯ

Дослідження здійснено в рамках проекту «Розвиток розподіленої енергетики в умовах ринку електричної енергії України з використанням технологій та систем цифровізації» НАН України. Глобальний розвиток спотового ринку електроенергії виявляє диверсифікований ландшафт. Різні країни розробили свої власні ринкові системи, налаштовані до їхніх політичних, економічних і географічних характеристик. Дворівнева модель оптимізації структурується поетапно. Потрібно чітко визначати механізми взаємодії та канали обміну інформацією між ринками різного (регіонального й обласного) рівня для гарантування координованої роботи спільного ринку. В обласній моделі попереднього клірингу є складні оптимізаційні змінні, включаючи булеві змінні запуску-зупину окремих енергоблоків, обмеження потоків потужності, а також численні обмеження, що охоплюють як часові, так і кількісні виміри. Ця складність вимагає значних обчислювальних ресурсів під час процесу розв'язання моделі, що ускладнює оперативність роботи за допомогою традиційних математичних методів. Сьогодні для клірингу ринку електроенергії в енергетичних системах переважно використовуються оптимізаційні або евристичні алгоритми³⁶.

³⁶Gorbachuk V., Gavrilenko S., Golotsukov G., Nikolenko D. The digital tools for decentralized patent accounting and management. *Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2021* (28 червня – 01 липня 2021 р.). Чернівці : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. С. 135–139.

Література

1. Горбачук В. М., Гаркуша Н. І. Багаторівневі моделі та методи обчислюваної загальної рівноваги. *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. 2009. № 3. С. 121–126.
2. Горбачук В. М., Ніколенко Д. І., Пустовойт М. М., Рибачок Д. О., Сабадаш Є. О. До цифрової децентралізації енергетики. *Кібербезпека енергетики* (29 травня 2024 р., Київ, Україна). Київ : Інститут проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова НАН України, 2024. С. 37–40.
3. Gorbachuk V., Lupey M., Suleimanov S.-B. Global decentralized mechanisms of data management. *Digitalization and Information Society. Selected Issues*. A. Ostenda, T. Nestorenko (eds.) Katowice, Poland: University of Technology, Katowice, 2022. P. 373–385. (in Ukrainian).
4. Kyrylov Y., Hranovska V., Savchenko V., Kononenko L., Gai O., Kononenko S. Sustainable rural development in the context of the implementation of digital technologies and nanotechnology in education and business. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20 (S8). P. 297–323.
5. Грановська В., Кононенко, Л., Савченко, В. Функціонування дорадчих служб у контексті забезпечення сталого сільського розвитку. *Економіка та суспільство*. 2024. № 69. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-69-111>
6. Горбачук В. М. Децентралізація е-уряду та зростання. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: економічні науки*. 2015. Вип. 11. С. 161–167.
7. Кирилов Ю. Є., Грановська В. Г., Кононенко Л. В. Агроконсалтинг як інструмент забезпечення реалізації сталого сільського розвитку. *Економічний простір*. 2024. № 193. С. 102–108.
8. Gorbachuk V. M. Simple descent algorithm without subproblems for a class of nonsmooth bilevel programming. *Discrete and Global Optimization. International Conference in Honor of 50-th Anniversary of Glushkov Institute of Cybernetics* (July 31 – August 2, 2008, Yalta, Ukraine). Kyiv: V.M. Glushkov Institute of Cybernetics; Texas A&M University; University of Florida, 2008. P. 14.
9. Горбачук В. М., Єрмольєв Ю. М., Єрмольєва Т. Ю. Двоетапна модель еколого-економічних рішень. *Вісник Одеського національного університету. Економіка*. 2016. Т. 21. Вип. 9. С. 142–147.
10. Горбачук В. М., Кошулько А. І., Сирку А. А. Розподілені децентралізовані мережі сенсорів для спостережень Землі. *16-th Ukrainian Conference on Space Research* (August 22–27, 2016, Odesa, Ukraine). Kyiv: State Space Agency of Ukraine, 2016. P. 192.

11. Gorbachuk V. M., Bardadaym T. O., Osypenko S. P. The problem of decentralized decision making for modern cloud services. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Physical and Mathematical Sciences*. 2024. 2021 (2). P. 32–38.

12. Горбачук В. М., Гаркуша Н. І. Задачі дворівневого прийняття рішень. *PDMU-2006* (21–25 травня 2006 р., Східниця, Україна). Київ: Київський національний університет імені Т. Шевченка, 2006. С. 178–180.

13. Горбачук В. М. Метод дворівневого страхування для визначення оптимальних часток центрального та регіонального бюджетів на безпеку регіонів. *Теорія прийняття рішень* (29 вересня – 4 жовтня 2008 р., Ужгород, Україна). Ужгород: УжНУ, 2008. С. 69–70.

14. Великий А. П., Горбачук В. М., Єрмольєв Ю. М., Кнопов П. С. Взаємодія централізації і децентралізації у міждисциплінарній кібернетиці академіка Глушкова. *Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку* (12–13 вересня 2013 р., Київ, Україна). Київ: Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, 2013. С. 241–243.

15. Горбачук В. М., Дунаєвський М. С. Математичні моделі підвищення ефективності децентралізованих систем та їх застосування. *Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності* (11–12 жовтня 2022 р., Вінниця, Україна). Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2022. С. 65–77.

16. Gorbachuk V., Dunaievskiy M., Suleimanov S.-B. Modeling of agency problems in complex decentralized systems under information asymmetry. *IEEE Conference on Advanced Trends in Information Theory* (December 18–20, Kyiv, Ukraine). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2019. P. 449–454.

17. Горбачук В. М. Втрати і виграші у децентралізованих системах. *Контроль і управління в складних системах* (14–16 жовтня 2014 р., Вінниця, Україна). Вінниця : ВНТУ, 2014. С. 30.

18. Горбачук В. М., Дунаєвський М. С. До економічної організації децентралізації. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем* (20–22 листопада 2019 р., Дніпро). Дніпро : ДНУ імені О.Гончара, 2019. С. 69–70.

19. Горбачук В. М., Ляшко В. І., Сирку А. А. Питання децентралізованого консенсусу блокчейнів. *Інфраструктура ринку*. 2019. 34. С. 325–332.

20. Горбачук В. М., Гудима А. В. Регіональний перерозподіл за централізації та децентралізації. *Науковий вісник Чернівецького університету. Економіка*. 2012. С. 179–184.

21. Горбачук В. М., Толубко І. Є., Пелехов С. П. Глобальні децентралізовані системи підтримки прийняття рішень. *Досвід та перспективи застосування загальнодержавних автоматизованих систем управління в соціально-економічній сфері* (28 листопада 2013 р., Київ, Україна). Київ : НТУУ «КПІ», 2013. С. 48–51.
22. Горбачук В. М., Гаркуша Н. І. Перерозподіл за централізації і децентралізації. *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. 2011. № 3. С. 129–132.
23. Горбачук В. М. Часткова децентралізація як інструмент системної стійкості. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія: економіка та менеджмент*. 2015. Вип. 11. С. 317–321.
24. Li Y., Zhang L., Cong Y., Chen H., Zhang F. Designing a clearing model for the regional electricity spot market based on the construction of the provincial electricity market: a case study of the Yangtze river delta regional electricity market in China. *Processes*. 2025. 13 (2). 492. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13020492>
25. Chen Y.; Zhang W.; Zhang C.; Wu P. Operation mechanism of inter-provincial and intra-provincial spot market for promoting new energy consumption. *Automation of Electric Power Systems*. 2021. Vol. 45 (14). P. 104–113.
26. Chen Y.; Wang H.; Yan Z.; Xu X.; Zeng D.; Ma, B. A two-phase market clearing framework for inter-provincial electricity trading in Chinese power grids. *Sustainable Cities and Society*. 2022. 85 104057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104057>
27. Du F.; Hu R.; Liu Z.; Zhang X.; Zhang R. Research on regional spot market clearing model considering subregional power exchange constraints. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. 2592. 012069. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2592/1/012069>
28. Горбачук В. М., Русанов И. А. Декомпозиция для решения двухуровневой задачи. *Компьютерная математика*. 2011. № 1. С. 120–128.
29. Горбачук В. М. Методы с усреднением для решения класса задач двухуровневого программирования. *Компьютерная математика*. 2008. № 2. С. 127–134.
30. Горбачук В. М., Ненахова С.Г. Метод решения задачи многоуровневого программирования. *Теорія оптимальних рішень*. 2005. № 4. С. 73–79.
31. Горбачук В. М. Параллельные методы решения задач двухуровневого программирования и их применения. *Компьютерная математика*. 2008. № 1. С. 159–165.

32. Горбачук В. М., Гаркуша Н. І. Необхідні умови першого порядку для задач дворівневої оптимізації. *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. 2010. № 2. С. 116–119.

33. Горбачук В. М. Дворівневе лінійне дробове програмування. *Теорія прийняття рішень* (27 вересня – 1 жовтня 2010 р., Ужгород, Україна). Ужгород : УжНУ, 2010. С. 65–66.

34. Горбачук В. М. Про метод Банаха–Кнастера–Штейнгауза пошуку рівноважних децентралізованих рішень. *Обчислювальна та прикладна математика* (8–9 жовтня 2015 р., Київ). Київ : Київський національний університет імені Т. Шевченка, 2015. С. 41–43.

35. Горбачук В. М., Макаренко О. С. Особливості прийняття рішень людиною для розв’язання складних міждисциплінарних проблем. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2017. № 3. С. 73–87.

36. Gorbachuk V., Gavrilenko S., Golotsukov G., Nikolenko D. The digital tools for decentralized patent accounting and management. *Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2021* (28 червня – 01 липня 2021 р.). Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. С. 135–139.

Information about the author:

Vasyl Gorbachuk

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Head of the Department of Intelligent Information Technologies,
V. M. Glushkov Institute of Cybernetics
of the National Academy of Sciences of Ukraine
40, Glushkov ave., Kyiv, 03187, Ukraine

Tamara Bardadym

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Research Associate,
Senior Research Associate at the Department
of Intelligent Information Technologies,
V. M. Glushkov Institute of Cybernetics
of the National Academy of Sciences of Ukraine
40, Glushkov ave., Kyiv, 03187, Ukraine