ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ

DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.03.047>
УДК 004.94:621.316

В.А. Євдокімов, канд. наук з держ. управління
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова 15
e-mail: ievdokimov40@gmail.com

Формулювання задачі побудови мультіагентної імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку електроенергії

На основі проведеного аналізу літературних джерел визначено ключові науково-практичні задачі вдосконалення і розвитку системи ціноутворення діючої в Україні моделі ринку електроенергії «Конкуренція на всіх рівнях». Розглянуто формулювання задачі побудови мультіагентної імітаційної моделі процесу ціноутворення на ринку електроенергії як складної динамічної системи децентралізованої взаємодії між агентами-виробниками, оптовими і роздрібними постачальниками, енерготрейдерами і агрегованими споживачами електроенергії.

К л ю ч о в і с л о в а: імітаційна модель, мультіагентне середовище, ринок електричної енергії, ціноутворення.

Актуальність проблеми. В роботі [1] до числа актуальних теоретичних і прикладних задач загальної проблеми вдосконалення методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання, призначених для аналізу функціонування складної організаційно-технічної системи (СОТС), віднесено задачу підвищення ефективності механізмів функціонування СОТС при управлінні ними в швидкозмінних умовах існування і проведення інституційних змін у взаєминах між її підсистемами і з суб'єктами управління господарською діяльністю у зовнішньому середовищі. Там же виділено підсистему управління ціноутворенням як окрему СОТС загальної системи організаційного управління (СОУ) ринком електричної енергії (ЕЕ), а процес ціноутворення в цій підсистемі як об'єкт дослідження.

У роботі [1] обґрунтовано актуальність та необхідність створення імітаційної моделі процесу ціноутворення на ринку ЕЕ з безпосередньою участю суб'єктів ринку, основним призначенням якої є дослідження науково-практичної проблеми удосконалення методичного інструментарію

© В.А. Євдокімов, 2021

розрахунку цінових показників на різних його сегментах. На основі аналізу сучасних методів імітаційного моделювання процесів управління обґрунтовано вибір мультиагентного підходу як основного для побудови імітаційної моделі децентралізованої взаємодії його суб'єктів на ринку ЕЕ в процесі ціноутворення.

Мультиагентний підхід знаходить все більше застосування в електроенергетичній сфері в зв'язку з необхідністю вирішення нових практичних задач, які виникають із впровадженням ринкових механізмів на ринку ЕЕ. Це, в першу чергу, стосується питань, пов'язаних із запровадженням децентралізованого принципу управління ринком ЕЕ, зокрема управління динамічним процесом ціноутворення, коли існує велика кількість учасників (агентів), які вирішують свої цілі (стратегія роботи) і здебільшого істотно впливають на процес ціноутворення. Зазначені цілі можуть співпадати (наприклад, отримання максимального доходу) і навпаки, бути різними відносно роботи ринку ЕЕ (наприклад, виробляти ЕЕ незалежно від її вартості, що притаманно альтернативним джерелам енергії). В роботі [1] на основі проведеного аналізу літературних джерел наведено обґрунтування вибору мультиагентного підходу для побудови імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку ЕЕ.

Перехід до нової моделі ринку ЕЕ України відповідно до Закону України «Про ринок електричної енергії» [2] є закономірним результатом його розвитку відповідно до прийнятої раніше Концепції функціонування та розвитку оптового ринку ЕЕ України і, разом з тим, частиною загальної тенденції зміни основних принципів функціонування ринків ЕЕ в країнах Європейського союзу, США, Австралії, Росії і багатьох інших. Процес реформування ринку ЕЕ України відповідно до світових тенденцій розвитку енергоринків, який почався ще наприкінці 90-х років, завершився переходом з 01.06.2019 р. до відомої моделі його організації «Конкуренція на всіх рівнях». Організаційну структуру ринку подано на рис. 1.

Таке перетворення організації ринку ЕЕ призвело до кардинальних змін в системі оперативно-технологічної, інформаційної та організаційно-економічної взаємодії суб'єктів ринку. Особливо відчутні ці зміни в частині ринкового ціноутворення на ЕЕ і при застосуванні регуляторних механізмів встановлення тарифів для компаній відновлюваної енергетики, енергопідприємств віднесених до категорії природних монополій та наданні енергопідприємствами системних послуг з метою забезпечення стійкості енергосистеми і тарифів для кінцевих споживачів.

У цих умовах, які можна назвати умовами розвитку ринкового ціноутворення на ЕЕ, питання формування цін продажу ЕЕ виробниками для подальшої подачі у вигляді торгових заявок на різні сегменти ринку ЕЕ є одними з найважливіших, тому що зазвичай визначають фінансові ре-

Рис. 1. Організаційна структура ринку

зультати їх роботи на ринку. У зв'язку з цим в нових умовах функціонування ринку ЕЕ постає питання розроблення та дослідження методичного інструментарію для підготовки і прийняття рішень про ціни в торгових заявках на поставку ЕЕ та системних послуг на новоутворені сегменти ринку: на добу наперед (РДН), внутрішньодобовий ринок (ВДР), ринок двосторонніх договорів (РДД), ринок допоміжних послуг (РДП), балансуєчий ринок (БР).

Саме на кожному з цих сегментів ринку існують свої особливості функціонування та ризики при формуванні рівноважних цін. Зрештою, це є питання формування стратегії ціноутворення генеруючих компаній (ГК) на них і в цілому на ринку, яке набуває особливої важливості як для аналізу раніше застосовуваних методик, так і для розробки нових алгоритмів та методик на їх основі, що відповідають новим Правилам ринку [3—6].

Головною метою СОУ ГК в ринкових умовах, як і раніше, є ефективне вирішення функціональних задач управління, що забезпечують надійність поставок ЕЕ споживачам, яка відповідає необхідним стандартам якості. Крім того, для СОУ ГК як суб'єктів ринку одною з важливіших задач є задача визначення стратегії цінового позиціонування на нових сегментах ринку ЕЕ. Її вирішення обумовлює необхідність збирання, зберігання, моніторингу великого обсягу даних про цінові показники функціонування вказаних сегментів ринку, що відповідають вимогам повноти, актуальності та достовірності, а також використання їх задля рішення задач аналізу процесів ціноутворення на ринку, прогнозу його розвитку і планування виробництва, вирішення нових задач інформаційної підтримки прийняття рішень по формуванню торгових заявок на сегментах ринку.

Вирішення більшості задач організаційного управління, зрештою, вимагає попереднього не тільки технічного, але й всебічного економічного обґрунтування цінових пропозицій при поданні торгових заявок з урахуванням впливу факторів невизначеності, а також оцінки наслідків прийнятих рішень, у тому числі і їх подальшого впливу на стан зазначених вище сегментів ринку при формуванні рівноважних цін. Тому можна стверджувати, що в нинішніх умовах є актуальним створення комп'ютерної імітаційної моделі процесу ціноутворення на ринку на основі застосування сучасного методичного і інформаційно-технологічного забезпечення задля рішення задач формування оптимальної торгової заявки з метою можливого зниження впливу факторів невизначеності на прийняття рішень.

Аналіз функціонування ринку. З початку періоду функціонування нової моделі на оптовому ринку ЕЕ діє принципово нова для ринку система ціноутворення, заснована на ринкових принципах. При цьому вплив

Рис. 2. Схема взаємодії учасників ринку ЕЕ з відповідними сегментами ринку

цін, вказаних у торгових заявках, на обсяги продажів продукції і допоміжних послуг на фінансову діяльність ГК істотно зростає. Тому ГК необхідно переглянути принципи і методичні основи прийняття рішення про ціни та обсяги при їх формуванні. Крім того, в цих умовах функціонування оптового ринку ГК потрібно виробити певну стратегію цінового позиціонування на сегментах ринку сформованих і діючих у підсистемі Оператора ринку — ДД, РДН, ВДР, а також в підсистемі Оператора системи передачі — БР, ДП.

Конкурентна модель ринку ЕЕ України офіційно запрацювала з 1 липня 2019 року. Згідно з Правилами ринку [3] основними учасниками ринку є виробники ЕЕ — ГК і покупці — постачальники оптові та роздрібні, енерготрейдери. Схему взаємодії учасників ринку ЕЕ з відповідними сегментами ринку наведено на рис. 2.

Основними структурними елементами системи організаційного, оперативного-технологічного та інформаційного управління, відповідно до Правил ринку [3], визначено Оператора ринку і Оператора системи передачі, які забезпечують роботу новостворених сегментів ринку стосовно організації торгівлі ЕЕ і допоміжних послуг з урахуванням вимог забезпечення надійності поставок ЕЕ і стійкості режимів об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС).

Оптовий ринок функціонує в двох цінових зонах: ОЕС та Бурштинський острів. В цільовій моделі ринку ЕЕ теоретично всі суб'єкти могли б купувати і продавати ЕЕ за вільними ринковими (нерегульованим) цінами. Однак фактично тільки на сегментах ринку РДН, ВДР і БР реалізовано ринковий принцип ціноутворення. В його основу покладено механізм конкурентного ціноутворення, що враховує баланс попиту і пропозиції на аукціоні цінових торгових заявок покупців і продавців ЕЕ. Лише на РДД частково збережено регульований принцип ціноутворення, який впливає на кінцеву ціну ЕЕ.

На сегментах ринку ВДР і БР усунення поточного небалансу між попитом і пропозицією здійснюється через закупівлю та продаж ЕЕ за цінами, сформованими з застосуванням відомих механізмів ціноутворення, затверджених Регулятором ринку. Головний критерій відбору заявок — мінімізація сукупної вартості виробленої ЕЕ та максимізація обсягу виробленої ЕЕ.

Аналіз обсягів ЕЕ, проданих і куплених на різних сегментах ринку, який було проведено за даними відкритих джерел [6,7], свідчить, що в першому півріччі 2020 р. було реалізовано приблизно: виробленої енергії (в тому числі 40 % для виконання задач права соціального забезпечення) на ринку ДД — 65 %; на біржі — 10 %; за позабіржовими угодами — 15 %; на РДН — 28 %; на ВДР — 2 %; на БР — 5 %.

Наведені дані свідчать про те, що в даний час ринок ЕЕ України не є конкурентним в повному розумінні цього слова і залишається частково регульованим, попри те що офіційно Регулятор ринку не визначає і не прогнозує оптову ціну ринку.

Проведений аналіз динаміки цін на різних сегментах ринку дозволяє висловити припущення про те, що ціна продажу ЕЕ, сформована в результаті торгів на РДН, учасниками яких є в основному компанії теплової генерації, фактично стає опорною для прийняття рішень щодо формування заявок ГК на інших сегментах ринку. Тому формування торгових заявок ГК на РДН і комплексних заявок для продажу ЕЕ та допоміжних послуг на інших сегментах ринку, що забезпечують реалізацію стратегії компаній, має визначальне значення. Отже, ціни РДН, що визначаються в результаті торгів на аукціоні, задають початкові умови процесу ціноутворення на ринку ЕЕ.

В роботі [8] наведено результати аналізу світового досвіду функціонування конкурентних ринків ЕЕ стосовно використання способів подання заявок учасників ринків РДН та БР. Встановлено, що існує два основних підходи щодо подання заявок купівлі-продажу ЕЕ.

В першому підході в заявках використовують «поетапні ціново-кількісні пари». Цей підхід застосовують генеруючі компанії на ринках Іспанії, Італії, Нідерландів, Польщі та Румунії.

У другому підході в заявках використовують подання «дискретних ціново-кількісних пар з лінійною інтерполяцією поміж ними». Цей підхід застосовується на біржах ЕЕ NordPool, Німеччині, Франції. У роботі [8] детально описано особливості використання цих підходів.

Для формування цінових показників торгових заявок застосовуються різні імітаційні моделі сегментів ринку [9—16]. Багато досліджень присвячено удосконаленню методів прогнозування цих показників. Велика увага в науковій літературі приділяється і дослідженням впливу зовнішнього середовища на ціноутворення на ринку ЕЕ. В роботі [17] класифіковано різні види енергетичних ризиків стосовно можливості їх регулювання (обліку) енергетичними компаніями. Зокрема, для ГК визначено такі основні групи:

- фінансові (неплатежі покупців, кредитні);
- регуляторні (тарифи, обмеження зростання цін);
- ринкові (зниження попиту на ЕЕ, зміни цін на ресурси, що використовуються).

Там же зазначено, що за даними опитування, проведеного для їх ідентифікації відомою компанією KPMG, при дослідженні енергетичних ризиків для російських енергетичних компаній найбільш істотними ризиками названо:

- ризик зміни законодавства в частині регулювання електроенергетики;
- ринковий ризик на енергію і потужність; ринковий ризик зміни цін на енергетичну сировину (вугілля, природний газ та мазут);
- експлуатаційно-технологічний ризик (кількість блоків, які знаходяться в ремонті, тощо) [18].

При розробці методичного забезпечення для формування торгових заявок основна увага багатьма дослідниками приділяється врахуванню чинників, пов'язаних з ринковими ризиками, а саме

- рівень цін, вказаних у заявках учасниками оптового ринку;
- обсяги, зазначені в заявках учасників;
- структура цінових заявок учасників оптового ринку;
- індивідуальні цінові стратегії учасників ринку;
- динаміка цін на сировинні енергоресурси;
- метеорологічні чинники.

Багато робіт присвячено дослідженню «модельних ризиків», які безпосередньо пов'язані з розробкою засобів математичного і комп'ютерного моделювання для прогнозування цінових показників функціонування оптового ринку ЕЕ і його сегментів. Вочевидь, це пояснюється тим, що результати моделювання використовуються як вихідні дані для визначення цін торгових заявок. Тому саме підвищення якості прогнозування погодинних цінових показників торгових заявок забезпечує можливість нівелювання ринкових ризиків. Незважаючи на те що публікації, присвячені цій проблемі, з'явилися ще на початку 2000-х років, дослідження і вдосконалення математичних моделей і пошук методів їх практичного використання для формування торгових заявок триває і в даний час [18—23].

Аналіз далеко не повного переліку літературних джерел, присвячених дослідженню складної комплексної проблеми ціноутворення на ринках ЕЕ, свідчить про те, що її вирішення, особливо в частині розвитку конкурентних відносин на всіх етапах виробництва, передачі та споживання енергії кінцевими споживачами, потребують пошуку нових напрямків її дослідження, створення і застосування ефективних засобів математичного і комп'ютерного (імітаційного) моделювання для досягнення основної мети — зниження тарифів на ЕЕ для споживачів.

Аналіз стану системи ціноутворення. Основним фактором, стримуючим розвиток ринку ЕЕ, а отже, і ціноутворення на ньому, є низький рівень конкуренції в процесах купівлі та продажу ЕЕ. Більший обсяг операцій купівлі-продажу ЕЕ на оптовому ринку проводиться поза конкурентного середовища за регульованими тарифами. На роздрібному ринку практично відсутня конкуренція між постачальниками, а її розвиток істотно обмежений організаційними умовами, тобто оператори си-

стем розподілу (ОСР) є природними монополістами, у нових постачальників на роздрібному ринку відсутні технологічні та технічні можливості підключення до розподільних мереж.

Аналіз основних факторів, які найістотніше впливають на рівень конкуренції в діючій моделі ринку, засвідчує наступне:

- ринок не забезпечує конкуренції за вплив на споживача, тому що споживач теоретично має, а практично не має, можливості вибору постачальника електроенергії;
- для споживача вихід на оптовий ринок практично неможливий, тому що це пов'язано з істотними втратами фінансів та часу, а зв'язок з ним через посередника — енерготрейдера, — скоріше за все, не приведе до зниження тарифу.

Отже, споживачі, які не є учасниками оптового ринку, не мають можливостей конкурентного впливу на постачальників енергії та послуг, а також купівлі енергії і послуг на відкритих торгових майданчиках. Це означає, що можливість зниження тарифів в перспективі внаслідок конкуренції на роздрібному ринку обмежена, оскільки тарифи ОСР, основну частину яких складають виробничі витрати, у багато разів нижче витрат на генерацію і передачу ЕЕ по магістральних лініях електропередач.

Крім того, діюча модель ринку передбачає природну монополію технологічної інфраструктури найбільш наближеною до споживача і, в першу чергу, електричних мереж. В аналогічних моделях ринку за кордоном держава за допомогою стимулюючих регуляторних механізмів забезпечує ефективне функціонування роздрібного сегмента і поступове зниження тарифу на послуги розподільчої електромережі як складової тарифу на ЕЕ для кінцевого споживача, а також його недискримінаційний доступ до розподільної мережі.

Аналіз розвитку даного сегмента ринку України за минулий період його функціонування свідчить про наступне:

- недосконалість механізмів тарифного регулювання і як результат — неконтрольоване зростання тарифів на передачу і розподіл ЕЕ;
- складність процедур і висока вартість приєднання до мереж;
- збереження системи перехресного субсидування («перехрестя» між групами «дешевих виробників» і справді «дорогими виробниками» ЕЕ на підприємствах відновлюваної енергетики закладено в тариф на передачу ЕЕ, але механізм її ліквідації не передбачений, що істотно спотворює ринкові процеси і позбавляє частину виробників ЕЕ можливостей використання їх конкурентних переваг і стимулів як в поточному стані, так і при виробленні стратегії розвитку).

Можна припустити, що саме ці обставини не сприяють зниженню цін на оптовому ринку ЕЕ, а отже, і тарифів для кінцевих споживачів, і

утворюють систему негативних сигналів для споживачів. Тому споживачі обирають власні варіанти подолання складних обставин, серед яких: скорочення споживання; підвищення енергоефективності виробництва; розвиток власної генерації.

Така тенденція спостерігалася і раніше, коли промислові, комунальні споживачі і окремі домогосподарства стали активно йти з ринку і орієнтуватися на розвиток локальних систем енергопостачання. В нових поточних умовах цей процес може тільки посилитися. Варто зазначити, що крім високих тарифів на ЕЕ для кінцевих споживачів цьому сприяє ряд інших факторів, а саме неможливість оперативного технологічного приєднання до мереж; незадоволеність якістю ЕЕ і надійністю електропостачання. Як наслідок це може викликати зниження обсягів купівлі-продажу ЕЕ на діючому оптовому ринку і суттєве зростання витрат на одиницю продукції генерації, магістральних і розподільних мереж ОЕС.

Зрештою створюються передумови виникнення нової проблеми: чим активніше йдуть споживачі від централізованого постачання електроенергії, тим вище цінове навантаження на покупців, що залишилися, тим дієвішими стають негативні сигнали, що змушують скорочувати споживання або створювати власну систему електропостачання. При цьому в системах розподіленої генерації виникають резервні потужності, ефективність використання яких невисока. Напевно, оптимальнішим варіантом була б їхня спільна робота з ОЕС, щоб мінімізувати витрати за допомогою обміну поставками з ОЕС в рамках системи управління попитом.

Таким чином, проведений аналіз дає змогу стверджувати, що внаслідок відсутності конкурентного середовища і неможливості для споживачів відмовитися від дорогої енергії, оскільки коефіцієнт еластичності ринку практично наближається до нуля, відбувається завищення тарифів постачальників. Сформована структура фактичного централізованого процесу ціноутворення для всіх суб'єктів ринку на одній торговій площадці неадекватно відображає фізичну і техніко-економічну особливість функціонування систем енергозабезпечення в Україні. Тому виникає необхідність проведення досліджень комплексного впливу зазначених вище взаємопов'язаних проблем на процеси ціноутворення ринку ЕЕ, щоб на цій основі провести аналіз можливих варіантів внесення до Правил ринку нових регуляторних механізмів і ввести в його роботу конкурентні механізми ціноутворення, які реально тиснуть на ціни «вниз».

При виборі перспективних шляхів вдосконалення діючої моделі оптового і роздрібного ринків ЕЕ важливо враховувати, що регуляторні механізми ринкового процесу ціноутворення необхідно вибудовувати виходячи, в першу чергу, з інтересів споживачів.

Формулювання задачі побудови мультиагентної імітаційної моделі процесу ціноутворення на ринку ЕЕ розглянемо на основі запропо-

нованого в роботі [1] підходу до побудови імітаційної моделі такого класу складності, а саме мультиагентного підходу, в рамках однієї з відомих методологій об'єктно-орієнтованого моделювання індивідуальної і колективної поведінки агентів в мультиагентному середовищі.

Запропонована модель — це імітаційна модель мультиагентної системи процесу ціноутворення, до складу якої входить множина активних агентів, що приймають рішення і діють в загальному середовищі для досягнення загальних цілей або індивідуальних (можливо конфліктуючих) інтересів і стратегій. Вона заснована на інформаційній взаємодії агентів-учасників ринку ЕЕ в процесі діючої системи ціноутворення, створеної відповідно до Правил ринку [3] та інших нормативних документів [4—6]. Тільки в цьому функціональному призначенні вона імітує роботу діючої СОТС ринку, являючи собою складну динамічну систему децентралізованої взаємодії (на відміну від діючої моделі) між агентами виробниками, оптовими і роздрібними постачальниками ЕЕ, енерготрейдерами і агрегованими споживачами в процесі ціноутворення.

Модель повинна бути такою що розвивається з урахуванням динаміки змін у зовнішніх факторах впливу на ціноутворення на ринку, в тому числі впливу організаційної, технічної і інформаційно-технологічної інфраструктури діючого ринку. Цю модель буде побудовано за принципом «знизу-вгору». Користувачі імітаційної моделі за допомогою мультиагентного середовища, що включає не тільки бази даних (БД), а й бази моделей, можуть не тільки вирішувати поточні завдання формування торгових заявок та інше, але й мати можливість досліджувати різні еволюційні шляхи розвитку системи ціноутворення при різних припущеннях про вдосконалення регуляторних механізмів, інституційних норм з урахуванням технологічних змін в структурі виробництва ЕЕ в майбутньому, а також використовувати спеціальні моделі для навчання менеджерів ринку при зростанні і зміні кількості і складу учасників.

Результати моделювання допоможуть користувачам удосконалювати свої локальні системи підтримки прийняття рішень для формування заявок на різних сегментах ринку і вирішувати інші поточні завдання взаємодії з інформаційно-технологічною інфраструктурою ринку. При проектуванні імітаційної моделі необхідно використовувати світовий досвід побудови моделей такого класу складності, наприклад досвід створення відомої системи NEMSIM (Австралія) [24].

Одним з основних етапів розробки імітаційної моделі є етап формування БД інформаційної системи з ретроспективними ринковими даними (з дня початку роботи діючої моделі ринку) про попит, ціноутворення, розподіл потужності між блоками електростанцій та ін. Як імітаційна модель динамічного процесу вона повинна мати дані про динаміку процесів

ціноутворення та про те, як вони актуалізуються. В подальшому БД наповнюються іншою необхідною і достовірною інформацією для розв'язання розрахункових задач за допомогою моделюючих алгоритмів, що забезпечує надання користувачам доступу до БД структурованої інформації, реалізованої у вигляді сховища даних.

Ця БД включає широкий перелік часових рядів даних про торги, які є важливим джерелом інформації про учасників ринку, їх інтереси, вподобання та стратегії агентів. Найважливішим є те, що ці дані повинні давати можливість сформувати такі множини гравців ринку, які дозволять отримати уявлення про поведінку індивідуальних агентів-конкурентів, та коаліцій агентів у конфліктних ситуаціях, що відображаються через реалізацію їхніх торговельних стратегій з застосуванням певних індивідуальних або коаліційних дій [25].

У запропонованій імітаційній моделі агенти оптових постачальників ЕЕ, постачальників послуг електричних мереж, постачальників роздрібного ринку, постачальників послуг Оператора ринку та інші купують і продають ЕЕ в імітаційному торговому мультиагентному середовищі. Агенти мають різні цілі. Деякі з них крім максимізації прибутку можуть побажати збільшити частку ринку, диверсифікувати джерела генерації або більш тісно співпрацювати з кінцевими споживачами. Незважаючи на наявність загального інформаційного середовища, кожен агент залишається унікальним, активним і самостійним в сенсі підготовки і прийняття оперативних і стратегічних рішень з використанням як загальної, так і доступної тільки для нього індивідуальної інформації. Крім того, завдяки вчасно отриманій актуальній та достовірній інформації агенти вчаться змінювати свою поведінку, щоб адаптуватися до нової ситуації і тим самим ефективніше коригувати свої дії для досягнення поставленої мети.

Таким чином, мультиагентна імітаційна модель ціноутворення дозволить створити мультиагентне середовища, у якому взаємодіє множина агентів, діяльність яких обмежена тільки діючими Правилами ринку і системою технічних обмежень, пов'язаних з необхідністю забезпечення стійкої роботи ОЕС. Створення такої імітаційної моделі надасть можливість користувачам формувати та приймати рішення як індивідуально, так і в колективі агентів, спільно з якими буде змінюватися чинник «знизу вгору».

Аналіз поведінки агентів (прийняті рішення, оцінка їх наслідків) може привести як до очікуваних, так і до несподіваних результатів на системному рівні в сенсі розвитку ринку. Імітація діяльності агента може здійснюватися в трьох секторах мультиагентного середовища:

1) в секторі торгових операцій (див. рис. 2), де діяльність агента здійснюється на взаємопов'язаних сегментах оптового ринку і на роздрібному ринку;

2) в технічному секторі діючих генеруючих блоків електростанцій з актуальною інформацією про стан електричної мережі магістральних і розподільних ліній електропередачі, тому що технічний сектор передачі і розподілу енергії накладає ряд обмежень на торговельні операції на ринку електроенергії; наприклад обсяг ЕЕ, що продається з однієї енергосистеми в іншу, обмежений пропускною спроможністю між двома сусідніми енергосистемами;

3) в секторі енергетичних ресурсів.

Передбачено, що робота кожного сектора буде автономною, але всі агенти будуть мати можливість одночасної роботи з усіма секторами.

Висновки

Відсутність конкурентного середовища і неможливість для споживачів відмовитися від дорогої енергії зумовлюють завищення тарифів поставальників. При цьому сформована структура фактичного централізованого процесу ціноутворення для всіх суб'єктів ринку на одній торговій площадці неадекватно відображає фізичну і техніко-економічну особливості функціонування систем енергозабезпечення в Україні. Сформульована задача дає змогу побудувати мультиагентну імітаційну модель процесів ціноутворення на ринку електроенергії та створити мультиагентне середовище, у якому взаємодіє множина імітованих агентів, діяльність яких обмежена тільки діючими Правилами ринку і системою технічних обмежень, пов'язаних з необхідністю забезпечення стійкої роботи ОЕС. В такому середовищі агенти зможуть не тільки вирішувати поточні завдання формування торгових заявок, але й будуть мати можливість досліджувати різні еволюційні сценарії розвитку системи ціноутворення за різними припущеннями про вдосконалення регуляторних механізмів та інституційних норм з урахуванням технологічних змін в структурі виробництва ЕЕ в майбутньому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мохор В.В. Про створення мультиагентної імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку електроенергії / В.В. Мохор, В.А. Євдокімов // Електрон. моделювання, 2020, **42**, № 6, с. 3—17.
2. Закон України «Про ринок електричної енергії» № 2019-VIII від 13. 04. 2017 р. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19/page2> (Дата звернення: 10.10.19).
3. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики і комунальних послуг. Про затвердження Правил ринку. Постанова № 307 від 14.03.2018 р. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18/page#Text> (Дата звернення: 10.10.19).

4. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики і комунальних послуг. Про затвердження Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку. Постанова № 308 від 14.03.2018 р. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18/page#Text> (Дата звернення: 10.10.19).
5. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики і комунальних послуг. Про затвердження Кодексу комерційного обліку електричної енергії. Постанова № 311 від 14.03.2018 р. [Електронний ресурс]: Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18/page#Text> (Дата звернення: 10.10.19).
6. Державне підприємство «Оператор ринку». Аналітичні матеріали. <https://www.oree.com.ua/>
7. Національна енергетична компанія «Укренерго». Аналітика. <https://ua.energy/>
8. *Блінов І.В.* Підхід до формування лотів виробників на аукціоні з купівлі-продажу електричної енергії / І.В. Блінов, Є.В. Парус // Праці Інституту електродинаміки НАН України, вип. 28. Київ: ІЕД НАНУ, 2011, с. 20—25.
9. *Королев М.* Составляем заявки на продажу... / М. Королев, Д. Углов // Профессиональный журнал, 2004, с. 64—69.
10. *Амелина А.Ю.* Выбор оптимальной стратегии поведения генерирующей компании на рынке «на сутки вперед» в условиях рыночного регулирования / А.Ю. Амелина, Е.М. Лисин, Ю.А. Анисимова, В. Стриелковски // Вектор науки ТГУ, 2013, № 4, с. 63—68.
11. *Микешина А.А.* Стратегия поведения генерирующей компании на оптовом рынке электроэнергетики / А.А. Микешина // Экономика, Статистика и Информатика, 2010, № 6, с. 190—192.
12. *Филатов С.А.* Модели и методы формирования оптимальных стратегий поведения генерирующих компаний на оптовом рынке электрической энергии: Автореф. дис. ... канд. экон. наук. СПб: изд-во СПб ГИЭУ, 2013, 19 с.
13. *Секретарев Ю.А.* Математическая модель управления функционированием генерирующей компании в современных условиях / Ю.А. Секретарев, Т.В. Мятёж, Б.Н. Мошкин // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018, **329**, № 2, с. 146—158.
14. *Битеряков Ю.Ф.* К вопросу формирования цен на конкурентных рынках электроэнергии / Ю.Ф. Битеряков, С.А. Кутинов // Вестник ИГЭУ, 2005, вып. 2, с. 1—4.
15. *Кириленко О.В.* Балансующий рынок електроенергії України та його математична модель / О.В. Кириленко, І.В. Блінов, Є.В. Парус//Технічна електродинаміка, 2011, № 2, с. 36—43.
16. *Кириленко О.В.* Імітаційна модель ринку електричної енергії «на добу наперед» з неявним урахуванням мережевих обмежень енергетичних систем / О.В. Кириленко, І.В. Блінов, Є.В. Парус, Г.А. Іванов // Там же, 2019, № 5, с. 60—67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.060>.
17. *Камчатова Е.Ю.* Риски энергетических компаний/Е.Ю. Камчатова, А.В. Костенко // Вестник университета, 2016, № 11, с. 69—74.
18. Market Risk Management in Russian electricity companies. Analytical study. KPMG, 2012 [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.kpmg.com/RU/ru/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/Market-risk-management-at-Russian-power-companies-rus.pdf> (accessed date : 11.10.2016).
19. *Azevedo F.* Forecasting electricity prices with historical statistical information using neural networks and clustering techniques / F. Azevedo, Z.A. Vale // IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2006, pp. 44—50.

20. Jain A. Short Term Load Forecasting by Clustering Technique based on Daily Average and Peak Loads / A. Jain , B. Satish // Proceedings of 2009 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM 2009): Report No: IIIT/TR/2009/205 Centre for Power Systems. International Institute of Information Technology, Hyderabad - 500 032, INDIA, July 2009.
21. Azevedo F. A long-term risk management tool for electricity markets using swarm intelligence / F. Azevedo, Z.A. Vale, P.B. Moura Oliveira, H.M. Khodr // Electric Power Systems Research, 2010, pp. 380—389.
22. Ortiz M. Price forecasting and validation in the Spanish electricity market using forecasts as input data / M. Ortiz, O. Ukar, F. Azevedo, A. Mugica // Electrical Power and Energy Systems, 2016, № 77, pp. 123—127 (journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijepes).
23. Chujie Tian. A Deep Neural Network Model for Short-Term Load Forecast Based on Long Short-Term Memory Network and Convolutional Neural Network / Chujie Tian, Jian Ma, Chunhong Zhang, Panpan Zhan // Energies, 2018, № 11, 13 p. Doi:10.3390/en1123493 www.mdpi.com/journal/energies
24. NEMSIM: the National Electricity Market simulator. <http://press-files.anu.edu.au/downloads/press/p96431/mobile/ch11s08.html>
25. Борукаев З.Х. Подход к построению теоретико-игровой модели энергетического рынка // Электрон. моделирование, 2006, **28**, № 4, с. 107—119.

Отримано 03.04.21

REFERENCES

1. Mokhor, V.V. (2020), “On the creation of a multi-agent simulation model of pricing processes in the electricity market”, *Elektronne modelyuvannya*, Vol. 42, № 6, pp. 3-17.
2. Law of Ukraine "On the electricity market" № 2019-VIII dated April 13, 2017, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19/page2> (accessed: October 10, 2019).
3. National Commission for State Regulation of Energy and Utilities. About the statement of Rules of the market. Resolution №307 of March 14, 2018, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18/page#Text> (accessed: October 10, 2019).
4. National Commission for State Regulation of Energy and Utilities. On approval of the Rules of the day-ahead market and the intraday market. Resolution № 308 of March 14, 2018, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18/page#Text> (accessed: October 10, 2019).
5. The National Committee, which is good for the state regulation in the spheres of energy and communal services. About the consolidated Code of the Commercial Obligation of Electricity. Resolution № 311 dated March 14, 2018, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18/page#Text> (accessed: October 10, 2019).
6. Market Operator, URL: <https://www.oree.com.ua/>.
7. UKRENERGO, URL: <https://ua.energy/>.
8. Blinov, I.V. (2011), “Prior to the formation of lots of producers for auctions for the purchase and sale of electrical energy”, *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*, Vol. 28, pp. 20-25.
9. Korolev, M. (2004), “We make orders for sale...”, *Professionalnyy zhurnal*, pp. 64-69.
10. Amelina, A.Yu. (2004), “Choosing the Optimal Strategy for a Generating Company to Behave in the Day-Ahead Market under Market Regulation”, *Vektor nauki TGU*, Vol. 4, pp. 63-68.
11. Mikeshina, A.A. (2010), “The strategy of behavior of a generating company in the wholesale electricity market”, *Ekonomika, Statistika i Informatika*, Vol. 6, pp. 190-192.

12. Filatov, S.A. (2013), "Models and methods for the formation of optimal strategies for the behavior of generating companies in the wholesale electricity market", Abstract of Cand. Sci. (Econom.) dissertation, 08.00.13, Saint Petersburg State University of Engineering and Economics, Saint Petersburg, Russia.
13. Sekretarev, Yu.A. (2018), "Mathematical model of management of the functioning of a generating company in modern conditions", *Izv. Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, Vol. 329, № 2, pp. 146-158.
14. Biteryakov, Yu.F. (2005), "On the issue of price formation in competitive electricity markets", *Vestnik IGEU*, Iss. 2, pp. 1-4.
15. Kirilenko, O.V. (2011), "Balancing market of electricity of Ukraine and a mathematical model", *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 2, pp. 36-43.
16. Kirilenko, O.V. (2019), "Simulation model of the market of electrical energy "in good time" with implicit consideration of festooned interconnection of energy systems, *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 5, pp. 60-67, DOI: <https://doi.org/10.15407/techned> 2019. 05.060.
17. Kamchatova, E.Yu. (2016), "Risks of energy companies", *Vestnik universiteta*, Vol. 11, pp. 69-74.
18. Market Risk Management in Russian electricity companies. Analytical study. KPMG (2012), available at: <https://www.kpmg.com/RU/ru/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/Market-risk-management-at-Russian-power-companies-rus.pdf> (accessed: October 11, 2016).
19. Azevedo, F. (2006), "Forecasting electricity prices with historical statistical information using neural networks and clustering techniques", *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, pp. 44-50.
20. Jain, A. (2009), "Short Term Load Forecasting by Clustering Technique based on Daily Average and Peak Loads", Proceedings of 2009 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM 2009), Report №: IIIT/TR/2009/205, Centre for Power Systems, International Institute of Information Technology, Hyderabad, India, July 2009.
21. Azevedo, F. (2010), "A long-term risk management tool for electricity markets using swarm intelligence", *Electric Power Systems Research*, pp. 380-389.
22. Ortiz, M. (2016), "Price forecasting and validation in the Spanish electricity market using forecasts as input data", *Electrical Power and Energy Systems*, № 77, pp. 123-127 (available at: www.elsevier.com/locate/ijepes).
23. Chujie, T. (2018), "A Deep Neural Network Model for Short-Term Load Forecast Based on Long Short-Term Memory Network and Convolutional Neural Network", *Energies*, № 11, p. 13, DOI:10.3390/en11123493, available at: www.mdpi.com/journal/energies.
24. NEMSIM: the National Electricity Market simulator, available at: <http://press-files.anu.edu.au/downloads/press/p96431/mobile/ch11s08.html>.
25. Borukaev, Z.Kh. (2006), Approach to the construction of a game-theoretic model of the energy market, *Elektronne modelyuvannya*, Vol. 28, № 4, pp. 107-119.

Received 03.04.21

V.A. Evdokimov

FORMULATION OF THE PROBLEM OF CONSTRUCTING
A MULTIAGENT SIMULATION MODEL OF PRICING PROCESSES
IN THE ELECTRICITY MARKET

Based on the analysis of literature sources, the key scientific and practical tasks of improving and developing the pricing system of the current model of the electricity market in Ukraine "Competition at all levels" have been identified. The formulation of the problem of building a multi-agent simulation model of the pricing process in the electricity market as a complex dynamic system of decentralized interaction between manufacturing agents, wholesale and retail suppliers, energy traders and aggregate electricity consumers is considered.

Keywords: simulation model, multiagent environment, electricity market, pricing.

ЄВДОКИМОВ Володимир Анатолійович, канд. наук з державного управління, докторант Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. В 1995 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — математичне і комп'ютерне моделювання енергоринків.