
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.003>
УДК 004.94:621.316

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

Створення мультиагентної імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку електроенергії

Наведено огляд та аналіз публікацій, присвячених вирішенню науково-практичних проблем розвитку ринку електричної енергії (ЕЕ) як складної організаційно-технічної системи (СОТС). Підсистему управління ціноутворенням виділено як окремий об'єкт організаційного управління СОТС. На основі аналізу сучасних методів імітаційного моделювання процесів управління в СОТС обгрунтовано вибір мультиагентного підходу для побудови імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку ЕЕ. Обгрунтовано актуальність створення імітаційної моделі системи управління процесом ціноутворення на ринку ЕЕ з безпосередньою участю суб'єктів ринку. Основним призначенням моделі є дослідження науково-практичної проблеми удосконалення методичного інструментарію ціноутворення.

К л ю ч о в і с л о в а: імітаційна модель, мультиагентний підхід, організаційно-технічна система, ринок електроенергії.

Постановка проблеми. Системне управління складними організаційно-технічними системами (СОТС), що об'єднують множину взаємопов'язаних структурних підсистем і елементів, які взаємодіють між собою та з зовнішніми технічними і соціально-економічними системами, є складною проблемою, дослідженням якої присвячено багато робіт. Проте немає підстав вважати її вивченою остаточно, оскільки серед розглянутих є чимало унікальних складно структурованих систем, які мають великий потенціал. Тому дослідженням комплексу теоретичних і прикладних проблем цієї загальної проблеми вдосконалення методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання, призначених для аналізу ефективності механізмів функціонування окремих СОТС, приділяється велика увага.

© Мохор В.В., Євдокімов В.А., 2020

До числа таких проблем входять наступні проблеми:

- адекватний математичний опис процесів функціонування СОТС і розробка алгоритмічних моделей механізмів організаційної, оперативно-технологічної та інформаційної взаємодії між підсистемами і елементами, що їх утворюють;
- розвиток теорії побудови інтегрованих комп'ютерних систем організаційного управління СОТС, методів та засобів імітаційного моделювання процесів управління в СОТС, включаючи їх структурну і алгоритмічну організацію, на основі застосування нових інформаційних технологій;
- 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.

Для вирішення зазначених проблем виникає нагальна потреба створення нових засобів математичного моделювання, застосування інформаційних технологій, що дозволяють розробляти комп'ютерні імітаційні моделі, які адекватно відображають процеси функціонування СОТС, а також враховують особливості взаємодії досліджуваної СОТС з зовнішнім середовищем. У структурі галузей господарського комплексу держави можна виділити чимало таких СОТС: електроенергетика; теплоенергетика; транспортна інфраструктура (залізничний, автомобільний, авіаційний, морський, річковий транспорт); видобуток корисних копалин (вугілля, газ тощо); великі промислові і сільськогосподарські компанії.

В умовах ринкової економіки кожна з цих СОТС зазнала ряд перетворень при реформуванні систем організаційного управління, викликаних створенням у зовнішньому середовищі нових ринків з відповідної структурою управління, на яких реалізується вироблена ними продукція або послуга. Це зумовило необхідність створення в СОТС нових структурних підсистем організаційного управління, головною функцією діяльності яких є організація процесів ціноутворення (тарифоутворення) на ринках продукції і послуг, а в деяких — і розподіл доходу від реалізованої продукції відповідно до встановлених на ринку правил ціноутворення та методик тарифоутворення.

Об'єднання таких підсистем в єдине організаційне, оперативно-технологічне, економічне та інформаційне середовище, що забезпечує процеси конкурентного та (або) «соціально направленою» ціноутворення, є, по суті, окремою організаційною системою, однією з найважливіших в системі відносин, що виникають між учасниками ринку під час здійснення операцій купівлі-продажу. З огляду на те, що в складі таких СОТС утворюються нові підсистеми організаційного управління, інфраструк-

турні інформаційно-технологічні підсистеми і елементи на основі засобів обчислювальної техніки і телекомунікаційного устаткування, її також можна включити до класу СОТС.

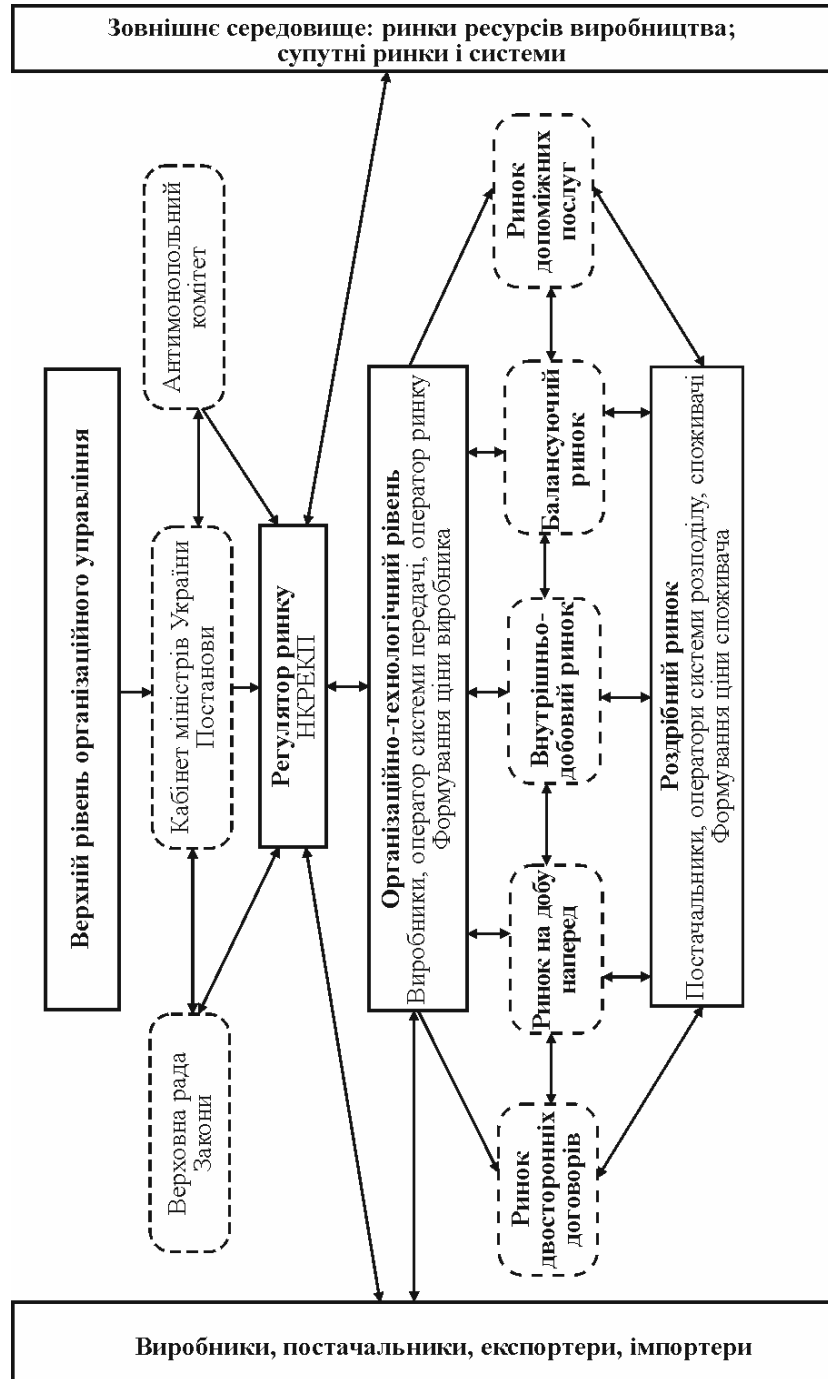
Для проведення теоретичних і прикладних досліджень будемо розглядати виділену підсистему ціноутворення, яка є складовою частиною великомасштабної СОТС, а саме ринок ЕЕ як окремий об'єкт організаційного управління. Її основою є технічна система — об'єднана електроенергетична система (ОЕС), яка розглядається як зовнішнє середовище. Зміни в структурі виробництва і споживання ЕЕ є визначальними в процесах ціноутворення та тарифоутворення. На рисунку наведено структурну схему системи організаційного управління ціноутворенням на ринку ЕЕ.

Аналіз стану досліджень. Будемо називати системою сукупність елементів, що перебувають у відносинах і зв'язках один з одним, які утворюють певну цілісність і єдність [1]. У роботах [2—8] наведено основні вживані терміни і поняття в області системного підходу до математичного моделювання СОТС і визначено критерії складності системи. В роботах [9, 10] сформульовано ознаки і відмінні риси СОТС, одна з яких полягає в тому, що всі підсистеми і елементи СОТС є самоврядними (децентралізація управління) або керованими ззовні в межах вищого управління на основі власного інтелекту і інформації, що зберігається в пам'яті.

Практичних проблем розвитку ринку ЕЕ, які для вирішення потребують проведення теоретичних досліджень, існує дуже багато. Серед них є проблеми, пов'язані з підвищенням енергоефективності процесів виробництва, передачі і використання ЕЕ, з економічною диспетчеризацією виробництва передачі та розподілу ЕЕ, зі змінами структури виробництва і споживання ЕЕ, ціно- та тарифоутворення на ЕЕ тощо.

До числа важливих проблем розвитку ринку належить проблема управління попитом. У США і в країнах ЄС усвідомили необхідність наукового дослідження цієї проблеми і пошуку практичних рішень на основі застосування результатів теоретичних досліджень ще в кінці 70-х років минулого століття. Аналіз світової практики досліджень цієї проблеми і застосування результатів досліджень при вирішенні різних задач управління наведено в роботах [11, 12].

Ефективність практичного застосування розробленого методичного інструментарію, призначеного для вирішення різних задач управління попитом підтверджується переконливими прикладами. Так, за даними, наведеними в роботі [11], з 1985 по 1995 рік понад 500 енергокомпаній в різних штатах США успішно застосували розроблений інструментарій та отримали економію 29 ГВт пікового навантаження. Середні питомі витрати на досягнення такого результату склали всього 2—3 центи на кіловат-годину, що набагато нижче середньої ставки тарифу.



Структурна схема організаційно-технічної системи управління ціноутворенням на ринку ЕЕ

В Україні дослідженням даної наукової проблеми також присвячено чимало робіт. Наприклад, в роботі [13] надано детальний аналіз особливостей взаємодії виробників і споживачів ЕЕ в умовах функціонування нової моделі ринку ЕЕ в Україні, на основі якого зроблено висновок про необхідність удосконалення нової моделі ринку ЕЕ, запропоновано один з можливих механізмів управління режимами електроспоживання (управління попитом).

Крім зазначеної проблеми багато ринків ЕЕ стикаються з проблемою появи безпосередньо в системі розподілу ЕЕ генеруючих установок (ГУ) розподіленої генерації, яка має флуктуаційні особливості. Виявлено і значні додаткові проблеми, які стосуються роботи ринку і ЕЕ в цілому. Серед них наступні:

- організаційні, пов'язані з необхідністю регламентувати діяльність ГУ;
- організаційно-економічні, пов'язані з встановленням спеціальних тарифів купівлі-продажу виробленої ними ЕЕ на ринку;
- оперативно-технологічні з можливою неконтрольованою видачею ЕЕ в енергосистему і необхідністю підтримки «гарячого резерву» потужності в ЕЕ для забезпечення балансу потужності виробництва і споживання ЕЕ;
- інформаційно-технологічні, пов'язані з необхідністю розвитку автоматизованої системи комерційного обліку енергії та інших автоматизованих систем управління технологічними процесами до рівня споживчої генерації.

Докладніший перелік організаційних, економічних та технічних проблем взаємодії ГУ з ЕЕ, які стосуються об'єктів розподіленої генерації, можна знайти у роботах [14—16]. Досвід дослідження зазначених проблем свідчить про те, що для їх аналізу, оцінки їх впливу на процеси ціноутворення на оптовому ринку ЕЕ і його сегментах необхідно використовувати імітаційні моделі. Більш детальний аналіз проблем, з якими стикаються дерегульовані та децентралізовані ринки ЕЕ і причин їх виникнення, наведено в роботах [17—20].

Серед проблем, що виникають, розглянуто такі: висока вартість впровадження моделі ринку; складна структура розподілу ринку на сегменти; немінуча волатильність та маніпулювання спотовими цінами; маніпулювання окремими гравцями, здійснюване ринковою владою; неефективні інвестиції; складність зниження вартості генерації; непередбачуваність цін на ринках енергоресурсів; некупність вартості виробництва ЕЕ часткою генеруючих потужностей (відновлювальна енергетика); нерівний розподіл доходів від реалізації спільно виробленої і поставленої споживачам продукції. Тому в багатьох країнах створюються імітаційні моделі функціонування ринків для проведення досліджень з

урахуванням особливостей їх протікання, що уможливило пошук найбільш раціональних і оптимальних механізмів розподілу доходів між сегментами ринку та безпосередньо їх суб'єктами. Для створення імітаційних моделей використовуються різноманітні методології та методи моделювання, комп'ютерні засоби та інформаційні технології [21].

Викладене вище свідчить про актуальність дослідження комплексної проблеми математичного та комп'ютерного моделювання організаційної, оперативної-технологічної та інформаційної взаємодії підсистем і елементів, що входять до СОТС ринку ЄЕ, з метою підвищення ефективності механізмів їх функціонування в умовах децентралізованого управління, яке передбачає відсутність єдиного керуючого центру формування координаційних команд для кожного з елементів підсистем. На основі проведеного аналізу літературних джерел можна також зробити висновок про те, що залишається велика кількість невирішених проблем подальшого розвитку ринку ЄЕ. Серед них особливе значення має науково-практична проблема ціно- та тарифоутворення. Для її вирішення необхідно визначити систему взаємопов'язаних задач, реалізація яких з застосуванням нових технологій імітаційного моделювання і інформаційно-комунікаційних технологій забезпечить підвищення обґрунтованості і якості прийнятих рішень. Теоретичні дослідження цієї проблеми тривають у багатьох країнах світу, що дозволяє зробити висновок про її важливість та про те, що від її вирішення, зрештою, залежить і вирішення інших проблем ринку ЄЕ та енергетики в цілому. Саме підвищення ефективності виробництва ЄЕ і енерговикористання, а також вирішення інших згаданих практичних проблем вдосконалення і розвитку ринків ЄЕ впливає на соціальний рівень розвитку держави.

Метою дослідження є обґрунтування підходу до побудови імітаційної моделі системи управління процесом ціноутворення на ринку ЄЕ за безпосередньою участю суб'єктів ринку, основним призначенням якої є вирішення науково-практичної проблеми удосконалення методичного інструментарію ціноутворення.

Ієрархічні рівні системи організаційного управління. Розглянемо формальний опис зазначеної підсистеми СОТС ринку ЄЕ, його організаційної системи, яка забезпечує цілеспрямовану взаємодію підсистем та елементів СОТС для вирішення функціональних задач управління ціноутворенням. Виділимо основні рівні і області їх взаємозв'язків з іншими елементами і суб'єктами господарювання зовнішнього середовища, а також наведемо короткий перелік функціональних задач організаційного управління, вирішення яких має бути забезпечено відповідними органами управління системи для досягнення поставлених цілей управління ціноутворенням та розподілом доходів між суб'єктами ринку від реалізації продукту кінцевому споживачеві.

Перший рівень, який назвемо Верхнім рівнем організаційного управління, утворюють органи державної влади, що забезпечують підготовку і прийняття законодавчих та нормативних (регуляторних) актів для створення необхідних умов функціонування і розвитку ринку ЕЕ, максимально адекватних обстановці на міжнародному та державному рівнях, формування загальносистемних планів розвитку господарського комплексу держави та їх реалізацію.

Другий рівень — Національна комісія, уповноважений Верхнім рівнем організаційного управління орган регулювання, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики і комунальних послуг (НКРЕКП), — Регулятор ринку. На цьому рівні реалізуються функції і завдання децентралізованого організаційного управління, спрямовані на забезпечення необхідних умов стійкого розвитку і функціонування ринку ЕЕ в цілому. А також функції планування розвитку енергосистеми, формування та затвердження нормативно-правової бази у вигляді правил (регуляторних механізмів) взаємодії учасників ринку, в тому числі і правил ціноутворення, функції контролю виконання затверджених правил і процедур функціонування його підсистем і елементів на основі даних моніторингу.

Третій рівень — Організаційно-технологічний рівень управління утворюють підсистеми — сегменти ринку, що забезпечують управління процесами взаємоузгодженого оперативного-технологічного та інформаційного забезпечення процесів виробництва, передачі, розподілу та споживання спільно виробленої продукції, тобто ЕЕ, на ринку. А також управління процесами формування балансів виробництва і споживання ЕЕ, ціноутворення на сегментах ринку відповідно до Правил та організації взаєморозрахунків між виробниками, постачальниками ЕЕ і постачальниками системних послуг з диспетчерського управління, передачі і розподілу ЕЕ на ньому. Це сегменти: ринок двосторонніх договорів; ринок «на добу вперед», внутрішньодобовий ринок, балансуєчий ринок та ринок допоміжних послуг. Всі ці сегменти оптового ринку мають функціональну специфіку, працюють і реалізують інтереси учасників ринку через застосування узгоджених з Регулятором Правил ринку, серед яких прописано і механізми ціноутворення. Суб'єктами управління цих підсистем (елементами) є генеруючі компанії виробники ЕЕ, в тому числі і компанії розподіленої генерації, а також оптові постачальники ЕЕ (енерготрейдери).

Четвертий рівень — управління роздрібним ринком ЕЕ. На цьому сегменті ринку представлено такі елементи: постачальники ЕЕ, компанії розподільчих мереж, постачальники універсальних послуг, які постачають ЕЕ побутовому та малому споживачеві, а також постачальник

«останньої надії», який забезпечує обов'язковою поставкою ЕЕ споживачу. Серед останніх зростає кількість «активних» споживачів, які прагнуть продавати надлишки власної генерації на ринку ЕЕ і, отже, можуть стати активними елементами системи ціноутворення.

Створення універсальної математичної моделі процесу функціонування ієрархічно побудованих багаторівневих СОТС з урахуванням всього різноманіття підсистем і елементів, а також особливостей прояву їх взаємопов'язаної горизонтальної і вертикальної організаційної, оперативно-технологічної, економічної та інформаційної взаємодії, є занадто складною проблемою для вирішення аналітичними методами. Тому зазвичай при вирішенні практичних проблем розвитку і вдосконалення ринків ЕЕ дослідники застосовують різні способи декомпозиції СОТС на підсистеми, не порушуючи принципу її цілісності, після чого використовують метод імітаційного моделювання для побудови моделей досліджуваних процесів в підсистемах, виділяючи коло відповідних проблем.

Практично всі відомі великі світові виробники програмних і програмно-апаратних платформ, SAP, ORACLE, IBM, Siemens та інші, пропонують комплексні рішення для побудови комп'ютерних систем організаційного управління в енергетиці. Крім цих платформ сьогодні в світі побудовано і перебувають в експлуатації комп'ютерні програми і алгоритми, які забезпечують моделювання процесів функціонування енергоринків. Найбільш відомі з них NEMS, GEMS, GEMINI (США); PRIMES, PLEXOS (ЄС); NEMSIM (Австралія). Докладний порівняльний аналіз можливостей і особливостей застосування існуючих в світі пакетів програм моделювання ринків ЕЕ наведено в роботі [21].

Ці програмні комплекси мають високу вартість, тому що орієнтовані на великих гравців енергетичних ринків. Аналіз структур виробників і постачальників ринків ЕЕ свідчить про те, що енергетичні ринки такого масштабу в світі формуються не тільки з великих гравців, а й з великої кількості учасників з невеликими оборотними засобами. У таких учасників немає економічних стимулів і можливостей купувати дорогі програмні комплекси для використання як «порадника» при формуванні стратегії поведінки на ринку. Крім того, ці комплекси зазвичай не дають можливості оцінити взаємний вплив стратегії і тактики на перспективу багатьох суб'єктів ринку, які є розподіленою генерацією, в процесі його функціонування. Ця обставина додає значну частку невизначеності при формуванні стратегії розвитку ринку в цілому для управління процесом планування електроспоживання (попитом на електроенергію), а отже, і процесом ціноутворення на ньому. Визначеність у прогнозуванні ціноутворення на ринку необхідна як суб'єктам ринку, так і кінцевому споживачеві. У даному випадку визначеність означає розуміння динаміки

цінової політики енергоринку як цілісної СОТС ціноутворення для двох основних складових кінцевої ціни поставки — ціни за енергетичний продукт (ЕЕ і потужність) і ціни послуги за його доставку кінцевому споживачеві.

Крім того, необхідно враховувати активний розвиток інформаційних технологій «розумні мережі», «розумні лічильники», «розумні будинки (підприємства)», в яких надзвичайно важливими є не тільки процеси автоматичного (дистанційного) управління обладнанням (включення, відключення, обмеження), але і можливість отримання і формування великої кількості даних, що містять інформацію про використання ЕЕ через «смарт-лічильники». З кожним роком зростає кількість інформаційних даних, отриманих від цих лічильників (щохвилинне, погодинне, добове, місячне, кварталне, річне). При цьому виникає проблема, як зберегти і захистити цю інформацію. Розвиток цифрових технологій і можливості математичного апарату, який отримав назву «штучний інтелект», дозволять вирішувати питання створення систем захисту процесів збору, зберігання, змістовної переробки та використання інформації в інтересах підсистем та елементів СОТС ціноутворення для управління об'єктами споживання енергоресурсів (підприємство, будинок, громада).

Обґрунтування вибору підходу до побудови імітаційної моделі ціноутворення. У роботах [4—8, 22—26] дано аналіз підходів до імітаційного моделювання складних нелінійних динамічних систем, таких як СОТС ціноутворення, описано особливості і доцільність їх застосування, переваги та недоліки. Серед детально розглянутих підходів в роботі [25] — системна динаміка, дискретно-подієве моделювання, діє-орієнтований підхід, процес-орієнтований підхід, подіє-орієнтований підхід, стан-орієнтований підхід, мультиагентний підхід. Наведено низку систем та мов імітаційного моделювання, створених для аналізу динаміки СОТС. Там же дано порівняльний аналіз сучасних підходів імітаційного моделювання динамічних систем, який став основою при виборі мультиагентного підходу для побудови імітаційної моделі процесу ціноутворення на ринку ЕЕ.

В останні два десятиліття у вітчизняній та зарубіжній науковій літературі, присвяченій дослідженням процесів управління СОТС, для побудови імітаційних моделей використовується підхід, який отримав назву мультиагентного моделювання. В рамках цього підходу розроблено методи і технології побудови комп'ютерних мультиагентних систем для вирішення задач управління підвищенням активності елементів і підсистем СОТС в прийнятті рішень. Така необхідність виникає і при проведенні заходів по децентралізації управління та вирішенні задач вдосконалення механізмів функціонування діючих систем організаційного управління. Огляд

публікацій, пов'язаних із застосуванням цього підходу, і класифікація напрямків його розвитку подано у роботах [22—25].

В роботах [22, 25, 26] наведено приклади використання мультиагентних моделей для аналізу децентралізованих динамічних систем управління, закономірності функціонування яких не вивчені в достатній мірі. Мультиагентні моделі застосовуються для того, щоб отримати уявлення про загальний характер функціонування таких систем в цілому, виявити напрями їх розвитку на основі аналізу даних про індивідуальну поведінку їх окремих підсистем та елементів (агентів). В [25] на основі аналізу великої кількості літературних джерел вказано характерні ознаки поведінки взаємодій підсистем і елементів (агентів) СОТС, що визначають доцільність застосування мультиагентного підходу для аналізу досліджуваної проблеми. Серед них такі характеристики агентів:

- приспосовуються та змінюють свою поведінку;

- навчаються та беруть участь у динамічній тактичній та стратегічній поведінці;

- мають відношення з іншими, і такі відношення динамічно формуються та розпадаються;

- формують коаліції, мають можливість адаптації і навчання взаємодії на рівні коаліції;

- мають просторовий компонент у поведінці та взаємодії з іншими агентами.

Особливістю мультиагентного підходу, описаного у [25], є те, що його застосування дає можливість опису поведінки елементів систем на високому рівні деталізації для імітаційного моделювання реальних процесів організаційної, оперативної-технологічної, економічної та інформаційної взаємодії підсистем і елементів систем управління. Наведене обґрунтування дозволяє зробити висновок про доцільність застосування мультиагентного підходу для побудови імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку електроенергії.

Мультиагентне моделювання застосовується і для вирішення проблем розвитку електроенергетичних систем. У роботах [27, 28] на основі аналізу міжнародного досвіду розвитку ринків ЕЕ, їх інформаційного та нормативного забезпечення в рамках розвитку концепції Smart Grid відзначено зростаючу роль «активного споживача» в процесах ціноутворення на ринку і взаємодії з розподільними електричними мережами та обґрунтовано необхідність створення системи мультиагентного управління енергосистемою, розроблено інформаційну модель еталонної архітектури ОЕС України. У [27, 28] подано огляд та аналіз сучасних технологій мультиагентного моделювання, діючих стандартів в області створення мультиагентних систем, а також програмних середовищ для

розробки мультиагентних моделей. В [29] наведено приклад застосування мультиагентного підходу для вирішення складної розподіленої задачі оцінювання стану електроенергетичних систем.

Таким чином, бачимо, що система управління ціноутворенням на ринку ЕЕ належить до числа децентралізованих динамічних розподілених СОТС і є багаторівневою територіально розподіленою системою, яка складається з множини підсистем і елементів, взаємопов'язаних між собою вертикально та горизонтально системоутворюючими зв'язками. Вибір мультиагентного підходу для імітаційного моделювання процесів ціноутворення в даній системі управління обумовлено також додатковими можливостями, а саме генерувати і враховувати вплив навколишнього середовища (наприклад, динаміку цін на ринках енергоресурсів), моделювати зміни поведінки основних підсистем — сегментів ринку в залежності від зміни інституційних норм; враховувати зміни конкурентоспроможності агентів; моделювати різні механізми ціноутворення і аналізувати можливі зміни енергокомпаній при виробленні своєї тактики і стратегії поведінки на ринку, моделювати розвиток і прогнозувати можливі результати реалізації інвестиційних проектів відновлюваної енергетики з позиції основних учасників ринку и тощо.

Висновки

Створення запропонованої мультиагентної імітаційної моделі може стати методологічною основою для розробки комп'ютерної системи мультиагентного управління процесом ціноутворення як середовища «розумного партнерства» учасників ринку. Така система може бути використана для підвищення ефективності спільного вирішення практичних задач при конкурентному ціноутворенні на спільно вироблений продукт, прозорого та взаємоузгодженого вирішення конфліктних ситуацій, які виникають між виробниками, постачальниками ЕЕ та іншими учасниками ринку при розподілі доходу від її продажу споживачам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Философский энциклопедический словарь* / Гл. ред. Л.Ф. Ильичев, П.Н. Федосеев, В.Г. Панов. М.: Сов. энциклопедия, 1983, 840 с.
2. *Погорелов В.И.* Система и ее жизненный цикл: введение в CALS-технологии/ Учеб. пособие. СПб: Балт. гос. техн. университет, 2010, 182 с.
3. *Чернышов В.Н., Чернышов А.В.* Теория систем и системный анализ / Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008, 96 с.
4. *Советов Б.Я., Яковлев С.А.* Моделирование систем / Учеб. для вузов. Третье изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2001, 343 с.
5. *Теория систем и системный анализ в управлении организациями* / Учеб. пособие. Под ред. В.Н. Волковой и А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика, 2006, 848 с.
6. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978, 400 с.

7. *Томашевський В.М.* Моделювання систем. Київ: Видавнича група ВНУ, 2005, 352 с.
8. *Ганз В.А., Герасимова Е.М., Герасимов Е.Л.* Модели систем организационного управления. Под науч. ред. В.В. Козловского. Минск: Право и экономика, 2015, 308 с.
9. *Соловьев И.В.* Проблемы исследования сложной организационно-технической системы // Вестник МГТУ МИРЭА, 2013, №1 (1), с. 20—40.
10. *Корнаков А.Н.* Модель сложной организационно-технической системы // Международный электронный научный журнал. Перспективы науки и образования, 2015, № 2, с. 44—50. Режим доступа: https://pnojournal.files.wordpress.com/2015/01/pdf_150206.pdf Дата последнего посещения: 14.12.19 г.
11. *Гительман Л.Д., Ратников Б.Е., Кожевников М.В.* Управление спросом на электроэнергию: адаптация зарубежного опыта // Экономика региона, 2013, №1 (76), с. 84—89.
12. *Нехороших И.Н., Добринова Т.В., Анисимов А.Ю., Желовская А.В.* Мировая практика управления спросом на электроэнергию // Экономика в промышленности, 2019, 12, № 3, с. 280—287.
13. *Находов В., Замулко А.* Усовершенствование новой модели рынка электроэнергии путем управления режимами электропотребления (научное мнение). Режим доступа: <http://reform.energy/news/usovershenstvovanie-novoy-modeli-rynka-elektroenergii-putem-upravleniya-rezhimami-elektropotrebleniya-nauchnoe-mnenie-13412>. Дата звернення: 15.01.20.
14. *Праховник А.В., Попов В.А., Ярмолюк Е.С., Кокорина М.Т.* Перспективы и пути развития распределенной генерации в Украине // Энергетика: економіка, технології, екологія, 2012, № 2, с. 7—14.
15. *Voropay N.I.* Prospects and ways of development of distributed generation in electric power systems. International Scientific and Practical Conference "Small Power Engineering—2005". [Electronic resource]: [site]: Access mode: <http://www.combienergy.ru/stat/983>. Date of access 19.10.19, 14 p.
16. *Євдокімов В.А.* Деякі питання дослідження технічного і організаційно-економічного впливу розподіленої генерації на функціонування енергосистеми та ринок електричної енергії // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. праць. Київ: 2019, вип. № 88, с. 134—143.
17. *Woo C.K., King M., Tishler A., Chow L.C.H.* Cost of electricity deregulation // Energy, 2006, Vol. 31, pp. 747—768.
18. *Стофт С.* Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии: Пер. с англ. М.: Мир, 2006, 623 с.
19. *Беляев Л.С.* Проблемы электроэнергетического рынка. Новосибирск: Наука, 2009, 296 с.
20. *Айзенберг Н.И., Филатов А.Ю.* Моделирование и анализ механизмов функционирования электроэнергетических рынков. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2013, 100 с.
21. *Саух С.Е.* Методология и методы математического моделирования энергетики в рыночных условиях // Электрон. моделирование, 2018, 40, № 3, с. 3—32.
22. *Кузнецов А.В.* Краткий обзор многоагентных моделей // Управление большими системами, 2018, вып. 71, с. 6—44.
23. *Тарасов В.Б.* Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.science.donntu.edu.ua/rus/kirgaev/libtatu>. Дата доступа 28.07.19, 46 с.
24. *Додонов А.Г., Ландэ Д.В.* Живучесть информационных систем. Киев: Наук. думка, 2011, 256 с.
25. *Яловець А.Л.* Мультиагентне моделювання переслідування на площині: від теорії до програмної реалізації. Київ: Наук. думка, 2019, 165 с.

26. North M.J., Macal C.M. Managing business complexity: discovering strategic solutions with agent-based modeling and simulations. Oxford University Press, Inc., 2007, 313 p.
27. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Танкевич С.Є., Базюк Т.М. Інформаційне та нормативне забезпечення організації мультиагентного керування електроенергетичної системи із активним споживачем // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, 2016, № 1, с. 29—34.
28. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016, 400 с.
29. Массель Л.В., Гальперов В.И. Разработка многоагентных систем распределенного решения энергетических задач с использованием агентных сценариев // Изв. Томского политехнического института, 2015, 326, № 5, с. 45—53.

Отримано 08.10.2020

REFERENCES

1. Ilyichev, L.F., Fedoseev, P.N., Panov, V.G. (1983), *Filosofskiy entsiklopedicheskiy slovar* [Philosophical Encyclopedic Dictionary], Sovetskaya entsiklopediya, Moscow, USSR.
2. Pogorelov, V.I. (2010), *Sistema i yeye zhiznennyi tsikl: vvedeniye v CALS-tehnologii. Uchebnoye posobiye* [System and its life cycle: an introduction to CALS technologies. Tutorial], BGTU, Saint Petersburg, Russia.
3. Chernyshov, V.N., Chernyshov, A.V. (2008), *Teoriya sistem i sistemnyy analiz: Uchebnoye posobiye* [Systems theory and systems analysis: Tutorial], TGTU, Tambov, Russia.
4. Sovetov, B. Ya., Yakovlev, S.A. (2001), *Modelirovaniye system. Uchebnyk dlya vuzov. Tret'ye izd., pererab. i dop.* [Modeling systems: Tutorial for universities. 3rd ed., revised and enlarged], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
5. Volkova, V.N., Emelyanov, A.A. (2006), *Teoriya sistem i sistemnyy analiz v upravlenii organizatsiyami: Uchebnoye posobiye* [Systems theory and systems analysis in the management of organizations: Tutorial], Finansy i statistika, Moscow, Russia.
6. Buslenko, N.P. (1978), *Modelirovaniye slozhnykh sistem* [Modeling of complex systems], Nauka, Moscow, USSR.
7. Tomashevsky, V.M. (2005), *Modelyuvannya system* [Models of systems], Vydavnycha grupa VNU, Kyiv, Ukraine.
8. Gane, V.A., Gerasimova, E.M., Gerasimov, E.L. (2015), *Modeli sistem organizatsionnogo upravleniya* [Models of systems of organizational management], Pravo i ekonomika, Minsk, Belarussia.
9. Soloviev, I.V. (2013), "Problems in the study of complex organizational-technical system", *Vestnik MGTU MIREA*, Vol. 1, no. 1, pp. 20-40.
10. Kornakov, A.N. (2015), "Model complex organizational-technical system", *Mezhdunarodnyy elektronnyy nauchnyy zhurnal. Perspektivy nauki i obrazovaniya*, Vol. 2, no. 14, pp. 44-50, available at: https://pnojurnal.files.wordpress.com/2015/01/pdf_150206.pdf (accessed: December 14, 2019).
11. Gitelman, L.D., Ratnikov, B.E., Kozhevnikov, M.V. (2013), "Electricity demand-side management: adaptation of foreign experience", *Ekonomika regiona*, Vol. 1, no. 76, pp. 84-89.
12. Nekhorishikh, I.N., Dobrinova, T.V., Anisimov, A.Yu., Zheglovskaya, A.V. (2019), "World practice of managing electricity demand", *Ekonomika v promyshlennosti*, Vol. 12, no. 3, pp. 280-287.
13. Nakhodov, V., Zamulko, A. (2020), "Improvement of the new model of the electricity market by managing power consumption modes (scientific opinion)", available at: <http://reform.energy/news/usovershenstvovanie-novoy-modeli-rynka-elektroenergii-putem-upravleniya-rezhimami-elektropotrebleniya-nauchnoe-mnenie-13412> (accessed January 15, 2020).

14. Prakhovnik, A.V., Popov, V.A., Yarmolyuk, E.S., Kokorina, M.T. (2012), "Perspectives and trends of distributed generation development in Ukraine", *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya*, Vol. 2, no. 31, pp. 7-14.
15. Voropay, N.I. (2005), "Prospects and ways of development of distributed generation in electric power systems", *International Scientific and Practical Conference "Small Power Engineering - 2005*, Moscow, Russia, available at: <http://www.combienergy.ru/stat/983> (accessed October 19, 2019).
16. Evdokimov, V.A. (2019), "Some questions of research of technical and organizational-economic influence of distributed generation on functioning of power system and market of electric energy", *Modelyuvannya ta informatsiyi tekhnolohiyi. Zbirnyk naukovykh prats*, Vol. 88, pp. 134-143.
17. Woo, C.K., King, M., Tishler, A., Chow, L.C.H. (2006), "Cost of electricity deregulation", *Energy*, Vol. 31, pp. 747-768.
18. Stoft, S. (2006), *Ekonomika energosistem. Vvedeniye v proyektirovaniye rynkov elektroenergii* [Power System Economics. Designing Markets For Electricity], Translated from English, Mir, Moscow, Russia.
19. Belyaev, L.S. (2009), *Problemy elektroenergeticheskogo rynka* [Problems of the electric power market], Nauka, Novosibirsk, Russia.
20. Eisenberg, N.I., Filatov, A.Yu. (2013), *Modelirovaniye i analiz mekhanizmov funktsionirovaniya elektroenergeticheskikh rynkov* [Modeling and analysis of mechanisms of functioning of electric power markets], Izd-vo Irkut. gos. un-ta, Irkutsk, Russia.
21. Saukh, S.E. (2018), *Metodologiya i metody matematicheskogo modelirovaniya yenergetiki v rynochnykh usloviyakh* [Methodology and methods of mathematical modeling of energy engineering in market conditions], *Elektronnoye modelirovaniye*, Vol. 40, no. 3, pp. 3-32.
22. Kuznetsov, A.V. (2018), "A brief overview of multi-agent models", *Upravleniye bol'shimi sistemami*, Vol. 71, pp. 6-44.
23. Tarasov, V.B. (1998), "Agents, multi-agent systems, virtual communities: a strategic direction in computer science and artificial intelligence", available at: <https://www.science.donntu.edu.ua/rus/kirgaev/libtatu> (accessed July 28, 2019).
24. Dodonov, A.G., Lande, D.V. (2011), *Zhivuchest informatsionnykh sistem* [Vitality of information systems], Naukova Dumka, Kyiv, Ukraine.
25. Yalovets, A.L. (2019), *Mulyahentne modelyuvannya peresliduvannya na ploshchyni: vid teorii do prohramnoyi realizatsiyi* [Multi-agent modeling of re-distribution on the area: from theory to software implementation], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
26. North, M.J., Macal, C.M. (2007), *Managing Business Complexity: Discovering Strategic Solutions with Agent-Based Modeling and Simulation*, Oxford University Press.
27. Kirilenko, O.V., Denisyuk, S.P., Tankevich, S.Ye., Bazyuk, T.M. et al. (2016), "Information and normative safety of organizing a multi-agent system for an electric power system and an active supporter", *Informatsiyi tekhnolohiyi ta kompyuterna inzheneriya*, Vol. 1, pp. 29-34.
28. Bazyuk, T.M., Blinov, I.V., Butkevych, O.F., (2016), *Intelektualni elektrychni merezhi: elementy ta rezhymy* [Intelligent electrical framing: elements and modes], Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
29. Massel, L.V., Galperov, V.I. (2015), "Development of multi-agent systems for distributed solution of energy problems using agent-based scenarios", *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, Vol. 326, no. 5, pp. 45-53.

Received 08.10.2020

V.V. Mokhor, V.A. Evdokimov

ABOUT CREATING A MULTI-AGENT SIMULATIONS MODEL
OF PROCESSES PRICING IN THE ELECTRICITY MARKET

A review and analysis of publications devoted to solving scientific and practical problems of the development of the electric energy (e/e) market as a complex organizational and technical system (SOTS) is given. The subsystem of pricing management is highlighted, as its component part, as a separate object of organizational management. The urgency and necessity of creating a simulation model of the system for managing the pricing process in the electricity market with the direct participation of market entities is substantiated, the main purpose of which is to study the scientific and practical problem of improving the methodological pricing tools. Based on the analysis of modern methods of simulation modeling of management processes in the SOTS, the choice of a multi-agent approach as the main one for building a simulation model of pricing processes in the electricity market is justified.

Key words: simulation model, multi-agent approach, organizational and technical system, electricity market.

МОХОР Володимир Володимирович, чл-кор. НАН України, д-р техн. наук, директор Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. В 1977 р. Закінчив Київський інститут інженерів цивільної авіації. Область наукових досліджень — математичне і комп'ютерне моделювання, спеціалізовані обчислювальні системи, інформаційна безпека.

ЕВДОКИМОВ Володимир Анатолійович, канд. наук з державного управління, директор державного підприємства «Оператор ринку». В 1995 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — математичне і комп'ютерне моделювання енергоринків.