

ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ МЕТОД ВУЗЛОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЦІНОУТВОРЕННЯ НА РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

З.Х. Борукаєв^{1*}, докт. техн. наук, В.А. Євдокімов^{1**}, канд. наук з держ. упр.,
К.Б. Остапченко^{2***}, канд. техн. наук

¹ Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України,
вул. генерала Наумова, 15, Київ, 03164, Україна,
e-mail: zelimh1948@gmail.com, ievdokimov40@gmail.com

² НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,
e-mail: okb2003@ukr.net

Основна увага у статті приділяється розробці методу вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку електроенергії. Наведено послідовність виконання основних конструктивних етапів його розробки та подальшого використання: опису та формалізації процесу ціноутворення; розробці обчислювальних процедур для побудови імітаційної моделі процесу ціноутворення. Відмінна риса даного методу від відомих та описаних у науковій літературі полягає у безпосередній прив'язці динамічного поточкорозподілу енергії на всіх стадіях технологічного процесу виробництва, передачі та розподілу електричної енергії до економічного поточкорозподілу. Обчислювальні процедури методу реалізуються з використанням дискретно-подійного підходу. Метод призначений для побудови імітаційної моделі процесу ціноутворення на ринку електроенергії, яка поряд із системою моделей короткострокового прогнозування цін на різних сегментах ринку стають ключовими у складі інформаційно-методичного забезпечення мультиагентного середовища взаємодії агентів ринку. Бібл. 13, рис. 2.

Ключові слова: агент, імітаційна модель, метод вузлової трансформації, процес ціноутворення, індекс цін, ринок електричної енергії.

Вступ. В роботі [1] розглянуто формулювання задачі побудови мультиагентної імітаційної моделі процесу ціноутворення на ринку електроенергії (ЕЕ) як динамічної системи децентралізованої взаємодії між виробниками, оптовими і роздрібними постачальниками, енерготрейдерами і агрегованими споживачами ЕЕ. Основним призначенням такої системи є дослідження складних процесів багаторівневої організаційної, оперативної-технологічної, економічної та інформаційної взаємодії учасників ринку, яких далі будемо називати агентами, і особливостей їхнього впливу на формування кінцевої ціни для споживача на різних стадіях її зміни, які відбуваються на шляху від безпосереднього виробника – генеруючих компаній – до постачальників роздрібного ринку, кінцевого споживача. В роботі обґрунтовано необхідність створення комп'ютерної інформаційно-моделюючої системи – мультиагентного середовища, де взаємодіє множина агентів, діяльність яких обмежена тільки діючими Правилами ринку [2] і системою технічних обмежень, пов'язаних з необхідністю забезпечення стійкої роботи Об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС).

Об'єктом дослідження є процес ціноутворення на ринку ЕЕ.

Предметом дослідження є метод вузлової трансформації процесу ціноутворення.

Метою роботи є розробка обчислювального методу вузлової трансформації для утворення імітаційної моделі процесу ціноутворення як динамічного процесу формування ціни на ЕЕ в діючій на даний час моделі ринку, і виділеної в роботі [3], в загальній системі організаційного управління ринком у вигляді окремої складної організаційно-технічної системи (СОТС) ціноутворення.

1. Аналіз проблеми і формулювання задачі. До складу організаційної структури СОТС ціноутворення включені практично всі основні учасники ринку ЕЕ, які своїми діями під час реалізації функціональних обов'язків відповідно до Правил ринку з метою реалізації своїх інтересів та конкурентних переваг можуть істотно впливати на формування кінцевої ціни на ЕЕ на різних стадіях процесу ціноутворення від виробника до кінцевого споживача.

Неважко побачити, що дану систему необхідно розглядати як складно структуровану багаторівневу територіально та функціонально розподілену систему, що утворюється з множини

© Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А., Остапченко К.Б., 2022
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0003-1290-6451>; ** <https://orcid.org/0000-0001-9497-4030>;
*** <https://orcid.org/0000-0002-6957-8180>

взаємодіючих підсистем і елементів, та є такою, що знаходиться в розвитку і динамічно змінюється під впливом як внутрішніх, так і зовнішніх факторів, які роблять істотний вплив на процеси ціноутворення, що відбуваються в ній.

Будемо вважати, що всі підсистеми і їхні складові елементи (агенти) мають в своєму складі інформаційно-обчислювальні, телекомунікаційні та інші ресурси, що забезпечують необхідний рівень обміну оперативно-технологічної та комерційної інформацією як між структурними підсистемами і елементами, так і системами рівня ОЕС – SCADA (система диспетчерського управління та збору даних у реальному часі), АСКОЕ (автоматизована система комерційного обліку електроенергії) та інші.

З огляду на ту обставину, що об'єктом дослідження попередніх робіт [1, 3] і теперішньої роботи в кінцевому підсумку є процес формування ціни на електроенергію в СОТС ціноутворення, у даній роботі ставиться завдання розробки обчислювального методу, призначеного для побудови імітаційної моделі індикативного аналізу процесу ціноутворення в інформаційно-моделюючій системі моніторингу та оцінки стійкості стану ринку електроенергії задля вирішення завдань аналізу динаміки процесу ціноутворення на всіх стадіях трансформації енергії і ціни в підсистемах та елементах СОТС.

Дослідженням процесу ціноутворення на ринках ЕЕ у багатьох країнах світу і, зокрема, у тих з них, у яких реалізована десятиліттями раніше, ніж чинна в Україні модель ринку з умовною назвою "Конкуренція на всіх рівнях", як однією з ключових проблем розвитку ринку, присвячено дуже багато робіт. А їхнім оглядам, класифікації застосовуваних нових підходів, у тому числі і мультиагентного, та інших методів аналізу процесів ціноутворення, прогнозу основних показників функціонування ринку – десятки таких робіт.

В роботі [4], яка присвячена аналізу процесів тарифо- та ціноутворення на електроенергію у країнах Європейського союзу (ЄС) та Організації економічного співробітництва та розвитку, стверджується, що і сьогодні немає єдиних правил щодо формування тарифів (цін) на ЕЕ у світовій енергетичній сфері та на внутрішньому ринку країн-членів ЄС, що пов'язано з вимогами раціонального використання енергії та принципами енергоощадності в кожній окремій країні. Складність вирішення проблеми формування тарифів обумовлена тим, що ЕЕ займає проміжне положення між товарами та послугами, тому тарифи на неї є чимось середнім між ціною на товар та тарифами на послуги. Крім того, тарифи, що встановлюються регуляторами ринку, які виконують регуляторну функцію дотримання балансу інтересів продавців та покупців ЕЕ, повинні забезпечувати і функцію розподілу доходів між численними енергетичними компаніями, що здійснюють спільно її виробництво та постачання кінцевому споживачеві.

Саме для дослідження зазначених вище проблем у багатьох наукових центрах, у тому числі й в Україні [5], ведуться роботи зі створення імітаційних моделей функціонування ринку ЕЕ та окремих його сегментів. Детальний огляд та аналіз досить великої кількості літературних джерел, присвячених побудові імітаційних моделей ринку ЕЕ, в рамках даної роботи не є можливим. Огляд таких моделей з описом їхніх можливостей можна знайти в роботах [6-8]. З оглядом мультиагентних моделей такого призначення на ринках ЕЕ можна ознайомитися у [9].

Зупинимося на огляді тих робіт, які найближче примикають до пропонованого в цій роботі підходу до моделювання процесу ціноутворення. Так у роботі [10] розглянуто дуже важливе питання моделювання процесів тарифо- і ціноутворення на роздрібному ринку та на основі результатів моделювання наведено рекомендації щодо розрахунків тарифів для споживачів та окремих елементів структури системи передачі ЕЕ.

Роботу [11] присвячено створенню гібридної моделі ринку, яка поєднує метод математичної оптимізації і об'єктно-орієнтований підхід та використовується для вивчення поведінки операторів блоків електростанцій Німецької енергосистеми в умовах діючих механізмів функціонування ринку і зростанням кількості генеруючих об'єктів, що використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ). Наведені результати показують можливі зміни ринкових цін у разі використання різних сценаріїв розвитку подій.

Очевидно, що основою для побудови системи формування таких цін і тарифів, які дозволяють одночасно з максимально можливим урахуванням інтересів усіх учасників процесу виробництва, транспорту енергії при розподілі доходів від продажу ЕЕ та спроможність покупців кінцевих споживачів сплачувати енергію, може стати система безперервного відстеження динаміки процесу ціноутворення від виробника до споживача. Розробці обчислювального методу вузлової

трансформації потоків (обсягів) енергії і цін на неї для побудови такої системи присвячено цю статтю.

Основною ідеєю для розробки методу стала детально розглянута в монографії [12] у главі 5 ідея застосування локалізованого (вузлового) ціноутворення для аналізу динаміки змін ціни в мережах передачі ЕЕ і узагальнена для випадку аналізу динаміки зміни ціни у всьому ланцюгу фізичного потокорозподілу. Відмінна риса пропонованого в даній роботі методу полягає в тому, що він дає можливість відобразити реально існуючий взаємозв'язок динамічних процесів потокорозподілу ЕЕ і ціноутворення з необхідною дискретністю часу. В його основі лежить оригінальний спосіб декомпозиції подання ціноутворення в СОТС у вигляді сукупності взаємопов'язаних підсистем фізичного і економічного потокорозподілу, які складаються з різних за кількісним складом множин елементарних вузлів, утворюваних з вузлових точок трансформації енергії, та які одночасно стають локальними вузлами ціноутворення, оскільки саме в них відбувається зміна (трансформація) ціни під впливом внутрішніх та зовнішніх факторів.

2. Етапи процесу ціноутворення. Розробка методу вузлової трансформації процесу ціноутворення і подальше його застосування в СОТС включає послідовність виконання основних конструктивних етапів.

Першим з них є опис процесу ціноутворення, основним призначення якого є його застосування у процесі створення адекватної імітаційної моделі досліджуваного процесу ціноутворення. А для побудови моделі, як відомо, важливим етапом є аналіз об'єкта дослідження предметної області моделювання, виділення найбільш істотних і відмітних особливостей динаміки процесу, його структуроване уявлення у вигляді взаємопов'язаних певним чином частин – підсистем, кожна з яких має свої чітко виражені особливості впливу на об'єкт, та визначення факторів впливу на об'єкт.

Очевидно, що досліджуваний процес не може розглядатися у відриві від технологічного процесу виробництва продукції, яка випускається. У нашому випадку такою продукцією є ЕЕ, в процесі виробництва і доставки її кінцевому споживачеві одночасно беруть участь тисячі енергетичних компаній, які забезпечують виробництво, транспорт ЕЕ по високовольтних лініях електропередачі, диспетчеризацію виробництва і споживання енергії з метою виконання досить жорстких вимог до стійкості режимів функціонування ОЕС і випуску продукції необхідної якості, розподілу і збуту ЕЕ кінцевому споживачу. Відмітна особливість взаємодії агентів ринку ЕЕ від взаємодії агентів на ринках інших видів продукції полягає в тому, що технологічно електроенергетична галузь є цілісною єдиною системою виробництва і споживання ЕЕ, яка пов'язана з безперервним і нерозривним (миттєвим) характером виробництва, передачі, розподілу й споживання, з продукцією виробництва, яку на даний час можна вважати такою, що не накопичується, територіальним характером споживання ЕЕ, обмеженими можливостями маневрування ресурсами виробництва продукції через неможливість їхнього миттєвого запуску або зупинки, обмеженими можливостями міжсистемних перетоків потужності у вузлах ОЕС, неминучими втратами під час передачі ЕЕ, наявністю єдиних транспортних магістралей та об'єктивно необхідним режимом централізованого диспетчерського управління завантаженням всіх генеруючих блоків електростанцій, пов'язаних паралельною роботою в ОЕС [13].

Другим етапом є побудова імітаційної моделі процесу ціноутворення, яка полягає у описі впливу зовнішнього середовища на процеси, що відбуваються в електроенергетиці. У тому числі і ті, що набирають масштабний характер у розвитку електроенергетики в багатьох країнах світу. А саме процеси, які пов'язані з декарбонізацією виробництва ЕЕ, децентралізацією процесів управління і з цифровізацією технологічних процесів під час виробництва, передачі та споживання ЕЕ.

Опис такої системи ціноутворення, в якій повною мірою враховуються всі зовнішні (екзогенні) і внутрішні (ендогенні) фактори, що роблять певний вплив на процеси ціноутворення, є досить важким завданням. Тому на даному етапі дослідження приймемо допущення про те, що вплив основних зовнішніх факторів на процес ціноутворення і пов'язаних з виконанням вимог екологічного та соціального характеру, враховуються Регулятором ринку шляхом застосування відповідних регуляторних механізмів і знаходять відображення при встановленні тарифів на оплату ЕЕ для різних груп споживачів на заключному етапі процесу ціноутворення.

Тому в подальшому будемо розглядати процес ціноутворення нерозривно пов'язаним з технологічними стадіями процесу виробництва ЕЕ і доставки її кінцевому споживачеві. Таких стадій, що відображають функціональну структуру електроенергетики, в різних літературних джерелах

виділяють декілька: генерація енергії високої напруги; диспетчеризація генерації високої напруги; передача енергії по високовольтних лініях передач високого (110-220 кВ), надвисокого класу (>220 кВ); диспетчеризація перетоків електроенергії у вузлах ОЕС в умовах обмежень перетоків потужності; надання системних послуг; генерація низької напруги; розподіл ЕЕ по мережах середнього класу (до 35 кВ) диференційованим в залежності від напруги і доставки постачальникам; збут роздрібним споживачам. На основі такого функціонального уявлення можна вибудувати ланцюжок вузлів, в яких відбувається не тільки трансформація енергії та її поточкорозподіл, але й перехід права власності на продукцію і зміна її ціни. Надалі ці вузли будемо називати елементарними вузлами перетворення (трансформації) ціни на ЕЕ у єдиній СОТС ціноутворення, а сам процес трансформації ціни економічним поточкорозподілом.

Представляючи потік енергії від виробника до споживача як послідовне проходження сукупності стадій трансформації енергії, приходимо до ланцюжка вузлів трансформації ціни на ЕЕ. Природно, що величина зміни ціни в цих елементарних вузлах безумовно залежить від обсягу ЕЕ, яка пройшла через нього, і від тарифу встановленого Регулятором ринку для цієї категорії послуг Оператору ринку, Операторів системи розподілу і Оператору системи передачі.

3. Формалізація процесу ціноутворення. Розглянутий процес ціноутворення в СОТС в результаті взаємопов'язаної взаємодії функціональних підсистем формує потоки децентралізованого організаційного (потік регуляторних впливів), технологічного (потік енергії) та інформаційного (потік показників стану ринку і зовнішнього середовища) управління, які забезпечують функціонування процесу динамічного ціноутворення.

Фактори впливу на процес ціноутворення, які не піддаються кількісній оцінці ступеня впливу на процес ціноутворення, фактично стають факторами ризику. В літературі виділяють наступні класифікаційні групи ризиків: ринкові; виробничі, комерційні, природні, політичні, юридичні, екологічні, фінансові, маркетингові, технічні, посередницькі, банківські, страхові та ін.

Зокрема, для генеруючих компаній як основні визначено такі групи: фінансові (неплатежі покупців, кредитні); регуляторні (тарифи, обмеження зростання цін); ринкові (зниження попиту на ЕЕ, зміни цін на використовувані ресурси). Основними найбільш істотними ризиками є: ризик зміни законодавства в частині регулювання електроенергетики; ринковий ризик попиту на енергію; ринковий ризик зміни цін на енергетичну сировину; експлуатаційно-технологічний ризик.

Системний аналіз процесів такого класу складності передбачає декомпозицію досліджуваного процесу та його подання у вигляді сукупності взаємопов'язаних складних підсистем і їхніх складових елементів. У нашому випадку пропонується виділити три підсистеми для стадій трансформації, які умовно назвемо "Товар", "Послуга", "Продукт" та які охоплюють діяльність основних функціональних структур управління ринком ЕЕ на різних стадіях процесу ціноутворення.

Ці структури: організаційного (регуляторного) управління ціноутворенням на оптовому та роздрібному ринках – Регулятор ринку; оперативного-технологічного управління ціноутворенням – виробництвом, передачею та розподілом електроенергії – Оператор системи передачі; організаційного (адміністративного) управління ціноутворенням на сегментах оптового ринку – Оператор ринку; організаційного управління учасників оптового та роздрібною ринків. У подальшому елементи підсистем (сегменти ринку) називатимемо елементарними вузлами, а складові їхньої компоненти (окремі енергетичні компанії-виробники, постачальники, транспортери ЕЕ) – вузловими точками.

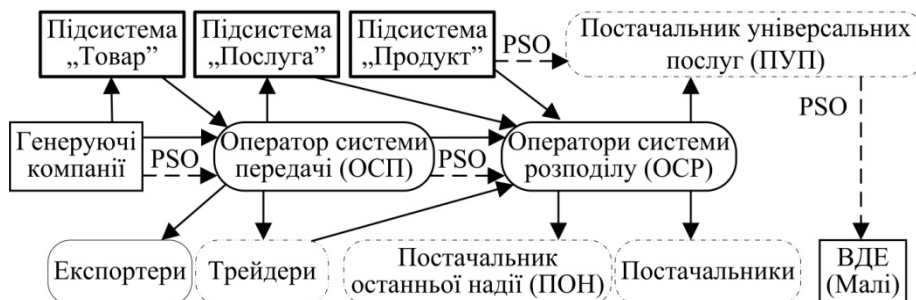


Рис. 1

Виділені підсистеми вузлів трансформації (перетворення) ціни на ЕЕ формуються з елементарних вузлів і вузлових точок. Спрощену схему ланцюга трансформації ціни зображено на рис. 1.

Підсистему елементарних вузлів, яку умовно названо "Товар"(Оптовий ринок), утворюють сегменти оптового ринку: ринок

двосторонніх договорів (РДД); ринок на добу наперед (РДН); внутрішньодобовий ринок (ВДР); балансуєчий ринок (БР). Підсистему елементарних вузлів, яку умовно названо "Послуга", утворюють вузли: ринок допоміжних послуг (РДП); гарантований покупець (ГарПОК); оператор системи розподілу (ОСР); оператор системи передачі (ОСП). Підсистему елементарних вузлів, яку умовно названо "Продукт"(Роздрібний ринок), утворюють вузли: постачальник універсальних послуг (ПУП), "Енергозбутові компанії" (Постачальники); постачальник останньої надії (ПОН); відновлювані джерела енергії (ВДЕ); "Споживачі".

4. Обчислювальні процедури динаміки ціноутворення. Наступним кроком застосування методу є розробка його обчислювальних процедур, які нададуть можливості побудувати імітаційну модель процесу ціноутворення. Процес цінової трансформації відбувається у часі, породжуючи стадії трансформації, та розповсюджується у просторі агентів трансформації, поділених на рівні їх декомпозиції – підсистем, елементарних вузлів, вузлових точок.

Введемо наступні позначення

$$\varphi^{p,k}(t) = \varphi^{p,k}(v^{p,k}(t), z^{p,k}(t), X^{p,k}),$$

де $\varphi^{p,k}(t)$ – функція цінової трансформації на часовому інтервалі t , яка визначає такі змінні – обсягу $v^{p,k}(t)$ і ціни $z^{p,k}(t)$ ЕЕ за її одиницю та $X = \bigcup_{p,k} X^{p,k}, X^{p,k} = \{x_l^{p,k}(t) | l=1,2,\dots,L\}$ – множина

формалізованих залежностей зміни динаміки зовнішніх факторів (змінних), перелік яких наведено вище та вплив яких враховується при трансформації ціни у вузлі k підсистеми p на даному часовому інтервалі; $p=1,2,3$ – номер підсистеми; $k=1,2,\dots,K^p$ – номер елементарного вузла трансформації ціни в підсистемі p . Природно припустити, що в кожному елементарному вузлі вплив зовнішніх чинників, які є екзогенними входними змінними величинами, має свої особливості впливу на динаміку зміни основних внутрішніх змінних величин – обсягу виробленого продукту і його ціни за одиницю товару.

Початком процесу ціноутворення будемо вважати добу визначення акцептованих цін на аукціонах відповідних сегментів оптового ринку – РДД, РДН, ВДР. При розрахунковому періоді в одну годину всі функціональні залежності як функції часу можуть бути представлені дискретними значеннями відповідного часового інтервалу – номеру доби з початку місяця $i=1,2,\dots,I$ і номеру години доби $j=1,2,\dots,24$

$$v^{p,k}(t) = (v_{i,j}^{p,k} | i = \overline{1, I}, j = \overline{1, 24}),$$

$$z^{p,k}(t) = (z_{i,j}^{p,k} | i = \overline{1, I}, j = \overline{1, 24}), \varphi^{p,k}(t) = \left(\varphi_{i,j}^{p,k} \left| \begin{array}{l} \varphi_{i,j}^{p,k} = \varphi^{p,k} \left(v_{i,j}^{p,k}, z_{i,j}^{p,k}, \{x_l^{p,k} | l = \overline{1, L}\} \right) \\ i = \overline{1, I}, j = \overline{1, 24} \end{array} \right. \right).$$

На першому етапі обчислювального процесу – визначенні початкових вихідних даних – будемо вважати, що врахування впливу зовнішніх чинників у елементарних вузлах першої підсистеми "Товар" ($p=1$) здійснюється учасниками вказаних сегментів оптового ринку у вигляді заявок на участь в аукціонах купівлі-продажу ЕЕ, системних послуг і т.ін. Це фактично означає, що на вхід першої підсистеми вузлів надходять початкові умови $\varphi_{i,j}^{0,k} = \varphi^{0,k}(v_{i,j}^{0,k}, z_{i,j}^{0,k})$, які складаються з акцептованих на сегментах ринків РДН, ВДР в результаті проведеного аукціону, значення обсягів енергії та цін за одиницю товару, а також обсяги та ціни імпортованої енергії на сегменті РДД. Цю множину даних можна вважати вихідними даними планового економічного поточкорозподілу на i -у добу місяця.

Далі на другому етапі в елементарних вузлах k відбувається трансформація цих даних як результат внутрішніх виробничо-технологічних, оперативно-технологічних організаційних процесів в енергосистемі, стан яких характеризується певним набором інформативних показників – ендогенних змінних стану ОЕС, а також застосування Регуляторних механізмів, передбачених Правилами ринку. Тобто від 0 годин починається процес погодинного обліку в АСКОЕ фактичного поточкорозподілу виробленої ЕЕ в мережах системи електропередачі та її споживання кінцевими споживачами протягом i -ї доби.

В результаті маємо, що

$$\varphi^{1,k}(v_{i,j}^{1,k}, z_{i,j}^{1,k}, X^{1,k}) = F^1(v_{i,j}^{0,k}, z_{i,j}^{0,k}, X^{1,k}), k = 1, 2, \dots, K^1,$$

де $F^1(v_{i,j}^{0,k}, z_{i,j}^{0,k}, X^{1,k})$ – композиція впливу певної кількості функцій з множини X (наприклад, зростання попиту, зміна погодних умов, використання резервів потужності тощо) та алгоритмів Правил ринку, які можуть змінити вхідні величини за рахунок зміни обсягових показників і цінових змінних. Відбувається зміна ціни на величину витрат інфраструктури, що забезпечує функціонування сегментів ринку – елементарних вузлів.

Тобто зміна ціни визначається виразом

$$z_{i,j}^{1,k} = z_{i,j}^{0,k} + Z_{i,j}^{INF,1,k},$$

де $Z_{i,j}^{INF,1,k}$ – питомі витрати вузла k першої підсистеми на елемент інфраструктури INF . Очевидно, що економічний поточкорозподіл ЕЕ, що здійснюється відповідно до результатів торгів на відповідних торгових майданчиках, передбачає її виробництво у необхідних обсягах за визначеними цінами. При цьому природно здійснюються необхідні витрати в кожному елементарному вузлі першої підсистеми в залежності від обсягу енергії, що виробляється. Це призводить до зміни як обсягів, так і ціни за одиницю продукції вузлах.

Позначимо через $\Delta^{p,k}(t) = \Delta^{p,k}(\varphi^{p,k}(t))$ функцію, що виражає закономірність зміни обсягу енергії та ціни в елементарному вузлі. Тоді для вузлів першої підсистеми отримаємо функції зміни обсягів виробленої енергії та цін на неї наступного виду:

$$\Delta^{1,k}(t) = \varphi^{1,k}(t) - \varphi^{0,k}(t).$$

Таким чином, на вхід наступної другої підсистеми елементарних вузлів, що забезпечує диспетчерське управління поточкорозподілом та транспорт енергії від шин електростанцій до розподільчих мереж, подається сукупний обсяг енергії, утворений на виході першої підсистеми $\varphi^{1,1}(v_{i,j}^{1,1}, z_{i,j}^{1,1}), \varphi^{1,2}(v_{i,j}^{1,2}, z_{i,j}^{1,2}), \dots, \varphi^{1,K^1}(v_{i,j}^{1,K^1}, z_{i,j}^{1,K^1})$. В результаті на виході цієї підсистеми маємо, аналогічно першому перетворенню, результат комплексного впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на технологічний процес транспорту енергії високовольними лініями електропередачі, диспетчерське управління, в умовах жорстких обмежень в точках перетікання потужності та необхідність виконання критерію забезпечення мінімуму витрат на передачу енергії, що матиме наступного вигляду:

$$\varphi^{2,k}(v_{i,j}^{2,k}, z_{i,j}^{2,k}, X^{2,k}) = F^2(v_{i,j}^{1,k}, z_{i,j}^{1,k}, X^{2,k}), k = 1, 2, \dots, K^2.$$

Таким чином, друге збільшення ціни в елементарних вузлах другої підсистеми визначається виразом

$$\Delta^{2,k}(t) = \varphi^{2,k}(t) - \varphi^{1,k}(t).$$

При цьому дуже важливою вимогою залишається дотримання балансу обсягів у момент переходу з однієї підсистеми в іншу, не дивлячись на трансформацію ціни та на те, що погодинні обсяги енергії прив'язані до погодинних цін. Крім того, обсяги енергії, закуплені постачальниками на оптовому ринку, призначені для передачі підсистемою вузлів "Послуга", фактично набуває адресного характеру, оскільки відправниками товару на адресу одного постачальника чи експортера можуть виявитися всі елементарні вузли, сегменти оптового ринку, першої підсистеми "Товар".

Аналогічно можуть бути отримані вирази для $\varphi^{3,k}(v_{i,j}^{3,k}, z_{i,j}^{3,k}, X^{3,k})$ і $\Delta^{3,k}(t)$ при переході від другої підсистеми до третьої.

Далі позначимо через $\tilde{V}_i^1 = \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^1} v_{i,j}^{1,k}$ сумарний обсяг енергії, що пройшов через першу підсистему вузлів за добу, а через $\tilde{Z}_{i,j}^1 = \frac{1}{K^1} \sum_{k=1}^{K^1} z_{i,j}^{1,k}$ – середню ціну, що склалася у вузлах кожну годину j доби у першій підсистемі.

Тоді індексом ціни першої підсистеми будемо називати середньодобову ціну $\tilde{Z}_i^1 = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^1} z_{i,j}^{1,k}$ або середньозважену добову ціну $\tilde{Z}_i^1 = \frac{1}{\tilde{V}_i^1} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^1} z_{i,j}^{1,k} \times v_{i,j}^{1,k}$, яка формується в першій підсистемі.

Враховуючи те, що Оператор системи передачі компенсує втрати енергії у високовольтних лініях передач, вважатимемо, що обсяг енергії після її трансформації у другій підсистемі залишається незмінним. Можливі відхилення обсягів енергії від акцептованих через зміни погодних ситуацій чи виникнення аварійних ситуацій у цій роботі не розглядаються. Тоді будемо мати, що $\tilde{V}_i^2 = \tilde{V}_i^1$.

Відмінна особливість трансформації ціни у другій підсистемі вузлів полягає в тому, що вона залежить лише від обсягу переданої енергії. А множину елементарних вузлів утворюють центри системних послуг, які забезпечують її передачу. Тому зміни цін відбуваються у зв'язку з необхідністю обліку витрат, понесених у кожному елементарному вузлі. Технічних складнощів розрахунок вузлового розподілу витрат не становить.

Приймемо далі, що:

а) витрати на послугу з диспетчерського керування з урахуванням витрат інфраструктури розраховуються за тарифом T^{DU} за формулою

$$Z_{i,j}^{DU,2,1}(v_{i,j}^{1,k}) = T^{DU} \times v_{i,j}^{1,k};$$

б) витрати на послуги з передачі ЕЕ з урахуванням витрат інфраструктури на виконання спеціальних обов'язків для забезпечення загальносуспільних інтересів (PSO), на покриття витрат з купівлі Е/Е для компенсації втрат розраховуються за тарифом T^{PE} за формулою

$$Z_{i,j}^{PE,2,1}(v_{i,j}^{1,k}) = T^{PE} \times v_{i,j}^{1,k};$$

в) покриття витрат на надання допоміжних системних послуг розраховуються за тарифом T^{DP} за формулою

$$Z_{i,j}^{DP,2,1}(v_{i,j}^{1,k}) = T^{DP} \times v_{i,j}^{1,k}.$$

Витрати на допоміжні системні послуги вимагають більшої деталізації через зростання частки ВДЕ у загальному обсязі виробництва ЕЕ. Ця обставина буде врахована за наявності необхідних для розрахунку погодинних вихідних даних.

Тоді для визначення величини збільшення ціни у вузлах другої підсистеми отримаємо

$$z_{i,j}^{2,k} = z_{i,j}^{1,k} + T^{DU} \times v_{i,j}^{1,k} + T^{PE} \times v_{i,j}^{1,k} + T^{DP} \times v_{i,j}^{1,k}.$$

На основі цих даних визначимо індекс ціни другої підсистеми як середньодобову ціну $\tilde{Z}_i^2 = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^2} z_{i,j}^{2,k}$ або як середньозважену добову ціну $\tilde{Z}_i^2 = \frac{1}{\tilde{V}_i^2} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^2} z_{i,j}^{2,k} \times v_{i,j}^{2,k}$.

Подальший потокорозподіл енергії здійснюється в третій підсистемі "Продукт", елементарні вузли якої забезпечують функціонування роздрібного ринку. Будемо також вважати, що у цих вузлах обсяг закупленої ЕЕ компаніями ПУП на оптовому ринку не змінюється. Проте, через необхідність урахування також впливу зовнішніх і внутрішніх факторів у кожному вузлі можуть відбуватися зміни ціни. Крім того на формування ціни може впливати певна кількість регіональних особливостей, пов'язаних з віддаленістю від генеруючих потужностей та їхнім типом, обсягом попиту і пропозиції, енергоємністю, структурою і динамікою споживання у різні сезонні періоди року, а також розвиток ВДЕ, які підключені до регіональних розподільних мереж. Тому, як і раніше, загальний вираз трансформації цін у третій підсистемі матиме вигляд

$$\varphi^{3,k}(v_{i,j}^{3,k}, z_{i,j}^{3,k}, X^{3,k}) = F^3(v_{i,j}^{2,k}, z_{i,j}^{2,k}, X^{3,k}), k = 1, 2, \dots, K^3.$$

Але у підсистемі "Продукт" зміна ціни на ЕЕ проходить дві стадії. Перша пов'язана з її передачею розподільними електромережами компаніями ОСР, а друга – з компаніями ПУП та іншими постачальниками, які здійснюють збут ЕЕ кінцевим споживачам – населенню та іншим суб'єктам господарювання. Крім того, в цій підсистемі може відбуватися в деякій частині вузлів і зміна вхідних показників обсягів споживання за рахунок купівлі/продажу енергії на сегменті БР або у ПОН, а також і вхідних цін. Тому формальний опис процесу ціноутворення у цій підсистемі відрізняється від опису попередніх підсистем.

Введемо додаткові позначення:

а) $z_{i,j}^{OSR,3,k}$, $z_{i,j}^{PUP,3,k}$ – ціни за розподіл купованої енергії у ОСР і ПУП;

б) $v_{i,j}^{BR,3,k}$, $v_{i,j}^{PON,3,k}$, $v_{i,j}^{VDE,3,k}$ – додаткові обсяги купованої енергії відповідно у ПУП на БР, у ПОН та у ВДЕ;

в) $z_{i,j}^{BR,3,k}$, $z_{i,j}^{PON,3,k}$, $z_{i,j}^{VDE,3,k}$ – ціни за одиницю додаткового обсягу енергії відповідно від БР, ПОН і ВДЕ.

Тоді отримаємо, що

$$v_{i,j}^{3,k} = v_{i,j}^{2,k} + v_{i,j}^{BR,3,k} + v_{i,j}^{PON,3,k} + v_{i,j}^{VDE,3,k},$$

$$\tilde{V}_i^3 = \tilde{V}_i^2 + \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^3} (v_{i,j}^{BR,3,k} + v_{i,j}^{PON,3,k} + v_{i,j}^{VDE,3,k}).$$

Ці дані надходять на вхід компаній ОСР третьої підсистеми. На основі цих даних формуються вихідні ціни ПУП для кінцевих споживачів. Таким чином для вихідних цін будемо мати вираз

$$z_{i,j}^{3,k} = z_{i,j}^{2,k} + z_{i,j}^{BR,3,k} + z_{i,j}^{PON,3,k} + z_{i,j}^{VDE,3,k} + z_{i,j}^{OSR,3,k} + z_{i,j}^{PUP,3,k}.$$

Тоді індекс ціни третьої підсистеми визначається як середньодобова $\tilde{Z}_i^3 = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^3} z_{i,j}^{3,k}$ або

середньозважена добова $\tilde{Z}_i^3 = \frac{1}{\tilde{V}_i^3} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^3} z_{i,j}^{3,k} \times v_{i,j}^{3,k}.$

5. Обговорення результатів. Очевидно, що наведена формалізація процесу ціноутворення шляхом його декомпозиції та подання у вигляді трьох взаємопов'язаних підсистем економічного потокорозподілу, прив'язаних до фактичного адресного розподілу виробленої ЕЕ в мережах електропередачі не є єдиною можливою. Необхідно також зазначити, що для обліку всіх особливостей процесу ціноутворення з урахуванням впливу на нього зовнішніх факторів знадобиться більша деталізація виділених стадій трансформації ціни. Але навіть таке її уявлення не дає можливості аналітичного розв'язання задачі без знання нелінійних залежностей F^1, F^2, F^3 , вихідними даними для яких можуть бути не тільки кількісні, але й слабо формалізовані якісні дані.

Тому основним призначенням методу вузлової трансформації є побудова імітаційної (алгоритмічної) моделі процесу ціноутворення (спрощену схему наведено на рис. 2) на основі максимального наближення економічного потокорозподілу до фізичного розподілу ЕЕ у ланцюзі "виробник–транспортувальник–споживач" та використання її для створення мультиагентного середовища комп'ютерної науково-практичної інформаційно-моделюючої системи, агентами-користувачами якої можуть бути як людино-машинні комплекси елементарних вузлів, вузлових точок, так і комп'ютерні засоби науковців та студентів.

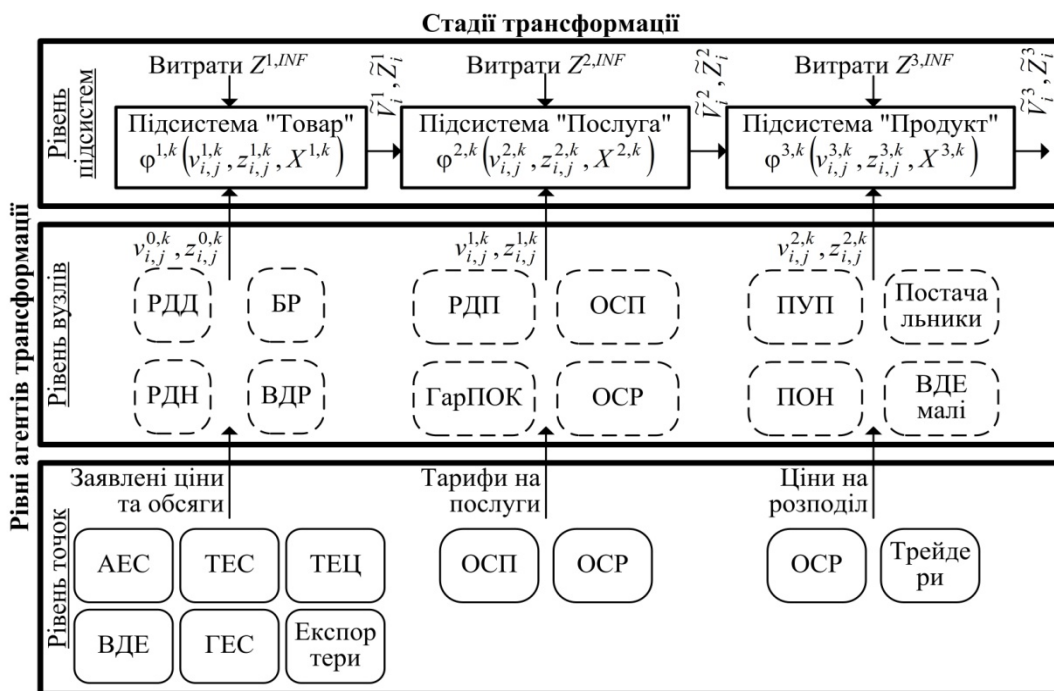


Рис. 2

Висновки. Наукова новизна представлених у роботі результатів складається у тому, що запропоновано обчислювальний метод вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку ЕЕ, призначений для побудови імітаційної (алгоритмічної) моделі процесу ціноутворення. Його відмінність визначається способом декомпозиції СОТС ціноутворення, який базується на реально взаємопов'язаних процесах фізичного поточкорозподілу енергії та економічного поточкорозподілу. Обчислювальні процедури визначення індексів, що відображають динаміку зміни цін та обсягів ЕЕ у підсистемах, елементарних вузлах та вузлових точках, дають змогу створити нову імітаційну модель ціноутворення з багаторівневою системою часових рядів цінних індексів, яка у свою чергу дозволить побудувати систему моніторингу та індикаторного аналізу стану ринку ЕЕ, а також проведення розрахунково-експериментальних досліджень з прогнозування та оцінки впливу на ціноутворення динамічних процесів зміни як внутрішніх, так і зовнішніх факторів.

Практичне значення результатів полягає в тому, що застосування методу для побудови імітаційних моделей процесів ціноутворення дозволяє підвищити прозорість функціонування ринку, виявляти не типові відхилення в динаміці зміни цін у вузлах і точках ціноутворення, своєчасно коригувати регуляторні механізми для їхнього усунення і відслідковувати наслідки прийнятих рішень. Неважко побачити і його можливе застосування для побудови імітаційних моделей СОТС ціноутворення на ринку газу, регіональних ринках теплової енергії та інших енергоринків.

1. Мохор В.В., Євдокімов В.А. Створення мультиагентної імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку електроенергії. *Електронне моделювання*. 2020. Том 42. № 6. С. 3-17. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.003>
2. Про затвердження Правил ринку: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018р. № 307. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18/page#Text> (дата звернення 24.04.2021).
3. Євдокімов В. А. Формулювання задачі побудови мультиагентної імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку електроенергії. *Електронне моделювання*. 2021. Том 43. № 3. С. 47-63. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.03.047>
4. Аналіз тарифо- та ціноутворення на електроенергію у країнах ЄС та ОЕСР. Системи стимулюючого тарифоутворення: Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго». URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/10/3.-Taryfo_tsinoutv_elektroen.pdf (дата звернення 30.09.2018).
5. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Іванов Г.А. Імітаційна модель ринку електричної енергії «на добу наперед» з неявним урахуванням мережевих обмежень енергетичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 60-67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.060>
6. Саух С.Е. Методология и методы математического моделирования энергетики в рыночных условиях. *Електронне моделювання*. 2018. Том 40. № 3. С. 3-32. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.40.03.003>
7. Блінов І.В. Теоретичні та практичні засади функціонування конкурентного ринку електроенергії. К.: Наукова думка, 2015. 216 с.
8. Остапченко К.Б., Лісовиченко О.І., Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х. Створення інформаційно-моделюючої системи аналізу процесів ціноутворення на ринку електричної енергії. *Електронне моделювання*. 2021. Том 43. № 4. С. 51-68. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.04.051>
9. Shinde P., Amelin M. Agent-Based Models in Electricity Markets: A Literature Review. IEEE Conference Proceedings *Innovative Smart Grid Technologies - Asia* (ISGT Asia). Chengdu, China, May 21-24, 2019. Pp. 3026-3031. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2019.8880889>
10. Куцан Ю.Г., Блінов І.В., Іванов Г.А. Моделювання тарифо- та ціноутворення на роздрібному ринку електричної енергії України в нових умовах функціонування. *Електронне моделювання*. 2017. Том 39. № 5. С. 71-80. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.39.05.071>
11. Oprea S., Bara A., Preotescu D., Bologna R., Coroianu L. A Trading Simulator Model for the Wholesale Electricity Market. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 184210-184230. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029291>
12. Стофт С. Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии. М.: Мир, 2006. 623 с.
13. Вороновский Г.К. Размышления об энергетике: судьбы и события, наблюдения и комментарии. *Избранные труды: в 5-ти томах*. Том 1. Харьков: Институт системных исследований в энергетике, 2003. 260 с.

COMPUTATIONAL METHOD OF NODAL TRANSFORMATION OF THE PRICING PROCESS IN THE ELECTRICITY MARKET

Z.Kh. Borukaiev¹, V.A. Evdokimov¹, K.B. Ostapchenko²

¹ G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering National Academy of Sciences of Ukraine, General Naumov Str., 15, Kyiv, 03164, Ukraine, e-mail: zelimh1948@gmail.com, ievdokimov40@gmail.com.

² National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: okb2003@ukr.net.

The main attention in the article is given to the development of the method of nodal transformation of the pricing process in the electricity market. The sequence of implementation of the main constructive stages of its development and further use is given, such as: descriptions of the pricing process; formalization of the pricing process; development of computational procedures for building a simulation model of the pricing process. A distinctive feature of this method from the known and described in the scientific literature is the direct connection of the dynamic energy flow at all stages of the technological process of production, transmission and distribution of electricity with the economic flow. The computational procedures of the method are implemented using the discrete-event approach. The method is designed to build a simulation model of the pricing process in the electricity market, which along with a system of short-term price forecasting models in different market segments, becomes the key in the information and methodological support of multi-agent environment for the market agents interaction. References 13, figures 2.

Keywords: agent, simulation model, nodal transformation method, pricing process, price index, electricity market.

1. Mokhor V.V., Evdokimov V.A. Creation of a multi-agent simulation model of pricing processes in the electricity market. *Elektronne modelivannia*. 2020. Vol. 42. No 6. Pp. 3-17. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.003>
2. On approval of the Market Rules: Resolution of the National Commission for Regulation of Economic Competition 14.03.2018 No 307. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18/page#Text> (accessed at 24.04.2021). (Ukr).
3. Evdokimov V.A. Formulation of the problem of building a multi-agent simulation model of pricing processes in the electricity market. *Elektronne modelivannia*. 2021. Vol. 43. No 3. Pp. 47-63. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.03.047>
4. Analysis of electricity tariffs and pricing in the EU and OECD countries. Incentive tariff systems: State Enterprise National Energy Company Ukrenergo. URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/10/3-Taryfo_tsinoutv_elektroen.pdf (accessed at 30.09.2018). (Ukr).
5. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus Ye.V., Ivanov H.A. Simulation Model of Day Ahead Market with Implicit Consideration of Power Systems Network Constraints. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 5. Pp. 60-67. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.060>
6. Saukh S.Ye. Methodology and Methods of Mathematical Modeling of Energy Engineering in Market Conditions. *Elektronne modelivannia*. 2018. Vol. 40. No 3. Pp. 3-32. (Rus). DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.40.03.003>
7. Blinov I.V. Theoretical and practical foundations for the functioning of a competitive electricity market. Kyiv: Naukova dumka, 2015. 216 p. (Ukr).
8. Ostapchenko K.B., Lisovychenko O.I., Evdokimov V.A., Borukaiev Z.Kh. Creation of Information Modeling System for Analysis of Pricing Processes in the Electricity Market. *Elektronne modelivannia*. 2021. Vol. 43. No 4. Pp. 51-68. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.04.051>
9. Shinde P., Amelin M. Agent-Based Models in Electricity Markets: A Literature Review. IEEE Conference Proceedings *Innovative Smart Grid Technologies - Asia* (ISGT Asia). Chengdu, China, May 21-24, 2019. Pp. 3026-3031. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2019.8880889>
10. Kutsan Yu.H., Blinov I.V., Ivanov H.A. Modelling of Tariff and Price Formation on Retain Market of Electrical Energy of Ukraine in New Conditions of its Functioning. *Elektronne modelivannia*. 2017. Vol. 39. No 5. Pp. 71-80. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.39.05.071>
11. Oprea S., Bara A., Preotescu D., Bologa R., Coroianu L. A Trading Simulator Model for the Wholesale Electricity Market. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 184210-184230. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029291>
12. Stoft S. Power System Economics. Designing Markets for Electricity. Moskva: Mir, 2006. 623 p. (Rus).
13. Voronovsky G.K. Reflections on Energy: Fates and Events, Observations and Comments. *Izbrannye trudy: v 5-ti tomah*. Vol. 1. Kharkov: Institute for Systems Research in Energy, 2003. 260 p. (Rus).

Надійшла 21.05.2022

Остаточний варіант 07.06.2022