

УДК 621.316:004.942

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.53.028>

## СКЛАДОВІ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ЦІНОУТВОРЕННЯ НА РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ

Є.В. Парус\*, канд. техн. наук, І.В. Блінов\*\*, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна,  
e-mail: [paruseugene@gmail.com](mailto:paruseugene@gmail.com), [blinovigor81@gmail.com](mailto:blinovigor81@gmail.com)

*Запропоновано основні принципи, за якими має будуватися імітаційна модель процесів ціноутворення на ринку електричної енергії України. Визначено вимоги до взаємодії між процесами ціноутворення під час моделювання сегментів ринку електричної енергії України, наведено функції формування зазначеної імітаційної моделі та її інформаційна архітектура. Встановлено, що реалізація системи імітаційного моделювання ринку електричної енергії України має виконуватися згідно з принципами побудови експертних систем з дискретно-подієвим характером розрахунків розподілених у часі процесів ціноутворення. Бібл. 8, рис.2.*

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, ринок електричної енергії, експертна система ціноутворення, тарифоутворення, мережеві обмеження.

**Вступ.** Розвиток оптового ринку електричної енергії України, що відбувається протягом останнього десятиріччя, відзначається переходом від діючої моделі "Єдиного покупця" до перспективної лібералізованої моделі повномасштабного конкурентного ринку електричної енергії. Відповідно до Закону «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII [1] в Україні в 2019 році має бути впроваджено нову модель ринку електричної енергії. Ця модель передбачає наявність таких основних організованих сегментів ринку [2]: ринок двосторонніх договорів, ринок «на добу наперед», балансувальний та роздрібний ринок, ринок допоміжних послуг. В «Правилах ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку» [3] визначено принципи функціонування ринку «на добу наперед» (РДН) України за правилами граничного ціноутворення на основі балансу сукупного попиту на електричну енергію та її сукупної пропозиції. З огляду на перспективи інтеграції ОЕС України з європейськими енергосистемами, структура та функції ринку електроенергії України повинні бути максимально адаптовані до європейських регламентуючих [4, 5] документів щодо функціонування ринків електроенергії.

Оскільки проблема створення єдиного методу або набору методів ціноутворення на європейських ринках електроенергії залишається актуальною, у процесі формування сегментів лібералізованої моделі ринку електроенергії України надзвичайно важливо приймати економічно обґрунтовані рішення щодо функціонування самих сегментів та взаємовідносин учасників у цих сегментах ринку електроенергії з урахуванням особливостей структури виробництва, передачі, розподілу і споживання електроенергії в ОЕС України [6-8]. Додатково структура і функції лібералізованої моделі ринку електроенергії України мають відповідати вимогам відповідних Регламентів Європейської Комісії [4, 5] з метою максимального забезпечення сумісності зі структурою ринків електроенергії європейських країн у процесі інтеграції ОЕС України до енергосистем Європи. Однак, жодна з існуючих в Європі моделей функціонування ринку електроенергії не може повністю повторити модель іншої країни [8], зокрема й України, навіть за наявності однакових сегментів та підходів до ціноутворення. Це обумовлено технологічними особливостями ОЕС України, національною

правовою та регуляторною базою, а також правилами функціонування ринку електричної енергії. Зважаючи на це, впровадження в Україні існуючих у світі засобів моделювання ринків електричної енергії потребуватиме значного часу для адаптації та врахування виняткових особливостей нового ринку електричної енергії.

Іншим підходом до вирішення проблеми підвищення якості обґрунтування управлінських рішень щодо запровадження механізмів і вдосконалення процесів ціно- та торфоутворення в умовах нової моделі ринку електричної енергії в Україні, подальшої його лібералізації та інтеграції з європейськими ринками електроенергії є розробка відповідної концепції та побудова імітаційної моделі.

**Метою** статті є визначення основних складових, функції формування та інформаційної архітектури імітаційної моделі ринку електроенергії, основне призначення якої є моделювання процесів ціноутворення в сегментах ринку та пошук на основі результатів такого моделювання оптимальних рішень щодо цін на електроенергію в Україні з урахуванням особливостей структури ринку електроенергії і правил його функціонування, а також системних обмежень в ОЕС України.

**Загальні методологічні підходи до системи імітаційного моделювання ринку електроенергії України.** З огляду на невизначеність шляхів вирішення проблеми вибору оптимальних способів ціноутворення в сегментах ринку електроенергії України, призначення імітаційної моделі – запропонувати інструментарій для оцінки практичних наслідків запровадження як різних механізмів ціноутворення, так і різних способів взаємодії учасників ринку в окремих сегментах. Водночас імітаційна модель має надавати можливість неявного врахування впливу функцій окремих сегментів ринку електроенергії чи окремих технологічних обмежень та моделювання з уточненим урахуванням цих факторів.

Окремо слід відзначити вимоги до найбільш складного в частині методології моделювання різних способів організації та функціонування сегменту – РДН. Особливістю РДН у порівнянні з іншими сегментами ринку електроенергії є широкий набір різних типів заявок для участі в торгах. Зокрема, для участі в погодинних торгах РДН подаються заявки з купівлі-продажу електроенергії з лінійними чи східчастими графіками. Крім того, для РДН України важливими є цінові заявки з атрибутом «все або нічого» та ціноприймальні заявки на купівлю-продаж електроенергії. Кожен із наведених типів заявок має свої особливості аналізу. Тому й оцінка впливу окремого замовлення на результати погодинних торгів має здійснюватися з урахуванням особливостей аналізу цього замовлення. Додатково на результати погодинних торгів на РДН впливають замовлення, аналіз яких здійснюється дискретними методами на рівні добової оптимізації. Складний характер впливу різних формалізмів аналізу відповідних типів заявок на результати торгів практично унеможливорює адекватну оцінку результатів функціонування РДН методами, що використовують лінеаризовані моделі. Найбільш точну оцінку наслідків впливу різних чинників на результати торгів у сегменті РДН надає безпосереднє імітаційне моделювання. Відповідно, модель аналізу результатів торгів на РДН має використовувати математичний апарат, максимально наближений до математичних методів та алгоритмів процесу розрахунків, що використовуються в автоматизованій інформаційній системі цього ринку.

Основні принципи, за якими має бути побудована імітаційна модель ринку електроенергії України, є аналогічними принципам створення складних розрахунково-аналітичних систем. Так, **принцип включення** визначає, що вимоги до створення, функціонування та розвитку імітаційної моделі встановлюються з боку більш складної системи. У цьому випадку вимоги до імітаційного моделювання окремих сегментів формулюються з огляду на їх функціонування в складі системи комплексного моделювання ринку електроенергії України. **Принцип системної єдності** визначає, що на всіх стадіях створення, функціонування та розвитку імітаційної моделі ринку електроенергії України її цілісність має забезпечуватися зв'язками між підсистемами, а також функціонуванням підсистеми управління. **Принцип розвитку** встановлює вимогу можливості нарощування та вдосконалення окремих компонентів імітаційної моделі ринку електроенергії України та зв'язків між ними. **Принцип комплексності** полягає в тому, що імітаційна модель ринку

електроенергії України має забезпечувати зв'язаність у процесі обробки інформації як окремих складових, так і всього обсягу даних загалом на всіх стадіях обробки. **Принцип інформаційної єдності** встановлює вимогу використовувати єдині терміни, символи, умовні позначення і способи подання в усіх підсистемах, засобах забезпечення і компонентах імітаційної моделі ринку електроенергії України. **Принцип сумісності** визначає, що мова, символи, коди і засоби імітаційної моделі ринку електроенергії України мають бути узгоджені та забезпечувати спільне функціонування всіх підсистем, зберігаючи відкритою структуру системи в цілому. Згідно з **принципом інваріантності**, підсистеми та компоненти імітаційної моделі ринку електроенергії України мають бути інваріантними до оброблюваної інформації, тобто процедури та алгоритми розрахунків мають бути типовими і не повинні залежати від кількості та конкретних значень вхідних даних.

У процесі розробки схем інформаційної взаємодії складових системи імітаційного моделювання ринку електроенергії України слід урахувувати невідповідність інформаційних структур на вході та виході засобів імітаційного моделювання РДН у порівнянні з іншими сегментами ринку електроенергії. Так, для участі в торгах на РДН подаються заявки як на окрему годину, так і на кілька годин доби. Водночас продуктами на РДН вважаються виключно погодинні договори на фізичне постачання електроенергії від продавця до покупця в межах відповідних систем передачі. Крім того, структура цінних зон та обмеження на обсяги обміну електроенергією між ними є обов'язковою складовою вхідних даних для рішення задачі сполучення ринку електроенергії. У той же час погодинні обсяги обміну електроенергією між цінними зонами мають значення додаткової інформації, корисної для оператора системи передачі, але зайвої для інших учасників торгів на РДН. Особливою інформаційною складовою результатів моделювання РДН є значення граничних цін у цінних зонах, які використовуються для розрахунку вартості продуктів РДН. Такі особливості інформаційних структур на вході та виході імітаційної моделі РДН необхідно враховувати згідно з наведеними вище принципами.

**Вимоги до взаємодії між процесами ціноутворення в процесі моделювання сегментів ринку електроенергії України.** Лібералізована модель ринку електроенергії передбачає взаємодію учасників ринку в різних ринкових сегментах (рис. 1). Наприклад, виробники електроенергії реєструють безпосередні довгострокові угоди на купівлю-продаж електроенергії з постачальниками чи з великими споживачами у відповідному сегменті ринку. Угоди на більш короткі строки реалізації укладаються додатково між цими учасниками на внутрішньодобовому ринку та в неявному вигляді в сегменті РДН. Виробники електроенергії місцевого значення (розподілена генерація) та з нерегульованими джерелами генерації укладають угоди з уповноваженим «гарантованим покупцем», функції якого можуть виконувати оператор системи передачі або оператори малих систем розподілу. Крім того, виробники електроенергії безпосередньо взаємодіють з оператором системи передачі для укладання угод на ринку допоміжних послуг, РДН та балансувальному ринку (БР).

Кожен сегмент ринку електроенергії визначає такі правила взаємодії між учасниками:

- правила організаційної взаємодії, які регламентують доступ учасників до торгів, проведення торгів та порядок укладання угод;
- правила взаємодії за економічними інтересами, які визначають механізми формування балансу між попитом і пропозицією та ціноутворення;
- правила взаємодії за технологічними ознаками, які враховують особливості технологічних процесів у національній електроенергетиці в процесі формування балансу виробництва та споживання електроенергії.

Результатом функціонування кожного сегменту ринку електроенергії є двосторонні договори, які визначають:

- сформовані в цьому сегменті баланси попиту та пропозиції;
- складові для формування загального балансу виробництва-споживання електроенергії;
- складові вартості електроенергії для кінцевого споживача.

Таким чином, елементарною складовою для моделювання ринку електричної енергії є заявки учасника ринку на купівлю-продаж електроенергії або надання-отримання послуг із зазначеними обсягами та ціною (рис. 1).

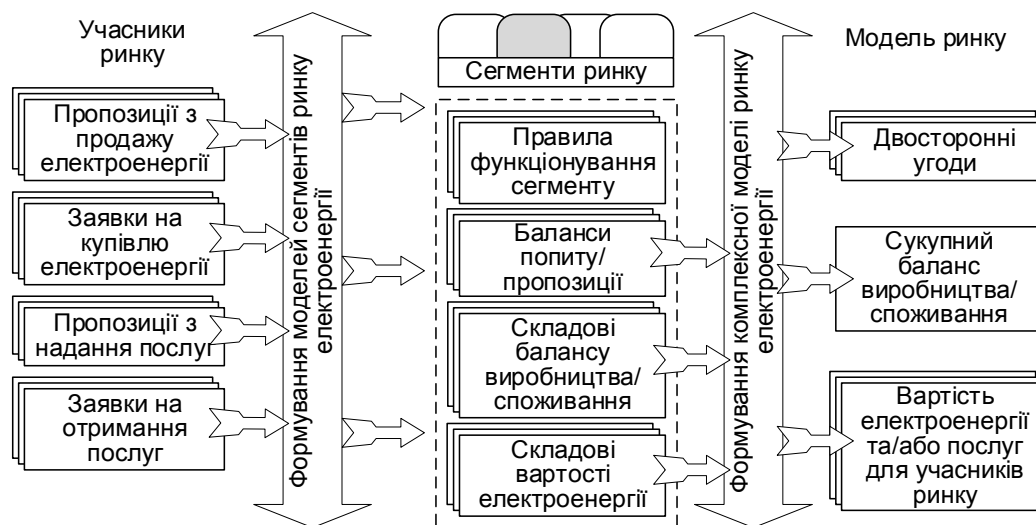


Рис. 1

Елементарним результатом моделювання є двостороння угода з купівлі-продажу електроенергії або з надання-отримання послуг із погодженими обсягами та вартістю. Результатом моделювання окремого сегменту ринку електроенергії є набір двосторонніх угод, які визначають сукупний баланс попиту-пропозиції в цьому сегменті, складові балансу виробництва-споживання електроенергії та складові вартості електроенергії або послуг. Функції комплексного моделювання ринку електроенергії узгоджують баланси попиту-пропозиції по сегментах із сукупним балансом виробництва-споживання електроенергії з урахуванням особливостей її передачі та розподілу. За результатами такого узгодження розраховуються вартісні показники для учасників ринку електроенергії. Водночас найбільш важливим індикатором функціонування ринку електроенергії є вартість електроенергії для кінцевих споживачів, у якій фактично враховуються всі складові ціноутворення, присутні на ринку.

Базовим рішенням для цих задач є експертне відображення моделі ринку, тобто сформовані експертом двосторонні угоди між учасниками ринку електроенергії з урахуванням особливостей функціонування кожного з модельованих сегментів із дотриманням балансів попиту і пропозиції в цих сегментах та загального балансу виробництва і споживання електроенергії (рис. 2). Найбільш показовими ціновими індикаторами сформованої моделі ринку електроенергії є ціни для кінцевих споживачів, оскільки ці вартісні показники дозволяють адекватно здійснювати порівняння різних варіантів моделі ринку електричної енергії.

З рис. 2 видно, що основу імітаційної моделі ринку електроенергії України складають функції узгодження балансу виробництва-споживання по сформованим за результатами балансування попиту-пропозиції двостороннім угодам у модельованих сегментах. Водночас форма подання правил функціонування сегментів ринку електроенергії залежить від рівня деталізації процесів балансування попиту-пропозиції та процесів ціноутворення для відповідних сегментів у комплексній моделі ринку.

У найпростішому випадку окремий сегмент ринку електричної енергії враховується в комплексній моделі неявно. У цьому разі експерт – користувач системи імітаційного моделювання самостійно формує для такого сегменту двосторонні угоди, керуючись поданими на вербальному рівні правилами. Таке неявне врахування окремого сегмента ринку електроенергії застосовується, перш за все, за відсутності чітко визначених методів формування балансів попиту-пропозиції та алгоритмів ціноутворення. А реалізація

програмних засобів з неявним урахуванням всіх сегментів ринку електроенергії є базовою версією системи імітаційного моделювання, призначеною для тестування алгоритмів узгодження балансів виробництва-споживання електроенергії та для оціночних розрахунків у процесі рішення окремих задач.

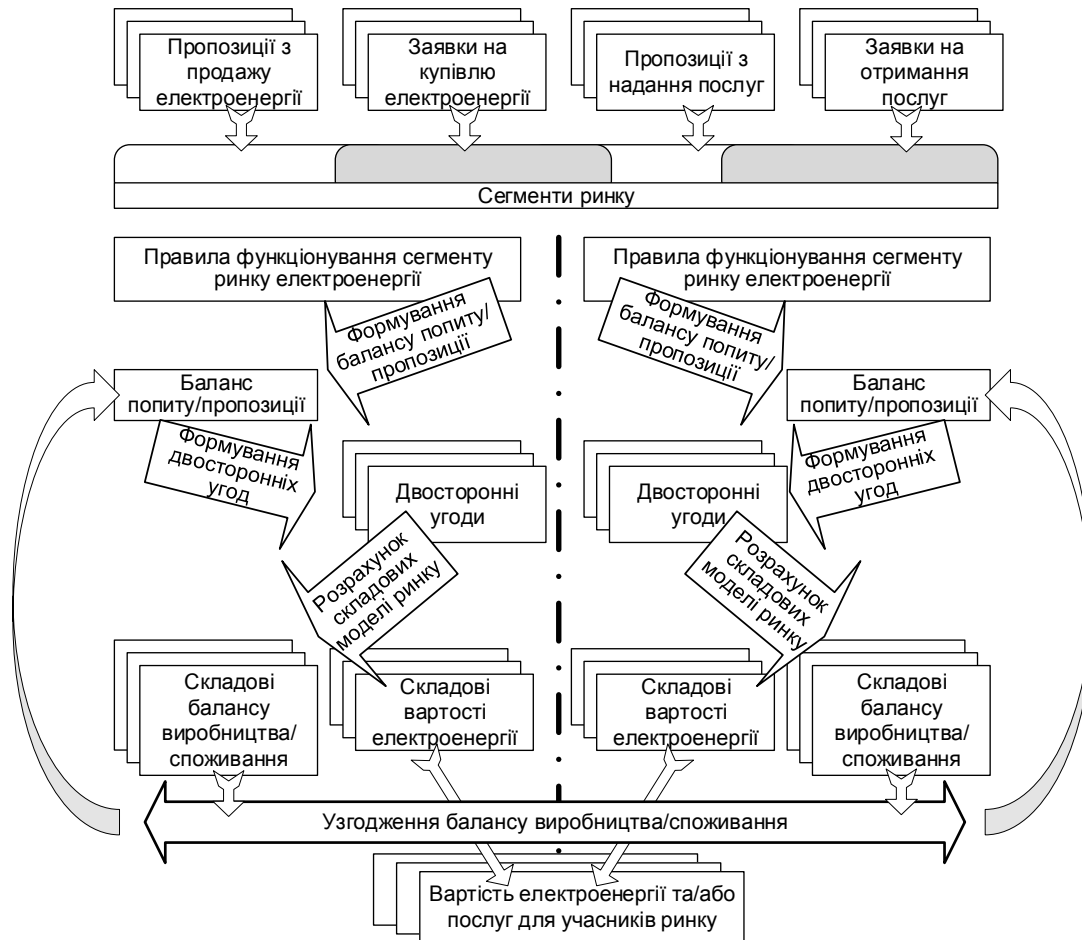


Рис. 2

Для більш точного врахування процесів ціноутворення в окремому сегменті ринку електроенергії України розробляється програмне розширення, в якому реалізуються типові для цього сегменту алгоритми формування балансу попиту-пропозиції та правила ціноутворення. У цьому разі правила функціонування модельованого сегменту визначаються користувачем системи як окремий інформаційний шар вхідних даних із визначеннями, які саме алгоритми слід використовувати в процесі імітаційного моделювання відповідного сегменту.

Функції балансування попиту та пропозиції під час моделювання окремих сегментів ринку електроенергії мають використовувати математичний апарат двостороннього аукціону з оптимізацією на основі цільової функції максимізації добробуту ринку електроенергії. Імітація односторонніх аукціонів (нееластичних по ціні попиту чи пропозиції) в такому випадку здійснюється шляхом використання відповідних заявок ціноприймального типу. Тоді функції імітаційного моделювання окремого сегмента ринку електричної енергії України зводяться до підготовки функцій попиту-пропозиції та визначення за результатами моделювання аукціонів інформації для функцій узгодження балансів. Особливості ціноутворення для окремого сегменту ринку електроенергії України визначаються постановкою задачі імітаційного моделювання і подаються посиланнями на алгоритм розрахунку вартості електроенергії, який необхідно застосовувати в процесі моделювання відповідного сегменту.

Функції узгодження балансів виробництва-споживання електроенергії здійснюють коригування доступних для торгів графіків у окремому сегменті ринку електроенергії за результатами вже сформованих балансів у інших сегментах. Тому імітаційна модель має також враховувати хронологію укладання угод. Наприклад, моделювання торгів на внутрішньодобовому ринку повинно здійснюватися після завершення моделювання торгів на РДН та з урахуванням їх результатів. Оскільки система імітаційного моделювання не призначена для функціонування в режимі реального часу, то для моделювання безперервних торгів на внутрішньодобовому ринку електроенергії достатньо здійснювати їх імітацію дискретно за фактом заявки на купівлю-продаж електроенергії відповідно до часових міток для заявок, сформованих за ретроспективною чи прогнозованою інформацією.

Отже, програмна реалізація системи імітаційного моделювання ринку електроенергії України має виконуватись з використанням принципів побудови експертних систем з дискретно-подієвим характером імітації розподілених у часі процесів ціноутворення.

**Висновки.** 1. Визначено основні складові, функції та загальна інформаційна архітектура комплексної імітаційної моделі ринку електроенергії України, побудова та використання якої дозволяє виконати моделювання процесів ціноутворення в сегментах ринку.

2. У межах імітаційного моделювання для кожного учасника ринку електроенергії України ціни та тарифи з достатнім рівнем точності формуються як адитивні складові з урахуванням частки їх участі в балансах попиту та пропозиції для різних сегментів ринку електроенергії. Тому подання структури ціноутворення для окремих учасників ринку електроенергії в декларативній формі (на рівні вхідних даних) не викликає особливих складнощів. Впровадження в імітаційній моделі ринку електроенергії України формалізованого опису взаємодії між учасниками ринку в процесах ціноутворення в декларативній формі дозволяє реалізувати принцип адаптивності розрахункової системи до змін у постановці задачі. Зі свого боку адаптивна до змін у постановці задачі імітаційна модель ринку електроенергії України надає ефективний інструментарій для дослідження різних форм ціноутворення в процесі підготовки управлінських рішень, що так само створює передумови прийняття економічно обґрунтованих рішень щодо структури та функцій ринку електроенергії України.

*Робота виконана за рахунок коштів бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (шифр «Інтехен»), (КПКВК 6541230).*

1. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 р. № 2019-VIII.  
URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>
2. Про затвердження Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 р. № 308.
3. Про затвердження Правил ринку: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 р. № 307.
4. Commission Regulation (EU) 2015/1222 of 24 July 2015 establishing a guideline on capacity allocation and congestion management. *Official Journal of the European Union*. 2015. Vol. 58. Pp. 24 – 72.
5. Commission Regulation (EU) 2016/1719 of 26 September 2016 establishing a guideline on forward capacity allocation. *Official Journal of the European Union*. 2016. Vol. 259. Pp. 42 – 68.
6. Блінов І.В., Парус Є.В., Іванов Г.А. Дослідження організації конкурентної моделі ринку електроенергії України з урахуванням мережевих обмежень в ОЕС України. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. № 45. С. 34 – 39.
7. Блінов І.В., Парус Є.В., Іванов Г.А. Імітаційне моделювання функціонування балансуєчого ринку електроенергії з урахування системних обмежень на параметри ОЕС України. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С. 72 – 79. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2017.06.072>
8. Блінов І.В. Теоретичні та практичні засади функціонування конкурентного ринку електроенергії. К.: Наукова думка, 2015. 250 с.

## СОСТАВЛЯЮЩИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ НА РЫНКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ УКРАИНЫ

**Е.В. Парус**, канд. техн. наук; **І.В. Блінов**, докт. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина,  
e-mail: [paruseugene@gmail.com](mailto:paruseugene@gmail.com), [blinovigor81@gmail.com](mailto:blinovigor81@gmail.com)

*Представлены основные принципы, по которым должна быть построена имитационная модель процессов ценообразования на рынке электрической энергии Украины. Определены требования к взаимодействию между процессами ценообразования при моделировании сегментов рынка электрической энергии Украины, приведены функции формирования указанной имитационной модели и ее информационная архитектура. Определено, что реализация системы имитационного моделирования рынка электрической энергии Украины должна выполняться с использованием принципов построения экспертных систем с дискретно-событийным характером расчетов распределенных во времени процессов ценообразования. Библ. 8, рис.2.*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, рынок электрической энергии, экспертная система ценообразования, тарифообразование, сетевые ограничения.

## **SIMULATION MODEL COMPONENTS OF THE PRICE FORMATION PROCESSES ON THE ELECTRICITY MARKET OF UKRAINE**

**Ye. Parus, I. Blinov**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

e-mail: [paruseugene@gmail.com](mailto:paruseugene@gmail.com), [blinovigor81@gmail.com](mailto:blinovigor81@gmail.com)

*The article presents the basic building principles of the simulation model of the price formation processes on the electricity market of Ukraine. The requirements for the interaction between price formation processes when modeling segments of the electricity market of Ukraine are determined. The functions of the simulation model design and its information architecture are given. It was determined that the implementation of a simulation system for the electricity market of Ukraine should be carried out using the principles of designing of expert systems with discrete-event character of calculations that are distributed in time of price formation processes. References 8, figures 2.*

**Key words:** simulation modeling, electricity market, expert pricing system, tariff setting, network constraints.

1. The Law of Ukraine "On Electricity Market". The Verkhovna Rada of Ukraine. The Law of 13.04.2017 No 2019-VIII. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>.
2. On approval of market rules "a day ahead" market and intraday market: Decree of National Commission for the State Regulation Energy and utilities from 14.03.2018. No 308.
3. On approval of market rules: Decree of National Commission for the State Regulation Energy and utilities from 14.03.2018. No 307.
4. Commission Regulation (EU) 2015/1222 of 24 July 2015 establishing a guideline on capacity allocation and congestion management. *Official Journal of the European Union*. 2015. Vol. 58. Pp. 24 – 72.
5. Commission Regulation (EU) 2016/1719 of 26 September 2016 establishing a guideline on forward capacity allocation. *Official Journal of the European Union*. 2016. Vol. 259. Pp. 42 – 68.
6. Blinov I., Parus Ye., Ivanov H. Research of competitive model of electricity market of Ukraine taking into account network constraints in IPS Ukraine. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2016. No 45. Pp. 34 – 39. (Ukr)
7. Blinov I.V., Parus Ye.V., Ivanov H.A. Imitation modeling of the balancing electricity market functioning taking into account system constraints on the parameters of the ips of Ukraine mode. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2017. No 6. Pp. 72 – 79. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.072>
8. Blinov I.V. Theoretical and practical principles of functioning of a competitive electricity market. Kyiv: Naukova Dumka, 2015. 215 p. (Ukr)

Надійшла 08.04.2019

Received 08.04.2019