

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ РИНКІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

*Надано огляд публікацій за трьома основними класами: оптимізаційні, імітаційні моделі та моделі рівноваги. Наведено класифікацію цих моделей за конкретними ознаками та визначено, який з підходів доцільно використовувати для різних завдань. Наведено короткий опис економічної розрахункової моделі рівноваги LIBEMOD.*

*Ключові слова:* ринок, електроенергія, моделювання, модель, конкуренція

Останнім часом у світі в електроенергетичній галузі відбулися значні зміни, пов'язані з дерегулюванням та конкуренцією з метою підвищення її економічної ефективності. В багатьох країнах ці зміни привели до виникнення ринків електроенергії. В умовах ринку керування виробничими одиницями більше не залежить від державних чи комунальних процедур, а залежить від децентралізованих рішень підприємств-виробників, які мають на меті максимізувати свої прибутки. Всі підприємства конкурують у наданні послуг з виробництва за ціною, що встановлюється на ринку в результаті взаємодії усіх підприємств та споживачів.

Метою статті є визначення та характеристика підходів, пов'язаних із моделюванням ринків електричної енергії. Означені підходи можна класифікувати згідно зі схемою, наведеною на рисунку. Вони поділяються на три основних класи: оптимізаційні моделі, імітаційні моделі та моделі рівноваги (рівноважні моделі). Оптимізаційні моделі зосереджують увагу на проблемі максимізації прибутку окремого підприємства-учасника на ринку, в той час як моделі рівноваги представляють поведінку всього ринку, розглядаючи конкуренцію між усіма його учасниками. Імітаційні моделі розглядаються більше як альтернатива рівноважним моделям у тому випадку, коли задача, що розглядається в рамках традиційної системи рівноваги, є надто складною.

**Математична структура.** В оптимізаційних моделях використовується єдина цільова функція, яку буде оптимізовано з урахуванням технічних та економічних обмежень. В імітаційних та рівноважних моделях розглядається задача одночасної максимізації прибутку для всіх конкуруючих підприємств на ринку.

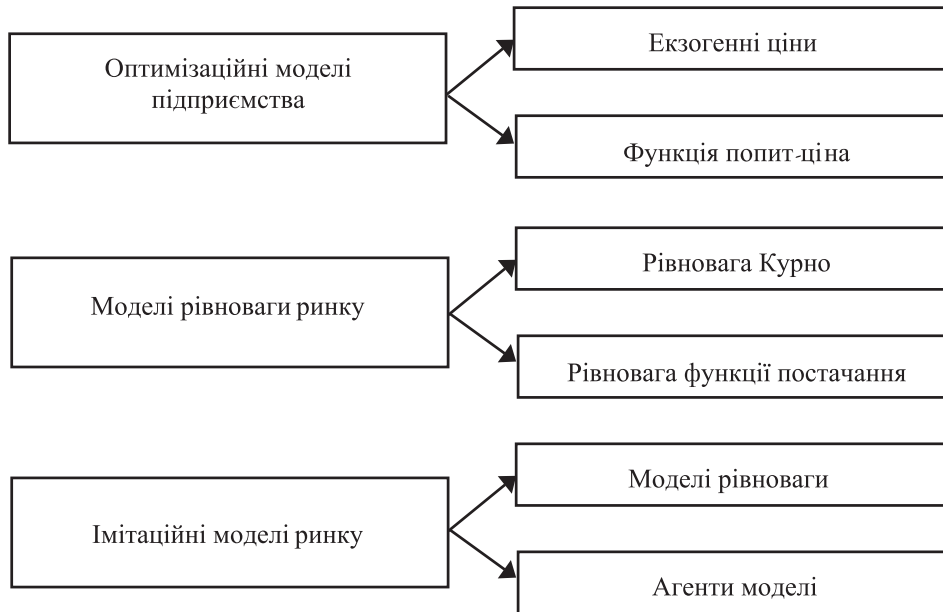
**Моделювання ринку.** Імітаційні моделі та моделі рівноваги відображають поведінку ринку, розглядаючи конкуренцію між усіма його учасниками. В оптимізаційних моделях ринок є об'єднаним у представленні процесу цінового клірингу, який може бути змодельований як екзогенний в оптимізаційній задачі, або як залежний від кількості електроенергії, відпущеної підприємством, що розглядається.

Основні сфери застосування існуючих моделей ринків електричної енергії описано нижче.

### **Оптимізаційна модель підприємства**

Оптимізаційні моделі переважно використовують підходи, що ґрунтуються на максимізації прибутку підприємства. Ці моделі враховують значущі для підприємства обмеження, а також процес цінового клірингу. Відповідно до способу, яким представлено цей процес, моделі поділяються на два типи, в яких: ціна моделюється як екзогенна змінна; ціна моделюється як функція потреби, яку задовольняє підприємство.

**Екзогенна ціна.** Найнижчий рівень дезагрегації моделювання ринку відображає процес цінового клірингу як екзогенний в оптимізаційній задачі. Іншими словами, гранична ціна системи є вхідним параметром для оптимізаційної задачі. Внаслідок цього ринковий дохід стає лінійною функцією виробництва підприємства, що є найголовнішою змінною у цьому підході. З огляду на це, для отримання вирішення моделі можуть застосовуватися традиційні методи лінійного програмування та частково-цілочисленого лінійного програмування (ЧЦЛП). Такий тип оптимізаційної моделі здатний коректно представити лише ті ринки, на яких спостерігаються псевдодосконалі умови конкуренції, оскільки він виключає вплив рішень підприємства на ринкові клірингові ціни.



Класи моделей ринків електричної енергії

Такі моделі можуть бути розділені на дві підгрупи залежно від того, який спосіб відображення ціни вони використовують – детермінований чи імовірнісний.

**Детерміновані моделі.** В цих моделях оптимізаційна задача підприємства може бути поділена на ряд підзадач аналогічно підходу релаксації Лагранжа, оскільки ціна вважається екзогенною величиною. Як і у випадку досконалої конкуренції, детермінована ціна та випукла (нелінійна) функція ціни (convex costs) визначаються простим порівнянням кожної граничної ціни виробництва і ринкової ціни та приймаються кожним виробником самостійно, залежно від виробництва. Таким чином, найкраща пропозиція кожного виробника формується на основі їхньої граничної ціни [1].

**Імовірнісні моделі.** У цих моделях попередній підхід вдосконалено з точки зору детального розгляду невизначеності ціни. Наприклад модель, в якій вирішується задача зобов'язань підприємства-виробника за умови екзогенної цінової невизначеності з використанням зворотного динамічного програмування [2].

**Ціна, як функція рішень підприємства.** На відміну від попередніх підходів, існує інша група моделей, які детально розглядають вплив можливих обсягів виробництва підприємством на ціну. В таких моделях кількість електроенергії, яку підприємство може продати за різними цінами, є вхідними даними, тобто функцією залишкового попиту. Ці моделі також можуть

поділятися на дві підгрупи залежно від функції, яка використовується: ймовірнісне представлення або функція залишкового попиту.

**Детерміновані моделі** спрямовані на вирішення задачі кожного підприємства за допомогою лінійної функції залишкового попиту. Враховуючи те, що ринковий дохід є квадратичною функцією загального обсягу виробництва підприємства, для використання ЧЦЛП запропоновано процедуру кусково-лінійної лінеаризації ринкового доходу [3, 4].

**Імовірнісні моделі** моделюють задачу побудови оптимальної кривої пропозиції підприємства-виробника. Для її отримання береться до уваги невизначеність поведінки як конкурентів, так і споживачів. Цей підхід створив вихідну точку для розвитку нових моделей, які перетворювали криву пропозиції в прибутковий механізм хеджування ризиків від короткострокових факторів невизначеності на ринку [5, 6].

Підходи, які детально розглядають ринкову рівновагу в межах традиційного математичного програмування, згруповано в категорію моделей рівноваги.

#### Моделі рівноваги

Як було зазначено вище, є два основних типи моделей рівноваги. Найбільш загальний тип ґрунтується на концепції конкуренції Курно, згідно з якою підприємства конкурують у кількості стратегій, тоді як другий, складніший тип, ґрунтується на функції рівноваги постачання (SFE), де підприємства конкуру-

ють у стратегіях стосовно кривої пропозиції. Хоча обидва підходи розрізняються стратегічними змінними, вони засновані на концепції рівноваги Неша, згідно з якою ринок досягає рівноваги у той момент, коли стратегія кожного підприємства є найкращою відповіддю на стратегію його конкурента.

**Рівновага Курно.** Рівновагу Курно, відповідно до якої підприємства вибирають свою оптимальну продуктивність, простіше вирахувати, ніж функції рівноваги пропозиції, тому що математична структура моделей Курно є комплексом алгебраїчних рівнянь, тоді як математична структура SFE-моделей є комплексом диференціальних рівнянь. Найбільш важливий недолік моделей Курно випливає з факту, що стратегії виробників виражаються показниками кількості, а не кривими пропозицій. Отже, рівноважні ціни визначаються тільки за допомогою функції попиту і є дуже чутливими до представлення попиту та звичайно вищі за ті, що реально спостерігались. Підхід “передбачуваної реакції” [7] змінює припущення виробників щодо стратегічного рішення їх конкурентів з точки зору можливості подальших реакцій. В контексті ринків електроенергії цей підхід відомий як підхід “передбачення функції постачання” [8, 9].

**Рівновага функції постачання.** За відсутності невизначеності, в умовах заданих змінних стратегій конкурентів (щодо кількості чи ціни) кожне підприємство не має переваги у вираженні своїх рішень у показниках кількості чи ціни, оскільки воно стикається з конкретним залишковим попитом. На противагу, коли підприємство стикається з низкою можливих кривих залишкового попиту, воно, зазвичай, очікує більшого прибутку, виражаючи свої рішення у вигляді функції постачання, яка визначає ціну, за якою воно пропонує різні кількості продукції на ринок. Доведено, що підхід функції рівноваги постачання може бути можливим напрямом дослідження для аналізу рівноваги на оптових ринках електроенергії [10].

Розрахунок SFE-моделей потребує рішення системи диференціальних рівнянь замість типового набору алгебраїчних рівнянь, яка виникає у традиційних моделях рівноваги, в яких важливі змінні набувають форми кількості або ціни. Отже, SFE-моделі мають значні обмеження щодо їх чисельного трактування. Зокрема, вони рідко містять детальне представ-

лення виробничих систем, що розглядаються.

Незважаючи на розмаїття запропонованих моделей, можна виділити деякі характеристики, які можна використовувати для порівняння між різними SFE-підходами. Деякі з таких характеристик належать до представлення ринку, такі як можливість розглядати неоднорідні підприємства (відрізняються за певними ознаками, такими як ефективність виробництва, продуктивність та ін.). Ще однією характеристикою є припущення, зроблені щодо форми кривих граничних витрат, функції постачання або кривої пропозиції. Інші характеристики належать до моделі систем виробництва (обмеження потужності) або мереж (обмеження передачі).

Підхід SFE має деякі переваги, зокрема при прогнозуванні середньострокових цін на електроенергію та поведінки підприємства за наявності низки сценаріїв попиту на неї. Однак така гнучкість супроводжується значними практичними обмеженнями, що стосуються трактування отриманих результатів.

#### **Імітаційні моделі**

Імітаційні моделі є альтернативою рівноважним у випадку, коли розглядаються надто складні для вирішення проблеми у рамках формальної рівноважної структури. Імітаційні моделі являють собою динаміку стратегічних рішень кожного агента за допомогою набору узгоджених правил. Правила можуть змінюватися від планування виробничих одиниць до побудови кривих пропозиції, які містять реакцію на попередні пропозиції конкурентів. Значною перевагою імітаційного підходу є гнучкість, яку він забезпечує у контексті упровадження майже будь-якого виду стратегічної поведінки.

**Імітаційні моделі, що залежать від моделей рівноваги.** В багатьох випадках імітаційні моделі тісно пов'язані з групою рівноважних моделей. Прикладом є імітаційна модель, яка розглядає максимізацію прибутку виробничого підприємства при врахуванні технічних обмежень, які впливають на тепло- і гідрогенеруючі потужності [11]. Прийняті генеруючими підприємствами рішення визначаються за допомогою ітеративної процедури. На кожній ітерації підприємство видозмінює свою стратегічну позицію в межах дворівневого процесу прийняття рішень. Спершу кожне підприємство оновлює свій випуск на кожний період

планування, маючи на меті задачу максимізації прибутку, в якій ринкова клірингова ціна залишається сталою та в обмеження Курно включаються граничні значення випуску підприємства. Потім модифікують ціну, за якою підприємство пропонує випуск виробленої продукції у запланований період згідно з правилами спадання. Нові ринкові клірингові ціни розраховуються ґрунтуючись на цих пропозиціях і на розвитку потреби, яка за припущеннями нееластична.

Інша імітаційна модель конструює функції оптимального постачання для аналізу потенціалу потужності ринку [12]. Цей підхід подібний до схеми SFE, але забезпечує більш гнучку структуру, яка дозволяє розглядати актуальні дані щодо граничних витрат і неоднорідні підприємства. Згідно з цією моделлю кожна генеруюча компанія припускає, що її конкуренти будуть приймати такі самі функції постачання, які пропонували напередодні. Невизначеність щодо кривої залишкового попиту пов'язана з коливаннями попиту протягом дня. Оптимізаційний процес для побудови функцій оптимального постачання скоріше ґрунтується на вичерпному пошуку, ніж на рішенні формальних проблем математичного програмування.

*Агенти моделі.* Агенти засновують свої рішення на інформації, зібраній завдяки щоденній роботі ринкових механізмів. Іншими словами, агенти вчаться на попередньому досвіді, вдосконалюють прийняття рішень і пристосовуються до змін оточуючого середовища, таких як поведінка конкурентів, варіації попиту, невизначеність гідрологічних умов тощо. Таким чином, адаптивні методи агентного імітування можуть висвітлювати ті характеристики ринків електроенергетики, які статистичні моделі ігнорують. Прикладом є імітаційна модель, в якій генеруючі компанії представлені як автономні адаптивні агенти, що беруть участь у постійному щоденному ринку та шукають стратегії для максимізації їхнього прибутку, використовуючи аналіз результатів, отриманих у попередніх операціях [13]. Припускається, що кожного дня компанії мають на меті дві головні цілі: мінімальний розмір використання свого виробничого капіталу та вищий, ніж за попередній день, дохід. Єдина інформація, наявна для кожної генеруючої компанії, складається з її власних доходів і з часового випуску її електричної енергії. Як правило, у цих

моделях сторона потреби просто наведена лінійною кривою попиту. Це дає змогу проаналізувати певну кількість ринкових схем.

Крім наведеної вище класифікації, моделі ринку електричної енергії також можуть бути поділені за ступенем конкуренції, часовими рамками моделі, моделюванням невизначеності, зв'язками між періодами моделювання, обмеженнями передачі, представленням виробничих систем та моделюванням ринку.

*Ступінь конкуренції.* Виділяють такі види конкуренції: досконала конкуренція, олігополія та монополія. З мікроекономічної теорії випливає, що досконала конкуренція може бути змодельована як задача мінімізації вартості або максимізації чистого прибутку. Отже, оптимізаційні моделі є, зазвичай, найкращим шляхом для моделювання такого типу ринку. Аналогічно, монополія може бути змодельована за допомогою задач максимізації доходу монополістичного підприємства. У цих моделях ціну отримують з функції потреби. На відміну від цього, в умовах недосконалої конкуренції задача максимізації доходу кожного учасника ринку повинна вирішуватись за допомогою імітаційних моделей. Крім того, придатність кожної олігопольної моделі залежить від часових меж її дослідження.

*Часові обмеження.* Часові обмеження є базовою характеристикою для класифікації електроенергетичних моделей, оскільки кожне часове обмеження містить різні змінні рішення і підходи до моделювання.

У випадку короткострокового планування, а саме, від одного дня до одного тижня, найкращий шлях представлення ринку – це модель “лідер-в-ціні” (leader-in-price) [7–10]. У цій моделі діюче підприємство має на меті отримання максимального доходу, беручи до уваги функцію залишкового попиту, яка співвідносить продукцію з її ціною.

У випадку середньострокового прогнозу, а саме, від одного місяця до одного року, переважна більшість моделей ґрунтується як на рівновазі Курно [11, 12, 14–17], так і на рівноважній функції постачання [18–21].

Для вирішення задач довгострокового планування рівновага Стакелберга може підходити краще, ніж інші олігополістичні моделі з довгостроковими задачами інвестиційних рішень, завдяки її послідовному процесу прийняття рішень.

*Моделювання невизначеності.* Одним із найбільш загальних застосувань електроенергетичних моделей є прогнозування ринкового випуску за широкого ряду сценаріїв, коли ціна залежить від випадкових змінних, таких як вимушений простій виробника, гідрологічні умови та рівень потреби. Крім того, в контексті конкуренції нові джерела невизначеності можуть розглядатися як результат стратегічної поведінки конкурентів, так і результат нестійкості ціни на паливо.

*Зв'язки між періодами моделювання.* Часові обмеження, що розглядаються при плануванні, як правило, поділяють на періоди. У виробництві електроенергії є багато витрат та рішень, які належать до певних часових обмежень, у тому числі планування ресурсів в декількох проміжних періодах. SFE-моделі, зазвичай, не розглядають ці міжчасові обмеження. На відміну від них майже всі інші моделі, описані в цій статті, зосереджені на компромісі планування ресурсів у часі.

*Обмеження передачі.* В контексті обмеження передачі електроенергетичні моделі можна розділити на два основних типи: одноузлові моделі та моделі мережі передач. Більшість моделей, наведених в цій статті, розглядають мережі передач.

*Моделювання виробничих систем.* Високий ступінь реалізму фізичного моделювання виробничих систем містить представлення технічних обмежень, що впливають на виробництво, а також розгляд точної вартісної функції виробництва теплових блоків.

Оптимізаційні моделі підприємства досягають високого рівня точності в системному моделюванні завдяки потужним методам лінійного програмування та ЧЦЛП. У цих моделях детально розглядають важливі технічні обмеження, що впливають на виробничі потужності. Таким чином, ці моделі розглядають кожен індивідуальну виробничу одиницю в неагрегованому вигляді.

*Моделювання ринку.* Моделі на основі досконалої конкуренції є найпростішими, оскільки вони розглядають процеси клірингу ціни як екзогенні по відношенню до оптимізаційної задачі [22–24]. Вважається, що моделі, засновані на концепції “лідер-в-ціні”, мають середній рівень складності, оскільки вони враховують вплив виробництва підприємства на ціну за допомогою функції залишкового попиту. Най-

більш складними моделями ринку є ті, які ґрунтуються на недосконалій ринковій рівновазі, оскільки вони враховують взаємодію між усіма учасниками ринку.

Прикладом найбільш поширеної економічної розрахункової моделі рівноваги є модель LİBEMOD, яка використовується для західноєвропейських ринків палива та енергії. Модель припускає, що всі ринки конкурентні. Вона враховує чотири енергетичних ресурси – вугілля, природний газ, нафту та електроенергію, які виробляються, продаються та споживаються в кожній з 13-ти ендегенних країн моделі, а саме: Австрії, Бельгії, Данії, Фінляндії, Франції, Німеччині, Великій Британії, Італії, Нідерландах, Норвегії, Іспанії, Швеції та Швейцарії. Виробництво та споживання енергії відбувається і в інших екзогенних країнах, а саме: Росії, Україні, США, Канаді, Польщі, Австралії та ін. [25].

Виробництво електроенергії відбувається за допомогою десяти різноманітних технологій, які пов'язані з використанням газу, нафти, вугілля, бурого вугілля, ГАЕС, ГЕС, АЕС, відходами, біопаливом та відновлюваних джерел енергії (ВДЕ): геотермальними, сонячними та вітровими. У кожному сезоні є шість часових періодів, які відображають різний час дня. Ефективність виробництва електроенергії варіює між підприємствами з відповідними технологіями у заданій країні. Це враховується у моделі шляхом відображення постачання енергії з кожної країни або технології, якщо є хоча б один постачальник зі зростаючими граничними витратами виробництва.

ГАЕС, ГЕС, АЕС, а також технології, пов'язані з використанням відходів, біопалива та ВДЕ, моделюються майже так само, як і технології, пов'язані з використанням викопних палив, за умови деяких додаткових обмежень.

Технології, пов'язані з використанням викопних палив, моделюють однаково. Для прикладу розглянемо технологію, пов'язану з використанням газу. Для існуючих виробничих потужностей є чотири типи витрат, які мають місце при виробництві електроенергії. Перший тип – витрати, які отримують з ціни на природний газ для споживачів та кількості природного газу, необхідного для виробництва заданої кількості електроенергії. Другий тип – інші витрати на виробництво. Припускається, що кількість цих витрат змінюється пропорційно

виробництву. Ці витрати пропорційні експлуатації потужностей в газовому секторі. Третій тип – витрати на пуск, тобто коли виробник збільшує виробництво в одному періоді по відношенню до іншого. Четвертий тип – робочі витрати.

Виробники максимізують свій дохід шляхом вибору продуктивності на кожний період та робочої потужності за умови деяких обмежень. Модель LIBEMOD також враховує постачання викопних палив, потребу в енергії, торгівлю та транспортування енергетичних ресурсів, а також викиди діоксиду сірки та діоксиду вуглецю. У версії моделі для довгострокового прогнозування враховується амортизація виробничих потужностей старих технологій та інвестиції в нові потужності.

## ВИСНОВКИ

Відмінність у математичній структурі моделювання ринку та гнучкість надають можливість для визначення основного застосування кожної низки моделей.

Оптимізаційні моделі підприємства можуть вирішувати складні та детальні задачі завдяки їхньому кращому обчислювальному трактуванню. Гарні приклади таких моделей – це ті, які належать до короткострокового гідротермального координування, яке потребує бінарних змінних та побудови оптимальної кривої пропозиції в умовах невизначеності, а також залучає ймовірнісне представлення пропозицій конкурентів та ставок попиту. Як правило, моделі керування ризиками також ґрунтуються на оптимізації з огляду на їхню складність та розмір.

Для довгострокового планування рівноважні моделі є більш придатними, оскільки враховують довші часові обмеження, мають нижчі вимоги до детальності моделювання та більш значущі характеристики всіх конкурентів.

Як і у випадку довгострокових досліджень, під час аналізу ринку електроенергії та планування ринку необхідно розглядати випуск продукції на ринок, який відбувається завдяки конкуренції між усіма учасниками ринку. Отже, моделі рівноваги та імітаційні моделі є найкращою альтернативою традиційним антимонополюським інструментам, які ґрунтуються на індексі Хіршмана–Хервіндахла та індексі Леренера.

Відносно аналізу управління перевантаженнями у мережах передачі моделі рівноваги Курно та SFE-моделі можуть розглядати обмеження потоків електроенергії та конкуренцію декількох підприємств на кожному вузлі імітаційним шляхом.

1. *Dariani A.N., Neishabour A.F., Rahimi-Kian A., Sharbafi M.A.* Designing a bidding-agent for electricity markets: a multiagent cooperative learning approach / Proceedings of the 17<sup>th</sup> World Congress. The international federation of automatic control. – Seoul, Korea, 6–11 July 2008. – 6 p.
2. *Rajamaran R., Kirsch L., Alvarado F. Clark.* Optimal self-commitment under uncertain energy and reserve prices, in, The next generation of electric power unit commitment models / Kluwer, Boston. – 2001. – P. 93–116.
3. *Cazzol M.V., Garzillo A., Innorta M.* Strategic bidding for an independent power producer in a competitive energy market with inter-alia constraints / 14<sup>th</sup> PSCC. Sevilla, 24–28 June 2002. – 6 p.
4. *Baillo A., Ventosa M., Ramos A., Rivier M., Canseco A.* Strategic unit commitment for generation companies in deregulated electricity markets, The next generation of electric power unit commitment models / Kluwer, Boston. – 2001. – P. 227–248.
5. *Anderson E.J., Philpott A.B.* Optimal offer curve construction in electricity markets / Mathematics of operations research. – 2002. – N 27 (1). – P. 82–100.
6. *Baillo A.* A methodology to develop optimal schedules and offering strategies for a generation company operating in a short-term electricity market / Ph. D. Dissertation, ICAI, Universidad Pontificia Comillas. Madrid, 2002. – 298 p.
7. *Vives X.* Oligopoly pricing: old ideas and new tools / MIT Cambridge, 2001. – 415 p.
8. *Cristian A. Diaz, Villara J., Camposa A., Reneses J.* Electricity market equilibrium based on conjectural variations / Electric power systems research. – 2010. – N 12 (80). – P. 1572–1579.
9. *Day C.J., Hobbs B.F., Pang J.S.* Oligopolistic competition in power networks: a conjectured supply function approach / IEEE transactions on power systems. – 2002. – N 17 (3). – P. 597–607.
10. *Klemperer P.D., Meyer M.A.* Supply function equilibria in oligopoly under uncertainty / Econometrica. – 1989. – N 57 (6). – P. 1243–1277.
11. *Otero-Novas I., Meseguer C., Battle C., Alba J.* A simulation model for a competitive generation market / IEEE transactions on power systems. – 2000. – N 15 (1). – P. 250–257.

12. *Barquin J., Centeno E., Reneses J.* Medium-term generation programming in competitive environments: a new optimization approach for market equilibrium computing / IEE proceedings, generation, transmission and distribution. – 2003.
13. *Bower J., Bunn D.* Model-based comparisons of pool and bilateral markets for electricity / Energy journal. – 2000. – N 21 (3). – P. 1–29.
14. *Scott T.J., Read E.G.* Modelling hydro reservoir operation in a deregulated electricity market / International transactions in operational research. – 1996. – N 3-4. – P. 243–253.
15. *Bushnell J.* Water and power: hydroelectric resources in the era of competition in the western US / Program on workable energy regulation (POWER) PWP-056. University of California Energy Institute. Berkeley, California. – 1998. – 34 p.
16. *Rivier M., Ventosa M., Ramos A.* A generation operation planning model in deregulated electricity markets based on the complementarity problem, The next generation of electric power unit commitment models / Kluwer, Boston. – 2001. – P. 273–298.
17. *Kelman R., Barroso L., Pereira M.* Market power assessment and mitigation in hydrothermal systems / IEEE transactions on power systems. – 2001. – N 16 (3). – P. 354–359.
18. *Green R.J., Newbery D.M.* Competition in the British electricity spot market / Journal of political economy. – 1992. – N 100 (5). – P. 929–953.
19. *Bolle F.* Supply function equilibria and the danger of tacit collusion / Energy economics. – 1992. – N 14. – P. 94–102.
20. *Rudkevich A., Duckworth M., Rosen R.* Modeling electricity pricing in a deregulated generation industry: the potential for oligopoly pricing in a Poolco / The energy journal. – 1998. – N 19 (3). – P. 19–48.
21. *Baldick R., Hogan W.W.* Capacity constrained supply function equilibrium models of electricity markets: stability, non-decreasing constraints, and function space iterations / Program on workable energy regulation (POWER) PWP-089. University of California, Energy Institute. Berkeley, California. – 2001.
22. *Fleten S.E., Ziemba W.T., Wallace S.W.* Hedging electricity portfolios via stochastic programming, in Decision making under uncertainty: Energy and Power / Springer, New York. – 2002. – P. 71–93.
23. *Unger G.* Hedging strategy and electricity contract engineering / Ph.D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. – 2002. – 227 p.
24. *Pereira M.V.* Methods and tools for contracts in a competitive framework / Working paper. – 1999.
25. *Aune F.R., Golombek R., Kittelsen S.A.C., Rosendahl K.E., Wolfgng O.* LIBEMOD – liberalisation model for the European energy markets: a technical description / Working paper. – 2001. – 63 p.

Надійшла до редколегії: 23.05.2011