

БОРУКАЄВ З.Х., БЛІНОВ І.В., ОСТАПЧЕНКО К.Б.,
ЧЕМЕРИС О.А., ШКАРУПИЛО В.В.

МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМ ОРГАНІЗАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОРИНКОМ



і.м. Т.С.Пухова
ІПМС
НАН України





**Борукаєв З.Х., Блінов І.В., Остапченко К.Б.,
Чемерис О.А., Шкарупило В.В.**

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ІМ. Г.Є. ПУХОВА

МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМ ОРГАНІЗАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОРИНКОМ

МОНОГРАФІЯ

За загальною редакцією Борукаєва З.Х.

Вінниця
«Європейська наукова платформа»
2022

Рецензенти:

Денисюк Сергій Петрович	доктор технічних наук, професор, директор Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Винничук Степан Дмитрович	доктор технічних наук, професор, завідувач відділу моделювання енергетичних процесів і систем Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (протокол №2 від 24 березня 2022 року), Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту електродинаміки НАН України (протокол №4 від 21 квітня 2022 року).

Борукаєв З. Х.

Б 82 Моделі та засоби автоматизації систем організаційного управління енергоринком: монографія / З. Х. Борукаєв, І. В. Блінов, К. Б. Остапченко, О. А. Чемерис, В. В. Шкарупило ; за заг. ред. З. Х. Борукаєва. — Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа», 2022. — 122 с.

ISBN 978-617-8037-82-6

DOI 10.36074/mtzasoye-monograph.2022

Монографію присвячено дослідженням розвитку спеціалізованих засобів математичного і комп'ютерного моделювання, інформаційно-технологічного забезпечення автоматизації процесів підготовки і прийняття рішень відповідними системами організаційного управління структурними елементами енергосистеми та енергоринку із розвинутими засобами змістовної обробки даних і користувацького інтерфейсу учасників конкурентного ринку електричної енергії, діючих в умовах складних взаємовідносин та потенційних ризиків. Визначаються особливості функціонування ринку електричної енергії, які вимагають вдосконалених комп'ютерних засобів моделювання, що забезпечують учасникам ринку можливість формувати та акцептувати стратегії власної поведінки на різних сегментах конкурентного ринку. Аналізуються існуючі рішення та дослідження в області створення сучасних програмних засобів моделювання, прогнозування та оптимізації функціонування енергетичних ринків у світі. Визначається напрямок розвитку таких засобів та запропоновано структурно-функціональний склад інформаційно-технологічного забезпечення, яке подається функціональними складовими процесу підготовки та прийняття рішень стосовно вироблення стратегії власної поведінки учасника ринку на його сегментах. Викладено комплексний підхід до формалізації показників функціонування характеристик ринку, що підлягають контролю у процесі оперування засобами математичного і комп'ютерного моделювання, із акцентом на програмно-алгоритмічну складову. Такий крок має на меті забезпечення механізму контролю заданих показників названих характеристик в автоматизованому режимі вже на етапі проєктування у процесі розроблення імітаційних моделей функціонування сегментів ринку електричної енергії.

Монографія призначена для наукових співробітників, спеціалістів та фахівців в галузі інформаційного обміну та функціонування ринків електричної енергії, аспірантів та студентів вищих навчальних закладів зі спеціальностей електроенергетичних систем і комплексів.

Монографія підготовлена за результатами досліджень, які виконуються за проєктами «Розроблення системи моделювання ОЕС України з великими частками обсягів виробництва електроенергії енергоблоками АЕС та енергетичними установками, що використовують ВДЕ» (шифр - МодельОЕСУ, № держ. реєстрації 0122U002122) та «Розроблення методів та засобів верифікації артефактів процесу проєктування систем критичного призначення» (шифр - Артефакт, № держ. реєстрації 0121U110615), що фінансуються за кодом програмної класифікації видатків 6541230 (прикладні дослідження).

УДК 621.31: 004.94

© Борукаєв З.Х., Блінов І.В., Остапченко К.Б., Чемерис О.А., Шкарупило В.В., 2022

© Інститут електродинаміки НАН України, 2022

© Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2022

ISBN 978-617-8037-82-6

© ГО «Європейська наукова платформа», 2022

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ	5
-------------------------	----------

ПЕРЕДМОВА	6
------------------------	----------

РОЗДІЛ 1.

ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СИСТЕМОЮ ОРГАНІЗАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОРИНКОМ. 11

1.1. Комп'ютерні моделюючі системи автоматизації процесів прийняття рішень системою організаційного управління ринком електричної енергії	12
1.2. Аналіз стану сучасних досліджень із створення систем організаційного управління ринком електроенергії	15
1.3. Напрями вдосконалення та розвитку СППР для організаційного управління ринком електричної енергії	19
1.4. Концепція створення інформаційно-технологічного забезпечення для автоматизації процесів прийняття рішень системою організаційного управління ринку	23
1.4.1. Організаційна модель інформаційно-технологічної платформи автоматизації процесів прийняття рішень	23
1.4.2. Концептуальна модель інформаційно-технологічної платформи автоматизації процесів прийняття рішень	25
1.5. Об'єктно-орієнтований підхід до створення адаптивної системи підтримки прийняття рішень	27
1.5.1. Аналіз подання процесів функціонування системи організаційного управління	27
1.5.2. Інформаційна модель предметної області системи організаційного управління	32
1.5.3. Функціональна модель інформаційно-технологічної платформи автоматизації процесів прийняття рішень	34
1.6. Організація інтерфейсу користувача системи підтримки прийняття рішень	40
1.6.1. Класифікація операцій взаємодії користувача з об'єктами предметної області СОУ	40
1.6.2. Інформаційна модель подання інтерфейсів користувача СППР	42
1.6.3. Функціональні модулі інтерфейсів користувача СППР	44
1.7. Інформаційно-моделююча система аналізу процесів ціноутворення на ринку електричної енергії	46
1.7.1. База даних інформаційно-моделюючої системи	46
1.7.2. Інтерфейси інформаційно-моделюючої системи	52

РОЗДІЛ 2.

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З УРАХУВАННЯМ МЕРЕЖЕВИХ ОБМЕЖЕНЬ ОЕС УКРАЇНИ ТА ЗА УМОВ ЇЇ ІНТЕГРАЦІЇ ДО ЗАГАЛЬНОЄВРОПЕЙСЬКОГО РИНКУ

56

2.1. Загальні методологічні підходи до системи імітаційного моделювання ринку електроенергії України	56
--	----

2.2. Вимоги до взаємодії між процесами ціноутворення при моделюванні сегментів ринку електроенергії України	60
2.3. Методичні підходи до реалізації розрахункової моделі ринку «на добу наперед» в Україні.....	64
2.4. Моделі розрахунку результатів «ринку на добу наперед» з урахуванням мережевих обмежень на потоки електричної енергії між окремими областями ринку	72
2.5. Приклад оцінки доцільності інтеграції окремої цінової зони ОЕС України до європейського ринку електричної енергії	84

РОЗДІЛ 3.

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ФОРМАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖУВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ОРГАНІЗАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ.....	93
3.1. Артефакти як форма подання процесів управління	93
3.2. Аналіз засобів формалізації процесів управління	94
3.3. Виокремлення ієрархічних рівнів.....	97
3.4. Подання спадковості артефактів.....	99
3.5. Аналіз сценаріїв оперування артефактами	100
3.5.1. Аналіз синтетичного сценарію	100
3.5.2. Аналіз прикладного сценарію.....	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	110

СКОРОЧЕННЯ

GSK	–	Generation Shift Keys
DEVS	–	Discrete Event System Specification
DMC	–	Decentralized Market Coupling
ENTSO-E	–	European Network of Transmission System Operators for Electricity
FB MC	–	Flow-base Market Coupling
TLC	–	TLA Checker
TLA	–	Temporal Logic of Actions
PTDF	–	Power Transfer Distribution Factor
TMC	–	Trilateral Market Coupling
UML	–	Unified Modeling Language
UMM	–	UN/CEFACT's Modeling Methodology
XML	–	Xtensible Markup Language
AM	–	атомарна модель
БД	–	база даних
БЕО	–	Бурштинській енергоострів
БР	–	балансуючий ринок
ВА	–	вихідний артефакт
ВДЕ	–	відновлювальні джерела енергії
ВДР	–	внутрішньодобовий ринок
ВРЧП	–	вторинне регулювання частоти та потужності
ГП	–	гарантований покупець
ДП	–	допоміжна послуга
ЄС	–	Європейський Союз
IACM	–	інформаційно-аналітична система моніторингу
ІМС	–	інформаційно-моделююча система
ІТП	–	інформаційно-технологічна платформа
НФХ	–	нефункціональна характеристика
ОЕС	–	об'єднана енергосистема України
ООМ	–	об'єктно-орієнтоване моделювання
ОСП	–	оператор системи передавання
ОСР	–	оператор системи розподілу
ПА	–	первинний артефакт
ПАС	–	програмно-алгоритмічна складова
ПР	–	проектне рішення
ПрО	–	предметна область
РА	–	результуючий артефакт
РДД	–	ринок двосторонніх договорів
РДН	–	ринок «на добу наперед»
РР	–	роздрібний ринок
СКП	–	система критичного призначення
СМ	–	складена модель
СОТС	–	складні організаційно-технічні системи
СОУ	–	система організаційного управління
СП	–	система переходів
СППР	–	система підтримки прийняття рішень
ФВ	–	формальна верифікація
ФС	–	формальна специфікація
ФХ	–	функціональна характеристика
ФЧЕ	–	функція чистого експорту

ПЕРЕДМОВА

Внаслідок впровадження в Україні нової моделі лібералізованого ринку електричної енергії, побудованого з дотриманням вимог Директиви 2009/72/ЄС (*“Directive of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity”*), склалася більш складна багаторівнева система взаємовідносин учасників на новоутворених сегментах оптового ринку – ринку двосторонніх договорів (РДД), ринку «на добу наперед» (РДН), внутрішньодобового ринку (ВДР), балансуючого ринку (БР). Але така конфігурація структури ринку надає можливість виробникам електроенергії реально конкурувати між собою, а постачальникам вільно обирати виробника електричної енергії. На роздрібному ринку (РР) також кардинально змінюється система взаємовідносин внаслідок появи нових учасників – постачальників електричної енергії, постачальників універсальних послуг, операторів системи розподілу, які займаються розподілом електричної енергії, а також відповідають за її комерційний облік. У результаті ринок працює за новими правилами, відповідно до яких тарифи на електроенергію залежать не тільки від умов роботи кінцевого споживача, а й ще від наданих умов щодо послуг постачання електричної енергії – ціни, умов оплати і обсягу продукції, що постачається. Конкуренція на цьому сегменті ринку буде залежати від стратегії надання послуг з постачання електричної енергії компаніями, які будуть мати можливість здійснювати планування, прогнозування і моделювання параметрів продукту – ціни і обсягів електричної енергії, які будуть впливати на відповідну пропозицію для кінцевого споживача.

До числа основних задач енергетичних компаній на сучасному етапі розвитку ринку електричної енергії відносять визначення основних напрямків формування стратегій і умов їх реалізації на різних сегментах ринку електроенергії, розробку методів і засобів моделювання процесів прийняття рішень при вирішенні завдань оптимізації структури продажів/купівлі електроенергії та допоміжних послуг за критеріями прибутковості і можливостей нівелювання рівня ризику прийнятих рішень. Проте, для ефективної роботи на зазначених сегментах ринку необхідний не тільки досвід, але й інструментарій – інформаційно-технологічне забезпечення у вигляді математичних моделей процесів функціонування

ринку та його сегментів, програмних засобів їх реалізації, необхідних баз даних (БД), що дозволить побудувати систему підтримки прийняття рішень (СППР) для учасників ринку, за допомогою якої і здійснювати необхідні моделюючі та прогнозні розрахунки для визначення впливу зовнішніх та внутрішніх факторів ризику на рішення, які приймаються, та пошук ефективних стратегій їх поведінки на цих сегментах.

Створення СППР такого класу на рівні енергосистем може бути центром управління взаємодією традиційних енергосистем з розподіленими та активними джерелами генерації електроенергії, кількість яких буде безперервно зростати, за допомогою якого можуть здійснюватися вирішення задач аналізу взаємного впливу розвитку різних типів генеруючих потужностей на забезпечення безперебійного електропостачання споживачів, з метою запобігання ситуаціям з перевантаженнями електромереж, а також прогнозування обсягів електроспоживання індивідуальними активними енергоспоживачами, вибору оптимального варіанту економічного енергоспоживання.

Актуальність створення подібних СППР обумовлена необхідністю впровадження нових інструментів управління розподіленими енергосистемами відповідно до концепції Smart Grid, та таких, що відповідають новим стандартам та вимогам енерговиробництва та енергоспоживання у країнах Євросоюзу: збільшення використання відновлюваних джерел енергії, зменшення викидів вуглекислого газу в атмосферу, підвищення енергоефективності енергоспоживання, підвищення ефективності використання пропускної спроможності електричних мереж.

Аналогічно можуть бути розроблені СППР, які призначені для операторів електромереж, учасників енергоринку, зокрема виробників, постачальників та споживачів електроенергії.

Вирішення тільки цих задач, обумовлює необхідність створення спеціалізованих засобів математичного і комп'ютерного моделювання, інформаційно-технологічного забезпечення автоматизації процесу підготовки і прийняття рішень відповідними системами організаційного управління (СОУ) учасників ринку на всіх його етапах.

Отже, актуальною продовжує залишатися проблема розвитку інформаційно-технологічних засобів розроблення СППР із розвинутими засобами змістовного опрацювання даних і користувацького інтерфейсу за допомогою застосування сучасних інформаційних технологій, розроблення і

формування необхідних БД та баз знань, які характеризують стан показників функціонування об'єкту управління та змін його зовнішнього середовища, у тому числі і зміни цін на ринках енергоносіїв. Окремим та дуже важливим завданням стає розроблення бази імітаційних моделей ринку електроенергії та його сегментів задля вирішення розрахункових задач аналізу та прогнозу змін показників функціонування ринку та управління ними.

У науковій літературі представлено чимало праць, присвячених дослідженням проблем математичного моделювання ринку електроенергії та його сегментів, автоматизації процесів прийняття рішень у системі його організаційного управління. Відмінна риса запропонованої монографії полягає в тому, що в ній розглядається комплекс взаємопов'язаних підходів до побудови СППР на основі застосування сучасних засобів інформаційно-технологічного забезпечення для створення сховища даних процесів функціонування ринку електроенергії, побудови бази імітаційних моделей сегментів ринку, формування бази знань на основі застосування єдиного підходу до формалізації досліджуваних процесів управління для застосування у функціонально-орієнтованій інформаційно-моделюючій системі як складової СППР при розв'язанні комплексу розрахункових задач з алгоритмічного моделювання процесів аналізу та прогнозування стану ринку електроенергії та його сегментів.

У розділі 1, авторами якого є Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., виходячи з аналізу особливостей механізмів організаційного управління енергоринком, зазначено, що, для автоматизації процесів організаційного управління на ринку електричної енергії, слід розглядати СППР як об'єктно-орієнтовану ієрархічну інтегровану систему. У результаті зазначеного, істотної ролі для вирішення проблеми об'єктного моделювання даних предметної області організаційного управління набуває функціональне моделювання технологічних процесів як опрацювання даних, так і формування моделі вирішення прикладної проблеми управління з метою уніфікації програмного інтерфейсу єдиної інтегрованої системи через типізацію-класифікацію операцій взаємодії особи, що приймає рішення з об'єктами-структурами даних предметної області СОУ.

Розглянуто питання побудови інформаційно-моделюючої системи (ІМС) у складі СОУ ринком електричної енергії, яка повинна стати гнучким інформаційно-технологічним інструментом комплексного прогнозу та аналізу наслідків діяльності учасників конкурентного ринку електричної енергії, що призведе до наступного еволюційного кроку у розвитку взаємовідносин на

його сегментах та ринку в цілому.

Розглянуто питання створення сховища даних процесів функціонування ринку електричної енергії яке призначене для збору, накопичення та візуалізації інформації про показники функціонування ринку та його учасників. Застосовується у функціонально-орієнтованій ІМС як складової СППР при розв'язанні комплексу розрахункових задач аналізу процесів функціонування учасників ринку електричної енергії, здійснення аналізу та прогнозування їх поведінки на ринку. Визначаються принципи моделювання процесів функціонування ринку електричної енергії, формуються вимоги до її БД. Наведено опис концептуальної моделі подання процесів функціонування ринку та результати проектування інформаційної логічної моделі БД. В наслідок перетворення інформаційної логічної моделі можливе створення фізичної структури об'єктно-реляційної БД процесів функціонування ринку електричної енергії, адаптованої до можливих змін у моделі його функціонування.

У розділі 2, написаному Бліновим І.В., наведено окремі складові концепції та загальні методологічні підходи до системи імітаційного моделювання ринку електроенергії України, що має поєднувати підсистеми моделювання ринку РДН, моделювання сполучення ринку електричної енергії України та країн Європи, підсистему визначення обсягів та вартісних показників надання допоміжних послуг для регулювання режимів роботи, підсистеми моделювання балансуючого ринку електричної енергії. Значної уваги приділено методичним підходам до реалізації розрахункової моделі РДН в Україні, зокрема із урахуванням мережевих обмежень на потоки електроенергії між окремими областями ринку електричної енергії. Визначені принципи за якими має бути побудована імітаційна модель процесів ціноутворення на ринку електричної енергії України, визначені вимоги до взаємодії між процесами ціноутворення під час моделювання сегментів ринку електричної енергії України, функції формування зазначеної імітаційної моделі та складових її інформаційної архітектури.

Розглянуто моделі ціноутворення сполучуваних ринків електричної енергії, з урахуванням різних відношень між попитом та пропозицією, а також запропоновано математичний апарат моделі ціноутворення в сегменті РДН, з урахуванням мережевих обмежень та впливу зовнішніх факторів, зокрема цін та обсягів щодо купівлі-продажу електричної енергії в сусідніх європейських країнах, реалізація якого дозволяє підвищити рівень адекватності імітаційних моделей ринку електроенергії України, зокрема –

сегменту РДН. Наведено приклад оцінки доцільності інтеграції окремої цінової зони української енергосистеми до європейського ринку електричної енергії.

У розділі 3, підготовленому Чемерисом О.А., Шкарупилом В.В., викладено комплексний підхід до формалізації показників змін показників функціонування ринку – функціональних (ФХ) і нефункціональних характеристик (НФХ), що підлягають контролю у процесі оперування названими моделями, із акцентом на програмно-алгоритмічну складову. Такий крок має на меті забезпечення механізму контролю заданих показників названих характеристик в автоматизованому режимі вже на етапі проєктування процесу розроблення моделей функціонування ринку та його сегментів. Цей крок набуває особливо вагомого значення саме у контексті критичності сценаріїв застосування названих вище організаційних систем і їх складових. З урахуванням поточної ситуації у Державі, критичність питання передбачуваності функціонування організаційних систем, що забезпечують протікання процесів та мають місце на сучасному конкурентному ринку електричної енергії, не викликає сумнівів.

Запропонований підхід побудовано згідно концепції багатовимірної верифікації, у відповідності до якої контролю підлягають показники як ФХ, так і НФХ. Зазначені моделі функціонування ринку електричної енергії адресуються як артефакти – сутності, якими оперуємо на етапі проєктування процесу розроблення, і які характеризуються архітектурою (структурою та зв'язками) і змістом. Названі артефакти при цьому розглядаються як графічні подання відповідних програмно-алгоритмічних складових (ПАС) систем, що забезпечують протікання процесів ринку електричної енергії.

Згідно представленого підходу, на основі зазначених артефактів синтезуються похідні артефакти – формалізовані подання, що уможливають здійснення автоматизованого контролю заданих показників і ФХ, і НФХ. У якості показника ФХ розглядається несуперечність ПАС. Як показник НФХ адресуються часові витрати на реалізацію дій, визначених ПАС. При цьому охоплюються як синтетичний, так і прикладний сценарії демонстрації викладеного підходу.

**Доступ до повного тексту видання в електронному
вигляді закрито з ініціативи авторів.**

Друковані примірники можна знайти тут:

- **Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського
(м. Київ, вул. Голосіївська, 3)**
- **Національна бібліотека України імені Ярослава Мудрого
(м. Київ, вул. Грушевського Михайла, 1)**

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

БОРУКАЄВ Зелімхан Харитонович
БЛІНОВ Ігор Вікторович
ОСТАПЧЕНКО Костянтин Борисович
ЧЕМЕРИС Олександр Анатолійович
ШКАРУПИЛО Вадим Вікторович

**МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ
СИСТЕМ ОРГАНІЗАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ
ЕНЕРГОРИНКОМ**

МОНОГРАФІЯ

*Редакція: Борукаєв З.Х.
Верстка: Зрада С.І.
Дизайн: Бондаренко І.В.*

Підписано до друку 25.04.2022. Формат 60×84/16.
Умовно-друк. арк. 7,09. Тираж: 100 примірників.
Замовлення № 30208. Цифровий друк.
Папір офсетний. Гарнітура Franklin Gothic Book.

Віддруковано з готового оригінал-макету.

Видавець: ГО «Європейська наукова платформа»
21037, Україна, м. Вінниця, вул. Зодчих, 18, офіс 81
Телефони: +38 098 1948380; +38 098 1956755 | E-mail: info@ukrlogos.in.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 7172 від 21.10.2020 р.

Виготовлювач друкованої продукції: Друкарня ФОП Гуляєва В.М.
08700, Україна, м. Обухів, вул. Малишка, 5. E-mail: 5894939@gmail.com
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 6205 від 30.05.2018 р.