ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ

DOI
УДК 004.94:519.86:621.311

О.О. Гавва, аспірант
e-mail: havva.oleksandr@gmail.com; orcid.org/0009-0008-4921-0486
В.А. Євдокімов, д-р техн. наук
e-mail: ievdokimov40@gmail.com; orcid.org/0000-0001-9497-4030
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
Україна, 03164, Київ, вул. Олега Мудрака, 15

Алгоритм визначення стратегії цінового арбітражу установок зберігання енергії на ринку «на добу наперед»

Розв'язано актуальну задачу довгострокового планування участі оператора установок зберігання енергії (УЗЕ) на ринку на добу наперед (РДН). Розроблено типові цикли арбітражу, що можуть бути реалізовані на РДН України. Показано, що задача формування оптимальної стратегії участі оператора УЗЕ на РДН зводиться до пошуку типових циклів арбітражу, які задовольняють вимогам рентабельності. Для зниження обчислювальної складності задачі довгострокового планування запропоновано алгоритм на основі операцій над множинами (реляційної алгебри). Такий підхід дозволив уніфікувати процедури пошуку оптимальних режимів експлуатації УЗЕ та достатньо просто реалізується в сучасних інформаційних системах на основі реляційних баз даних за допомогою SQL-команд. Обмеження рівня деталізації технологічних процесів УЗЕ є виправданим компромісом в умовах низької точності довгострокових прогнозів ринкової кон'юнктури.

К л ю ч о в і с л о в а: імітаційне моделювання, алгоритм оптимізації, установка зберігання енергії, ціновий арбітраж, ринок «на добу наперед».

Стрімке зростання частки відновлюваних джерел енергії, децентралізація генерації та підвищення вимог до гнучкості електроенергетичних систем зумовлюють активне впровадження установок зберігання енергії (УЗЕ) як одного з ключових елементів сучасної енергетичної інфраструктури. УЗЕ забезпечують можливість накопичення надлишкової електроенергії у періоди її низької вартості та подальшого використання або продажу у години дефіциту, що сприяє підвищенню ефективності функціонування ринку електричної енергії та покращенню режимної надійності енергосистеми.

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Для України роль УЗЕ додатково посилюється через високу волатильність цінових сигналів ринку електричної енергії, яка формується під впливом нерівномірності навантаження, розвитку відновлюваної генерації, обмежень мережевої інфраструктури та наслідків воєнних пошкоджень енергетичних об'єктів. У таких умовах одним із найбільш перспективних напрямів комерційного використання УЗЕ є реалізація стратегій цінового арбітражу [1] на ринку «на добу наперед» (РДН) [2], що передбачає купівлю електричної енергії в періоди низьких цін та її продаж у години максимальних цінових значень.

Ефективність цінового арбітражу безпосередньо залежить від здатності оператора УЗЕ своєчасно визначати економічно доцільні інтервали заряджання та розряджання накопичувача. Водночас пошук оптимальних режимів роботи повинен враховувати не лише прогнозовані ринкові ціни, а й технічні обмеження установки, зокрема доступну ємність, потужність заряджання та розряджання, коефіцієнт корисної дії та вимоги щодо забезпечення енергетичного балансу [3].

Задачі оптимізації режимів роботи учасників ринку електричної енергії широко досліджуються у науковій літературі. Значна кількість робіт присвячена оптимальному плануванню графіків генерації, управлінню енергетичними ресурсами та формуванню торгових стратегій у різних сегментах ринку електричної енергії [4]. Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням УЗЕ у складі балансуючих груп [5], локальних енергетичних систем та мікромереж [6, 7], де накопичувачі розглядаються як інструмент підвищення надійності електропостачання та інтеграції відновлюваних джерел енергії.

Значна частина наукових досліджень у сфері моделювання режимів експлуатації УЗЕ зосереджується на деталізації технологічних чинників. Хоча це підвищує точність моделювання, такий підхід ускладнює моделі та збільшує вимоги до обчислювальних ресурсів. Натомість у задачах довгострокового планування (на місяці, сезони, рік), коли адекватність моделі обмежується об'єктивно низькою точністю довгострокових прогнозів ринкової кон'юнктури, виникає потреба у пошуку раціонального компромісу між точністю результатів та обчислювальною складністю [8]. У запропонованій роботі рівень деталізації технологічних процесів УЗЕ свідомо обмежено найбільш важливими чинниками, врахування яких залишається доцільним в умовах цінової невизначеності. Крім того, на відміну від класичних імперативних конструкцій (типу «if-else»), які часто є громіздкими при обробці великих масивів даних, використання заздалегідь розроблених типових циклів арбітражу та математичного апарату операцій над множинами (реляційної алгебри) дозволило уніфікувати

процедури пошуку оптимальних графіків участі оператора УЗЕ на РДН. Такий алгоритм природно і просто реалізується у сучасних інформаційних системах на основі реляційних баз даних з інтерфейсом SQL-команд.

Метою статті є розробка алгоритму довгострокового планування стратегії цінового арбітражу для оператора УЗЕ на ринку на добу наперед шляхом визначення типових циклів арбітражу та застосування операцій реляційної алгебри для уніфікації пошуку оптимальних рішень.

Математична постановка задачі. До вхідних даних моделі, якими визначаються умови функціонування РДН, віднесені: вектор прогнозованих погодинних ринкових цін $C_t \in C\ (t)\ \forall t \in D = [1..24]$ (₴/МВт·год), а також мінімальна маржа від експлуатації УЗЕ з реалізацією процедур купівлі/продажу електроенергії у сегменті РДН C_{marg} (₴/МВт·год). Задачі прогнозування ринкових цін та оцінки якості прогнозів винесені за межі алгоритму. Технічні характеристики УЗЕ враховані такими вхідними даними: актуальною робочою ємністю (ємність, доступна для реалізації цінового арбітражу) W_{work} (МВт · год), максимальними значеннями потужностей заряджання $P_{\max}^{\text{ch}}$ і розряджання $P_{\max}^{\text{dch}}$ (МВт), а також ефективністю зберігання енергії η_{dis}.

Для зв'язку між імітацією режимів УЗЕ та участю оператора УЗЕ на РДН обсяги заряджання ототожнені з обсягами купівлі електроенергії, а обсяги розряджання — з обсягами продажу електроенергії.

Ціль оптимізації — максимізація вигоди від цінового арбітражу на добовому горизонті планування D:

$$Max\ (F_{\text{arb}}) = \sum_{t \in D} \left(C_t P_t^{\text{dch}} \Delta t \right) - \sum_{t \in D} \left(C_t P_t^{\text{ch}} \Delta t \right),$$

де P_t^{ch}, P_t^{dch} — ендогенні змінні, потужності відповідно заряджання та розряджання УЗЕ у розрахункову годину t; Δt — інтервал часової дискретизації 1 година.

Технічні обмеження режимів заряджання і розряджання УЗЕ враховані системою обмежень:

$$0 \le P_t^{\text{ch}} \le P_{\max}^{\text{ch}},\ 0 \le P_t^{\text{dch}} \le P_{\max}^{\text{dch}},\ \forall t \in D.$$

Умова балансу енергії в УЗЕ на добовому D горизонті планування передбачає реалізацію циклу заряджання/розряджання:

$$\sum_{t \in D} \left(C_t P_t^{\text{dch}} \Delta t \right) = \sum_{t \in D} \left(C_t P_t^{\text{ch}} \eta_{\text{dis}} \Delta t \right).$$

Стан накопичення енергії в УЗЕ для кожного розрахункового періоду t спрощено імітує симетричні втрати енергії для режимів заряджання та розряджання:

$$W_t = P_t^{\text{ch}}\Delta t - P_t^{\text{dch}}\Delta t - \frac{\left(1-\eta_{\text{dis}}\right)}{2}\left(P_t^{\text{ch}}\Delta t + P_t^{\text{dch}}\Delta t\right),\ \forall t \in D.$$

Система обмежень для контролю стану накопичення на горизонті планування має вигляд:

$$0 \le W_t \le W_{\text{work}},\ \forall t \in D.$$

Обмеження економічної доцільності виконання цінового арбітражу на горизонті планування D:

$$\sum_{t\in D}\left(\left(C_t - C_{\text{mrg}}\right)P_t^{\text{dch}}\Delta t\right) - \sum_{t\in D}\left(C_t P_t^{\text{ch}}\eta_{\text{dis}}\Delta t\right) \ge 0.$$

За результатами оптимізації $Max\,(F_{\text{arb}})$ формуються графіки обсягів купівлі $P_t^{\text{ch}}\Delta t$ та продажу $P_t^{\text{dch}}\Delta t$ електроенергії на горизонті планування $t \in D$.

Сценарії оптимальної експлуатації УЗЕ. Оптимальні режими експлуатації УЗЕ базуються на купівлі електроенергії за мінімальними цінами та її продажу за максимальними. Фактичні обсяги арбітражу на ринку РДН суворо обмежуються технічними параметрами УЗЕ (робочою ємністю, потужністю, ККД). При цьому аналіз цінової кон'юнктури РДН України виявив стабільні добові тренди: максимуми вартості традиційно фіксуються у вечірні (20:00—23:00) та ранкові (07:00—09:00) години, а мінімуми — вночі та вдень (через профіцит генерації СЕС, що особливо характерно для літнього сезону).

На рис. 1 наведено типовий графік погодинних цін РДН літнього сезону (на прикладі 02.06.2025) та відповідні режими роботи УЗЕ, де додатні значення потужності відповідають розряджанню (продажу), а від'ємні — заряджанню (купівлі).

Найвищі ціни (з 21-ї по 23-тю годину) та найнижчі (з 12-ї по 14-ту) формують найбільш ефективний цикл цінового арбітражу, який надалі називатимемо опорним циклом.

Різниця між нічним мінімумом цін (03:00—05:00) та ранковим сплеском (07:00—08:00) дозволяє реалізувати додатковий цикл. Він не залежить від опорного, а його впровадження обґрунтовується досягненням окремої позитивної маржі для оператора УЗЕ.

Специфіка зовнішніх ринкових умов може генерувати ще один тимчасовий цикл безпосередньо в межах опорного (на рис. 1 це розряджання о 15:00—16:00 із наступним заряджанням о 17:00). Такий режим називатимемо вкладеним циклом. Він розглядається виключно як технологічне розширення опорного циклу. Головна умова його імплементації — загальне збільшення сумарної вигоди порівняно з реалізацією лише опорного циклу та гарантоване відновлення заряду УЗЕ, необхідного для вечірнього максимуму.

Взимку вплив генерації СЕС мінімальний, тому найнижчі ціни спостерігаються суто вночі, а найвищі — у години ранкового та вечірнього максимумів ОЕС України. Відповідно, опорний цикл оптимальних режимів експлуатації базується на нічному заряджанні. Залежно від вибору екстремуму для розряджання виокремлюють два базові сценарії:

Сценарій ранкового розряджання (рис. 2). Пріоритетом опорного циклу є ранковий максимум цін. Це створює технологічну можливість реалізації додаткового циклу (заряджання вдень, розряджання ввечері) за умови підтвердження його окремої економічної доцільності.

Сценарій вечірнього розряджання (рис. 3). Опорний цикл орієнтований на вечірній максимум цін. За таких умов можлива імплементація вкладеного циклу (розряджання вранці, заряджання вдень), якщо це сумарно збільшує загальну вигоду арбітражу.

У перехідні сезони (весняний, осінній) оптимальний графік експлуатації УЗЕ формується аналогічно — шляхом комбінування розглянутих структурних елементів: опорного, вкладеного та додаткового циклів.

Алгоритмічний пошук оптимальної стратегії участі оператора УЗЕ на РДН зводиться до трьох послідовних кроків:

1) оцінка економічної доцільності реалізації типових циклів (опорного, вкладеного, додаткового) на основі актуальних цінових трендів;

2) формування часових інтервалів активних режимів заряджання/розряджання;

3) розрахунок допустимих обсягів купівлі/продажу з урахуванням технічних обмежень установки.

Отримані результуючі графіки купівлі та продажу електроенергії є еквівалентними оптимальним технічним режимам експлуатації УЗЕ на добовому горизонті планування.

Алгоритм пошуку оптимальних сценаріїв експлуатації УЗЕ. Для пошуку оптимальних розв'язків використовується таблиця з кортежами сценарних оцінок: $M\left\langle n,\ N_n^{\text{beg}},\ N_n^{\text{end}},\ Dif_n,\ C_n^{\min},\ C_n^{\max},\ C_n^{\text{av}}\right\rangle$, яка створюється та заповнюється до початку процедури пошуку оптимального

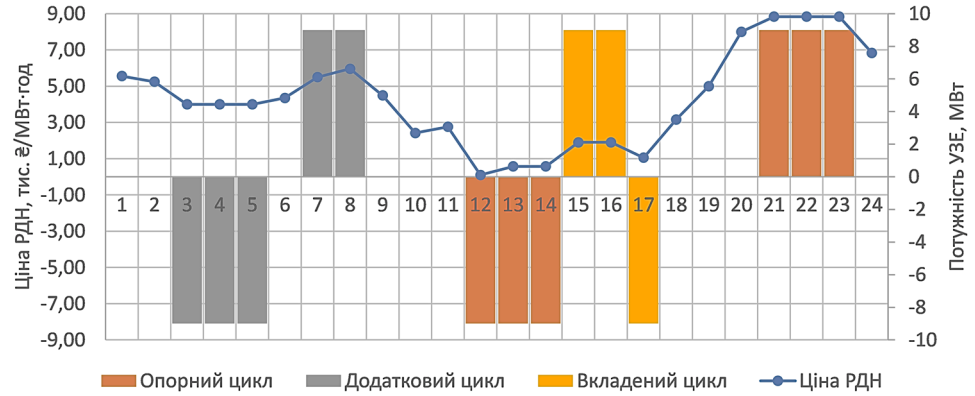


Рис. 1. Перспективні цикли заряджання/розряджання УЗЕ за цінами РДН на 2.06.2025

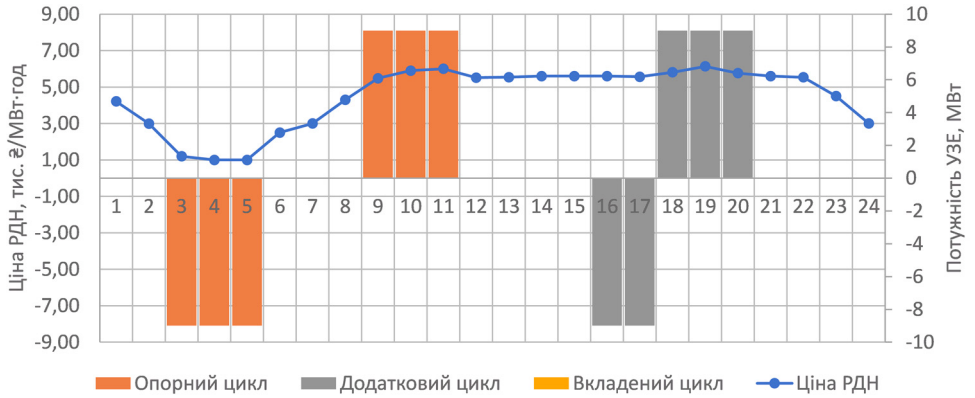


Рис. 2. Перспективні цикли заряджання/розряджання УЗЕ за цінами РДН на 26.12.2025 (опорний цикл з розряджанням вранці)

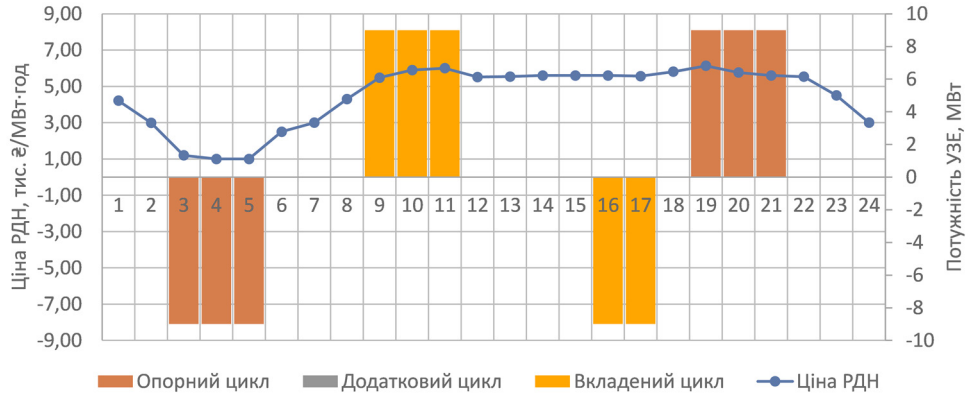


Рис. 3. Перспективні цикли заряджання/розряджання УЗЕ за цінами РДН на 26.12.2025 (опорний цикл з розряджанням увечері)

розв'язку. Значення полів кожного кортежу розраховуються за формулами:

$$\begin{cases} n=[1..300];\ N_n^{\text{beg}} \in [1..24];\ N_n^{\text{end}} \in \left[N_n^{\text{beg}}..24 \right];\ Dif_n = N_n^{\text{end}} - N_n^{\text{beg}} + 1; \\ C_n^{\min} = \min\left(C_t\right),\ C_n^{\max} = \max\left(C_t\right) \forall N_n^{\text{beg}} \le t \le N_n^{\text{end}};\ C_n^{\text{av}} = \dfrac{1}{Dif_n} \sum\limits_{t=N_n^{\text{beg}}}^{N_n^{\text{end}}} C_t \end{cases}$$

Запропоновано алгоритм пошуку оптимальних розрахункових періодів роботи УЗЕ, який складається з чотирьох модулів: ініціалізація даних, пошук опорного циклу, оцінка доцільності реалізації додаткового і вкладеного циклів, а також розрахунок технічно допустимих обсягів заряджання/розряджання УЗЕ.

Для формалізації процедур пошуку в алгоритмі використано операції над множинами, що відповідають базовим операціям реляційної алгебри. З метою спрощення математичного опису алгоритму зазначені операції подано із застосуванням операторів математичної логіки та теоретико-множинної нотації. При програмній реалізації алгоритму відповідні операції мають бути інтерпретовані нотацією мов запитів реляційних СУБД (SQL) або еквівалентними конструкціями мов програмування загального призначення, зокрема Python.

Модуль 1. Ініціалізація та попередня підготовка часових рядів:

К р о к 1.1. Створюється та заповнюється таблиця кортежних оцінок $M\langle\ \rangle$.

К р о к 1.2. Створюються пермутації таблиці кортежів $M\langle\ \rangle$ із сортуванням за атрибутом C_n^{av} окремо у порядку зростання і спадання:

$$\begin{cases} M^{\text{R+}}\langle\ \rangle = sort_{\left(C_n^{\text{av}}\right)}\left(M\langle\ \rangle\right) : M_n^{\text{R+}} \succ M_{n+1}^{\text{R+}} \because C_n^{\text{av}} < C_{n+1}^{\text{av}} \\ M^{\text{R-}}\langle\ \rangle = sort_{\left(C_n^{\text{av}}\right)}\left(M\langle\ \rangle\right) : M_n^{\text{R-}} \succ M_{n+1}^{\text{R-}} \because C_n^{\text{av}} > C_{n+1}^{\text{av}} \end{cases}.$$

Модуль 2. Пошук опорного циклу:

К р о к 2.1. Створюється відображення таблиці кортежів з допустимими сценаріями та новим розрахунковим полем *dC*:

$$M^{\text{Ref}}\langle\ \rangle = CROS_JOIN\left(M^{\text{R-}}\langle\ \rangle, M^{\text{R+}}\langle\ \rangle\right):$$

$$dC = \left(M_n^{\text{R-}}\langle\ \rangle.C_n^{\text{av}} - M_n^{\text{R+}}\langle\ \rangle.C_n^{\text{av}}\right) \ge C_{\text{marg}};\ M_n^{\text{R-}}\langle\ \rangle.N_n^{\text{beg}} > M_n^{\text{R+}}\langle\ \rangle.N_n^{\text{end}},$$

де SQL-оператор *CROSS_JOIN* створює декартовий добуток двох таблиць.

К р о к 2.2. Якщо отримане відображення має порожню множину записів $M^{\text{Ref}}\langle\ \rangle = \varnothing$, то вхідна множина цінових сигналів не забезпечує рентабельну експлуатацію УЗЕ протягом доби. Процедура планування припиняється (перехід у кінець алгоритму на Крок END).

К р о к 2.3. Виконується сортування таблиці кортежів з оптимальними опорними сценаріями у порядку спадання значення поля *dC*:

$$M^{\text{Ref*}}\langle\ \rangle = sort_{(dC_n)}\left(M^{\text{Ref}}\langle\ \rangle\right) : M_n^{\text{Ref*}} \succ M_{n+1}^{\text{Ref*}} \therefore M_n^{\text{Ref*}}.dC_n > M_{n+1}^{\text{Ref*}}.dC_{n+1}.$$

К р о к 2.4. Як опорний план обирається перший запис отриманої множини:

$$M^{\text{оп}}\langle\ \rangle \equiv first\left(M^{\text{Ref*}}\langle\ \rangle\right).$$

Модуль 3. Оцінка доцільності реалізації додаткового циклу до початку опорного циклу:

К р о к 3.1. Створюється відображення таблиці кортежів з допустимими сценаріями та новим розрахунковим полем *dC*:

$$M^{\text{Ref}}\langle\ \rangle = CROS_JOIN\left(M^{\text{R}-}\langle\ \rangle, M^{\text{R}+}\langle\ \rangle\right) : dC =$$

$$= \left(M_n^{\text{R}-}\langle\ \rangle.C_n^{\text{av}} - M_n^{\text{R}+}\langle\ \rangle.C_n^{\text{av}}\right) \geq C_{\text{marg}};$$

$$M_n^{\text{R}-}\langle\ \rangle.N_n^{\text{beg}} > M_n^{\text{R}+}\langle\ \rangle.N_n^{\text{end}} \vee M_n^{\text{R}-}\langle\ \rangle.N_n^{\text{end}} < M_n^{\text{оп}}\langle\ \rangle.M_n^{\text{R}+}\langle\ \rangle.N_n^{\text{beg}}.$$

У порівнянні із кроком 2.1 (створення відображення для пошуку опорного циклу) на кроці 3.1 додано умову завершення додаткового циклу до початку реалізації опорного циклу.

К р о к 3.2. Якщо отримане відображення має порожню множину записів $M^{\text{Ref}}\langle\ \rangle = \varnothing$, то вхідна множина цінових сигналів не забезпечує рентабельність додаткового циклу до початку опорного циклу. Процедура планування додаткового циклу припиняється (перехід у кінець Модуля 3 на Крок 3.5).

К р о к 3.3. Виконується сортування таблиці кортежів з оптимальними додатковими сценаріями у порядку спадання значення поля *dC*:

$$M^{\text{Ref*}}\langle\ \rangle = sort_{(dC_n)}\left(M^{\text{Ref}}\langle\ \rangle\right) : M_n^{\text{Ref*}} \succ M_{n+1}^{\text{Ref*}} \therefore M_n^{\text{Ref*}}.dC_n > M_{n+1}^{\text{Ref*}}.dC_{n+1}.$$

К р о к 3.4. Як додатковий цикл до початку опорного обирається перший запис отриманої множини:

$$M^{\text{дод1}}\langle\ \rangle \equiv first\left(M^{\text{Ref*}}\langle\ \rangle\right).$$

К р о к 3.5. Кінець Модуля 3.

Модуль 4. Оцінка доцільності реалізації додаткового циклу після завершення опорного циклу:

К р о к 4.1. Створюється відображення таблиці кортежів з допустимими сценаріями та новим розрахунковим полем *dC*:

$$M^{\text{Ref}}\langle\ \rangle = CROS_JOIN\left(M^{\text{R}-}\langle\ \rangle, M^{\text{R}+}\langle\ \rangle\right): dC =$$
$$= \left(M_n^{\text{R}-}\langle\ \rangle.C_n^{\text{av}} - M_n^{\text{R}+}\langle\ \rangle.C_n^{\text{av}}\right) \geq C_{\text{marg}};$$
$$M_n^{\text{R}-}\langle\ \rangle.N_n^{\text{beg}} > M_n^{\text{R}+}\langle\ \rangle.N_n^{\text{end}} \vee M_n^{\text{R}+}\langle\ \rangle.N_n^{\text{beg}} > M_n^{\text{оп}}\langle\ \rangle.M_n^{\text{R}-}\langle\ \rangle.N_n^{\text{end}}.$$

У порівнянні із кроком 2.1 (створення відображення для пошуку опорного циклу) на кроці 4.1 додано умову початку додаткового циклу після завершення опорного циклу.

К р о к 4.2. Якщо отримане відображення має порожню множину записів $M^{\text{Ref}}\langle\ \rangle = \varnothing$, то вхідна множина цінових сигналів не забезпечує рентабельність додаткового циклу до початку опорного циклу. Процедура планування додаткового циклу припиняється (перехід у кінець Модуля 4 на Крок 4.5).

К р о к 4.3. Виконується сортування таблиці кортежів з оптимальними додатковими сценаріями у порядку спадання значення поля *dC*:

$$M^{\text{Ref*}}\langle\ \rangle = sort_{(dC_n)}\left(M^{\text{Ref}}\langle\ \rangle\right): M_n^{\text{Ref*}} \succ M_{n+1}^{\text{Ref*}} \because M_n^{\text{Ref*}}.dC_n > M_{n+1}^{\text{Ref*}}.dC_{n+1}.$$

К р о к 4.4. Як додатковий цикл після завершення опорного обирається перший запис отриманої множини:

$$M^{\text{дод2}}\langle\ \rangle \equiv first\left(M^{\text{Ref*}}\langle\ \rangle\right).$$

К р о к 4.5. Кінець Модуля 4.

Модуль 5. Оцінка доцільності реалізації вкладеного циклу:

К р о к 5.1. Створюється відображення таблиці кортежів з допустимими сценаріями та новим розрахунковим полем *dC*:

$$M^{\text{Ref}}\langle\ \rangle = CROS_JOIN\left(M^{\text{R}-}\langle\ \rangle, M^{\text{R}+}\langle\ \rangle\right): dC =$$
$$= \left(M_n^{\text{R}-}\langle\ \rangle.C_n^{\text{av}} - M_n^{\text{R}+}\langle\ \rangle.C_n^{\text{av}}\right) \geq C_{\text{marg}};$$
$$M_n^{\text{R}+}\langle\ \rangle.N_n^{\text{beg}} > M_n^{\text{R}-}\langle\ \rangle.N_n^{\text{end}} \vee M_n^{\text{R}-}\langle\ \rangle.N_n^{\text{beg}} > M_n^{\text{оп}}\langle\ \rangle.M_n^{\text{R}+}\langle\ \rangle.N_n^{\text{end}}$$
$$\vee M_n^{\text{R}+}\langle\ \rangle.N_n^{\text{end}} < M_n^{\text{оп}}\langle\ \rangle.M_n^{\text{R}-}\langle\ \rangle.N_n^{\text{beg}}.$$

У порівнянні із кроком 2.1 (створення відображення для пошуку опорного циклу) на кроці 5.1 додано умови початку вкладеного циклу після завершення режиму заряджання опорного циклу, а також завершення вкладеного циклу до початку режиму розряджання опорного циклу.

К р о к 5.2. Якщо отримане відображення має порожню множину записів $M^{\text{Ref}}\langle\ \rangle = \varnothing$, то вхідна множина цінових сигналів не забезпечує рентабельність вкладеного циклу усередині опорного циклу. Процедура

планування вкладеного циклу припиняється (перехід у кінець Модуля 5 на Крок 5.5).

К р о к 5.3. Виконується сортування таблиці кортежів з оптимальними сценаріями вкладених циклів у порядку спадання значення поля *dC*:

$$M^{\text{Ref*}}\langle\ \rangle = sort_{(dC_n)}\left(M^{\text{Ref}}\langle\ \rangle\right) : M_n^{\text{Ref*}} \succ M_{n+1}^{\text{Ref*}} \because M_n^{\text{Ref*}}.dC_n > M_{n+1}^{\text{Ref*}}.dC_{n+1}.$$

К р о к 5.4. Як вкладений цикл після завершення опорного обирається перший запис отриманої множини:

$$M^{\text{дод2}}\langle\ \rangle \equiv first\left(M^{\text{Ref*}}\langle\ \rangle\right).$$

К р о к 5.5. Кінець Модуля 5.

Модуль 6. Розрахунок енергії заряджання та розряджання УЗЕ.

Розрахунок обсягів заряджання/розряджання УЗЕ виконується послідовним узгодженням за умовою балансу енергії та крайовими умовами допустимих режимів установки. Для опорного циклу попереднє значення потужності заряджання узгоджується із технічними можливостями УЗЕ накопичити енергію за заданий інтервал часу:

$$P_{\text{оп}}^{\text{ch*}} = \min\left(\frac{W_{\text{work}}^{\text{УЗЕ}}}{M^{\text{оп}}\langle\ \rangle.M^{\text{R+}}\langle\ \rangle.Dif_n}, P_{\text{max}}^{\text{ch}}\right).$$

Потужність розряджання для опорного циклу узгоджується з умовою балансу енергії та технічними можливостями УЗЕ здійснити відпуск накопиченої енергії за заданий інтервал часу:

$$P_{\text{оп}}^{\text{dch}} = \min\left(\eta_{\text{dis}}\frac{W_{\text{work}}^{\text{УЗЕ}}}{M^{\text{оп}}\langle\ \rangle.M^{\text{R}-}\langle\ \rangle.Dif_n}, \eta_{\text{dis}}P_{\text{оп}}^{\text{ch*}}, P_{\text{max}}^{\text{dch}}\right).$$

Значення потужності заряджання для опорного циклу, скориговане за крайовими умовами допустимих режимів експлуатації УЗЕ та умовою балансу енергії:

$$P_{\text{оп}}^{\text{ch}} = \frac{P_{\text{оп}}^{\text{dch}}M^{\text{оп}}\langle\ \rangle.M^{\text{R}-}\langle\ \rangle.Dif_n}{\eta_{\text{dis}}M^{\text{оп}}\langle\ \rangle.M^{\text{R+}}\langle\ \rangle.Dif_n}.$$

Потужності заряджання та розряджання для додаткових циклів арбітражу розраховуються аналогічно:

$$\left[\begin{array}{l} P^{\text{ch*}}_{\text{дод1}} = \min\left(\dfrac{W^{\text{УЗЕ}}_{\text{work}}}{M^{\text{дод1}}\langle\ \rangle.M^{\text{R+}}\langle\ \rangle.Dif_n}, P^{\text{ch}}_{\text{max}}\right); \\ P^{\text{dch}}_{\text{дод1}} = \min\left(\eta_{\text{dis}}\dfrac{W^{\text{УЗЕ}}_{\text{work}}}{M^{\text{дод1}}\langle\ \rangle.M^{\text{R-}}\langle\ \rangle.Dif_n}, \eta_{\text{dis}}P^{\text{ch*}}_{\text{дод1}}, P^{\text{dch}}_{\text{max}}\right); : M^{\text{дод1}}\langle\ \rangle \neq \varnothing. \\ P^{\text{ch}}_{\text{дод1}} = \dfrac{P^{\text{dch}}_{\text{дод1}}M^{\text{дод1}}\langle\ \rangle.M^{\text{R-}}\langle\ \rangle.Dif_n}{\eta_{\text{dis}}M^{\text{дод1}}\langle\ \rangle.M^{\text{R+}}\langle\ \rangle.Dif_n}; \end{array}\right.$$

$$\left[\begin{array}{l} P^{\text{ch*}}_{\text{дод2}} = \min\left(\dfrac{W^{\text{УЗЕ}}_{\text{work}}}{M^{\text{дод2}}\langle\ \rangle.M^{\text{R+}}\langle\ \rangle.Dif_n}, P^{\text{ch}}_{\text{max}}\right); \\ P^{\text{dch}}_{\text{дод2}} = \min\left(\eta_{\text{dis}}\dfrac{W^{\text{УЗЕ}}_{\text{work}}}{M^{\text{дод2}}\langle\ \rangle.M^{\text{R-}}\langle\ \rangle.Dif_n}, \eta_{\text{dis}}P^{\text{ch*}}_{\text{дод2}}, P^{\text{dch}}_{\text{max}}\right); : M^{\text{дод2}}\langle\ \rangle \neq \varnothing. \\ P^{\text{ch}}_{\text{дод2}} = \dfrac{P^{\text{dch}}_{\text{дод2}}M^{\text{дод2}}\langle\ \rangle.M^{\text{R-}}\langle\ \rangle.Dif_n}{\eta_{\text{dis}}M^{\text{дод2}}\langle\ \rangle.M^{\text{R+}}\langle\ \rangle.Dif_n}; \end{array}\right.$$

Особливість вкладеного циклу полягає у розряджанні попередньо накопиченої (в межах опорного циклу) енергії з подальшим обов'язковим відновленням заряду. Для вкладеного циклу баланси потужностей узгоджуються з додатковим урахуванням крайових умов допустимих режимів експлуатації УЗЕ:

$$\left[\begin{array}{l} P^{\text{dch*}}_{\text{вкл}} = \min\left(\dfrac{\eta_{\text{dis}}P^{\text{ch}}_{\text{оп}}M^{\text{оп}}\langle\ \rangle.M^{\text{R+}}\langle\ \rangle.Dif_n}{M^{\text{вкл}}\langle\ \rangle.M^{\text{R-}}\langle\ \rangle.Dif_n}, P^{\text{dch}}_{\text{max}}\right); \\ P^{\text{ch}}_{\text{вкл}} = \min\left(\dfrac{P^{\text{dch*}}_{\text{вкл}}M^{\text{вкл}}\langle\ \rangle.M^{\text{R-}}\langle\ \rangle.Dif_n}{\eta_{\text{dis}}M^{\text{вкл}}\langle\ \rangle.M^{\text{R+}}\langle\ \rangle.Dif_n}, P^{\text{ch}}_{\text{max}}\right); \ : M^{\text{вкл}}\langle\ \rangle \neq \varnothing. \\ P^{\text{dch}}_{\text{вкл}} = \dfrac{\eta_{\text{dis}}P^{\text{ch}}_{\text{вкл}}M^{\text{вкл}}\langle\ \rangle.M^{\text{R+}}\langle\ \rangle.Dif_n}{M^{\text{вкл}}\langle\ \rangle.M^{\text{R-}}\langle\ \rangle.Dif_n}; \end{array}\right.$$

К р о к END. Кінець роботи алгоритму.

Приклад розрахунків. Оскільки розроблений алгоритм орієнтований на довгострокові оціночні розрахунки, ключовим критерієм його ефективності є робастність (стійкість), тобто здатність обчислювальної процедури зберігати структуру оптимального розв'язку та забезпечувати фінансову беззбитковість при значних збуреннях вхідних цінових сигналів. Тестування алгоритму виконано у два етапи:

1) побудова оптимальних графіків режимів експлуатації УЗЕ на основі прогнозних цінових сигналів;

2) обчислення фактичної добової вигоди оператора УЗЕ за цими графіками з використанням ретроспективних даних РДН.

Для проведення імітаційного моделювання та стрес-тестування алгоритму в умовах невизначеності було обрано три варіанти формування цінових сигналів:

«*Ідеальний прогноз*» — базується на ретроспективних фактичних цінах розрахункової доби і є теоретичним еталоном для порівняння (верхньою межею ефективності);

«*Наївний прогноз*» — використовує вектор фактичних ринкових цін за попередню добу (стратегія високої невизначеності);

«*Прогноз за граничними цінами*» — як цінові сигнали застосовуються затверджені для РДН України максимуми граничних цін (Price Caps) [9—10] (детермінований сценарій граничних умов).

Слід зауважити, що використання простих («наївних») моделей прогнозування є свідомим методологічним кроком. Застосування складних систем прогнозування на основі глибокого навчання (LSTM, CNN) чи статистичних моделей (ARIMA, GARCH) дозволяє підвищити точність точкового передбачення, проте нівелює можливість оцінити власну стійкість алгоритму оптимізації до суттєвих похибок у вхідних даних.

Тестові розрахунки виконано для горизонту планування тривалістю 1 місяць за даними за серпень, вересень та жовтень 2025 року (джерело даних — АТ «Оператор ринку»). Зведені результати моделювання наведено в таблиці.

Результати моделювання сценаріїв діяльності УЗЕ на РДН

Місяць	Прибуток (без ПДВ), грн				
	Ідеальний прогноз	Стратегія попереднього дня		Прогноз за граничними цінами	
		Прибуток	Відхилення, %	Прибуток	Відхилення, %
Серпень	675 310	641 393	–5,02	641 109	–5,06
Вересень	605 862	576 574	–4,83	577 462	–4,69
Жовтень	802 660	738 374	–8,01	738 628	–7,98
Разом	2 083 832	1 956 341	–6,12	1 957 199	–6,08

Аналіз результатів показав, що для наближених сценаріїв прогнозування («наївного» та за Price Caps) відхилення показників прибутку від еталона не перевищує 8%. Навіть за умови високої інтегральної помилки точкового прогнозу (метрика MAPE для «наївного» прогнозу в окремі дні перевищує 25—30%) кінцева фінансова похибка стратегії залишається мінімальною. Це доводить високу робастність запропонованого підходу. Зумовлена похибками прогнозування певна недооцінка прибутковості свідчить про консервативний характер алгоритму. Така стратегія мінімізує фінансові ризики та знижує апаратне зношування УЗЕ за рахунок оптимізації інтенсивності її експлуатації.

Обмеження результатів досліджень. Сфера застосування розробленого алгоритму визначається його ключовими перевагами та об'єктивними обмеженнями.

До переваг запропонованого підходу належать:

1) *Обчислювальна ефективність та гнучкість інтеграції.* Переведення оптимізаційної задачі з простору неперервного математичного програмування у теоретико-множинний простір реляційної алгебри дозволило уникнути ітераційних процедур пошуку екстремумів. Класичний комбінаторний перебір варіантів послідовностей на часовому горизонті T характеризується експоненціальною складністю $O(M^T)$ (де M — кількість станів системи), що обмежує його застосування. Запропонований алгоритм, завдяки фільтрації даних через фіксовану множину типових циклів, зводить обчислення до операцій сортування та злиття відношень у один оптимальний розв'язок чи пусту множину розв'язків. Це забезпечило лінійно-логарифмічну обчислювальну складність $O(N \log N)$, де $N = 300$ — розмірність масиву вхідних даних. Алгоритм легко реалізується в інформаційних системах із SQL-інтерфейсом або за допомогою традиційного коду.

2) *Робастність в умовах невизначеності.* Алгоритм демонструє низьку чутливість до точності точкових довгострокових прогнозів ринкових цін, що підтверджено імітаційним моделюванням і є критично важливим для довгострокового планування.

Математична модель має такі обмеження:

3) *Абстрагування часових інтервалів.* Фіксація періодів заряджання/розряджання УЗЕ на основі середніх значень цінових трендів усуває потребу в складній глобальній оптимізації, проте звужує область допустимих розв'язків порівняно з моделями неперервного планування на основі методів MILP чи динамічного програмування.

4) *Статичне моделювання витрат.* Врахування витрат через фіксовану питому маржу не дозволяє оцінити динаміку деградації ємності бата-

рей залежно від глибини розряду та інтенсивності експлуатації. Це є прийнятним припущенням для довгострокового планування, але обмежує адекватність алгоритму в задачах точного добового керування.

Порівняльний аналіз запропонованого алгоритму з моделями точної локальної оптимізації (MILP, Branch-and-Bound), що деталізують окремі технологічні чинники УЗЕ, є перспективним напрямом подальших досліджень застосовності алгоритму у задачах короткострокової оптимізації.

Висновки

Визначено та описано типові цикли арбітражу, характерні для умов функціонування РДН України. Показано, що задачу розробки стратегії участі оператора УЗЕ на РДН доцільно зводити до ідентифікації та пошуку тих типових циклів, які задовольняють вимогам рентабельності.

Розроблено алгоритм планування цінового арбітражу УЗЕ, орієнтований на задачі довгострокового періоду. Встановлено, що для забезпечення прийнятного компромісу між точністю результатів та обчислювальною складністю в умовах низької точності довгострокових прогнозів обмеження деталізації технологічних процесів УЗЕ із залишенням лише ключових впливових чинників є концептуально виправданим.

Науково обґрунтовано концепцію відображення динамічної оптимізаційної задачі цінового арбітражу УЗЕ у теоретико-множинний простір реляційної алгебри. Доведено, що перехід від класичних ітераційних методів локального пошуку до операцій фільтрації та злиття відношень дозволяє мінімізувати просторову й часову складність обчислень, забезпечуючи лінійно-логарифмічну оцінку замість експоненціальної. Отриманий теоретичний результат не лише гарантує робастність розв’язків на довгострокових горизонтах планування в умовах ринкової невизначеності, а й забезпечує інваріантність алгоритму до обчислювальних платформ завдяки можливості його безпосередньої імплементації на рівні декларативних запитів реляційних баз даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Metz D., Saraiva J.T. Use of battery storage systems for price arbitrage operations in the 15- and 60-min German intraday markets. *Electric Power Systems Research*. 2018. Vol. 160. P. 27—36. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.01.020.
2. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13 квіт. 2017 р. № 2019-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2017. № 27—28. Ст. 312. (зі змінами та доповненнями станом на 04.12.2025 р.). URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19 (дата звернення: 19.06.2026).

3. Construction of a Model for Optimal Scheduling of Energy Storage Systems in the Day-Ahead Market Considering Market Strategies and Technical Constraints / O. Havva, Y. Parus, I. Blinov, V. Evdokimov. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2026. Vol. 2, № 2 (140). P. 94—101. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.355330.
4. Парус Є.В., Блінов І.В., Мірошник В.О., Рибіна О.Б., Олефір Д.О., Сичова В.О. Модель оптимального розподілу гідроресурсів ГЕС з резервуванням потужностей для надання допоміжних послуг автоматичного відновлення частоти. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 3. С. 73—84. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2024. 03.073.
5. Blinov I., Trach I., Parus Y. Evaluation of the efficiency of the use of electricity storage systems in the balancing group and the small distribution system / I. Blinov, I. Trach, Y. Parus, V. Khomenko, V. Kuchanskyy, V. Shkarupylo. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) : proceedings (Kharkiv, 13–17 Sept. 2021). Piscataway : IEEE, 2021. P. 262—265. DOI: https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981.
6. Парус Є.В., Блінов І.В. Оптимізація використання доступних енергоресурсів мікромережі за умов підтримки готовності до ізольованого режиму. *Технічна електродинаміка*. 2025. № 5. С. 56—69. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2025.05.056.
7. Блінов І.В., Парус Є.В., Артемчук В.О. Модель планування роботи активного споживача на роздрібному ринку електричної енергії. Технічна електродинаміка. 2026. № 1. С. 50—61. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2026.01.050.
8. Energy storage in long-term system models: a review of considerations, best practices, and research needs / J.B. Bistline et al. *Progress in Energy*. 2020. Vol. 2, no. 3. Art. 032001. DOI: https://doi.org/10.1088/2516-1083/ab9894.
9. Правила ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку: затверджено Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14 берез. 2018 р. № 308. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text (дата звернення: 19.06.2026).
10. Про граничні ціни на ринку «на добу наперед», внутрішньодобовому ринку та балансуючому ринку: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 25 лип. 2025 р. № 1133. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/v1133874-25 (дата звернення: 19.06.2026).

Стаття надійшла 29.06.2026;
Прорецензована 10.07.2026

REFERENCES

1. Metz D., Saraiva J.T. (2018). Use of battery storage systems for price arbitrage operations in the 15- and 60-min German intraday markets. *Electric Power Systems Research*. Vol. 160. P. 27-36. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.01.020.
2. On the Electricity Market : Law of Ukraine dated April 13, 2017 No. 2019-VIII. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*. 2017. No. 27-28. Art. 312. (amended as of December 04, 2025). URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19 (accessed: 19.06.2026). (in Ukrainian).
3. Havva O., Parus Y., Blinov I., Evdokimov V. (2026). Construction of a Model for Optimal Scheduling of Energy Storage Systems in the Day-Ahead Market Considering Market Strategies and Technical Constraints. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, № 2 (140). P. 94-101. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.355330.
4. Parus Ye.V., Blinov I.V., Miroshnyk V.O., Rybina O.B., Olefir D.O., Sychova V.O. (2024). Model for optimal allocation of HPP hydro resources with power reservation for providing ancillary services of automatic frequency restoration. *Technical Electrodynamics*. No. 3. P. 73-84. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2024.03.073. (in Ukrainian).

5. Blinov I., Trach I., Parus Y. (2021). Evaluation of the efficiency of the use of electricity storage systems in the balancing group and the small distribution system / I. Blinov, I. Trach, Y. Parus, V. Khomenko, V. Kuchanskyy, V. Shkarupylo. IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) : proceedings (Kharkiv, 13-17 Sept. 2021). Piscataway : IEEE, 2021. P. 262-265. DOI: https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981.
6. Parus Ye.V., Blinov I.V. (2025). Optimization of the use of available energy resources of the microgrid under the condition of supporting readiness for isolated mode. *Technical Electrodynamics.* No. 5. P. 56-69. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2025.05.056. (in Ukrainian).
7. Blinov I.V., Parus Ye.V., Artemchuk V.O. (2026). Prosumer operation planning model in the retail electricity market. *Technical Electrodynamics*. No. 1. P. 50-61. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2026.01.050. (in Ukrainian).
8. Bistline J.B. (2020). Energy storage in long-term system models: a review of considerations, best practices, and research needs / Progress in Energy. Vol. 2, no. 3. Art. 032001. DOI: https://doi.org/10.1088/2516-1083/ab9894.
9. Day-Ahead Market and Intraday Market Rules: approved by Resolution of the National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities dated March 14, 2018 No. 308. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text (accessed: 19.06.2026).
10. On Price Caps on the Day-Ahead Market, Intraday Market and Balancing Market: Resolution of the National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities dated July 25, 2025 No. 1133. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/v1133874-25 (accessed: 19.06.2026).

Article received 29.06.2026;
Reviewed 10.07.2026

O. Havva, V. Evdokimov

AN ALGORITHM FOR DETERMINING
A PRICE ARBITRAGE STRATEGY FOR ENERGY STORAGE
FACILITIES IN THE DAY-AHEAD MARKET

The pressing problem of long-term planning for the participation of an energy storage facility (ESF) operator in the day-ahead market (DAM) is solved. Typical arbitrage cycles have been developed that can be implemented on Ukraine's day-ahead market. It is shown that the problem of formulating an optimal strategy for an ESS operator's participation in the day-ahead market boils down to finding typical arbitrage cycles that satisfy profitability requirements. To reduce the computational complexity of the long-term planning problem, an algorithm based on set operations (relational algebra) is proposed. This approach has made it possible to unify the procedures for finding optimal ESS operating modes and can be implemented quite simply in modern information systems based on relational databases using SQL commands. Limiting the level of detail in the UZE's technological processes is a justified compromise given the low accuracy of long-term market forecasts.

K e y w o r d s: simulation modeling, optimization algorithm, energy storage facility, price arbitrage, "day-ahead" market.

ГАВВА Олександр Олександрович, аспірант Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. У 2015 р. Закінчив Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Область наукових досліджень — цифровізація та сучасні технології в енергетиці.

ЄВДОКІМОВ Володимир Анатолійович, д-р техн. наук, пров. наук. співробітник, заст. директора з наукової роботи Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. У 1995 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — математичне і комп'ютерне моделювання енергоринків.