

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-64-30>

УДК 004.75:519.86

Федотов Сергій Олександрович<sup>1</sup>, аспірант

<https://orcid.org/0009-0009-7275-0867>

Кайдик Олег Леонтійович<sup>2</sup>, к.т.н, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-4114-0734>

<sup>1</sup> Державний торговельно-економічний університет, м. Київ, Україна

<sup>2</sup> Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

## БАГАТОКРИТЕРІЙНА МОДЕЛЬ ІНТЕГРАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ У ХМАРНІ СЕРВІСИ

**Федотов С. О., Кайдик О. Л.** Багатокритерійна модель інтеграції розподілених систем у хмарні сервіси. У рамках даного дослідження запропоновано багатокритеріальну оптимізаційну модель інтеграції систем розподіленої обробки інформації у хмарні сервіси, яка враховує часові залежності та фактори ризику і відрізняється від існуючих аналогів тим, що, окрім традиційних критеріїв, таких як бізнес-ефективність, фінансові витрати та технічні пріоритети, до моделі були введені часові залежності та ризики, що дозволяє точніше відображати динаміку процесів інтеграції та мінімізувати потенційні негативні наслідки. У рамках обчислювальних експериментів підтверджено, що викладена в роботі модель результативно вирішує задачу багатокритеріальної оптимізації, враховуючи суперечливі цілі, зокрема максимізацію бізнес-ефективності, мінімізацію фінансових витрат та управління ризиками. Акцент було зроблено на врахуванні часових залежностей, таких як швидкість адаптації системи до хмарної інфраструктури (параметр  $\alpha$ ) та темп накопичення економічної вигоди (параметр  $\beta$ ), що в кінцевому підсумку підвищило точність моделювання, надаючи особам, які приймають рішення, можливість більш реалістично оцінювати динаміку інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси та перспективи впровадження нових технологій розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси. Розроблена модель була реалізована на мові Python на основі застосування методу NSGA-II, обраного завдяки його здатності ефективно працювати з багатокритеріальними задачами, враховувати обмеження та знаходити рішення на Парето-фронті. Застосування цього методу дозволяє забезпечити рівномірний розподіл рішень у просторі критеріїв, що є релевантним для задач, пов'язаних з інтеграцією розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси, які апріорі передбачають необхідність враховувати множину суперечливих цілей. Врахування факторів, таких як швидкість адаптації та темп накопичення економічної вигоди, дозволило точніше прогнозувати результати інтеграції та мінімізувати ризики, пов'язані з переходом на хмарні технології. Особливістю моделі є її орієнтованість на практичне застосування в умовах реального бізнесу, що робить її особливо затребуваною для торговельних компаній, де швидкість обробки даних і доступність ресурсів безпосередньо впливають на задоволеність клієнтів та прибуток.

**Ключові слова:** багатокритеріальна оптимізаційна модель, системи розподіленої обробки інформації, хмарні сервіси, хмарні технології, хмарні обчислення, інтеграція, метод NSGA-II, обчислювальні експерименти, модель, технології

**Fedotov S., Kaidyk O.** A Multi-Criteria Model for Integrating Distributed Systems into Cloud Services. This study proposes a multi-criteria optimization model for integrating distributed information processing systems into cloud services, which takes into account time dependencies and risk factors and differs from existing models in that, in addition to traditional criteria such as business efficiency, financial costs, and technical priorities, time dependencies and risks have been incorporated into the model, allowing for a more accurate reflection of the dynamics of integration processes and the minimization of potential negative consequences. Computational experiments have confirmed that the model presented in this paper effectively solves the multi-criteria optimization problem, taking into account conflicting objectives, specifically the maximization of business efficiency, the minimization of financial costs, and risk management. Emphasis was placed on accounting for time-dependent factors, such as the speed of the system's adaptation to the cloud infrastructure (parameter  $\alpha$ ) and the rate of economic benefit accumulation (parameter  $\beta$ ), which ultimately improved the accuracy of the modeling, providing decision-makers with the ability to more realistically assess the dynamics of integrating distributed information processing into cloud services and the prospects for implementing new distributed information processing technologies in cloud services. The developed model was implemented in Python using the NSGA-II method, which was chosen for its ability to effectively handle multi-criteria problems, account for constraints, and find solutions on the Pareto front. The application of this method ensures a uniform distribution of solutions across the criterion space, which is relevant for problems related to the integration of distributed information processing into cloud services—problems that, by their very nature, require consideration of a set of conflicting objectives. Taking into account factors such as the speed of adaptation and the rate of economic benefit accumulation will allow for more accurate forecasting of integration outcomes and minimize the risks associated with the transition to cloud technologies. A distinctive feature of the model is its focus on practical application in real-world business environments, making it particularly valuable for trading companies, where data processing speed and resource availability directly impact customer satisfaction and profit.

**Keywords:** multi-criteria optimization model, distributed information processing systems, cloud services, cloud technologies, cloud computing, integration, NSGA-II method, computational experiments, model, technologies

### Постановка наукової проблеми.

Актуальність розробки багатокритеріальної оптимізаційної моделі інтеграції систем розподіленої обробки інформації у хмарні сервіси з урахуванням часових залежностей та ризиків зумовлена кількома ключовими факторами, пов'язаними із сучасними тенденціями цифровізації

бізнесу та зростаючою потребою в ефективному управлінні ресурсами та процесами. В умовах цифрової трансформації [1–4] хмарні технології стають невід'ємною частиною бізнес-процесів, пропонуючи клієнтам такі переваги, як масштабованість, гнучкість та економічна ефективність. Однак інтеграція існуючих систем розподіленої обробки інформації в хмарні середовища вимагає ретельного аналізу та оптимізації, щоб мінімізувати ризики та максимізувати вигоди. Як було показано в [1–7], процеси інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні середовища супроводжуються тимчасовими затримками, пов'язаними з адаптацією систем, навчанням персоналу та налаштуванням інфраструктури, а врахування часових факторів дозволить точніше прогнозувати результати інтеграції та планувати ресурси. Згідно з [4], інтеграція розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси передбачає одночасний розгляд множини критеріїв, таких як бізнес-ефективність, фінансові витрати, технічні пріоритети та ризики. Однак ці критерії апіорі суперечать один одному, що зумовлює необхідність застосування методів багатокритеріальної оптимізації для пошуку компромісних рішень.

В умовах високої конкуренції компанії прагнуть оптимізувати свої бізнес-процеси, знизити витрати та підвищити продуктивність. А запропонована в роботі модель дозволить приймати обґрунтовані рішення щодо інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси, роблячи таке рішення релевантним, наприклад, для торгових компаній, де швидкість обробки даних і доступність ресурсів безпосередньо впливають на задоволеність клієнтів та прибуток. Незважаючи на наявність множини досліджень, присвячених хмарним технологіям та розподіленим системам, більшість існуючих моделей не враховують часові залежності та ризики в повній мірі. Тому вважаємо, що доцільною є розробка нової моделі, яка враховує ці аспекти та заповнює існуючу прогалину в наукових дослідженнях.

#### **Аналіз досліджень.**

Тематика використання хмарних сервісів та рентабельності інвестицій (ROI), включаючи завдання, пов'язані з торгівлею, є предметом активного вивчення багатьма вченими. Десятки публікацій, які ми розглянемо нижче, присвячені дослідженню різних аспектів цієї галузі, зокрема розробці архітектур хмарних платформ, методам інтеграції розподілених систем, аналізу їхнього впливу на бізнес-процеси та економічну ефективність, у тому числі у сфері торгівлі. Так, у роботі [5] автори розглядають вплив технологій хмарних обчислень на підвищення продуктивності малих підприємств завдяки використанню інтернет-технологій. Однак вплив розподіленої обробки інформації в хмарних обчисленнях автори не розглядають.

Стаття [6] присвячена використанню технологій хмарних обчислень для підвищення ефективності бізнесу за рахунок використання можливостей Інтернету. Автор досліджує переваги хмарних технологій, такі як зниження витрат на IT-інфраструктуру, підвищення продуктивності та прискорення бізнес-процесів, а також обговорює приклади впровадження хмарних рішень у різних галузях, підкреслюючи їхню стратегічну значимість для сучасного бізнесу. Зауважимо, що вплив розподіленої обробки інформації у хмарних обчисленнях автор не розглядає.

Автори статті [7] досліджують концепцію електронних торгових майданчиків для хмарних сервісів, приділяючи у своєму дослідженні переважну увагу аналізу платформ, що надають централізований доступ до різноманітних хмарних послуг, таких як IaaS, PaaS та SaaS. У статті переважно обговорюються переваги таких майданчиків, зокрема можливість порівняння та вибору оптимальних рішень для бізнесу, а також їхня роль у просуванні хмарних технологій та забезпеченні їхньої доступності для користувачів. Проблематика інтеграції ROI в хмарні сервіси авторами не розглядалася.

Монографія [8] пропонує загальний посібник для бізнесу щодо використання хмарних технологій. Автори цього дослідження роз'яснюють основні концепції хмарних технологій, їхні переваги та ризики, а також демонструють, як хмарні технології можуть бути впроваджені для покращення бізнес-операцій компаній, зокрема у сфері торговельних операцій. Дослідження [9] є докладним посібником з роботи з платформою Amazon Web Services (AWS), що охоплює ключові аспекти використання AWS, зокрема розгортання додатків, управління даними, забезпечення безпеки та масштабованість. Автори також наводять практичні приклади та рекомендації, спрямовані на оптимізацію роботи з AWS. У [10] детально розглядаються вдосконалення платформи Amazon Redshift, призначеної для хмарної обробки даних. Автори описують оновлення, спрямовані на підвищення продуктивності та масштабованості платформи, а також на поліпшення аналітичних

можливостей, акцентуючи увагу в даному дослідженні на застосуванні ІТ для оптимізації роботи з великими обсягами даних та забезпечення високої швидкості обробки інформації, зокрема для систем розподіленої обробки даних у хмарних середовищах. Дослідження [11] присвячене застосуванню аналітичних інструментів Microsoft Azure для трансформації бізнес-процесів, при цьому автори детально розглядають підходи до інтеграції хмарних аналітичних рішень в існуючу інфраструктуру, підкреслюючи їхню важливість для збору, обробки та аналізу даних, зокрема для систем ROI. У [12] представлено дослідження, пов'язане з аналізом мережі Ethereum із використанням інструментів Google BigQuery. Автори показують, як технології хмарних обчислень та візуалізації даних сприяють глибокому аналізу розподілених мереж, акцентуючи увагу на інтеграції методів аналізу та обробки великих даних для підвищення ефективності роботи з блокчейн-платформами, що є принципово важливим для вирішення завдань, пов'язаних із розподіленою обробкою інформації. Автори [13] розглядають бізнес-цінність хмарних технологій з точки зору гнучкості партнерських відносин. У роботі аналізується вплив хмарних рішень на взаємодію компаній, зокрема підвищення швидкості адаптації до змін ринку, поліпшення комунікацій між партнерами та зниження витрат. Автори підкреслюють необхідність інтеграції хмарних технологій у наявні бізнес-процеси для забезпечення конкурентних переваг у сучасних умовах цифровізації економіки. Стаття [14] присвячена майбутньому електронної комерції в контексті інтеграції хмарних технологій із новими програмними системами. Автори описують, як хмарні платформи сприяють створенню безперервного користувацького досвіду, оптимізуючи процеси управління запасами, обробки транзакцій та персоналізації контенту, і акцентують увагу на перевагах використання хмарних технологій для підвищення ефективності та гнучкості бізнес-процесів у сфері електронної комерції.

#### **Мета дослідження**

Мета, що вирішується в рамках даного дослідження, полягає в тому, щоб розробити багатокритеріальну оптимізаційну математичну модель для підтримки прийняття рішень щодо інтеграції систем розподіленої обробки інформації у хмарні сервіси, наприклад, для торгової компанії. Модель повинна враховувати бізнес-показники, фінансові та технічні аспекти, ризики, вплив на співробітників, а також часові залежності

#### **Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.**

##### **Методи та моделі.**

Нехай  $x_i \in \{0,1\}$  – бінарна змінна, де  $x_i = 1$ , якщо система розподіленої обробки інформації  $i$  інтегрується в хмару, та  $x_i = 0$ , якщо система залишається на локальній інфраструктурі.

У рамках завдання, що вирішується, — інтеграції систем розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси — під перенесенням розуміємо переміщення обчислювальних, аналітичних та інфраструктурних процесів, що виконуються локальними системами компанії (не обов'язково торгової, а будь-якої компанії, яка переносить бізнес-процеси в хмару), у хмарне середовище. Таке перенесення дозволяє використовувати переваги хмарних технологій, включаючи масштабованість, гнучкість, економічну ефективність та доступність ресурсів, однак для деяких систем, з огляду на їхню специфіку, може бути доцільним зберегти локальну інфраструктуру через особливості їхнього використання, ризики або економічну недоцільність перенесення. Тобто під інтеграцією системи в хмару мається на увазі перехід обчислювальних процесів, зберігання даних та аналітики з локальної інфраструктури компанії на хмарну платформу, що надається зовнішнім провайдером (наприклад, Amazon Web Services, Microsoft Azure, Google Cloud Platform). Отже, у результаті система розподіленої обробки інформації стає частиною хмарної екосистеми, забезпечуючи доступ через Інтернет, можливість масштабування ресурсів, використання моделей оплати «pay-as-you-go» та зниження капітальних витрат.

Для прикладів, які ми розглядаємо в рамках цього дослідження, — торгових компаній — це відповідає уявній ситуації, коли, наприклад, для торгової компанії система управління замовленнями (Order Management System, OMS), що обробляє дані про покупки, статуси доставок та зворотний зв'язок від клієнтів, може бути інтегрована в хмарне середовище, що дозволяє в реальному часі масштабувати обчислювальні потужності під час пікових навантажень, наприклад, під час акцій або розпродажів, і, відповідно, підвищити доступність даних для віддалених підрозділів компанії, проте при цьому обробка даних, аналітика та формування звітів здійснюються на хмарних серверах.

Необхідно максимізувати інтегральну ефективність  $K_{ecs}$  у всіх  $n$  системах, мінімізуючи витрати та часові втрати.

Математичну модель можна описати так:

$$\max \sum_{i=1}^n x_i \cdot K_{ecs,i} - \lambda \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \mu \cdot \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

де  $K_{ecs,i}$  — інтегральна ефективність ( $i$ )-ї системи, що визначається залежністю виду:

$$K_{ecs,i} = I_b \cdot (a_1 \cdot E_b(t) + a_2 \cdot F_p(t) + a_3 \cdot T_p + a_4 \cdot R_p(t) + a_5 \cdot P_f), \quad (2)$$

де,

$E_b(t), F_p(t), T_p, R_p(t), P_f$  — критерії (ефективність для бізнесу, фінансові переваги, технічний пріоритет, ступінь ризику, психологічний фактор), що залежать від часу ( $t$ );

$I_b$  — показник надійності та безпеки системи;

$y_i$  — додаткові ресурси, необхідні для інтеграції ( $i$ )-ї системи;

$t_i$  — часові витрати на інтеграцію ( $i$ )-ї системи;

$\lambda, \mu$  — штрафні коефіцієнти за ресурси та час,

$a_i$  — коефіцієнти вагомості (налаштовуються експертом у проєктованому модулі інтелектуальної інформаційної системи — ПС).

Для моделі прийнято такі обмеження.

Бюджетні обмеження опишемо так:

$$\sum_{i=1}^n x_i \cdot C_i \leq B, \quad (3)$$

де,

$C_i$  — витрати на інтеграцію ( $i$ )-ї системи;

$B$  — загальний доступний бюджет.

Мінімальний рівень надійності:

$$I_b \geq I_{min} \quad (4)$$

Співвідношення технічних та бізнес-показників:

$$T_p \geq \alpha \cdot E_b(t), \quad (5)$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт значущості технічних обмежень.

Детальніше розглянемо прийняті нами критерії.

Ефективність для бізнесу ( $E_b(t)$ ) визначає, наскільки впровадження інтеграції сприяє ключовим бізнес-показникам.

Були прийняті такі показники:

$R_s$  — приріст швидкості обробки замовлень (прийнятий для торгових компаній; для інших предметних областей може бути інший показник);

$P_r$  — збільшення продуктивності користувачів (типовий для всіх завдань інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси);

$O_r$  — оптимізація використання ресурсів (типовий показник для всіх завдань інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси);

$C_b$  — критичність додатка для бізнесу (типовий показник для всіх завдань інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси).

Тоді залежність для нашої моделі матиме такий вигляд:

$$E_b = a_{11} \cdot R_s + a_{12} \cdot P_r + a_{13} \cdot O_r + a_{14} \cdot C_b, \quad (6)$$

де  $E_b = a_{11} \cdot R_s + a_{12} \cdot P_r + a_{13} \cdot O_r + a_{14} \cdot C_b$  моделюються як функції часу з урахуванням приросту продуктивності на кожному кроці інтеграції.

Фінансові переваги ( $F_p$ ) оцінює фінансову вигоду від впровадження розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси.

Були прийняті такі показники:

$C_{cs}$  – витрати на хмарні сервіси (типові для всіх завдань інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси);

$E_s$  – економія коштів (типова для всіх завдань інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси).

Тоді справедлива залежність:

$$F_p = \frac{E_s}{C_{cs}}. \quad (7)$$

Зауважимо, що  $E_s(t)$  залежить від зниження витрат у міру збільшення використання хмари, тим самим враховуючи часові показники, що є типовим для всіх завдань інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси.

Технічний пріоритет ( $T_p$ ) оцінює технічну готовність та придатність додатків до інтеграції.

Були прийняті такі показники:

$I$  – інтеграція з поточною інфраструктурою;

$M_c$  – можливість міграції додатка в хмару;

$T_s$  – відповідність технологічному стеку;

$D_a$  – якість дизайну додатка (істотно для торгових компаній).

Вважаємо, що справедливою є така залежність:

$$T_p = a_{21} \cdot I + a_{22} \cdot M_c + a_{23} \cdot T_s + a_{24} \cdot D_a. \quad (8)$$

Ступінь ризику ( $R_p$ ) враховує потенційні ризики впровадження.

Були прийняті такі показники:

$R_{reg}$  – відповідність нормативно-правовим вимогам інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні системи;

$R_{inc}$  – здатність справлятися з інцидентами (інформаційна безпека, несправності, відмови тощо);

$C_{inc}$  – несумісність додатків;

$R_{rec}$  – відновлення даних після збою;

$O_{over}$  – ймовірність переоплати («pay-as-you-go»).

Тоді справедливо, що:

$$R_p = a_{31} \cdot R_{reg} + a_{32} \cdot R_{inc} + a_{33} \cdot C_{inc} + a_{34} \cdot R_{rec} + a_{35} \cdot O_{over}. \quad (9)$$

Вважаємо, що зменшення ризику  $R_p(t)$  може бути пов'язане з накопиченням досвіду та зниженням ймовірності помилок, тим самим враховується часова залежність.

Психологічний фактор ( $P_f$ ) враховує вплив на співробітників процесів, пов'язаних з інтеграцією розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси.

Були прийняті такі показники:

$S_{sat}$  – задоволеність співробітників;

$W_{inn}$  – готовність до інновацій, пов'язаних з інтеграцією розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси;

$I_{cap}$  – інтелектуальні здібності користувачів;

$M_{mot}$  – мотивація співробітників.

Тоді справедливою є така залежність:

$$P_f = \frac{S_{sat} + W_{inn} + I_{cap} + M_{mot}}{4}. \quad (10)$$

Оскільки для ілюстрації особливостей інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси як предметну область було обрано сферу торгівлі, то необхідно враховувати, що критерії

мають різні вагові коефіцієнти залежно від напрямку. Наприклад, пріоритет інтеграції ( $T_p$ ) та ризику ( $R_p$ ) є вищим для торгівлі. А для інших предметних областей, наприклад, критичних (енергетика, постачання води, газу, банки тощо), може бути вищою залежність від швидкості обробки даних, надійності, відмовостійкості, тощо. У бізнес-плані для торгівлі важливі ( $E_b, E_p, T_p$ ), тобто збільшення кількості замовлень, скорочення часу на обробку, задоволеність клієнтів. Приріст продуктивності можна формалізувати так:

$$P(t) = P_o + \Delta P \cdot (1 - e^{-\alpha t}), \quad (11)$$

де,

$P_o$  — початковий рівень продуктивності;

$\Delta P$  — приріст від впровадження хмарних систем;

$\alpha$  — швидкість досягнення нового рівня при інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні системи.

Наприклад, після інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси та впровадження нової технології обробка замовлень зросте з 50 до 70 на хвилину за 3 місяці ( $\alpha=1/3$ ). Таким чином, змінна ( $\alpha$ ) — це основний параметр, що описує швидкість адаптації системи до хмарної інфраструктури. У викладеній вище математичній моделі ( $\alpha$ ) визначається, наскільки швидко в нашому випадку торгова компанія зможе почати отримувати вигоду від інтеграції систем розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси, а врахування ( $\alpha$ ) дозволяє точніше оцінити динаміку продуктивності, економічної ефективності та управління ризиками, що сприятиме побудові реалістичної стратегії переходу компанії на хмарні технології та хмарні сервіси.

Економія коштів також залежить від часу, тобто:

$$E_s(t) = E_o + \beta \cdot \Delta E \cdot t, \quad (12)$$

де,

$E_o$  — початкова економія. Наприклад, економія коштів зросте на 15 % через 6 місяців впровадження розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси;

$\beta$  — коефіцієнт накопичення.

Щоб визначити ( $\alpha$ ), необхідно провести спостереження за системою після впровадження хмарних технологій, відповідно, вимірявши базовий рівень продуктивності ( $P_o$ ) до інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси. А потім періодично фіксувати рівень продуктивності  $P(t)$  після впровадження (щодня або щотижня). Далі можна побудувати криву продуктивності  $P(t)$  від  $t$ . А потім, використовуючи апроксимацію функції (11), підібрати значення ( $\alpha$ ), яке мінімізує середньоквадратичне відхилення (метод найменших квадратів) між модельною та реальною кривими. Якщо даних для спостережень недостатньо, то можна використовувати експертні оцінки або дані з аналогічних впроваджень. Тоді припускаємо, що високе значення  $\alpha$  ( $0,5 \leq \alpha \leq 1$ ) характерне для систем розподіленої обробки інформації з простою архітектурою та високою сумісністю з хмарними сервісами. Низьке значення  $\alpha$  ( $0,01 \leq \alpha \leq 0,1$ ) характерне для складних систем розподіленої обробки інформації, що вимагають значних змін в інфраструктурі та навчанні персоналу. На ( $\alpha$ ) згідно з [15–17] впливають такі фактори, як: складність системи (логічно, що прості системи адаптуються швидше), рівень підготовки співробітників (навчені співробітники підвищують ( $\alpha$ )), інтеграційні технології (стандартні інструменти прискорюють процес).

Визначення ( $\beta$ ) схоже на підхід до ( $\alpha$ ), але тут акцент зроблено на економічних показниках. Етапи теоретичного визначення ( $\beta$ ) теж збігаються з ( $\alpha$ ). Вимірюємо рівень витрат  $C(t)$  до впровадження, а потім відстежуємо зміну витрат або економії (див. вираз (12)), після інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси. Потім будують криву економії.

Якщо експериментальні дані відсутні, ( $\beta$ ) можна оцінити за допомогою експертного підходу, як це було показано в роботах [18, 19]. Тоді, згідно з [18, 19], високе значення  $\beta$  ( $0,5 \leq \beta \leq 1$ ) характерне для стандартних завдань (наприклад, відмова від локальних серверів на користь хмари), низьке значення  $\beta$  ( $0,01 \leq \beta \leq 0,1$ ) характерне для складних систем із високою початковою вартістю міграції.

На  $(\beta)$ , відповідно, згідно з [18, 19], впливають такі фактори, як зниження експлуатаційних витрат, вартість навчання персоналу та реорганізації процесів, рентабельність інвестицій (ROI), моделі ціноутворення провайдерів хмарних послуг.

Згідно з [20–24], розв'язання таких задач вимагає застосування методів багатокритеріальної оптимізації (Multi-Objective Optimization, MOO). Серед доступних підходів особливу увагу приділяють еволюційним алгоритмам, таким як NSGA-II [20, 21], через їхню здатність ефективно знаходити рішення на Парето-фронті.

Для проведення обчислювальних експериментів наведена вище модель була реалізована на алгоритмічній мові Python.

### Результати дослідження.

Результати обчислювальних експериментів для нашої моделі наведено на рисунках 1 і 2.

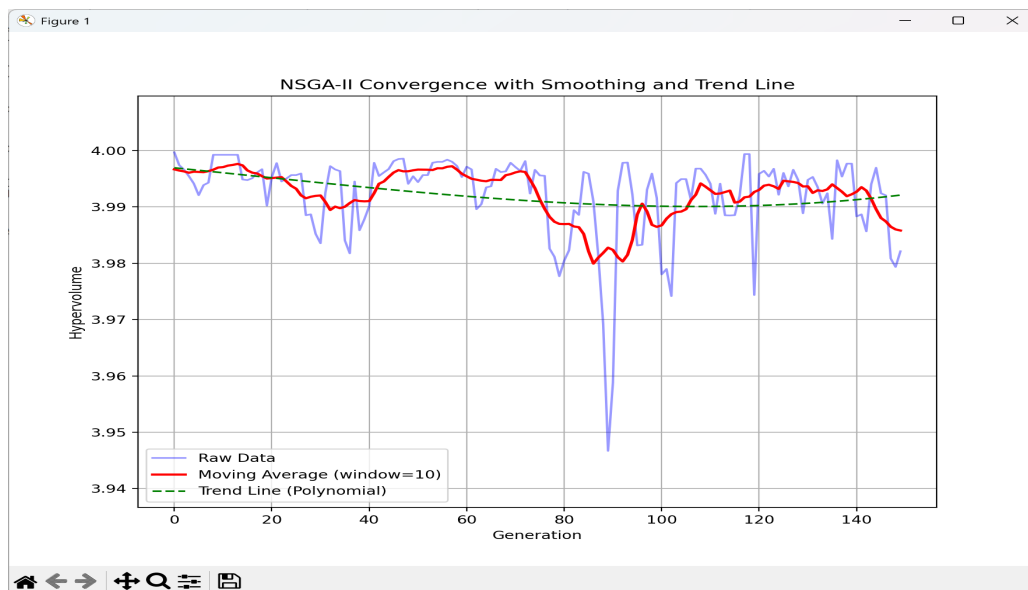


Рис. 1. Графік, що ілюструє перший варіант модифікованих результатів моделювання для математичної моделі (1) – (14) та рівномірність покриття множини Парето в задачі багатокритеріальної оптимізації.

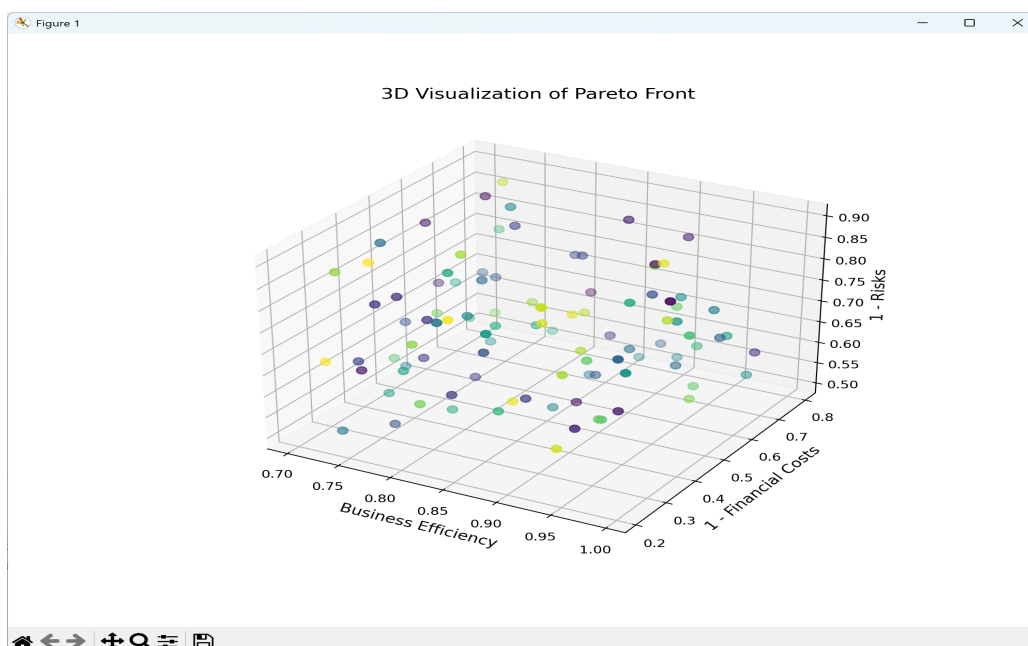


Рис. 2. 3D-графік, що ілюструє другий варіант модифікованих результатів моделювання для математичної моделі (1) – (14) та рівномірність покриття множини Парето в задачі багатокритеріальної оптимізації

На рисунку 1 показано графік, що ілюструє рівномірність покриття множини Парето в задачі багатокритеріальної оптимізації для математичної моделі (1) – (14) і відіграє ключову роль в оцінці ефективності алгоритму NSGA-II. Цей графік, дозволяє нам кількісно та якісно проаналізувати розподіл знайдених рішень у просторі критеріїв, виявляючи, наскільки повно й рівномірно алгоритм заповнює наблизений фронт Парето. З математичної точки зору, множина Парето-оптимальних рішень  $P$  визначається як сукупність векторів рішень  $X^* = \{x_i \in \mathbb{R}^n\}$ , для яких не існує іншого допустимого рішення ( $x_i$ ), такого, що  $f_k(x_j) \leq f_k(x_i)$  для всіх критеріїв  $k = 1, \dots, m$ , причому хоча б одна з цих нерівностей є строгою. У контексті нашої задачі застосування алгоритму NSGA-II формує апроксимацію множини Парето  $P_A$ , яка являє собою множину недомінованих рішень, знайдених на останньому поколінні алгоритму.

Графічна інтерпретація покриття множини Парето у вигляді двовимірного, як це показано на рисунку 1, або тривимірного розподілу точок (див. рис. 2) дозволяє нам у процесі дослідження візуально оцінити збалансованість знайдених рішень. В ідеальному випадку наблизений фронт Парето повинен являти собою рівномірно розподілені точки, що лежать на істинному фронті Парето або в його безпосередній околиці. При недостатній ефективності алгоритму можна спостерігати (хоча ці результати ми не наводимо, оскільки вони є невдалими експериментами) або надмірну концентрацію рішень в окремих областях критеріального простору, або наявність значних пропусків, що свідчить про слабку диверсифікацію популяції в процесі еволюції.

#### Висновки та перспективи подальшого дослідження.

У результаті досліджень було отримано такі результати:

1. Розроблено багатокритеріальну оптимізаційну модель інтеграції систем розподіленої обробки інформації у хмарні сервіси з урахуванням часових залежностей і ризиків, яка відрізняється від відомих рішень тим, що в ній враховано не лише традиційні критерії, такі як бізнес-ефективність, фінансові витрати та технічні пріоритети, але також введені часові залежності та фактори ризику, що дозволяють точніше відображати динаміку процесів імплементації технологій розподіленої обробки інформації та мінімізувати потенційні негативні наслідки такої інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні сервіси.

2. У рамках обчислювальних експериментів обґрунтовано, що запропонована модель дозволяє ефективно вирішувати задачу багатокритеріальної оптимізації, враховуючи суперечливі цілі, такі як максимізація бізнес-ефективності, мінімізація фінансових витрат та управління ризиками, а також показано, що врахування часових залежностей, таких як швидкість адаптації системи до хмарної інфраструктури (параметр  $\alpha$ ) та темп накопичення економічної вигоди (параметр  $\beta$ ), підвищують точність моделювання, дозволяючи особам, що приймають рішення щодо інтеграції розподіленої обробки інформації в хмарні бізнес-процеси, більш реалістично оцінювати динаміку такої інтеграції та впровадження нових технологій, зокрема, розподіленої обробки інформації у хмарні бізнес-процеси компаній.

#### Список бібліографічного опису

1. Garg, S.K., Vecchiola, C. & Buyya, R. Mandi: a market exchange for trading utility and cloud computing services. *J Supercomput* 64, 1153–1174 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11227-011-0568-6>
2. M. Abid and M. Saqlain, "Utilizing edge cloud computing and deep learning for enhanced risk assessment in China's international trade and investment," *Int J. Knowl. Innov. Stud.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2023. <https://doi.org/10.56578/ijkis010101>
3. Belgacem, A., Beghdad-Bey, K. Multi-objective workflow scheduling in cloud computing: trade-off between makespan and cost. *Cluster Comput* 25, 579–595 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10586-021-03432-y>
4. Omid Fatahi Valilai, Mahmoud Houshmand, A collaborative and integrated platform to support distributed manufacturing system using a service-oriented approach based on cloud computing paradigm, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 29, Issue 1, 2013, Pages 110–127, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.07.009>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584512000932>
5. Attaran, M., & Woods, J. (2019). Cloud computing technology: improving small business performance using the Internet. *Journal of Small Business & Entrepreneurship*, 31(6), 495–519. <https://doi.org/10.1080/08276331.2018.1466850>
6. Attaran, Mohsen (2017) "Cloud Computing Technology: Leveraging the Power of the Internet to Improve Business Performance," *Journal of International Technology and Information Management*: Vol. 26: Iss. 1, Article 6. DOI: <https://doi.org/10.58729/1941-6679.1283>
7. Giovanoli, C., Pulikal, P., & Grivas, S. G. (2014). E –marketplace for cloud services. *Cloud computing*, 76 –83.
8. Hugos, M. H., & Hultitzky, D. (2010). *Business in the cloud: what every business needs to know about cloud computing*. John Wiley & Sons.
9. Wittig, A., & Wittig, M. (2023). *Amazon Web Services in Action: An in –depth guide to AWS*. Simon and Schuster.

10. Nikos Armenatzoglou, Sanuj Basu, Naga Bhanoori, Mengchu Cai, Naresh Chainani, Kiran Chinta, Venkatraman Govindaraju, Todd J. Green, Monish Gupta, Sebastian Hillig, Eric Hotinger, Yan Leshinsky, Jintian Liang, Michael McCreedy, Fabian Nagel, Ippokratis Pandis, Panos Parchas, Rahul Pathak, Orestis Polychroniou, Foyzur Rahman, Gaurav Saxena, Gokul Soundararajan, Sriram Subramanian, and Doug Terry. 2022. Amazon Redshift Re-invented. In Proceedings of the 2022 International Conference on Management of Data (SIGMOD '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2205–2217. <https://doi.org/10.1145/3514221.3526045> (pp. 2205–2217).
11. Altaïr, H., Lee, J., & Peña, M. (2021). Cloud Analytics with Microsoft Azure: Transform your business with the power of analytics in Azure. Packt Publishing Ltd.
12. N. S. Kumar, S. Mirdula, P. Singh, T. Gayathri, J. S and A. M., "A Paradigm Shift in Ethereum Network Analysis Through Google BigQuery, Portation, and Visualization," 2024 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI), Pune, India, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/ESCI59607.2024.10497269.
13. Liu S, Yang Y, Qu WG, Liu Y (2016), "The business value of cloud computing: the partnering agility perspective". Industrial Management & Data Systems, Vol. 116 No. 6 pp. 1160–1177, doi: <https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2015-0376>.
14. Chillapalli, N. T. R., & Murganoor, S. (2024). The Future of E –Commerce Integrating Cloud Computing with Advanced Software Systems for Seamless Customer Experience. Library of Progress –Library Science, Information Technology & Computer, 44(3). <https://doi.org/10.48165/bapas.2024.44.2.1>
15. Pedro Casas, Raimund Schatz, Quality of Experience in Cloud services: Survey and measurements, Computer Networks, Volume 68, 2014, Pages 149-165, ISSN 1389-1286, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.01.008>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128614000383>)
16. Tzafilkou, K., Protogeros, N., & Koumpis, A. (2017). User-centred cloud service adaptation: an adaptation framework for cloud services to enhance user experience. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 30(4–5), 472–482. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1030697>
17. J. Jeknić and B. Kraut, "Cloud services and marketing," 2015 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, 2015, pp. 1492-1498, doi: 10.1109/MIPRO.2015.7160508.
18. Nayar, K. B., & Kumar, V. (2018). Cost benefit analysis of cloud computing in education. International Journal of Business Information Systems, 27(2), 205–221.
19. Alford, T., & Morton, G. (2009). The Economics of cloud computing. Booz Allen Hamilton.
20. Yusoff, Y., Ngadiman, M. S., & Zain, A. M. (2011). Overview of NSGA-II for optimizing machining process parameters. Procedia Engineering, 15, 3978–3983.
21. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002, doi: 10.1109/4235.996017
22. S. Verma, M. Pant and V. Snasel, "A Comprehensive Review on NSGA-II for Multi-Objective Combinatorial Optimization Problems," in IEEE Access, vol. 9, pp. 57757-57791, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3070634.
23. Ma, H., Zhang, Y., Sun, S. et al. A comprehensive survey on NSGA-II for multi-objective optimization and applications. Artif Intell Rev 56, 15217–15270 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10526-z>
24. H. Ishibuchi, R. Imada, Y. Setoguchi and Y. Nojima, "Performance comparison of NSGA-II and NSGA-III on various many-objective test problems," 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Vancouver, BC, Canada, 2016, pp. 3045-3052, doi: 10.1109/CEC.2016.7744174.

#### References

1. Garg, S.K., Vecchiola, C. & Buyya, R. Mandi: a market exchange for trading utility and cloud computing services. J Supercomput 64, 1153–1174 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11227-011-0568-6>
2. M. Abid and M. Saqlain, "Utilizing edge cloud computing and deep learning for enhanced risk assessment in China's international trade and investment," Int J. Knowl. Innov. Stud., vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2023. <https://doi.org/10.56578/ijkis010101>
3. Belgacem, A., Beghdad-Bey, K. Multi-objective workflow scheduling in cloud computing: trade-off between makespan and cost. Cluster Comput 25, 579–595 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10586-021-03432-y>
4. Omid Fatahi Valilai, Mahmoud Houshmand, A collaborative and integrated platform to support distributed manufacturing system using a service-oriented approach based on cloud computing paradigm, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 29, Issue 1, 2013, Pages 110-127, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.07.009>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584512000932>)
5. Attaran, M., & Woods, J. (2019). Cloud computing technology: improving small business performance using the Internet. Journal of Small Business & Entrepreneurship, 31(6), 495–519. <https://doi.org/10.1080/08276331.2018.1466850>
6. Attaran, Mohsen (2017) "Cloud Computing Technology: Leveraging the Power of the Internet to Improve Business Performance," Journal of International Technology and Information Management: Vol. 26: Iss. 1, Article 6. DOI: <https://doi.org/10.58729/1941-6679.1283>
7. Giovanoli, C., Pulikal, P., & Grivas, S. G. (2014). E –marketplace for cloud services. Cloud computing, 76 –83.
8. Hugos, M. H., & Hultizky, D. (2010). Business in the cloud: what every business needs to know about cloud computing. John Wiley & Sons.
9. Wittig, A., & Wittig, M. (2023). Amazon Web Services in Action: An in –depth guide to AWS. Simon and Schuster.
10. Nikos Armenatzoglou, Sanuj Basu, Naga Bhanoori, Mengchu Cai, Naresh Chainani, Kiran Chinta, Venkatraman Govindaraju, Todd J. Green, Monish Gupta, Sebastian Hillig, Eric Hotinger, Yan Leshinsky, Jintian Liang, Michael

- McCreedy, Fabian Nagel, Ippokratis Pandis, Panos Parchas, Rahul Pathak, Orestis Polychroniou, Foyzur Rahman, Gaurav Saxena, Gokul Soundararajan, Sriram Subramanian, and Doug Terry. 2022. Amazon Redshift Re-invented. In Proceedings of the 2022 International Conference on Management of Data (SIGMOD '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2205–2217. <https://doi.org/10.1145/3514221.3526045> (pp. 2205–2217).
11. Altaiar, H., Lee, J., & Peña, M. (2021). Cloud Analytics with Microsoft Azure: Transform your business with the power of analytics in Azure. Packt Publishing Ltd.
  12. N. S. Kumar, S. Mirdula, P. Singh, T. Gayathri, J. S and A. M, "A Paradigm Shift in Ethereum Network Analysis Through Google BigQuery, Portation, and Visualization," 2024 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI), Pune, India, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/ESCI59607.2024.10497269.
  13. Liu S, Yang Y, Qu WG, Liu Y (2016), "The business value of cloud computing: the partnering agility perspective". Industrial Management & Data Systems, Vol. 116 No. 6 pp. 1160–1177, doi: <https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2015-0376>.
  14. Chillapalli, N. T. R., & Murganoor, S. (2024). The Future of E –Commerce Integrating Cloud Computing with Advanced Software Systems for Seamless Customer Experience. Library of Progress –Library Science, Information Technology & Computer, 44(3). <https://doi.org/10.48165/bapas.2024.44.2.1>
  15. Pedro Casas, Raimund Schatz, Quality of Experience in Cloud services: Survey and measurements, Computer Networks, Volume 68, 2014, Pages 149-165, ISSN 1389-1286, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.01.008>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128614000383>)
  16. Tzafilkou, K., Protogeros, N., & Koumpis, A. (2017). User-centred cloud service adaptation: an adaptation framework for cloud services to enhance user experience. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 30(4–5), 472–482. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1030697>
  17. J. Jeknić and B. Kraut, "Cloud services and marketing," 2015 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, 2015, pp. 1492-1498, doi: 10.1109/MIPRO.2015.7160508.
  18. Nayar, K. B., & Kumar, V. (2018). Cost benefit analysis of cloud computing in education. International Journal of Business Information Systems, 27(2), 205–221.
  19. Alford, T., & Morton, G. (2009). The Economics of cloud computing. Booz Allen Hamilton.
  20. Yusoff, Y., Ngadiman, M. S., & Zain, A. M. (2011). Overview of NSGA-II for optimizing machining process parameters. Procedia Engineering, 15, 3978–3983.
  21. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002, doi: 10.1109/4235.996017
  22. S. Verma, M. Pant and V. Snasel, "A Comprehensive Review on NSGA-II for Multi-Objective Combinatorial Optimization Problems," in IEEE Access, vol. 9, pp. 57757-57791, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3070634.
  23. Ma, H., Zhang, Y., Sun, S. et al. A comprehensive survey on NSGA-II for multi-objective optimization and applications. Artif Intell Rev 56, 15217–15270 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10526-z>
  24. H. Ishibuchi, R. Imada, Y. Setoguchi and Y. Nojima, "Performance comparison of NSGA-II and NSGA-III on various many-objective test problems," 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Vancouver, BC, Canada, 2016, pp. 3045-3052, doi: 10.1109/CEC.2016.7744174.

Історія статті:

Отримано: 28.05.2026 Доопрацьовано: 11.08.2026 Прийнято до друку: 23.09.2026 Опубліковано: 29.09.2026