The Central Research institute
of the Armed Forces of Ukraine

Military Science. Vol. 3 No. 3 (2025)

Received: *September 2, 2025* | **Revisions Requested:** *October 3, 2025* | **Revision Received:** *October 23, 2025*
Accepted: *October 31, 2025* | **Published Online:** *December 1, 2025*

Licensed (C) by Creative Commons Attribution International License 4.0 (CC BY-NC-SA)

DOI: 10.62524/msj.2025.3.3.21

Обчислювальний експеримент з оптимізації вибору хмарних сервісів для підприємств

Михайло Хомчак
аспірант факультету комп'ютерних наук та технологій
Державного університету "Київський авіаційний інститут"
начальник департаменту розвитку та хмарних технологій
ТОВ «Київстар.Тех»
03113, вул. Дегтярівська, 53, Київ, Україна
e-mail: mykhailo.khomchak@gmail.com
ORCID: 0009-0000-4127-556X

Денис Молчанов
науковий співробітник науково-дослідної лабораторії
кафедри військової підготовки
Державний університет "Київський авіаційний інститут"
03048, вулиця Медова 1, Київ, Україна
e-mail: mdbua2@gmail.com
ORCID: 0009-0007-9268-2764

Алевтина Гетьман
старший науковий співробітник
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Імені Героїв Крут
01011, вул. Князів Острозьких, 45/1, Київ, Україна
e-mail: getman2017@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6397-7412

Анотація. Розглянуто науково-практичну проблему вибору оптимальних конфігурацій хмарних сервісних платформ (ХСП) для великих підприємств України. Зростання ролі ХСП у забезпеченні бізнес-процесів підприємств обумовило потребу в ефективних методах їх оцінювання та відбору. В умовах озброєного протистояння з рф, дестабілізації економічного середовища, обмеженості ресурсів багатьох українських компаній та підприємств, зокрема великих, та зростання вимог до інформаційної безпеки першочергової уваги набуло питання вибору оптимального складу ХСП. При цьому потрібно врахувати наявність сукупності суперечливих критеріїв ХСП. Зокрема, вартості, продуктивності, надійності, масштабованості, безпеки, інтеграції та відповідності нормативним вимогам. Метою статті є розробка та експериментальна перевірка узагальненої моделі багатокритеріальної оптимізації вибору ХСП. Запропонована у статті модель поєднала нечітке оцінювання критеріїв ХСП з еволюційними алгоритмами пошуку Парето-оптимальних рішень. А для розв'язання задачі вибору ХСП застосовано нечіткі функції належності та еволюційні алгоритми NSGA-III й MOEA/D. Експериментальну перевірка здійснена у середовищах програмування Google

Colaboratory та PyCharm. Для імітаційного експерименту під час апробації моделі залучено бібліотеки pymoo, pandas, numpy та matplotlib. В процесі імітаційного багатокритеріального відбору ХСП отримано стабільні множини Парето-оптимальних рішень. Під час експериментів зафіксовано зростання гіпероб'єму (Hypervolume). Також відмічена рівномірність розподілу рішень (Spacing) й підвищення різноманіття (Diversity) під час процедури вибору оптимального складу ХСП. Аналіз графіків паралельних координат показав покращення модельованих критеріїв ХСП. Результати дослідження підтвердили, що запропонована модель може бути використана як інструмент підтримки управлінських рішень під час планування та впровадження хмарних технологій у корпоративну інфраструктуру великих підприємств України. Її застосування посприяє підвищенню рівня стійкості, оптимізації витрат та зниженню ризиків в умовах воєнної та післявоєнної відбудови української економіки.

Ключові слова: хмарні сервіси, хмарна сервісна платформа (ХСП), багатокритеріальна оптимізація, нечітка логіка, еволюційні алгоритми, Парето-оптимальні рішення, моделювання; великі підприємства

Вступ (Introduction)

Бізнес-процеси багатьох великих підприємств України в умовах воєнного стану дедалі частіше спираються на інтеграцію хмарних сервісів (ХС). Саме ХС забезпечують гнучкість, масштабованість та економічну ефективність корпоративних IT-систем. Зростання різноманітності хмарних платформ, сервісних моделей та постачальників сформувало складну задачу багатокритеріального вибору конфігурації ХС. У такій оптимізаційній задачі потрібно одночасно задовольнити вимоги підприємств щодо продуктивності, безпеки, вартості, сумісності та відповідності стандартам хмарних сервісних платформ (ХСП) тощо.

Наявні методи та моделі [1, 2] розв'язання задачі вибору ХСП для великої кількості критеріїв переважно базуються на евристичних або суб'єктивних експертних оцінках. Такі методи та моделі не враховують нечіткість критеріїв та взаємозалежність між ними. Водночас використання методів нечіткої логіки (НЛ) та еволюційної багатокритеріальної оптимізації, на нашу думку, дозволить спростити процес ухвалення рішень і знайти узгоджені варіанти конфігурацій ХСП у просторі критеріїв. У роботі представлено узагальнену математичну модель відбору ХСП для великих підприємств. Модель поєднала нечітке оцінювання критеріїв якості із еволюційним пошуком множини Парето-оптимальних рішень. Акцент у статті зроблено на результатах обчислювального експерименту.

Великі українські підприємства дедалі активніше впроваджують ХС для забезпечення власних бізнесів. Збільшення кількості постачальників і сервісних моделей IaaS, PaaS, SaaS, BPaaS, DaaS тощо сформувало складну практичну задачу вибору оптимальної конфігурації ХСП за сукупністю суперечливих критеріїв. До цих критеріїв, зазвичай, належать – вартість, продуктивність, безпека, надійність, масштабованість, інтеграційна сумісність та відповідність ХСП нормативним вимогам. Проте наявні методи та моделі розв'язання цієї задачі наразі базуються на експертних або евристичних припущеннях. Апріорі ці методи характеризують високим рівнем суб'єктивності. Також ці методи та моделі здебільшого не враховують нечіткість і взаємозалежність між згаданими вище критеріями. Це істотно обмежує можливості для ухвалення обґрунтованих управлінських рішень щодо впровадження ХСП у корпоративні інфраструктури. Через це постає науково-практична проблема розроблення моделі багатокритеріальної оптимізації вибору конфігурацій ХСП, яка б, зокрема, врахувала нечіткі вимоги до параметрів ХСП. Саме тому релевантною є задача запропонувати модель, яка б поєднувала апарат нечіткої логіки з еволюційними методами пошуку Парето-оптимальних рішень. Така модель, на наш розсуд, має забезпечити формування узгоджених за

багатьма критеріями рішень з урахуванням невизначеності оцінок критеріїв. Вважаємо, що подібна модель здатна дозволити підприємствам досягти найкращих співвідношень між продуктивністю, безпекою та вартістю хмарних рішень.

Огляд літератури (Literature review)

Проблематика вибору та оптимізації ХСП упродовж останніх 10–15 років жваво розглядалася у працях вітчизняних і зарубіжних дослідників. В Україні питання ефективності використання хмарних технологій у діяльності підприємств досліджували Ю. Семененко [1], С. В. Мерінова та Л. П. Половенко [2]. Релевантні задачі впровадження інформаційних та хмарних технологій у корпоративне управління висвітлено у працях О. Лебідь [4] та Ю. І. Каткова [3].

Зарубіжні автори розробили низку методичних підходів до вибору провайдерів і сервісних моделей хмарних обчислень. У роботах J. Repschlaeger, R. Zarnekow та K. Turowski [7, 8] запропоновано застосовувати метод AHP для вибору постачальників хмарних послуг. Подальші дослідження H. Kwon і K. Seo [9], а також O. Boutkhoum [10] розвинули ці підходи через поєднання методів нечіткої логіки (fuzzy AHP, TOPSIS). Схожу методологію використано у роботах M. Tajvidi [13] та Y. Shin [12]. Автори оцінювали якість хмарних сервісів і процес формування інтегральних індексів ефективності ХСП.

Таксономічний аналіз класифікацій хмарних сервісів запропоновано у дослідженнях T. Fortiş [15], C. Höfer [16] та M. Firdhous [17]. Ці дослідження заклали основу для систематизації критеріїв оцінювання якості ХСП. Водночас, у працях J. Rittinghouse і J. Ransome [5], а також R. Buyya і S. Ilager [6] розглянуті питання управління ефективністю та безпекою ХСП.

Значна частина наукових робіт в останні роки присвячена саме проблематиці оптимізації складу ХСП. Зокрема науковці досліджували й доцільність застосування для розв'язання цієї задачі еволюційних алгоритмів, як найбільш швидкодіючих у багатокритеріальному просторі ознак ХСП. Суттєвий внесок у розвиток еволюційних методів оптимізації зроблено K. Deb [18], який розробив алгоритм NSGA-II, та Y. Yao [19], що адаптував його до задач вибору ХСП із врахуванням показників якості (QoS) [20, 21]. Саме ці підходи стали базою для сучасних досліджень з проблематики багатокритеріальної оптимізації хмарних рішень.

Попри значну кількість праць, більшість із них не враховує специфіку функціонування великих підприємств України. Це визначає потребу в розробленні нових моделей, здатних забезпечити узгоджене ухвалення рішень щодо вибору ХСП з урахуванням нечітких критеріїв і багатокритеріальної оптимізації.

Мета дослідження – експериментальна перевірка узагальненої моделі багатокритеріальної оптимізації вибору ХСП для великих підприємств, яка поєднала методи нечіткої логіки та еволюційні алгоритми пошуку Парето-оптимальних рішень. Розроблений програмний застосунок має забезпечити формування урівноважених конфігурацій ХСП з урахуванням суперечливих критеріїв – вартості, продуктивності, безпеки, масштабованості, надійності, інтеграції та відповідності стандартам.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Нехай $X = \{x_1, ..., x_n\}$ – множина потенційних конфігурацій хмарних сервісів, де $\{x_i\}$ – кожна конфігурація являє собою комбінацію сервісів з різних підкатегорій (обчислення, зберігання, безпека тощо).

Потрібно знайти таке $x^* \in X$, яке оптимізує векторну функцію цілі з урахуванням нечіткості критеріїв. Розглянемо наступні сім критеріїв для задачі вибору оптимального набору хмарних сервісів для великого підприємства (або далі приймаємо наступну абревіатуру ХСП – хмарні сервісні платформи): $f_1(x)$ – вартість ХСП (мінімізуємо); $f_2(x)$ – масштабованість

ХСП (максимізуємо); $f_3(x)$ – продуктивність ХСП (максимізуємо); $f_4(x)$ – рівень безпеки (або безпека) ХСП (максимізуємо); $f_5(x)$ – надійність ХСП (максимізуємо); $f_6(x)$ – відповідність ХСП стандартам (максимізуємо); $f_7(x)$ – інтеграція ХСП з іншими сервісами (максимізуємо).

Зазначимо, що набір критеріїв $\{f_1(x), \dots, f_7(x)\}$ не є довільним. Він є результатом так званої таксономії ознак. Конфігурацію ХСП для підприємства можна подати так:

$$f_j(x),\ j=1,\dots,k, \tag{1}$$

де $f_j(x)$ – критерії оцінювання ХСП (вартість, масштабованість, безпека тощо).

Для оцінювання критеріїв пропонуємо застосувати нечіткі функції належності:

$$\mu_i\left(f_j(x)\right)\in[0,1]. \tag{2}$$

Тоді агреговану функцію задоволеності ХСП подамо так:

$$\mu(x)=\sum_{j=1}^{k}\omega_i\mu_i\left(f_j(x)\right),\quad \sum_{j=1}^{k}\omega_i=1, \tag{3}$$

де ω_i – ваги критеріїв, отримані, наприклад, через AHP чи рівновагу Неша.

Вираз (3) складе ядро нечіткої моделі вибору ХСП.

Відповідно оптимізаційну постановку задачі вибору складу ХСП подамо так:

$$x^*=\arg\max_{x\in X}\mu(x). \tag{4}$$

Отже, згідно з виразом (4) здійснюємо вибір конфігурації ХСП, що максимізує наведена інтегральна задоволеність.

На наступному кроці знаходимо множину Парето-оптимальних рішень, яку апроксимуємо завдяки застосуванню алгоритмів NSGA-III та/або MOEA/D, відповідно до виразу (5):

$$P^*=\left\{x\in X\ \middle|\ \exists x':\ f_j(x')>f_j(x)\ \forall j\right\}. \tag{5}$$

Модель (1–5) реалізовано на мові програмування Python та проведено відповідні обчислювальні експерименти.

Вихідною позицією моделювання виступала таксономія критеріїв вибору ХСП [5–7бул]. Тобто таксономія у цьому випадку являла собою ієрархічну структуру (рис. 1.) класифікації критеріїв оцінювання якості ХСП.

Її зміст полягав у формалізації багатовимірного поняття “якість хмарного сервісу” через групування чинників за економічними, технічними, безпековими, правовими та організаційними ознаками. Це забезпечило цілісність категорій оцінювання ХСП.

Результатом методологічної інтеграції стало формування зв’язку між трьома рівнями представлення даних: теоретичний (таксономія) (рис. 1); інструментальний (опитувальник); аналітичний (датасет) (табл. 1).

У межах цього зв’язку кожна позиція опитувальника виступала похідною від певного елемента таксономії. А кожен запис у датасеті – це фактично кількісне відображення експертної оцінки.

Імітаційне моделювання та експериментальні обчислення здійснювалися у комбінованому середовищі Google Colaboratory та інтегрованому середовищі розробки PyCharm, (рис. 2). Це дало змогу поєднати під час імітаційних експериментів (ІЕ) зручність хмарних обчислень у Google Colaboratory із контролем локального програмного середовища PyCharm. Програмна реалізація моделі (1–5) виконувалася мовою Python версії 3.8 та 3.10. Мова Python обрана для проведення ІЕ завдяки своїй універсальності, відкритості та наявності розвиненої системи бібліотек для наукових обчислень.

Для реалізації математичних процедур, оброблення даних і візуалізації результатів застосовано бібліотеки pymoo 0.6.0, pandas 1.3.5, numpy 1.21.6 та matplotlib 3.2.2.

Таблиця 1. Структура опрацювання результатів опитування та формування даних для Dataset (фрагмент для 5 записів з 1063)

x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	cost	Scala-bility	per for ma nce	Secu-rity	Reli a-bilit y	Comp-liance	Integ - ratio n	servi ce_ type	eco_ wei ght	tech _ wei ght	sec_ wei ght	law _ wei ght	org _ wei ght
0. 43	0.9 5	0. 79	0. 63	0.2 4	0.24	0.15	0.88	4.5	7.4	1.3	0.23	0.90	0.74	0.84	IaaS	0.9	1.0	0.95	0.8	0.9
0. 11	0.9 7	0. 84	0. 29	0.2 6	0.26	0.37	0.57	1.3	6.8	1.5	0.43	0.65	0.64	0.61	DaaS	0.7	0.85	1.0	0.95	0.85
0. 65	0.2 2	0. 36	0. 43	0.5 1	0.80	0.28	0.56	6.3	3.8	4.7	0.35	0.65	0.74	0.48	SaaS	1.0	0.8	0.85	0.9	0.9
0. 64	0.2 5	0. 15	0. 95	0.9 6	0.82	0.37	0.18	6.2	4.2	8.5	0.43	0.35	0.80	0.69	DaaS	0.7	0.85	1.0	0.95	0.85
0. 21	0.5 4	0. 13	0. 91	0.3 3	0.69	0.38	0.56	2.	3.9	3.0	0.44	0.65	0.71	0.56	IaaS	0.9	1.0	0.95	0.8	0.9

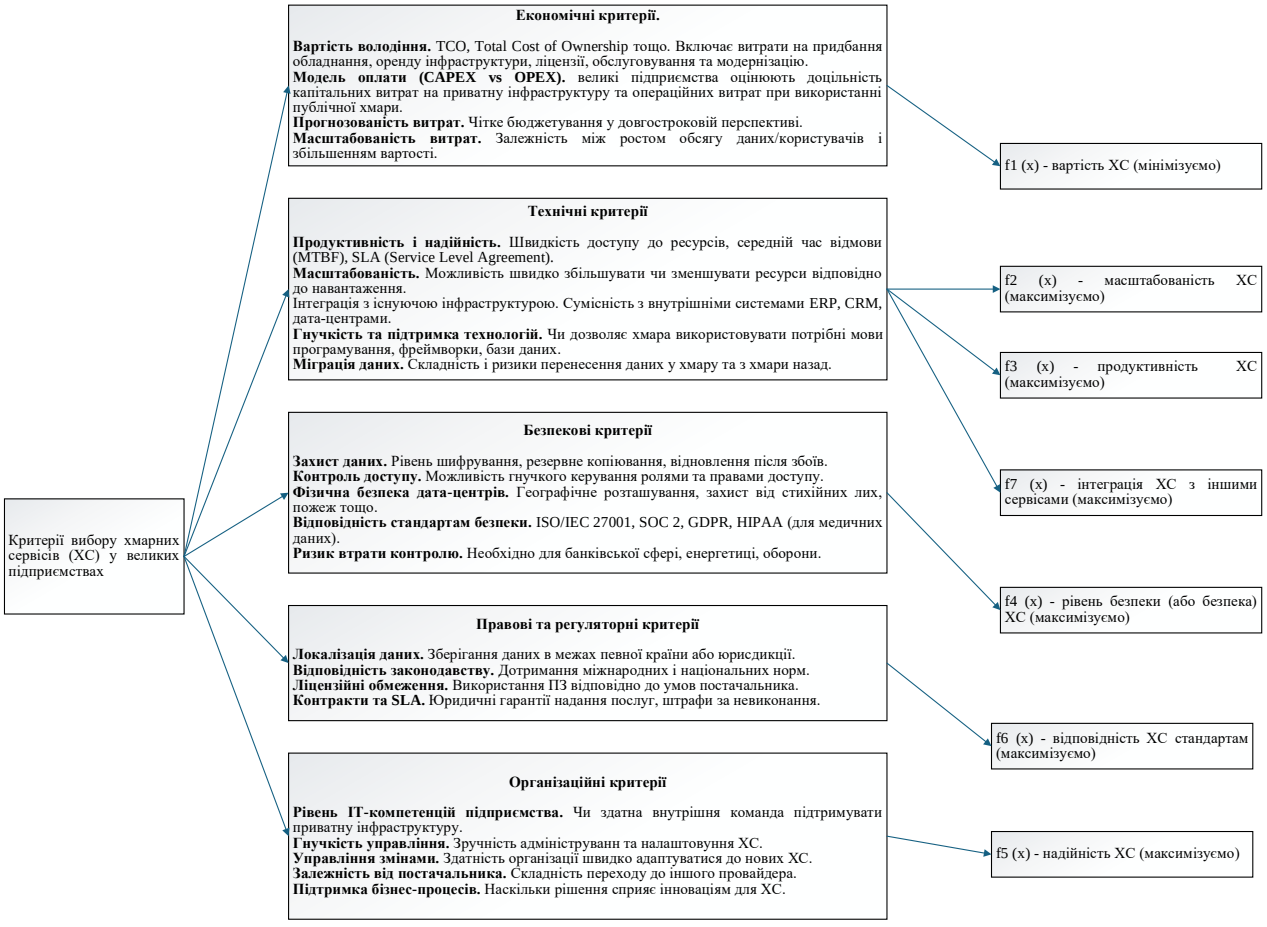


Рисунок 1. Таксономія критеріїв для оптимізації ХСП

Джерело: складено автором

Використання бібліотеки pymoo забезпечило у процесі реалізації ІЕ реалізацію алгоритмів багатокритеріальної оптимізації, зокрема NSGA-II, NSGA-III та MOEA/D, у поєднанні з процедурою оцінювання Парето-оптимальних рішень.

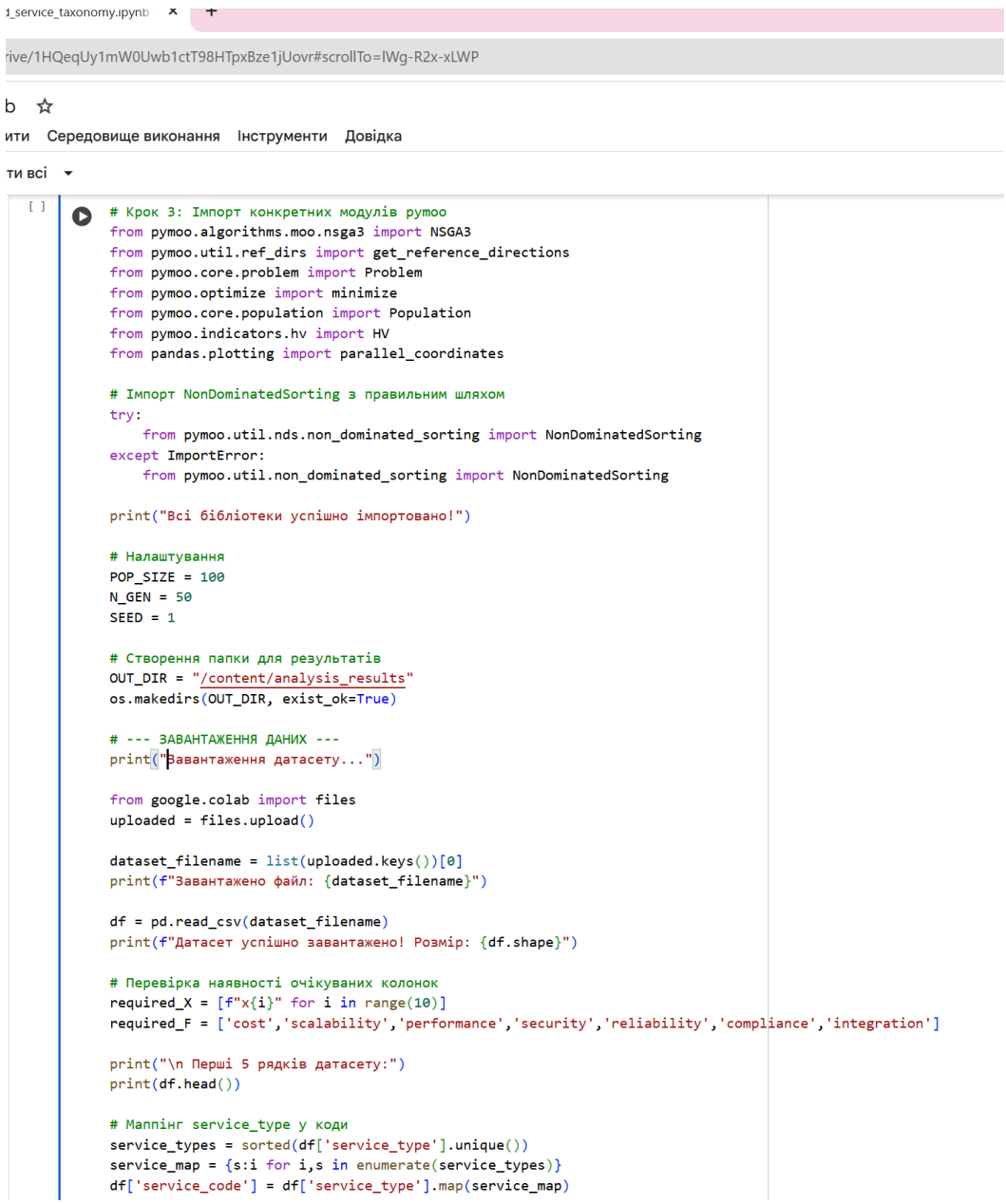


Рисунок 2. Загальний вигляд проведення ІЕ у Google Colaboratory

Апаратна конфігурація середовища виконання ІЕ містила ПК з центральним процесором частотою 2.3 GHz та оперативною пам’яттю 12 GB, що забезпечило достатній обсяг ресурсів для проведення симуляцій із середнім навантаженням й збереження результатів у окремих файлах *.csv.

Зазначимо, що розроблена експериментальна методика має низку обмежень. Вони пов’язані із постановкою завдання дослідження. Зокрема модель оцінювання охоплювала лише п’ять типових категорій хмарних сервісів – IaaS, PaaS, SaaS, BPaaS та DaaS. Проте це узгоджено із прийнятою у галузі класифікацією. Також аналіз здійснювався за фіксованим набором із семи цільових критеріїв $f_1(x) - f_7(x)$. Результати симуляцій певною мірою залежать від структури та наповнення вихідного датасету, (табл. 1). А датасет сформовано на основі експертних оцінок. Тому він відображав притаманні експертам суб’єктивні характеристики ХСП. Але, попри зазначені обмеження, розроблена методика забезпечувала системну основу

для відтворюваного дослідження процесу вибору та впровадження ХСП великих підприємств. Її застосування дозволило інтегровано оцінити ефективність розробленого методу багатокритеріальної оптимізації, перевірити узгодженість між теоретичною моделлю (1– 5) та експериментальними даними.

Результати дослідження наведено далі.

Результати (Results)

Основні результати виводимо у дашбордах (рис. 3, 4, 5).

На рис. 1 відображено результати першого етапу ІЕ. Мета етапу – порівняти розподіл недомінованих рішень, отриманих безпосередньо з емпіричного датасету, із оптимізованими Парето-фронтами, які сформовано за результатами роботи відповідного еволюційного алгоритму. На рис. 3 наведено приклад для NSGA-III. Для реалізації ІЕ застосуємо комбінацію критеріїв Cost ($f_1(x)$ – вартість ХСП (мінімізуємо), Scalability ($f_2(x)$ – масштабованість ХСП (максимізуємо) та Performance ($f_3(x)$ – продуктивність ХСП), які є, на думку більшості експертів, пріоритетними у процесі вибору та впровадження ХСП.

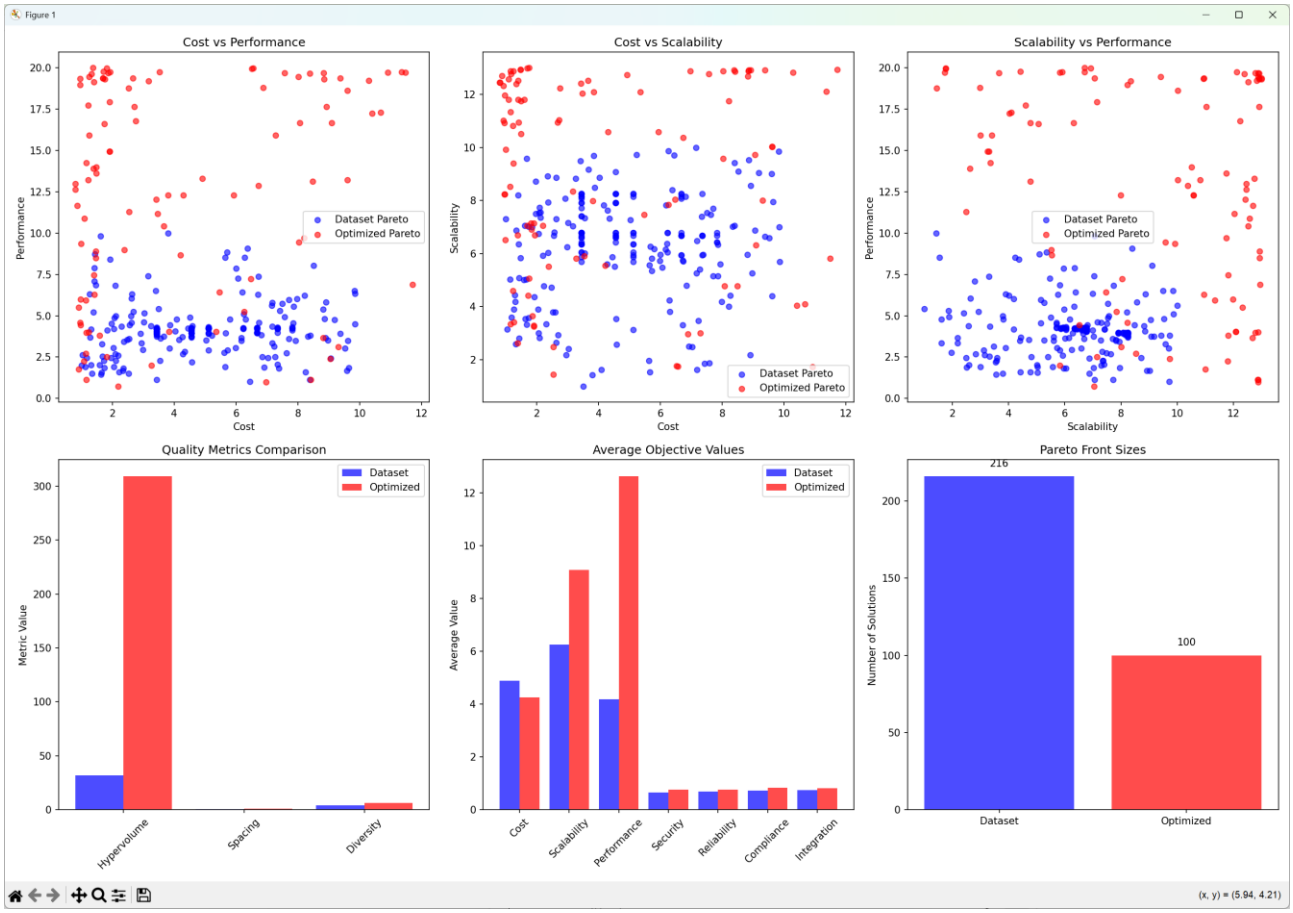


Рисунок 3. Загальний вигляд першого дашборда з результатами ІЕ (для варіанта застосування NSGA-III)

Порівняльний аналіз трьох діаграм показав відмінності між початковими недомінованими рішеннями (позначеними синім кольором) та оптимізованими результатами (позначеними червоним кольором).

У площині “Cost ($f_1(x)$) – Performance ($f_3(x)$)” спостерігаємо чітке розширення області Парето-фронту після оптимізації. Множина червоних точок охопила ширший простір співвідношень між продуктивністю та витратами. Це означає наступне. Алгоритм NSGA-III зміг віднайти нові комбінації параметрів, які забезпечили вищу продуктивність за порівнянних або нижчих витрат на ХМС.

Нижня частина дашборда на рис. 3 містила узагальнені результати другого етапу ІЕ. Мета цього етапу – кількісне оцінювання якості отриманих Парето-рішень та ефективності застосування алгоритмів NSGA-III та/або MOEA/D.

Для цього використано три групи показників. А саме – метрики якості рішень, середні значення цільових функцій та порівняння розміру Парето-фронтів до і після оптимізації. Гістограми на дашборді рис. 3 – віддзеркалене порівняння основних метрик якості для NSGA-III та MOEA/D – Hypervolume, Spacing та Diversity. Отримані результати свідчили про значне збільшення гіпероб’єму (Hypervolume) після оптимізації. Результат продемонстрував ширше покриття області узгодженості між розглянутими критеріями $f_1(x) – f_7(x)$. Іншими словами, після роботи алгоритмів NSGA-III та MOEA/D множина оптимальних рішень охоплювала більший обсяг простору критеріїв $f_1(x) – f_7(x)$.

Показник Spacing (SP) залишився близьким до нуля. Це майже ідеальний показник для датасету. Результат підтвердив рівномірність розподілу точок у фронті Парето. А також ІЕ довів відсутність кластеризації рішень при виборі оптимальних ХСП. Метрика Diversity демонструвала під час ІЕ зростання після оптимізації. Отриманий результат, відповідно, підтвердив збільшення різноманіття альтернатив у процесі вибору конфігурацій ХСП. Отже, такий показник є сприятливим для ухвалення управлінських рішень під час вибору ХСП для конкретного замовника.

Але головним результатом ІЕ, який довів спроможність моделі (1–5) знаходити оптимальні рішення, став вигляд графіка паралельних координат, який подано на рис. 4.

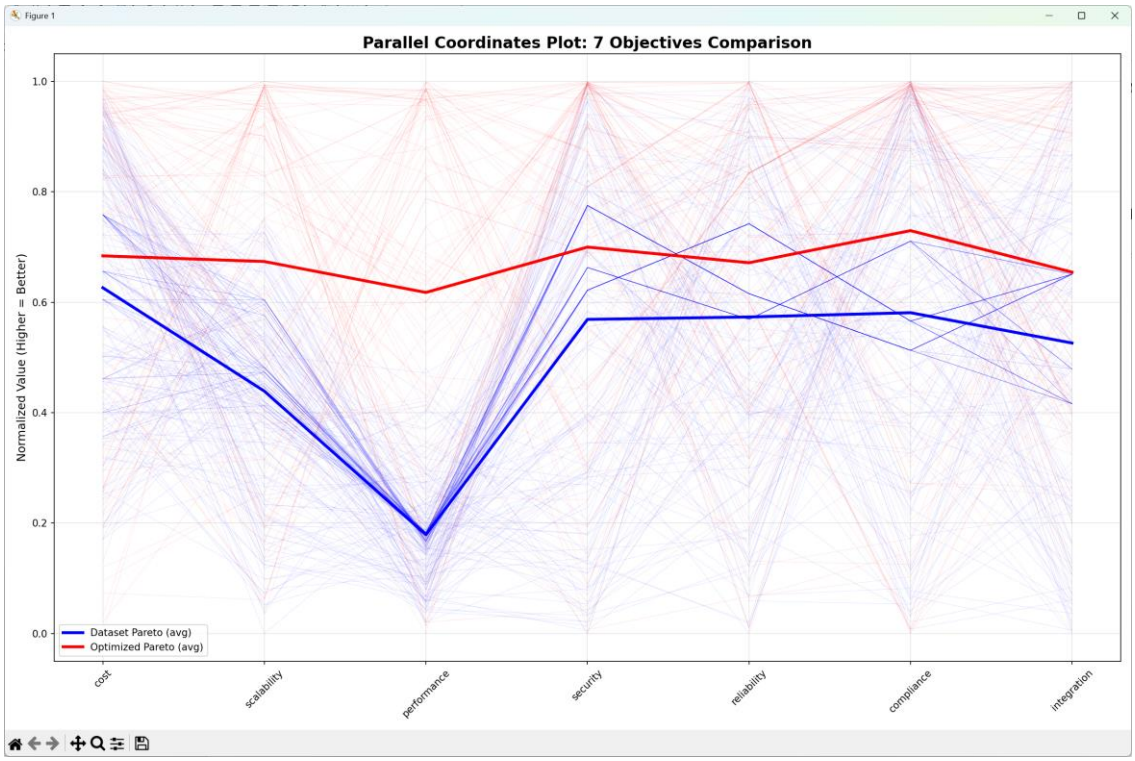


Рисунок 4. Графік паралельних координат для критеріїв $f_1(x) – f_7(x)$

На рис. 4 подано результат порівняння поведінки семи цільових критеріїв $f_1(x) – f_7(x)$ за допомогою графіка паралельних координат. Цей тип візуалізації є одним із найінформативніших для аналізу багатовимірних рішень. Саме графік паралельних координат дозволив одночасно простежувати під час ІК взаємозв'язки між критеріями $f_1(x) – f_7(x)$. Синя та червона групи ліній на рис. 4 відповідали Парето-фронтам. Останні отримано на різних етапах дослідження. Так, сині лінії відображали вихідні (неоптимізовані) рішення. Червоні лінії віддзеркалили результати після застосування моделі (1–5). Суцільні товсті лінії у кожній групі позначали середні профілі рішень для випадків застосування алгоритмів NSGA-III та MOEA/D. Такі товсті лінії дозволяли нам стежити за тенденціями змін для кожного критерію в нормалізованому просторі значень $f_1(x) – f_7(x)$. Як видно з графіка на рис. 4, після оптимізації спостерігаємо системне покращення більшості критеріїв. Зокрема, значення показників scalability ($f_2(x)$), security ($f_4(x)$), reliability ($f_5(x)$) та integration ($f_7(x)$) піднялися до верхніх рівнів шкали. Тобто результат засвідчив досягнення кращої рівноваги між технічними характеристиками ХСП і вимогами корпоративної інфраструктури. Підвищення середнього рівня security ($f_4(x)$) і reliability ($f_5(x)$) підтвердило, що оптимізаційний процес у дослідженні орієнтований не лише на економічні або продуктивні аспекти. Він також охопив параметри безпеки та стабільності ХСП.

Водночас зміна показника cost ($f_1(x)$) на рис. 4 продемонструвала незначне зниження. Це стало очікуваним ефектом. Згідно з логікою моделі (1–5) ми прагнемо мінімізувати витрати на ХСП. Але при цьому намагаємось досягти мінімальної вартості ХСП без суттєвого погіршення інших характеристик. Зсув свідчив про ефективність рівноваги між вартісною ($f_1(x)$) та якісною ХСП. Це виправдано, якщо мова йде про впровадження моделей IaaS і PaaS. Для останніх гнучкість масштабування та витрат є визначальними чинниками.

Також звернемо увагу на поведінку лінії критерію performance (($f_3(x)$) на рис. 4. Цей показник демонстрував виражену варіативність після оптимізації. Це свідчило про те, що модель не сфокусована на одній єдиній конфігурації ХСП. Модель (1–5) забезпечила варіативність рішень. Першочергово для варіантів із різними співвідношеннями продуктивності та інших параметрів. Така властивість є перевагою моделі (1–5) для практичних рішень. Тобто модель (1–5) потенційно дозволить прилаштувати вибір ХСП до індивідуальних потреб конкретного підприємства.

Загалом форма та нахил червоної лінії свідчили про стабільність нормалізованих показників. Також на рис. 4 спостерігаємо зменшення амплітуди коливань між ними. Це означає, що оптимізовані рішення характеризувалися не лише кращими середніми значеннями $f_1(x) – f_7(x)$, а також було зменшено ризик диспропорцій між окремими аспектами ефективності вибору на підґрунті застосування NSGA-III та MOEA/D. Результати, відображені на рис. 4, підтвердили наукову обґрунтованість і практичну ефективність моделі (1–5). Оптимізаційна модель впорядкувала поліпшення рівноваги між усіма сімома критеріями $f_1(x) – f_7(x)$. У підсумку застосування програмного застосунку сформувало гармонійний та стійкий Парето-фронт.

Висновок (Conclusion)

У межах дослідження виконано експериментальну перевірку узагальненої математичної моделі вибору ХСП для великих підприємств. Модель ґрунтувалася на поєднанні нечіткого оцінювання критеріїв якості ХСП із застосуванням еволюційних методів багатокритеріальної оптимізації – NSGA-III та MOEA/D.

Експериментальні дослідження реалізовані у середовищах Google Colaboratory та PyCharm із використанням бібліотек pymoo, pandas, numpy та matplotlib. Отримані результати підтвердили здатність моделі знаходити стабільні та узгоджені Парето-оптимальні рішення. У процесі симуляцій отримано зростання гіпероб'єму (Hypervolume), рівномірний розподіл

рішень (Spacing) та підвищення різноманіття альтернатив (Diversity). Отже, одержані результати засвідчили спроможність моделі забезпечити якісне покриття простору потенційних оптимальних конфігурацій ХСП.

Візуалізація результатів у вигляді графіка паралельних координат показала покращення ключових критеріїв масштабованості, безпеки, надійності та інтеграційної сумісності ХСП при одночасному зниженні витрат. Це підтвердило ефективність моделі у досягненні компромісу між технічними, економічними та безпековими аспектами вибору ХСП.

Проведена експериментальна перевірка довела практичну дієвість розробленої моделі як інструменту підтримки управлінських рішень щодо оптимізації конфігурацій ХСП. Застосування моделі дозволить менеджменту підприємств гнучко оцінити альтернативи оптимального складу ХСП. При цьому враховано й нечіткість експертних даних. Отже, отриманий результат сприяє підвищенню ефективності впровадження хмарних технологій у діяльність великих українських підприємств.

Конфлікт інтересів (Conflict of Interest)

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів.

Використані джерела

1. Семененко, Ю. (2024). Хмарні технології як фактор підвищення ефективності діяльності компанії. *Вісник Хмельницького національного університету*, *334* (5), 211–18.
2. Мерінова, С. В., & Половенко, Л. П. (2024). Хмарні технології в управлінні бізнес-процесами на сучасному підприємстві. *Здобутки економіки: перспективи та інновації*, *10*. https://doi.org/10.5281/zenodo.14003546
3. Катков, Ю. І., Звенігородский, О. С., Сєрих, С. О., & Бурсак, В. В. (2020). Підвищення ефективності малого бізнесу через використання хмарних сервісів. *Наукові записки Держ. ун-ту інформ.-комунікаційних технологій*, *2*, 34–44.
4. Лебідь, О. (2023). Цифрові та інформаційні технології в управлінні підприємством: реальність та погляд у майбутнє. *Економіка та суспільство*, *55*.
5. Rittinghouse, J. W., & Ransome, J. F. (2017). *Cloud computing: implementation, management, and security.* CRC press.
6. Buyya, R., Ilager, S., & Arroba, P. (2024). Energy efficiency and sustainability in new generation cloud computing: a vision and directions for integrated management of data centre resources and workloads. *Software: Practice and Experience*, *54* (1), 24–38.
7. Repschlaeger, J., Wind, S., Zarnekow, R., & Turowski, K. (2013). *Decision model for selecting a cloud provider: A study of service model decision priorities*.
8. Repschlaeger, J., Proehl, T., & Zarnekow, R. (2014). Cloud service management decision support: An application of AHP for provider selection of a cloud-based IT service management system. *Intelligent Decision Technologies*, *8* (2), 95–110.
9. Kwon, H. K., & Seo, K. K. (2013). A decision-making model to choose a cloud service using fuzzy AHP. *Advanced Science and Technology Letters*, *35* (1), 93–96.
10. Boutkhoum, O., Hanine, M., Agouti, T., & Tikniouine, A. (2017). A decision-making approach based on fuzzy AHP-TOPSIS methodology for selecting the appropriate cloud solution to manage big data projects. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, *8* (Suppl 2), 1237–1253.
11. Whaiduzzaman, M., Gani, A., Anuar, N. B., Shiraz, M., Haque, M. N., & Haque, I. T. (2014). Cloud service selection using multicriteria decision analysis. *The Scientific World Journal*, *1*, 459375.
12. Shin, Y. R., You, D., & Huh, E. N. (2018, Dec.). Analytic Hierarchy Process Based Cloud Service Assessment Model Using Service Measure Index. In *International Conference on Ubiquitous Information Technologies and Applications* (pp. 568–573).

13. Tajvidi, M., Ranjan, R., Kolodziej, J., & Wang, L. (2014, Oct.). Fuzzy cloud service selection framework. In *2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking (CloudNet)* (pp. 443–448). IEEE.
14. Harnisch, S., & Buxmann, P. (2013, June). Evaluating cloud services using methods of supplier selection. In *International Conference on Business Information Systems* (pp. 1–13). Springer Berlin Heidelberg.
15. Fortiş, T. F., Munteanu, V. I., & Negru, V. (2015). A taxonomic view of cloud computing services. *International Journal of Computational Science and Engineering*, *11* (1), 17–28.
16. Höfer, C. N., & Karagiannis, G. (2011). Cloud computing services: taxonomy and comparison. *Journal of Internet Services and Applications*, *2* (2), 81–94.
17. Firdhous, M. (2014, Aug.). A comprehensive taxonomy for the infrastructure as a service in cloud computing. In *2014 Fourth International Conference on Advances in Computing and Communications* (pp. 158–161). IEEE.
18. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation, 6(2), 182-197.
19. Yujie Yao, Haopeng Chen (2009, Dec.). QoS-aware service composition using NSGA-II. In *Proceedings of the 2009 ACM symposium on Applied Computing* (pp. 1185–1191). ACM.
20. Khomchak, M. (2024, 14 Apr.). Enterprise private cloud platforms: A systematic review of key vendors. *IJ Wireless and Microwave Technologies* (1–14).
21. Tsukamoto, Y., & Terano, T. (1977, Dec.). Failure diagnosis by using fuzzy logic. In *1977 IEEE Conference on Decision and Control including the 16th Symposium on Adaptive Processes and A Special Symposium on Fuzzy Set Theory and Applications* (pp. 139–1395). IEEE.

References

1. Semenenko, Y. (2024). Cloud technologies as a factor in increasing company efficiency. *Herald of Khmelnytskyi National University*, *334* (5), 211–218.
2. Merinova, S. V., & Polovenko, L. P. (2024). Cloud technologies in business process management at a modern enterprise. *Achievements of Economics: Perspectives and Innovations*, *10*. https://doi.org/10.5281/zenodo.14003546
3. Katkov, Y. I., Zvenigorodskyi, O. S., Serykh, S. O., & Bursak, V. V. (2020). Increasing the efficiency of small business through the use of cloud services. *Scientific Notes of the State University of Information and Communication Technologies*, *2*, 34–44.
4. Lebid, O. (2023). Digital and information technologies in enterprise management: Reality and a look into the future. *Economics and Society*, *55*.
5. Rittinghouse, J. W., & Ransome, J. F. (2017). *Cloud computing: Implementation, management, and security*. CRC Press.
6. Buyya, R., Ilager, S., & Arroba, P. (2024). Energy efficiency and sustainability in new generation cloud computing: A vision and directions for integrated management of data centre resources and workloads. *Software: Practice and Experience*, *54* (1), 24–38.
7. Repschlaeger, J., Wind, S., Zarnekow, R., & Turowski, K. (2013). *Decision model for selecting a cloud provider: A study of service model decision priorities*. [No publication details provided in the original. Assuming a working paper or conference presentation without proceedings details.]
8. Repschlaeger, J., Proehl, T., & Zarnekow, R. (2014). Cloud service management decision support: An application of AHP for provider selection of a cloud-based IT service management system. *Intelligent Decision Technologies*, *8* (2), 95–110.
9. Kwon, H. K., & Seo, K. K. (2013). A decision-making model to choose a cloud service using fuzzy AHP. *Advanced Science and Technology Letters*, *35* (1), 93–96.

10. Boutkhoum, O., Hanine, M., Agouti, T., & Tikniouine, A. (2017). A decision-making approach based on fuzzy AHP-TOPSIS methodology for selecting the appropriate cloud solution to manage big data projects. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, *8* (Suppl 2), 1237–1253.
11. Whaiduzzaman, M., Gani, A., Anuar, N. B., Shiraz, M., Haque, M. N., & Haque, I. T. (2014). Cloud service selection using multicriteria decision analysis. *The Scientific World Journal*, *2014* (1), 459375.
12. Shin, Y. R., You, D., & Huh, E. N. (2018). Analytic Hierarchy Process Based Cloud Service Assessment Model Using Service Measure Index. In *International Conference on Ubiquitous Information Technologies and Applications* (pp. 568–573). Springer Singapore.
13. Tajvidi, M., Ranjan, R., Kolodziej, J., & Wang, L. (2014). Fuzzy cloud service selection framework. In *2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking (CloudNet)* (pp. 443–448). IEEE.
14. Harnisch, S., & Buxmann, P. (2013). Evaluating cloud services using methods of supplier selection. In *International Conference on Business Information Systems* (pp. 1–13). Springer Berlin Heidelberg.
15. Fortiş, T. F., Munteanu, V. I., & Negru, V. (2015). A taxonomic view of cloud computing services. *International Journal of Computational Science and Engineering*, *11*(1), 17–28.
16. Höfer, C. N., & Karagiannis, G. (2011). Cloud computing services: Taxonomy and comparison. *Journal of Internet Services and Applications*, *2* (2), 81–94.
17. Firdhous, M. (2014). A comprehensive taxonomy for the infrastructure as a service in cloud computing. In *2014 Fourth International Conference on Advances in Computing and Communications* (pp. 158–161). IEEE.
18. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *6* (2), 182–197.
19. Yao, Y., & Chen, H. (2009). QoS-aware service composition using NSGA-II. In *Proceedings of the 2009 ACM symposium on Applied Computing* (pp. 1185–1191). ACM.
20. Khomchak, M. (2024). Enterprise private cloud platforms: A systematic review of key vendors. *IJ Wireless and Microwave Technologies*, *14* (4), 1–14.
21. Tsukamoto, Y., & Terano, T. (1977). Failure diagnosis by using fuzzy logic. In *1977 IEEE Conference on Decision and Control including the 16th Symposium on Adaptive Processes and A Special Symposium on Fuzzy Set Theory and Applications* (pp. 1390–1395). IEEE.

Computational Experiment on the Optimisation of Cloud Service Selection for Enterprises

Mykhailo Khomchak
Doctoral candidate, Faculty of Computer Science and Technologies
State University “Kyiv Aviation Institute”
Chief of the Department for Development and Cloud Technologies,
LLC “Kyivstar.Tech”
03113, Degtyarivska St., 53, Kyiv, Ukraine
e-mail: mykhailo.khomchak@gmail.com
ORCID: 0009-0000-4127-556X

Denis Molchanov
Research Fellow
Research Laboratory Department of Military Training
State University "Kyiv Aviation Institute"
03048, Medova Street 1, Kyiv, Ukraine
e-mail: mdbua2@gmail.com
ORCID: 0009-0007-9268-2764

Alevtyna Hetman
Senior Research Fellow
Military Institute of Telecommunications and Informatization
named after Heroes of Kruty
01011, Knyaziv Ostrozkyh St., 45/1, Kyiv, Ukraine
e-mail: getman2017@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6397-7412

Abstract. A scientific and practical problem concerning the selection of optimal configurations of Cloud Service Platforms (CSPs) for large Ukrainian enterprises is examined. The increasing strategic importance of CSPs in sustaining and securing enterprise business processes has created a demand for efficient methods of their evaluation and selection. Under conditions of armed confrontation with the russian federation, destabilisation of the economic environment, resource constraints affecting many Ukrainian companies and enterprises – particularly large-scale ones – and heightened requirements for information security, the issue of identifying an optimal CSP composition has become a matter of operational priority. The task is complicated by the presence of multiple, often conflicting criteria for CSP evaluation, including cost efficiency, performance, reliability, scalability, security, interoperability, and compliance with regulatory standards. The aim of this article is to develop and experimentally validate a generalised model for multi-criteria optimisation of CSP selection. The model proposed in this paper integrates fuzzy evaluation of CSP criteria with evolutionary algorithms for Pareto-optimal solution search. Specifically, fuzzy membership functions were combined with the NSGA-III and MOEA/D evolutionary algorithms to address the CSP selection problem. Experimental verification was conducted within the Google Colaboratory and PyCharm programming environments. The simulation experiment employed the pymoo, pandas, numpy, and matplotlib libraries. During the multi-criteria simulation-based selection process, stable sets of Pareto-optimal solutions were obtained. The experiments recorded an increase in the Hypervolume indicator, as well as uniformity in the Spacing metric and improved Diversity during the optimisation of CSP configurations. Analysis of parallel coordinate plots confirmed an overall improvement across the modelled CSP criteria. The research results demonstrate that the proposed model can serve as an effective decision-support instrument for management and planning in the deployment of cloud technologies within the corporate infrastructure of large Ukrainian enterprises. Its application is expected to enhance operational resilience, optimise resource expenditure, and reduce risk levels amid wartime and post-war reconstruction of the Ukrainian economy.

Keywords: cloud services, Cloud Service Platform (CSP), multi-criteria optimisation, fuzzy logic, evolutionary algorithms, Pareto-optimal solutions, simulation modelling, large-scale enterprises.