

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-обчислювальних систем і управління

ЗАКАЛЯК Роман Федорович

Багатокритеріальний метод вибору постачальника хмарних
послуг /

Multicriteria Method of Selecting a Cloud Services Provider

спеціальність: 122 – Комп'ютерні науки
освітньо-професійна програма – Комп'ютерні науки

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
КНМ-21
Р. Ф. Закаляк

Науковий керівник:
к.е.н., доцент Г. М. Гладій

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:
«__» _____ 2022 р.
Завідувач кафедри
_____ М. П. Комар

ТЕРНОПІЛЬ – 2022

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-обчислювальних систем і управління
Освітній ступінь «магістр»
Спеціальність 122 Комп'ютерні науки
Освітньо-професійна програма «Комп'ютерні науки»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ М. П. Комар
« ____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Закаляк Роман Федорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи:

Багатокритеріальний метод вибору постачальника хмарних послуг / Multicriteria Method of Selecting a Cloud Services Provider

керівник роботи: к.е.н., доцент Гладій Г. М.,

затверджені наказом по університету від 31 грудня 2021 року № 606.

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи: 16 листопада 2022 року.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: завдання на кваліфікаційну роботу студента, наукові статті, технічна література.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

- проаналізувати методи оцінювання якості надання хмарних послуг;
- сформулювати критерії вибору постачальника хмарних послуг;
- розробити модель вибору на засадах багатокритеріальності;
- провести апробацію моделі з вибору постачальника вказаних послуг
- запропонувати структуру хмарного брокера на основі багатокритеріального методу вибору постачальника

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

- загальна схема запропонованого методу вибору постачальника;
- схема алгоритму оцінювання провайдерів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 3 грудня 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Надання хмарних послуг і проблема вибору їх постачальника	12.2021 р. – 03.2022 р.	
2	Порівняльний аналіз багатокритеріальних методів прийняття рішень і застосування їх у процесі вибору хмарного провайдера	03.2022 р. – 05.2022 р.	
3	Експериментальне дослідження запропонованого методу вибору постачальника хмарних послуг і його застосування в хмарних брокерах	05.2022 р. – 11.2022 р.	
4	Повне завершення та представлення кваліфікаційної роботи на кафедрі	16.11.2022 р.	

Студент _____

Р. Ф. Закаляк

Керівник роботи _____

к.е.н., доцент Г. М. Гладій

РЕЗЮМЕ

Кваліфікаційна робота за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерні науки» спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» написана обсягом 108 сторінок і містить 13 таблиць, 22 ілюстрацій, 2 додатки і 91 використаних джерел.

Мета роботи – розробка методу вибору постачальника хмарних послуг на засадах багатокритеріальності.

Методи дослідження: системний підхід, математичне моделювання, багатокритеріальне прийняття рішень, експертне оцінювання, статистичні методи.

Основні результати дослідження: проаналізовано методи оцінювання якості надання хмарних послуг; сформовано критерії вибору постачальника хмарних послуг; розроблено модель вибору на засадах багатокритеріальності; проведено апробацію моделі з вибору постачальника вказаних послуг; запропоновано структуру хмарного брокера на основі багатокритеріального методу вибору постачальника.

Ключові слова: ХМАРНІ ОБЧИСЛЕННЯ, ПОСТАЧАЛЬНИК ХМАРНИХ ПОСЛУГ, МОДЕЛЮВАННЯ, БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНІ МЕТОДИ, ЕКСПЕРТНЕ ОЦІНЮВАННЯ, ХМАРНИЙ БРОКЕР.

RESUME

Master's thesis on the educational program "Computer Science" in specialty 122 "Computer Science" is 108 pages long and contains 13 tables, 22 illustrations, 2 appendices, and 91 used sources.

The purpose of the work is to develop a method for selecting a cloud service provider based on multi-criteria approach.

Research methods: systematic approach, mathematical modeling, multi-criteria decision-making, expert evaluation, statistical methods.

The main results of the research: the methods of evaluating the quality of providing cloud services were analyzed; criteria for selecting a cloud service provider were formed; a selection model based on multi-criteria was developed; the model for choosing the provider of the specified services was tested; a cloud broker structure based on a multi-criteria provider selection method is proposed.

Keywords: CLOUD COMPUTING, CLOUD SERVICE PROVIDER, SIMULATION, MULTI-CRITERIA METHODS, EXPERT EVALUATION, CLOUD BROKER.

ЗМІСТ

Вступ	7
1 НАДАННЯ ХМАРНИХ ПОСЛУГ І ПРОБЛЕМА ВИБОРУ ЇХ ПОСТАЧАЛЬНИКА	9
1.1 Поняття хмарних обчислень і хмарних послуг	9
1.2 Різноманіття постачальників хмарних послуг і проблема їх вибору	23
1.3 Критерії оцінювання хмарних сервісів і вибору постачальників	36
Висновки до розділу 1	44
2 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИХ МЕТОДІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ І ЗАСТОСУВАННЯ ЇХ У ПРОЦЕСІ ВИБОРУ ХМАРНОГО ПРОВАЙДЕРА	45
2.1 Порівняння сучасних методів багатокритеріального прийняття рішень	45
2.2 Аналіз використання багатокритеріальних методів у сфері хмарних обчислень	53
2.3 Багатокритеріальний метод вибору постачальника хмарних послуг	60
Висновки до розділу 2	65
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ ВИБОРУ ПОСТАЧАЛЬНИКА ХМАРНИХ ПОСЛУГ І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В ХМАРНИХ БРОКЕРАХ	67
3.1. Апробація розробленого методу вибору постачальника хмарних послуг ..	67
3.2. Багатокритеріальний метод вибору хмарного сервісу як ядро хмарного брокера	73
Висновки до розділу 3	79
Висновки	81
Список використаних джерел	83
Додаток А Атрибути якості хмарних послуг і їх визначення	92
Додаток Б Копія публікацій автора	96

ВСТУП

Актуальність дослідження. Хмарні обчислення дають змогу користувачам хмари задовольняти свої ІТ-потреби, використовуючи віртуалізовані через мережу Інтернет ресурси, не підтримуючи власну обчислювальну інфраструктуру. Хмарні обчислення – це революційна технологія, яка надає можливість користувачам платити за обчислювальні послуги та зберігання на основі плати за використання. Крім того, хмарні обчислення усувають різні адміністративні та технічні ускладнення, пов'язані з внутрішньою ІТ-інфраструктурою. Різні технології, такі як допоміжні обчислення та мережеві системи, використовуються для об'єднання численних комп'ютерів у середовищі хмарних обчислень. Технологія хмарних обчислень пропонує користувачам величезний обсяг ІТ-ресурсів як послугу через Інтернет у гнучкий спосіб.

Різні постачальники хмарних послуг пропонують подібні послуги з різними функціями за різними цінами та рівнями продуктивності. Велика кількість різних постачальників послуг хмарних обчислень ускладнює користувачам порівняння та вибір найкращого сервісу відповідно до їхніх потреб. Тому необхідно враховувати широкий спектр критеріїв відбору, щоб вибрати найвідповіднішого провайдера. Наприклад, такі критерії якості послуг як продуктивність або надійність є важливими для визначення характеристик провайдера. Атрибути безпеки та конфіденційності послуг також мають надзвичайне значення для хмарних клієнтів.

Важливою проблемою для клієнтів є те, як вибрати постачальника, послуги якого найкраще задовольняють їхні вимоги. Вибір хмарного сервісу можна вважати проблемою багатокритеріального прийняття рішень, який за наявності кількох критеріїв зазвичай прагне визначити найкращу альтернативу серед усіх можливих. Отже, тема множинного вибору провайдера хмарного сервісу є актуальною в сфері комп'ютерних наук.

Мета роботи – розробка методу вибору постачальника хмарних послуг на засадах багатокритеріальності.

Об'єктом дослідження є процес оцінювання якості надання хмарних послуг, а **предметом дослідження** – методи вибору постачальника хмарних послуг.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- проаналізувати методи оцінювання якості надання хмарних послуг;
- сформулювати критерії вибору постачальника хмарних послуг;
- розробити модель вибору на засадах багатокритеріальності;
- провести апробацію моделі з вибору постачальника вказаних послуг
- запропонувати структуру хмарного брокера на основі

багатокритеріального методу вибору постачальника.

Методи дослідження: системний підхід, математичне моделювання, багатокритеріальне прийняття рішень, експертне оцінювання, статистичні методи.

Наукова новизна дослідження полягає в розробці багатокритеріального методу вибору постачальника хмарних послуг і удосконаленні структури хмарного брокера, яка враховує суб'єктивні та об'єктивні оцінки продуктивності хмарних сервісів.

Практична значимість дослідження – запропоновано метод вибору хмарного провайдера, який може стати ядром системи хмарного брокера.

Апробація і публікації результатів. Результати дослідження доповідалися автором на мультидисциплінарній науковій інтернет-конференції «Світ наукових досліджень» (Тернопіль – Пшеворськ, 29-30 вересня 2022 р.) і міжнародній науковій інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: Випуск 71», (м. Тернопіль, 18-19 жовтня 2022 р.), та опубліковані в матеріалах вказаних конференцій (див. додаток Б).

1 НАДАННЯ ХМАРНИХ ПОСЛУГ І ПРОБЛЕМА ВИБОРУ ЇХ ПОСТАЧАЛЬНИКА

1.1 Поняття хмарних обчислень і хмарних послуг

У 21 ст. інформаційні технології перейшли в нову еру, відому як хмарні обчислення (cloud computing). Вони забезпечують користувачам широкий доступ до таких ресурсів, як сервери, операційні системи, мережі, програмне забезпечення, застосунки та обладнання для зберігання. Хмарні обчислення (ХО) стали перспективним вибором для компаній, щоб замінити локальну ІТ-інфраструктуру на хмарну.

Концепція хмарних обчислень сягає своїм корінням у 1950-1960 рр., хоча з тих пір вона зазнала значних змін. Компанії вперше почали використовувати ЕОМ у 1950-х рр., але комп'ютери були дорогими, і було непрактично всім користувачам мати власні машини. Тому запровадили концепцію розподілу часу, щоб ефективніше використовувати дорогоцінний процесорний час на громіздких ЕОМ.

Поділ часу давав змогу користувачам одночасно отримувати доступ до кількох екземплярів ЕОМ, щоб максимізувати обчислювальну потужність і мінімізувати час простою. Ця технологія є першим прикладом спільного використання обчислювальних ресурсів і формує основу хмарних обчислень сьогодні.

Витоки використання глобальних мереж для забезпечення обчислювальними ресурсами переважно приписують американському вченому Дж. Ліклайдеру, котрий допоміг створити Мережу агентств передових дослідницьких проєктів, попередницю Інтернету. Він прагнув об'єднати комп'ютери по всьому світу, надаючи користувачам доступ до даних і програм з довільного місця. Хмарні обчислення просунулися далі з появою перших віртуальних машин у 1970-х рр. Завдяки цьому користувачі змогли запускати кілька обчислювальних систем на одному фізичному комп'ютері. Їхні можливості призвели до концепції віртуалізації та мали великий вплив на розвиток хмарних обчислень.

У 1970-1980 рр. провідні технологічні компанії Microsoft, Apple і IBM запровадили технології, які покращили хмарне середовище та сприяли

використанню хостингу хмарних серверів. Salesforce стала першою компанією в 1999 р., яка надала доступ до бізнес-додатків через свій веб-сайт. У 2006 р. Amazon запустив Amazon Web Services (AWS) для надання послуг хмарних обчислень і зберігання. Відтоді інші великі технологічні компанії, зокрема Microsoft і Google, запустили свої хмарні продукти, щоб конкурувати з AWS.

Створення інфраструктури для підтримки ХО зараз становить значну частину всіх витрат на ІТ, тоді як витрати на традиційні внутрішні ІТ зменшуються, оскільки обчислювальні навантаження продовжують переміщатися в хмару, незалежно від того, чи це публічні хмарні послуги, пропоновані постачальниками, чи приватні хмари, побудовані самими підприємствами. Стає все очевиднішим, що коли справа доходить до корпоративних обчислювальних платформ, подобається це чи ні, хмара перемогла.

Остання динаміка ринку хмарних обчислень наведена на рис.1.1-1.2.

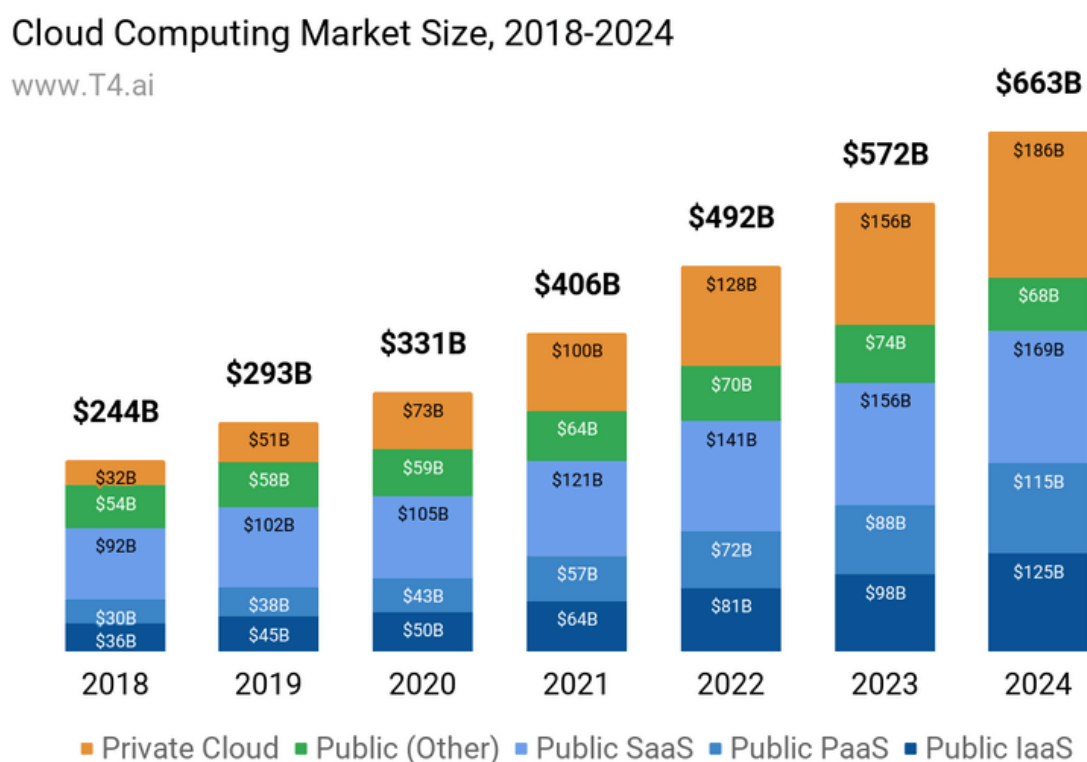


Рисунок 1.1 – Розмір ринку хмарних обчислень, 2018–2024 рр. [1]

За даними аналітиків компанії Gartner, глобальні витрати на публічні хмарні продукти зростають щорічно на 20,4% і, ймовірно, досягнуть 600 млрд \$US у 2023 р. Зростаюча тенденція гібридної роботи спонукає організації витратити приблизно

2,6 мільярда \$US/рік на свої зусилля з хмарної міграції.

Gartner прогнозує, що до 2025 р. приблизно половина витрат на ринки прикладного програмного забезпечення, інфраструктурного програмного забезпечення, послуг бізнес-процесів і системної інфраструктури буде перенесено в хмару, порівняно з 41% у 2022 р. За їхніми оцінками, майже дві третини витрат на прикладне програмне забезпечення будуть здійснюватися через ХО, порівняно з 57,7% у 2022 р. [2].

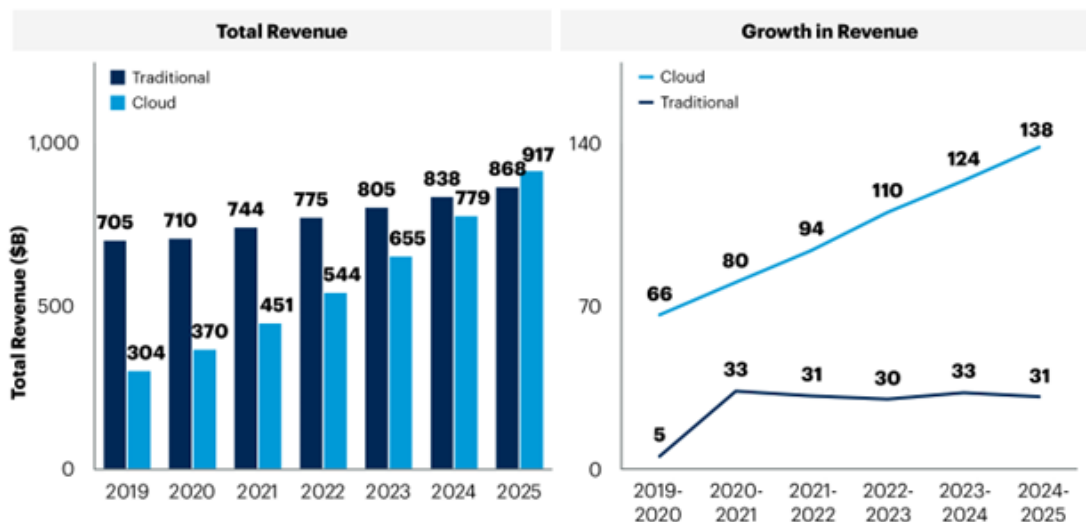


Рисунок 1.2 – Світова динаміка зміщення у хмару, 2019-2025 рр.

Технології та послуги ХО можуть бути реалізовані в різноманітних архітектурах, за різними моделями обслуговування та розгортання. Термін «хмарні обчислення» використовується з різними значеннями в різних контекстах. Найширше використовуваним визначенням є визначення Національного інституту стандартів і технологій США (NIST): «Хмарні обчислення – це модель для забезпечення повсюдного зручного мережевого доступу на вимогу до спільного пулу конфігурованих обчислювальних ресурсів (наприклад, мережі, сервери, сховища, програми та служби), які можна швидко надати та вивільнити з мінімальними зусиллями адміністратора або через взаємодію з постачальником послуг» [3].

Подібне визначення ХО наведено в міжнародному стандарті ISO/IEC 17788:2014: «Хмарні обчислення – це парадигма для забезпечення мережевого доступу до масштабованого та еластичного пулу фізичних або віртуальних

ресурсів з наданням самообслуговування і адмініструванням на вимогу» [4]. Варто зазначити, що ХО є парадигмою, котра розвивається. Їй притаманні такі ключові особливості:

- широкий мережевий доступ;
- вимірюване обслуговування;
- мультиоренда;
- самообслуговування за вимогою;
- швидка еластичність і масштабованість;
- пул ресурсів.

Також потрібно визначитись з терміном «хмарні послуги». Переклад англійської версії «cloud service» передбачає два варіанти – «хмарна служба» і «хмарна послуга», які нами використовуватимуться як синоніми.

Згідно з міжнародним стандартом ISO/IEC 22123-1: 2021 «хмарна служба (послуга) – одна або більше можливостей, запропоновані через хмарні обчислення, що викликаються за допомогою визначеного інтерфейсу»[5].

Інше визначення, запропоноване Міжнародним Телекомунікаційним Союзом: «хмарна послуга – це послуга, яка надається та використовується за запитом будь-коли через довільну мережу доступу, використовуючи будь-які підключені пристрої за допомогою технологій хмарних обчислень»[6].

Тому постає питання, як скористатися такими обчислювальними ресурсами з високою універсальністю, доступністю та мінімальними зусиллями в управлінні [7].

В результаті компанії тепер можуть зосередитися на своїх основних функціях, залишаючи постачальникам хмарних послуг (cloud service providers, CSP) вирішення проблеми керування своїми обчислювальними активами. CSP – це провайдери, які динамічно надають своїм клієнтам в оренду різні типи послуг згідно з попитом клієнта на основі оплати за використання. Відносини між замовниками та постачальниками послуг організуються відповідно до певного договору, який називається Угодою про рівень обслуговування (Service Level Agreement, SLA) [8].

У середовищі хмарних обчислень функціонують три суб'єкти (рис.1.3):

- постачальник хмарних послуг (cloud service provider);

- власник даних (data owner);
- користувач (user) або власник запитів (query owner).

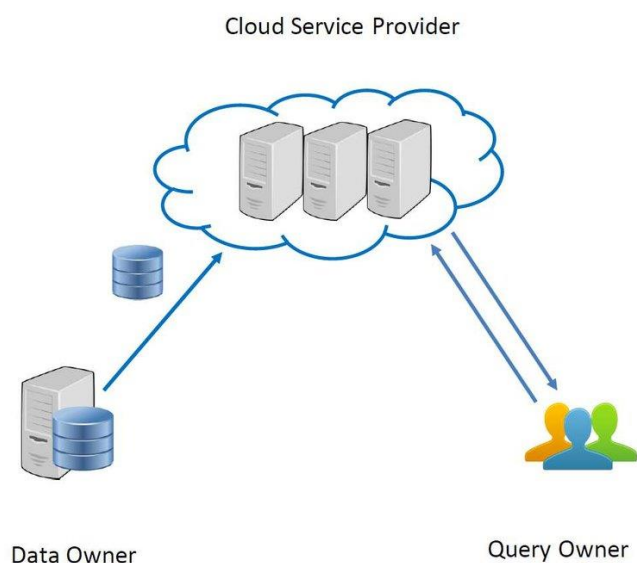


Рисунок 1.3 – Суб'єкти ринку хмарних послуг

Керуючи всіма операціями в хмарному середовищі, провайдер виконує функцію центральної влади. Власники даних зберігають свої дані на хмарному сервері, а користувачі використовують цей сервер для доступу до даних або послуг [9, 10]. Можливість доступу до надійних високопродуктивних апаратних і програмних ресурсів як послуги, уникаючи витрат на розробку, обслуговування та безпеку, спонукала ІТ-стейкхолдерів перейти до хмарних обчислень.

Стандарти ISO визначають суб'єктів, задіяних в ХО, як окремі сторони (party): постачальник хмарних послуг, споживач послуг хмарних послуг і партнери з хмарних послуг. Там також визначено ролі і субролі цих сторін (рис.1.4).

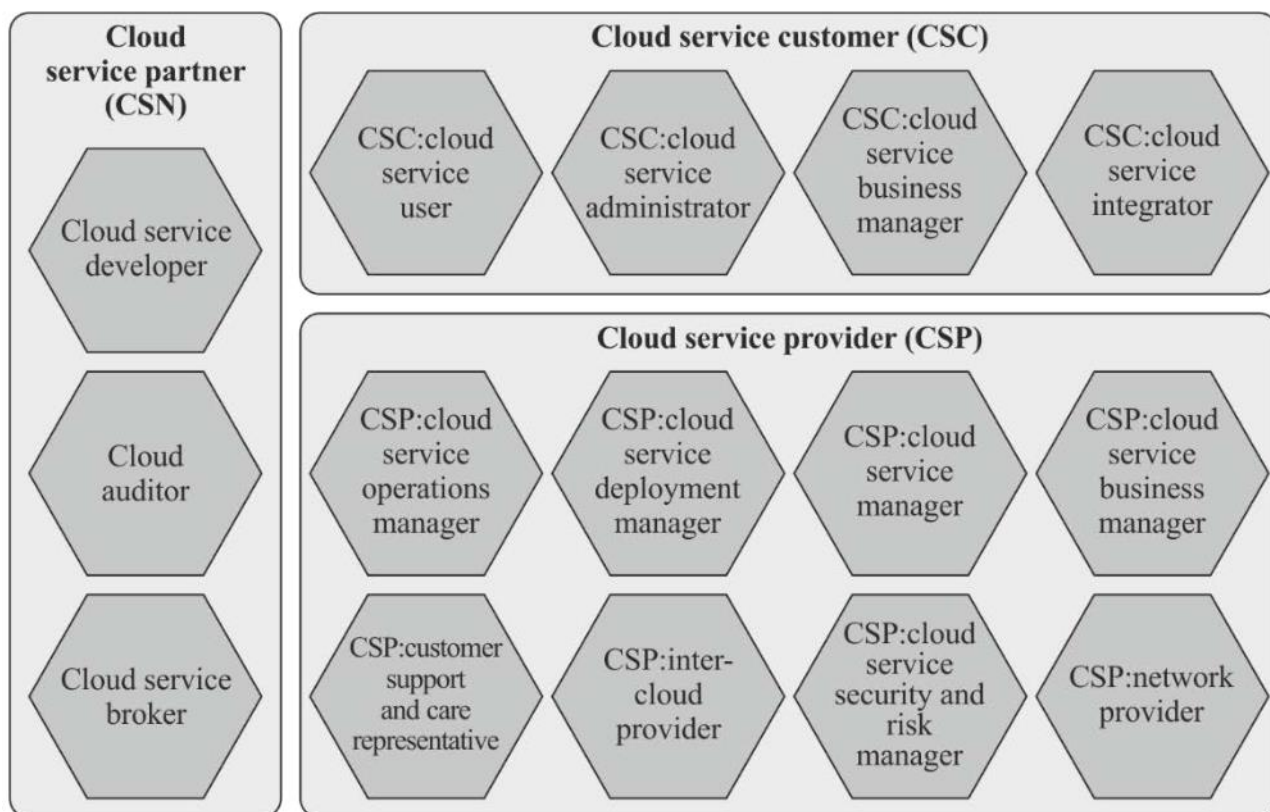


Рисунок 1.4 – Ролі та субролі сторін у хмарному середовищі [11]

Завдяки значним перевагам, які ХО пропонують бізнесу, інвестиції в цю технологію надзвичайно зростають. Відповідно зростає кількість як хмарних сервісів, так і провайдерів цих послуг [12]. Великі ІТ-компанії, такі як Google, Microsoft та Amazon, зараз змагаються за те, щоб запропонувати своїм клієнтам надійні та економічно ефективні послуги, які найкраще відповідають їхнім запитам. Ця здорова конкуренція призводить до розквіту технології ХО і спонукає багато ІТ-компаній покращувати якість обслуговування (quality of service, QoS).

Сьогодні на ринку хмарних послуг різні постачальники пропонують подібні послуги з різними функціями за різними цінами та рівнями продуктивності [13]. Велика кількість різних постачальників послуг хмарних обчислень ускладнює користувачам порівняння та вибір найкращого сервісу відповідно до їхніх потреб [14, 15]. Для зменшення складності вибору сервісу користувачами хмари почали запроваджувати хмарних брокерів (рис.1.5), тобто посередників між користувачем хмари та надавачем послуг. Система хмарного брокера враховує вимоги користувачів і надає ранжований список відповідних хмарних сервісів.

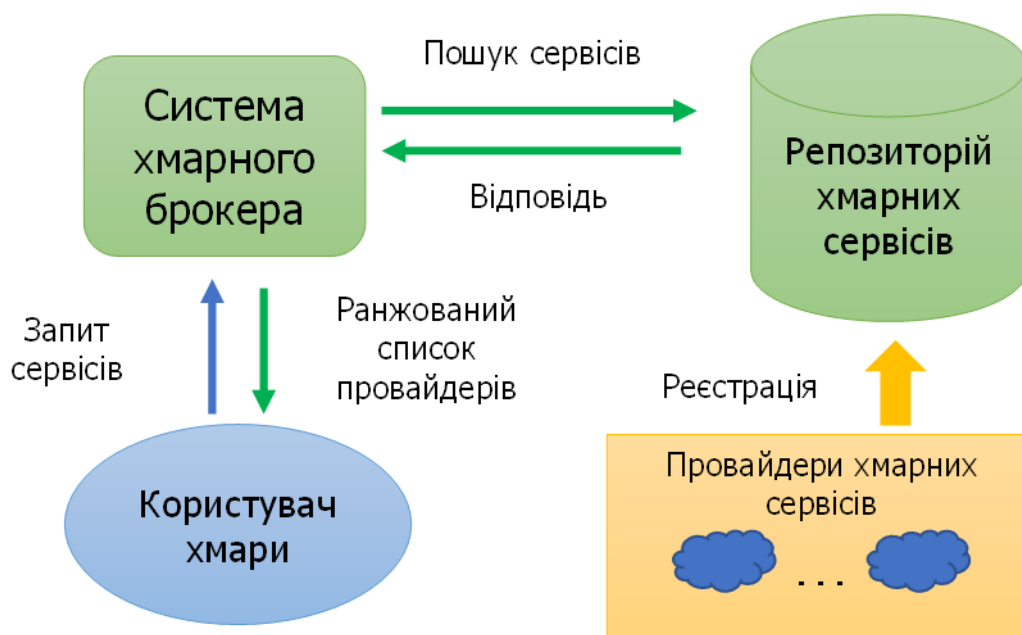


Рисунок 1.5 – Архітектура хмарного брокера

Парадигма хмарних обчислень передбачає три основні моделі обслуговування на основі вимог клієнтів [14]:

- програмне забезпечення як послуга (Software as a Service, SaaS);
- платформа як послуга (Platform as a Service, PaaS);
- інфраструктура як послуга (Infrastructure as a Service, IaaS).

Також ще доступно багато моделей послуг відповідно до їхніх функціональних можливостей і можливостей надання послуг, що призвело до створення моделей доставки Anything-as-a-Service (XaaS).

Далі порівнюємо основні типи моделей послуг.

I. Інфраструктура як сервіс (IaaS).

У IaaS, яку іноді називають Hardware-as-a-Service, провайдер постачає обладнання або фізичні ресурси, такі як сервери (Servers), сховище (Storage) та мережа (Network), на вимогу клієнтів. IaaS використовує технологію віртуалізації для створення віртуального екземпляра фізичних ресурсів, таких як віртуальні машини, сховище даних і пропускна здатність мережі. Віртуалізація дає змогу використовувати фізичні ресурси кільком клієнтам, однак користувачі не можуть бачити чи обмінюватися даними один одного.

Мультиорендність призводить до оптимального використання апаратного забезпечення та механізму зберігання даних. Зазвичай користувач не відстежує і не знає місцезнаходження віртуальних ресурсів. Він може отримати доступ до необхідних ресурсів, не замислюючись про фізичні деталі. Переваги цієї моделі включають оплату за використання та гнучкість ресурсів для відповідних потреб у обчисленнях. Клієнтські ресурси, доступні для надання, часто виглядають необмеженими та їх можна придбати будь-коли в будь-якій кількості. У IaaS клієнт не керує і не контролює базову хмарну інфраструктуру, однак, операційні системи, дані та програми, які запускаються та зберігаються у віртуальній інфраструктурі, керуються клієнтом. Прикладами постачальників IaaS є Amazon Elastic Compute Cloud, Amazon Simple Storage Service і GoGrid.

II. Платформа як сервіс (PaaS).

У PaaS провайдер надає послуги у вигляді комплексу розробки програмного забезпечення (Software Development Kit, SDK), мов програмування, операційних систем й інтегрованого середовища розробки (Integrated Development Environments, IDE), які можуть використовуватися клієнтами для розробки власних програм у хмарній інфраструктурі. Клієнти можуть контролювати програми, проте не мають засобів для управління інфраструктурою чи операційними системами, які лежать в їхній основі. Це корисно за обставин, коли кільком розробникам, розташованим у різних фізичних місцях, потрібно працювати разом, оскільки їм надається інтегрований стек для створення та розгортання програм із хмари. Популярним постачальником PaaS є Google App Engine. Це SDK, що забезпечує середовище, котре підтримує мови програмування Python, Java та Go. Іншими відомими постачальниками PaaS є Salesforce і Microsoft Azure.

III. Програмне забезпечення як послуга (SaaS).

Провайдер пропонує готові до використання програми, централізовано розміщені в хмарі, щоб замінити програми, запущені на локальних машинах. Клієнти можуть отримати доступ до цих програм просто через веббраузери, запущені на різних клієнтських пристроях, наприклад, смартфонах. Переваги цієї моделі включають централізовану конфігурацію та розміщення, оновлення випуску програмного забезпечення без необхідності переустановлення та

прискорену доставку функцій. У SaaS клієнти не можуть керувати чи контролювати базову хмарну інфраструктуру, операційні системи чи навіть основні функції додатків, однак вони мають доступ до обмежених налаштувань конфігурації програми, що стосуються користувача. Популярні постачальники SaaS – програми Google і Amazon Web Services (AWS).

IV. Будь-що як послуга (XaaS).

Окрім трьох основних послуг, провайдери також надають послугу під терміном «XaaS», де «X» є змінною, з якою можуть бути пов'язані різні об'єкти, наприклад, дані як послуга (Data-as-a-Service, DaaS), моніторинг як послуга (Monitoring-as-a-Service, MaaS), маршрутизація як послуга (Routing-as-a-Service, RaaS), безпека як послуга (Security-as-a-Service, SecaaS) чи зв'язок як послуга (Communication-as-a-Service, CaaS).

Результати порівняння розглянутих типів послуг наведено в табл.1.1.

Якщо порівнювати IaaS, PaaS і SaaS з точки зору стійкості, то IaaS виділяється з поміж них. Стійкість повністю залежить від обраного провайдера. Те ж саме стосується й безпеки. Вартість IaaS, яка переважно стягується за годину користування послугами, може зрости через точний характер виставлення рахунків.

З іншого боку, PaaS дає змогу впоратися з просунутим високорівневим програмуванням, оптимізуючи та спрощуючи процес. Це робить розробку програм більш ефективною з точки зору витрат коштів і часу. Ціна, однак, зростатиме разом із розширенням масштабу клієнтського додатка. Після приєднання до постачальника PaaS, клієнт буде зацикленим на обраному середовищі та інтерфейсі.

SaaS має цінову перевагу перед PaaS і IaaS, що робить його порятунком для приватних осіб і малого бізнесу. Проте в SaaS, на відміну від IaaS і PaaS, відсутній контроль над управлінням, оскільки постачальник послуг контролює всі аспекти.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика типів хмарних послуг

	IaaS	PaaS	SaaS
Особливості	<ul style="list-style-type: none"> – надає будівельні блоки для хмарної інфраструктури; – надає обчислювальні ресурси; – модель pay-as-you-go. 	<ul style="list-style-type: none"> – зовнішня сторона надає своїм користувачам інструменти через Інтернет; – треті сторони пропонують свої інструменти та послуги на власній інфраструктурі. 	<ul style="list-style-type: none"> – забезпечує доступ до веб-програми через Інтернет; – модель pay-as-you-go.
Переваги	<ul style="list-style-type: none"> – помірна ціна; – гнучкість; – аварійне відновлення; – доступність; – надійність. 	<ul style="list-style-type: none"> – економічна ефективність; – збільшення продуктивності; – гнучкість і чутливість; – просте масштабування; – зручна доступність. 	<ul style="list-style-type: none"> – масштабованість і доступність; – помірна ціна; – простота оновлення; – легкість розгортання.
Недоліки	<ul style="list-style-type: none"> – відсутність контролю; – проблема безпеки даних. 	<ul style="list-style-type: none"> – проблеми сумісності; – зміна постачальника. 	<ul style="list-style-type: none"> – недостатній рівень безпеки даних; – менший контроль.
Приклади провайдерів	<ul style="list-style-type: none"> – Amazon Web Services; – Google Compute Engine; – Microsoft Azure; – DigitalOcean. 	<ul style="list-style-type: none"> – AWS Elastic; – Beanstalk; – Apache Stratos; – Force.com; – OpenShift; – Heroku; 	<ul style="list-style-type: none"> – Google Workspace; – Salesforce; – Cisco WebEx; – Dropbox.

Прийняття правильного рішення щодо вибору послуг і провайдера має вирішальне значення для успіху бізнесу, і це може заощадити клієнтам багато проблем і витрат у довгостроковій перспективі. На відміну від традиційних ІТ-рішень і локальних рішень, PaaS, IaaS і SaaS пропонують різні рівні автономії та контролю та відповідають різним потребам бізнесу.

Розмежування сфер впливу споживачів і провайдерів у розрізі основних послуг наведено на рис.1.6.

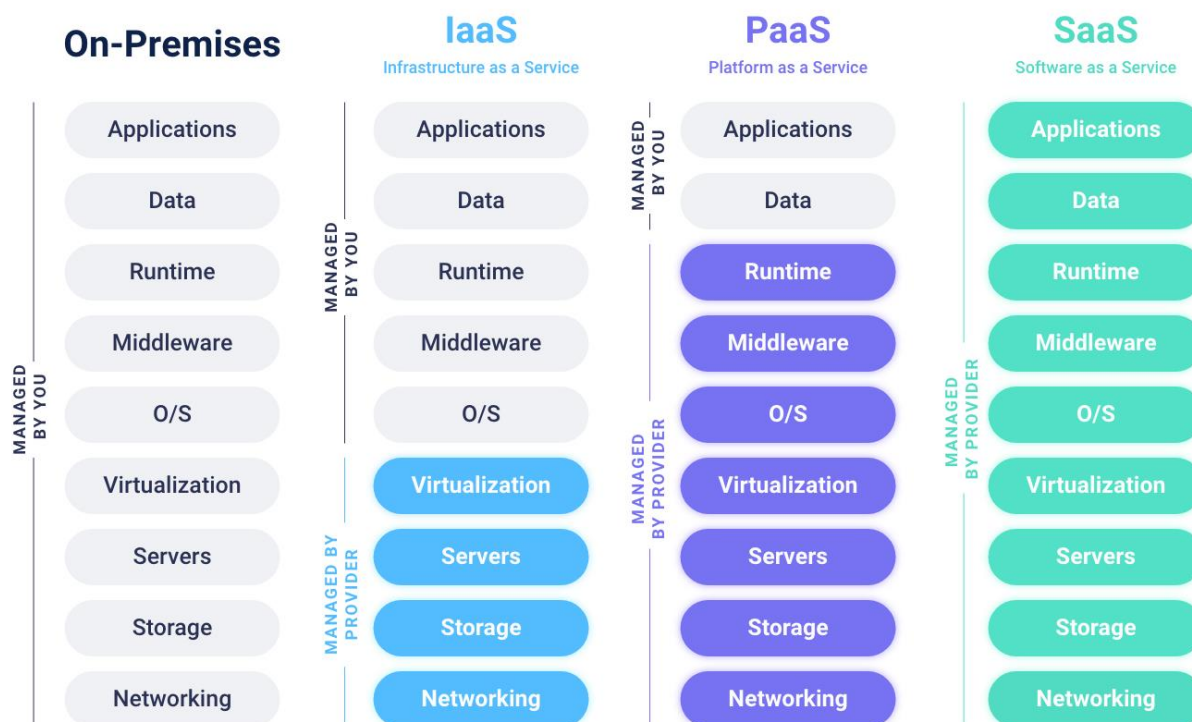


Рисунок 1.6 – Сфери впливу клієнта і провайдера для основних типів хмарних послуг [20]

Відповідь на питання «Що краще: PaaS, IaaS чи SaaS?» непроста. Усі три моделі хмарних обчислень мають переваги та недоліки, які варто враховувати. Але вони також пропонують різні рівні гнучкості, масштабованості та контролю, щоб відповідати будь-яким потребам бізнесу.

Із ХО також пов'язані моделі розгортання хмарного середовища. Під моделлю хмарного розгортання (cloud deployment model) розуміють спосіб організації хмарних обчислень на основі контролю та спільного використання фізичних або віртуальних ресурсів [21]. Зазвичай, до моделей розгортання хмари належать:

- колективна хмара (community cloud);
- приватна хмара (private cloud);
- публічна хмара (public cloud);
- гібридна хмара (hybrid cloud).

Сьогодні компанії та підприємства всіх форм і розмірів звертаються до

хмарних обчислень. Проте немає нічого ідеального, і ХО не є винятком. Хоча вони надзвичайно корисні, але мають певні ризики та проблеми, які не варто ігнорувати при переході до хмарного середовища. Далі наведемо узагальнені ключові переваги та недоліки ХО та їх застосувань.

Переваги хмарних обчислень:

- економічна ефективність. Основна причина переходу компаній на хмарні обчислення полягає в тому, що вони потребують значно менших витрат, ніж будь-яка локальна технологія. Тепер хмара пропонує величезний простір для зберігання, заощаджуючи гроші та ресурси;
- висока швидкість. ХО дають змогу швидко розгорнути службу за меншу кількість кліків, тобто швидке розгортання надає можливість отримати необхідні ресурси за лічені хвилини;
- виняткова доступність. Зберігання інформації в хмарі надає доступ до неї будь-де та будь-коли незалежно від машини, роблячи її доступною та гнучкою технологією сучасності;
- резервне копіювання та відновлення даних. Коли дані зберігаються в хмарі, легше отримати їхню резервну копію та відновити, що досить трудомістко у локальній технології;
- керованість. ХО усувають потребу в оновленні та обслуговуванні ІТ-інфраструктури, оскільки постачальник послуг забезпечує своєчасне, гарантоване та безперебійне надання послуг, а також піклується про обслуговування та керування ІТ-послугами клієнта відповідно до угоди про рівень обслуговування;
- нерегулярна пакетна обробка. ХО дають змогу змінювати ресурси та послуги відповідно до потреб споживача. Якщо робоче навантаження не буде 24/7, користувачеві не потрібно турбуватися про те, що ресурси та послуги будуть витрачені даремно, тобто частина служб залишиться невикористаною;
- стратегічна перевага. ХО надають компанії перевагу перед конкурентами, коли йдеться про доступ до найновіших і критично важливих додатків, які їй потрібні, без необхідності інвестувати свій час і гроші в їхню інсталяцію;

- легке впровадження. Завдяки хмарному хостингу підприємства можуть зберігати ті ж додатки та процеси без необхідності працювати з технічними нюансами серверної частини. До хмарної інфраструктури можна легко отримати доступ;

- немає потреби в апаратному забезпеченні. Оскільки хмара розміщує все, відсутня потреба у фізичному центрі зберігання даних. Проте резервне копіювання рекомендовано для запобігання аварійним ситуаціям і забезпечення неперервності роботи;

- автоматична інтеграція програмного забезпечення. У хмарі інтеграція програмного забезпечення відбувається автоматично. Не потрібно додаткових зусиль для налаштування та інтеграції додатків згідно з вподобаннями;

- надійність. Це найбільша перевага хмарного хостингу. Завдяки миттєвим оновленням не потрібно турбуватися про зміни;

- мобільність. Співробітники, які працюють на місці або віддалено, можуть легко отримати доступ до всіх хмарних служб за наявності підключення до Інтернету;

- необмежений обсяг пам'яті. Хмара постачається з майже необмеженою ємністю для зберігання, яку можна розширити в будь-який час за дуже номінальну щомісячну плату;

- співробітництво. Платформи ХО допомагають співробітникам, які знаходяться в різних місцях, зручно та безпечно співпрацювати один з одним.

Недоліки хмарних обчислень:

- вразливість до атак. Зберігання даних у хмарі може спричинити серйозні проблеми крадіжки інформації, оскільки всі дані компанії знаходяться в Інтернеті. Попри те, що в хмарі використовуються розширені заходи безпеки, зберігання конфіденційних даних у хмарі може бути ризикованою справою, а тому варто враховувати вразливість до атак;

- залежність від мережевого підключення. ХО повністю залежать від Інтернету, а це означає, що компанія потребує надійного та постійного Інтернет-сервісу, а також швидкого з'єднання та пропускну здатності, щоб скористатися

перевагами ХО;

- час простою. Вважається одним із найпотенційніших недоліків використання ХО. Постачальники хмарних послуг іноді можуть стикатися з технічними збоями через різні причини, такі як втрата живлення, низький рівень підключення до Інтернету, припинення роботи центрів обробки даних для технічного обслуговування тощо, що може призвести до тимчасового простою хмарної служби;

- блокування постачальника. Мігруючи з однієї хмарної платформи на іншу компанія може зіткнутися з серйозними проблемами через відмінності між платформами постачальників. Перехід може спричинити проблеми з підтримкою, ускладнення конфігурації та додаткові витрати. Дані компанії також можуть залишатися вразливими для атак під час міграції;

- обмеженість контролю. Клієнти хмарних технологій можуть зіткнутися з обмеженим контролем при розгортанні. Хмарні служби працюють на віддалених серверах, якими повністю володіють і керують постачальники послуг, що ускладнює для компаній бажаний рівень контролю над своєю серверною інфраструктурою;

- недоступність певних функцій. Деякі постачальники хмарних послуг пропонують лише обмежені версії з найпопулярнішими функціями. Перед реєстрацією важливо знати, які хмарні послуги надаються;

- проблеми з пропускну здатністю. Для кращої продуктивності бажано не розміщувати велику кількість пристроїв зберігання даних і серверів у невеликих центрах обробки даних. Однак додаткове зберігання може бути значно дорогим;

- брак підтримки. Компанії ХО часто не надають належної підтримки своїм клієнтам і вважають, що для них досить поширених запитань (FAQ) чи онлайн-довідки;

- варіювання продуктивності. У хмарному середовищі провайдер надає ресурси багатьом підприємствам. Це означає, що будь-яка атака чи шкідлива діяльність щодо провайдера може вплинути на продуктивність спільних ресурсів.

Незважаючи на всі переваги та недоліки ХО, неможливо заперечувати той факт, що хмарні обчислення є частиною мережево-орієнтованих обчислень, яка

розвивається найшвидше. ХО пропонує велику перевагу клієнтам будь-якого розміру: простому користувачеві, розробникам і всім типам підприємств й організацій. Варто зазначити, що частина недоліків хмарних обчислень є випадковою та незначною, прогрес у технологіях безперечно усуне їх найближчими роками.

1.2 Різноманіття постачальників хмарних послуг і проблема їх вибору

Хмарні обчислення та найкращі постачальники цих послуг призвели до фундаментального впливу на ринкову основу ІТ-інфраструктури в усьому світі. Постачальники публічних хмарних послуг сприяють ефективності розподілених хмарних обчислень, що дає змогу створювати інноваційні програмні додатки та платформи, одночасно підвищуючи інформаційну безпеку та засоби контролю конфіденційності. Тому важливо розуміти кожного провідного постачальника хмарних послуг, а також їхні різні стратегії з метою подальшого вибору.

Постачальники хмарних послуг пропонують інфраструктуру та інструменти на вимогу для розробників, стартапів, малого та середнього бізнесу та великих підприємств для створення, розгортання та масштабування програмного забезпечення та баз даних. Два основні ринки, на яких працюють провайдери хмарних послуг, відомі як інфраструктура-як-послуга (IaaS) і платформа-як-послуга (PaaS), які формуються з таких компонентів:

- IaaS: обчислення, сховище та мережеве спілкування;
- PaaS: системи управління базами даних і платформи додатків.

Завдяки цій комбінованій інфраструктурі IaaS і PaaS постачальники хмарних послуг забезпечують широкий спектр варіантів використання, включаючи веб і мобільні додатки, хостинг вебсайтів, електронну комерцію, медіа та ігри, керовані послуги та багато іншого. Ці обчислювальні послуги та послуги зберігання покладаються на спільні сервери, які забезпечують високий ступінь масштабованості та безперебійності. Зазвичай, клієнти використовують послуги хмарних обчислень на основі оплати за використання.

Крім того, певні постачальники загальнодоступних хмарних послуг

пропонують програмне забезпечення як послугу (SaaS), що стосується застосунків кінцевих користувачів.

Провайдери хмарних послуг будують свою цифрову інфраструктуру навколо так званих регіонів і зон доступності. Регіон – це фізичне місце у світі, де постачальник хмарних послуг має кілька зон доступності. Ці зони доступності складаються з одного чи кількох ізольованих центрів обробки даних, розміщених в окремих будівлях, кожен з яких має резервне живлення, охолодження, мережу та оптоволоконне підключення. Зони доступності дають змогу кінцевим користувачам керувати робочими програмами та базами даних, що є більш доступними, відмовостійкими та масштабованими, ніж це можливо в окремому центрі обробки даних. Ілюстрація регіонів і зон доступності на прикладі Microsoft Azure дана на рис.1.7.

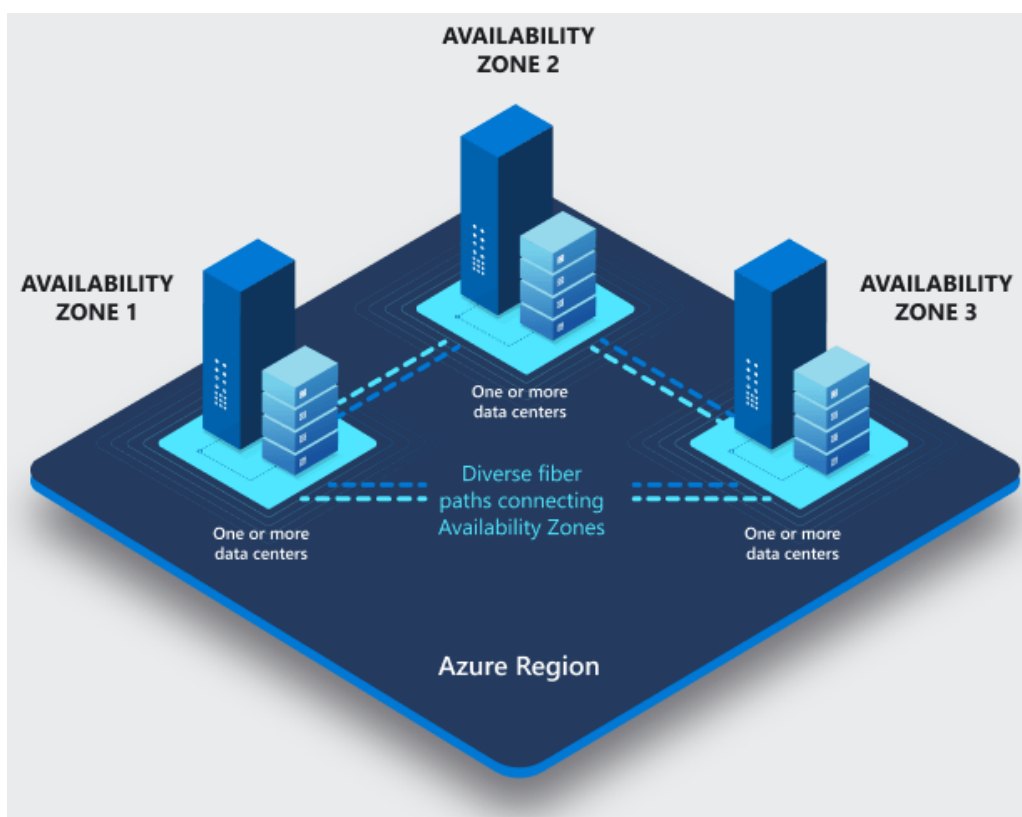


Рисунок 1.7 – Регіони й зони доступності (приклад Microsoft Azure) [22]

Постачальники хмарних послуг відрізняються від можливостей окремих серверів і центрів обробки даних завдяки віртуалізації, що означає збільшення рівня абстракції між обладнанням і програмами. Відповідно віртуалізація дає змогу

виконувати кілька робочих навантажень і операційних систем на одному фізичному сервері. Отже, віртуалізація забезпечує критичні конкурентні переваги хмари, включаючи масштабованість, максимальне використання ресурсів і надання більшої кількості робочих навантажень із меншими експлуатаційними витратами.

Топ-десятку найкращих світових постачальників хмарних послуг в 2022 р. за версією Dgtl Infra [23] наведено в табл.1.3, де вказано кількість регіонів і зон доступності, якими володіє кожен постачальник, а також їхню долю ринку. Цей аналіз зосереджений переважно на постачальниках публічних хмарних послуг, на відміну від приватних хмарних технологій (наприклад, VMware).

Таблиця 1.2 – 10 найкращих світових постачальників хмарних послуг (станом на 2022 р.)

№	Провайдер	Кількість регіонів	Зони доступності	Частка ринку
1	Amazon Web Services	26	84	34%
2	Microsoft Azure	60	116	22%
3	Google Cloud Platform	34	103	9,5%
4	Alibaba Cloud	27	84	6%
5	Oracle Cloud	38	46	2%
6	IBM Cloud	11	29	2%
7	Tencent Cloud	21	65	2%
8	OVHcloud	13	33	<1%
9	DigitalOcean	8	14	<1%
10	Linode (Akamai)	11	11	<1%

1. Amazon Web Services (AWS). Служба хмарних обчислень Amazon.com є найбільшим постачальником хмарних послуг у світі. У своїх центрах обробки даних компанія надає понад 200 повнофункціональних послуг, у т.ч. обчислення, зберігання та базу даних. AWS збільшила чистий обсяг продажів з приблизно 8 млрд доларів США у 2015 р. до понад 17 млрд доларів США у 2017 р., досягнувши 35 млрд доларів США до 2019 р., і зараз генеруючи майже 74 млрд доларів США щорічно. Таке зростання було зумовлене розширенням зон доступності з 32 (2015 р.) до 52 (2017 р.), а зараз до 84. Паралельно компанія запустила тисячі нових

сервісів AWS, що також сприяло її розширенню.

2. Microsoft Azure. До хмарного сегменту корпорації Microsoft входить Azure, другий за величиною постачальник хмарних послуг у світі. Завдяки йому компанія забезпечує можливості гібридної хмари й штучного інтелекту, а також безпеку та продуктивність розробникам. У всьому світі розташовано понад 200 фізичних центрів обробки даних Microsoft Azure з комп'ютерними серверами, і всю цю інфраструктуру об'єднують понад 175 000 миль оптоволоконних ліній у 140 країнах. У річному обчисленні дохід Microsoft Cloud наразі становить 93,6 млрд доларів, а Azure є лише частиною загального доходу від Microsoft Cloud, поряд з іншими хмарних службами, Office 365 Commercial, LinkedIn і Dynamics 365.

3. Google Cloud Platform (GCP) – третій за величиною постачальник хмарних послуг у світі, котрий надає корпоративні хмарні сервіси. GCP дає змогу розробникам створювати, тестувати та розгортати застосунки на своїй розподіленій і масштабованій інфраструктурі, одночасно використовуючи можливості сервісу щодо безпеки, керування даними, аналітики та штучного інтелекту. Підрозділ Google Cloud отримує дохід від своєї інфраструктури, платформи та інших послуг, що у річному обчисленні становить 23,3 млрд доларів США.

4. Alibaba Cloud. Підрозділ хмарних обчислень Alibaba Group – четвертий за величиною постачальник хмарних послуг у світі та найбільший постачальник у Китаї. Через Alibaba Cloud бізнес пропонує хмарні послуги, включаючи еластичні обчислення, базу даних, сховище, мережеву віртуалізацію, великомасштабні обчислення, безпеку, служби керування та додатків, аналітику великих даних і машинне навчання. За межами материкового Китаю Alibaba Cloud працює в США, Європі, Азіатсько-Тихоокеанському регіоні та на Близькому Сході. Alibaba Group переважно отримує дохід від хмарних обчислень, який у річному обчисленні становить майже 12 млрд доларів.

5. Oracle Cloud. Пропозиції Cloud Services від Oracle Corporation охоплюють Oracle Cloud Software-as-a-Service (SaaS) і Oracle Cloud Infrastructure (OCI). Через OCI компанія є провайдером хмарних послуг, що надає інфраструктурні технології як послугу, у т.ч. обчислювальні послуги, послуги зберігання та мережеві послуги. Крім того, Oracle Cloud пропонує урядові хмарні регіони для урядів США та

Великобританії. ОСІ зазвичай стягує передплачену комісію, що поступово зменшується в міру споживання послуг клієнтом. У річному обчисленні Oracle Cloud отримує 11,6 млрд доларів США доходу.

6. IBM Cloud (Kyndryl). Наприкінці 2021 р. IBM відокремила свій бізнес із послуг керованої інфраструктури в компанію Kyndryl, яка зараз розробляє, створює та керує приватними, загальнодоступними та багатохмарними середовищами для своїх клієнтів. Сегмент хмарних послуг Kyndryl допомагає підприємствам оптимізувати використання постачальників хмарних послуг шляхом інтеграції послуг, що надаються незалежними постачальниками програмного забезпечення, публічних постачальників хмарних послуг, внутрішніх платформ і таких технологій, як Інтернет речей (internet of things, IoT).

7. Tencent Cloud. Підрозділ хмарних обчислень Tencent Holdings, відомий як Tencent Cloud, є другим за величиною постачальником хмарних послуг у Китаї після Alibaba Cloud. Tencent Cloud працює в материковому Китаї, США, Бразилії, Німеччині та Азіатсько-Тихоокеанському регіоні.

8. OVHcloud. Це орієнтований на Європу постачальник хмарних послуг, який пропонує рішення, у т.ч. приватну хмару, публічну хмару та вебхмарні сервіси. Зараз OVHcloud працює в 13 локаціях, включаючи 33 дата-центри (з яких вона володіє 30) з 400 тис. фізичних серверів. Ці центри обробки даних розташовані у 8 країнах: Франції, Канаді, США, Австралії, Німеччині, Польщі, Великобританії та Сінгапурі. OVHcloud пропонує доменні імена, плани вебхостингу та хмарні рішення понад 1,6 млн клієнтів. Компанія використовує недорогу модель і, зазвичай, конкурує за цінами.

9. DigitalOcean – постачальник хмарних послуг, який пропонує інфраструктуру та інструменти платформи на вимогу для невеликих клієнтів, включаючи розробників, стартапи та малий і середній бізнес. Зокрема, компанія орендує центри обробки даних на ринках метрополій Нью-Йорка та Сан-Франциско, а також у Торонто, Лондоні, Амстердамі, Франкфурті, Бангалорі та Сінгапурі. DigitalOcean надає свої інфраструктурні та програмні рішення 620 тис клієнтів у понад 185 країнах. Приблизно 70% доходу DigitalOcean отримують за межами США. Як і OVHcloud, DigitalOcean конкурує за ціною, часто на понад 50%

економічно ефективніше, ніж найбільші постачальники хмарних послуг.

10. Linode (Akamai). У березні 2022 р. компанія Akamai Technologies, мережа доставки контенту і постачальник рішень безпеки, придбала Linode. Зараз у Linode працює 11 регіонів центрів обробки даних, через які він надає обчислення у формі контейнерів і віртуальних машин, а також послуги зберігання. Центри обробки даних компанії розташовані на ринках США, Канади, Лондон, Великобританії, Німеччини, Японії, Сінгапуру, Індії та Австралії. Платформа Linode IaaS обслуговує 1 млн клієнтів і компаній у всьому світі завдяки своїм можливостям хмарних обчислень. Компанія конкурує за ціною та зосереджена на обслуговуванні розробників, а також стартапів і підприємств.

Всесвітньо відома компанія «Gartner», яка проводить аналітичні дослідження в сфері інформаційних технологій, періодично публікує так званий Магічний квадрант для служб хмарної інфраструктури та служб платформи (Magic Quadrant for Cloud Infrastructure and Platform Services) – оцінку лідерів хмарних обчислень у всьому світі. Gartner опитує власних клієнтів, а також збирає дані від усіх найбільших у світі постачальників хмарних обчислень, щоб визначити лідера у цій галузі.

Магічний квадрант Gartner – це інструмент, який надає графічне конкурентне позиціонування хмарних постачальників, щоб допомогти прийняти розумні інвестиційні рішення. Квадрант надає огляд чотирьох типів постачальників: лідери, візіонери, нішеві гравці та претенденти. Сім найкращих глобальних постачальників хмарної інфраструктури та платформ у магічному квадранті візуалізовано на рис.1.8 [24].



Рисунок 1.8 – Gartner Magic Quadrant for Cloud Infrastructure and Platform Services 2021

Сфера дії Магічного квадранта для хмарних сервісів включає пропозиції інфраструктури як послуги (infrastructure-as-a-service, IaaS) та інтегрованої платформи як послуги (integrated-platform-as-a-service, PaaS). Сюди входять PaaS для додатків (application PaaS, PaaS), функції як сервіс (functions-as-a-service, FaaS), PaaS для баз даних (database PaaS, dbPaaS), PaaS для розробників додатків (application developer PaaS, adPaaS) і промислово розподілені хмарні пропозиції, які часто розгортаються в корпоративних центрах обробки даних.

Отже, Топ-7 світових хмарних провайдерів за версіями аналітиків Gartner і Dgtl Infra співпадають. Із наведеного переліку (табл.1.3) «Велика трійка» (Amazon Web Services, Microsoft Azure і Google Cloud Platform) є постачальниками хмарних послуг з найбільшою часткою ринку, сукупно охоплюючи понад 65% витрат на послуги хмарної інфраструктури.

За оприлюдненими даними аналітичної компанії Synergy Research Group у 2021 р. світові компанії витратили загалом \$178 млрд на сервіси хмарної інфраструктури, що на 37% більше, ніж у попередньому році. У дослідження були включені витрати бізнесу на рішення IaaS, PaaS, а також приватні хмарні середовища. На IaaS і PaaS припадає більшість ринку, причому ці сегменти ще й

ростуть швидше. Тренди на ринку хмарних послуг показано на рис.1.9. Amazon продовжує лідирувати з великим відривом, але Microsoft, Google та Alibaba все ще зростають швидше.

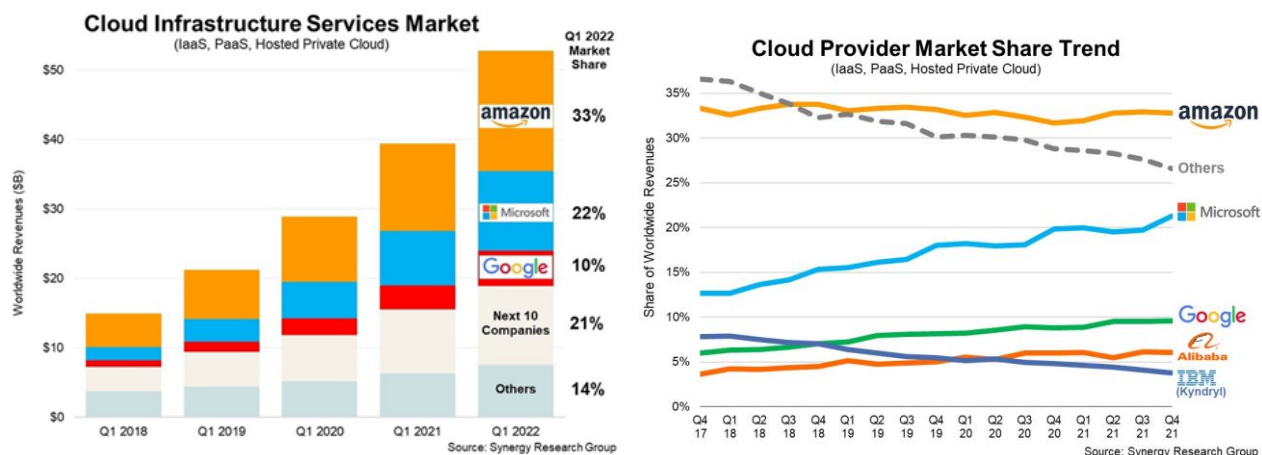


Рисунок 1.9 – Тренди на світовому ринку хмарних сервісів (за даними Synergy Research Group) [25, 26]

Однак гіганти в сфері хмарних сервісів не досягли поки що повної монополізації цього ринку. Тому попри них існують й інші оператори хмарних послуг. На таку ситуацію впливають декілька чинників.

Насамперед бізнес-рішення гігантів не дають змоги організувати гнучкий підхід до взаємодії з їхніми хмарними сервісами, тобто споживач вимушений брати сервіс у тому вигляді, який пропонується компанією, або звертатися до іншого хмарного постачальника. Зазвичай компанії-гіганти пропонують широкий спектр послуг, через що їхня вартість вища, ніж у інших постачальників. Завдяки такій диференціації клієнт вирішує свої хмарні проблеми в межах одного провайдера. Проте часто користувачеві для своїх завдань достатньо 10% від пропонованих хмарних ресурсів. Цим і зумовлена присутність дрібніших гравців на світового хмарному ринку.

Хоча десятка найкращих постачальників хмарних послуг охоплює приблизно 77% витрат на послуги хмарної інфраструктури, але на світових ринках все ще існує значна кількість невеликих постачальників. Наприклад, до цих постачальників хмарних послуг належать націлені на певну нішу, наприклад, малий і середній бізнес, або регіональні (наприклад, у Європі чи Азіатсько-

Тихоокеанському регіоні). Нижче наведено приклади цих невеликих постачальників хмарних послуг:

- Китай: Huawei Cloud, Baidu AI Cloud, QingCloud, Kingsoft Cloud, JD Cloud, UCloud;
- Європа: Bleu (Orange and Cargemini), Hetzner, Leaseweb;
- Японія і Корея: Fujitsu, SoftBank, NTT, KT Cloud, NAVER Cloud;
- Приватна хмара / керовані сервіси: Hewlett Packard Enterprise, Rackspace, VMware;
- Партнери SaaS: Salesforce, SAP.

В Україні хмарний бізнес почав активно розвиватися з 2014 р. Переважно хмарні послуги надаються іноземними провайдерами, такими як Amazon Web Services, Microsoft Azure, Tet. На ринку хмарних сервісів їхня частка становить понад 60%. Крім глобальних сервіс-провайдерів на вітчизняному ринку також працюють й локальні оператори: GigaCloud, De Novo, UCloud, Парковий, Tucha, VoliaCloud [27].

Першу п'ятірку хмарних провайдерів українського ринку в 2020 р. формували:

- Microsoft Azure;
- De Novo;
- Amazon Web Services;
- GigaCloud
- Tet.

Перше і третє місце займали компанії-гіганти Microsoft Azure і Amazon Web Services. Microsoft традиційно володіла в Україні розвиненою мережею партнерів і системою продажів, що забезпечило їй лідерство.

На другій позиції – компанія De Novo – найбільший вітчизняний IaaS-оператор, у якої сильні позиції на ринку приватних великих компаній і в державному секторі. Далі, на четвертому місці розташувалася компанія Gigacloud, яка є другим за розміром українським сервіс-оператором. На пару з De Novo вони контролюють три четвертини державного сектора і майже 30% усього ринку IaaS.

Обидва українські хмарні провайдери продемонстрували такі економічні показники: De Novo – 180 млн грн (2019 р.) і 218,8 млн грн (2020 р.); GigaCloud – 76 млн грн (2019 р.) і 109,3 млн грн (2020 р.).

Замикають п'ятірку два закордонні провайдери – латвійський TET і Google Cloud Platform. Зокрема, останній демонструє кращий темп зростання. За ними йде різношерста група дрібних українських і закордонних постачальників хмарних послуг – Ucloud, Парковий, Hetzner, Воля, Tucha, німецькі та польські оператори [28].

Упродовж 2021 р. український хмарний ринок виріс на 25% і досягнув 50 млн доларів США. Це надто мало порівняно з глобальним ринком, котрий в 2022 р. досягне 482 млрд доларів (за прогнозом Gartner). Незважаючи на війну та удар по економіці український ринок хмарних послуг зазнав несподіваного підйому. Так компанія GigaCloud за місяць війни інвестувала у купівлю серверів 1 млн доларів, тобто стільки, скільки запланувала на весь 2022 р. [29]. В лютому 2022 р. Верховна Рада України ухвалила закон «Про хмарні послуги» [30], що однозначно сприятиме розвитку української ІТ-галузі.

Разом з тим, значна кількість підприємств переходять на гібридні та багатохмарні середовища, щоб уникнути прив'язки до постачальника та зберегти гнучкість для розміщення конфіденційних робочих навантажень у безпечнішому середовищі.

Кожен провайдер пропонує подібні послуги за різними цінами та різними рівнями якості з різним набором функцій. Хоча один постачальник може бути дешевим для послуг зберігання, проте може бути дорогим для обчислень. Враховуючи таку різноманітність пропозицій хмарних послуг, важливою проблемою для клієнтів є те, як вибрати постачальника, який найкраще задовольняє їхні вимоги. Це важливо для забезпечення майбутньої продуктивності та правової підтримки [31]. З іншого боку, вибір неправильного провайдера може призвести до збою в наданні послуг у майбутньому, порушення конфіденційності або цілісності даних, а також порушення вимог використання хмар для зберігання даних.

Вибір хмарних послуг, зазвичай, є процесом пошуку найвідповіднішого

постачальника шляхом узгодження вимог користувача з характеристиками доступних хмарних послуг, надаваних різними провайдерами. Збільшення кількості постачальників разом із різноманітними типами послуг, які вони пропонують за дуже різноманітними схемами цін і якості, призвели до складнощів у порівнянні різних постачальників та виборі найкращого з них з урахуванням уподобань користувачів.

Крім того, необхідно враховувати широкий спектр критеріїв відбору, щоб вибрати найвідповіднішого провайдера хмарних послуг. Наприклад, такі критерії якості послуг як продуктивність або надійність є важливими для визначення характеристик провайдера. Атрибути безпеки та конфіденційності послуг також мають надзвичайне значення для хмарних клієнтів. Деякі критерії вибору незрозумілі клієнту, наприклад, часто немає неперозорості щодо того, як здійснюється доступ до хмарних ресурсів і хто до них має доступ. Інші критерії (наприклад, юзабіліті та безпеку) нелегко визначити кількісно через природу хмари.

Також приходиться шукати компроміс між багатьма з цих критеріїв, такими як продуктивність і ціна. Щоб вибрати постачальника хмарних послуг, який найкраще відповідає уподобанням користувачів, потрібно розглянути широкий спектр різних критеріїв оцінювання, які характеризують кілька хмарних послуг, запропонованих багатьма провайдерами.

Для порівняння хмарних провайдерів потрібні три ключові чинники: типи провайдерів, пропоновані послуги та ціни [32].

1. Порівняння, засноване на типі хмарного постачальника.

Попри те, що фахівці із закупівлі хмарних послуг мають достатній досвід для оцінювання постачальників, щоб визначити стабільність їхнього бізнесу, надійність, а також їхні загальні можливості та ціни, є багато базових аспектів хмарних послуг, які також варто врахувати, наприклад:

- регіони та країни, в яких працюють провайдери;
- розташування центра обробки даних;
- розмір і стабільність бізнесу;
- безпека та ризик;
- надійність і достовірність;

- моделі ціноутворення та умови договору;
- угоди про рівень обслуговування (Service-Level Agreements);
- простота використання, самообслуговування, надійний прикладний програмний інтерфейс (API).

У хмарній індустрії домінують три постачальники-гіганти (Amazon, Google і Microsoft), за якими йдуть багато менших регіональних постачальників, котрі обслуговують певні глобальні регіони. Споживач вирішує, на кого з них (якщо вони доступні) варто звернути увагу чи, можливо, співпрацювати з кількома постачальниками, забезпечуючи конкуренцію та уникаючи прив'язки до провайдера. Крім того, можливий варіант поєднання великих і малих постачальників з унікальними послугами.

2. Порівняння на основі пропонованих хмарних послуг.

Оцінювання різних хмарних послуг, пропонованих постачальниками, також є складною справою. Ось декілька аспектів, які необхідно враховувати, порівнюючи послуги провайдера:

- специфікації послуг (наприклад, кількість віртуальних процесорів, обсяг оперативної пам'яті, типи та розміри сховища).
- клас або розмір хмарної служби (наприклад, стандартна віртуальна машина чи оптимізована під обчислення);
- технологія зберігання та конфігурації (наприклад, локальне сховище чи мережевого, обертовий диск або твердотільний накопичувач);
- фактична продуктивність, виміряна за допомогою процесу об'єктивного бенчмаркінгу;
- послуги з доданою вартістю (підтримка, керовані послуги, додаткові послуги).

Специфікації хмарних послуг на вебсайті постачальника часто є першою точкою порівняння для кінцевого користувача, а вже потім порівнюють ціни.

Однак специфікації конкретної віртуальної машини надають дуже грубе уявлення про її потенційну продуктивність під час виконання робочих навантажень. З одного боку, кількість віртуальних процесорів, технологія чіпів на фізичному

сервері, обсяг пам'яті, а також тип сховища та його розмір є чинниками, легко доступними для вивчення. Проте часто в реальності продуктивність не так добре співвідноситься зі специфікаціями вебсайту, як це рекламують постачальники. Тому варто глибше дослідити ціноутворення, щоб сформулювати повніше порівняння.

3. Порівняння, засноване на цінах хмарних сервісів.

Розуміння цін на хмарні послуги сьогодні є також непростю справою. Хмарні постачальники постійно розгортають нові версії існуючих сервісів, абсолютно нові послуги та нові стратегії ціноутворення, спрямовані на досягнення конкурентної переваги перед іншими постачальниками.

Одні моделі ціноутворення є відносно простими, а інші – складнішими. Деякі з наведених нижче чинників є важливими для розуміння ціни хмарних послуг не лише для окремої послуги, а й для випадку комбінованих хмарних послуг:

- ціноутворення окремих послуг, напр. обчислювальні сервіси, класи та екземпляри віртуальних машин, конфігурації та параметри зберігання, мережеві служби тощо;
- кроки тарифікації (наприклад, щодня, щогодини, щосекундно).
- стратегії дисконтування для багаторічних угод;
- об'єднання послуг (наприклад, деякі постачальники об'єднують сховище з віртуальними машинами, а інші – ні);
- валютні курсові різниці та коливання.

Стосовно хмарних послуг, то ціни на них постійно падають, а також доступні знижки від певного постачальника. Процес захоплення частки ринку, в якому беруть участь провайдери-гіганти, в якийсь момент він сповільниться або припиниться. Така тенденція вигідна для споживачів.

З точки зору споживача, оцінювання цінових варіантів і сценаріїв використання хмари – це складний процес, для розуміння якого потрібні спеціалісти з фінансового моделювання. Тому споживачам потрібно знайти способи відстежувати ціни своїх хмарних постачальників і приймати найкращі обґрунтовані рішення щодо того, з ким співпрацювати та які конкретні хмарні сервіси використовувати.

Таким чином, вибір правильного постачальника є складною проблемою

багатокритеріального прийняття рішень, де кілька альтернатив мають бути оцінені та ранжовані за кількома критеріями з урахуванням конкретних переваг користувача (тобто відносної важливості критеріїв).

1.3 Критерії оцінювання хмарних сервісів і вибору постачальників

Постачальники хмарних послуг постійно конкурують за клієнтів. Ця конкуренція спочатку базувалася насамперед на вартості наданих ресурсів, але кількісна оцінка та порівняння фактичних можливостей тепер стають все критичнішими. А тому якість послуг (сервісів) (Quality of Service, QoS) відіграє вирішальну роль у моніторингу, контролі, звітності та виставленні рахунків [33].

Відповідно, постачальникам послуг доводиться свідомо інвестувати та докладати зусиль для розвитку бізнесу, оскільки покращення якості послуг буде позитивно оцінено їхніми клієнтами. Зростаючий інтерес до вирішення проблем, пов'язаних з якістю хмарних послуг, в останні роки призвів до пропозиції численних показників, за допомогою яких можна оцінити якість хмарних послуг [34]. Показники надають корисні дані, які можна аналізувати та використовувати для прийняття технічних, операційних і бізнес-рішень, особливо при виборі хмарних провайдерів.

Для встановлення набору можливих критеріїв оцінювання якості хмарних послуг звернемося до Cloud Services Measurement Initiative Consortium (CSMIC), який запропонував стандартний індекс вимірювання (Standard Measurement Index, SMI): «Індекс вимірювання послуг (SMI) – це набір ключових індикаторів ефективності (KPI), що стосуються бізнесу, які забезпечують стандартизований метод вимірювання та порівняння бізнес-послуг незалежно від того, чи надається ця послуга внутрішньою чи зовнішньою компанією. Він покликаний стати стандартним методом, який допомагає організаціям вимірювати хмарні бізнес-послуги на основі їхніх конкретних бізнес- та технологічних вимог» [35].

Структура SMI – це ієрархічна модель, яка надає поки що найповніший набір характеристик QoS (рис. 1.10). Атрибути SMI засновані на стандартах Міжнародної організації зі стандартизації (ISO) і надають клієнтам цілісне уявлення про QoS при

виборі постачальника хмарних послуг. Повний опис вказаних атрибутів наведено в додатках.

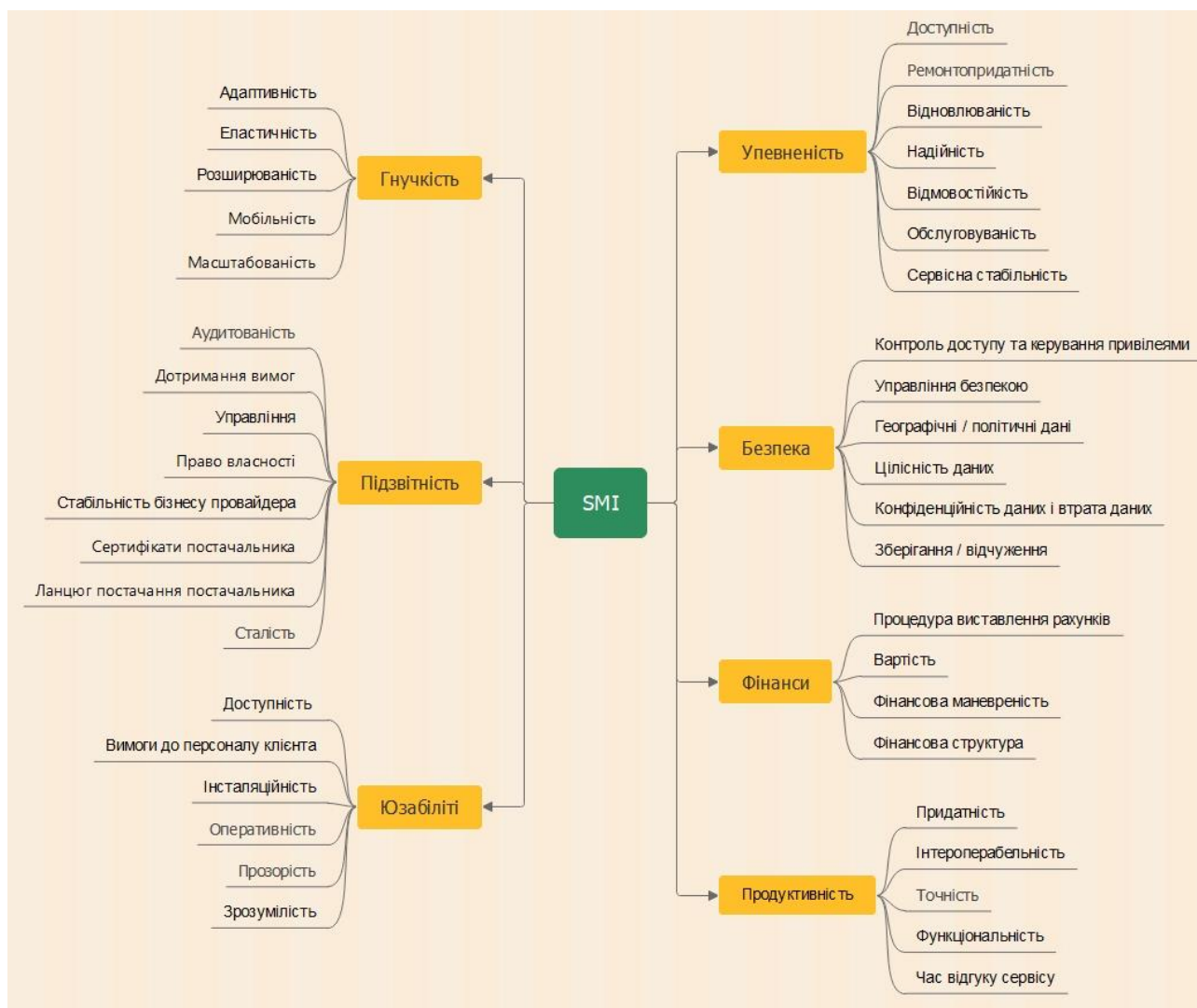


Рисунок 1.10 – Атрибути якості послуг

Усі показники QoS розбиті на сім категорій:

- підзвітність (accountability) – чи можемо ми розраховувати на організацію-провайдера?
- гнучкість (agility) – чи можна це змінити і як швидко?
- впевненість (assurance) – наскільки ймовірно, що послуга працюватиме належним чином?
- фінансові (financial) – скільки це коштує?
- продуктивність (performance) – робить те, що нам потрібно?
- безпека і конфіденційність (security and privacy) – чи безпечна послуга і захищена конфіденційність?

– зручність використання (usability) – чи легко вчитися та використовувати?

Ці категорії далі поділяються на множину атрибутів QoS [37].

Оскільки різні постачальники хмарних послуг пропонують подібні послуги зі схожою функціональністю на основі різних критеріїв, то з точки зору споживача, структура SMI є важливою моделлю для оцінювання продуктивності та якості хмарних послуг.

Використовуючи цю структуру, клієнти можуть вимірювати різноманітні пропозиції хмарних послуг на основі найкращих переваг у поєднанні з деякими іншими елементами. Крім того, деякі якісні аспекти хмарних сервісів можна перевірити за допомогою кількісних вимірювань. Отже, існує багато розрахунків для функціональних і нефункціональних вимог, яким задовольняють різні постачальники хмарних послуг [31]. У цьому контексті атрибут QoS є важливим інгредієнтом у виборі та ранжуванні хмарних послуг із набору різних сервісів.

Перш ніж почати оцінювати постачальників хмарних послуг, потрібно визначити потреби відповідно до типу послуги. Зі збільшенням кількості хмарних провайдерів, вибрати одну послугу, безперечно, складно. Ключовий показник ефективності (Key Performance Indicator, KPI) визначає набір значень, які використовуються для вимірювання та порівняння продуктивності різних хмарних сервісів [55]. Крім того, послуги хмарних обчислень можна оцінити за допомогою кількісних і якісних показників.

Далі описані деякі ключові критерії оцінювання [31, 36, 37], широко використовувані в сфері хмарних обчислень.

1. Доступність (Availability) – визначає час (у відсотках), протягом якого хмарний сервіс доступний у мережі. Вона визначається за допомогою формули

$$Ava = \frac{AST - DT}{AST} \times 100, \quad (1.1)$$

де AST – узгоджений час обслуговування;

DT – час простою.

2. Надійність (Reliability) – означає, як хмарна служба працює без збоїв за певних умов роботи протягом певного періоду часу. Розраховується як добуток

обіцяного середнього часу до відмови постачальника хмарних послуг (P_{mtf}) та ймовірності відмови служби протягом визначеного часу ($Prob_{sf}$). У контексті SaaS це означає, наскільки надійним є примірник програмного забезпечення, для PaaS вона пов'язана з надійністю платформи, а для IaaS – це надійність віртуальних машин або служб зберігання даних. Надійність розраховується за формулою:

$$Rel = Prob_{sf} \times P_{mtf} \Rightarrow \frac{1 - numfail}{n} * P_{mtf}, \quad (1.2)$$

де n – загальна кількість користувачів;

$numfail$ – кількість користувачів, які зазнали збою протягом меншого інтервалу часу, ніж обіцяно постачальниками хмарних послуг.

3. Час реакції (Response time) – стисло показує загальну продуктивність хмарної служби. Показник вказує, наскільки швидко хмарний сервіс може бути доступним для використання. Час відповіді визначається як час між надсиланням повідомлення-запиту до отримання повідомлення-відповіді. У випадку SaaS час відповіді стосується підготовки та завантаження програми, а також відображає час, витрачений для відповіді на запит. Для PaaS він відображає дії з підготовки й завантаження платформи та час, витрачений на обслуговування запиту. Наприклад, якщо користувач у IaaS запитує віртуальну машину (VM) постачальника хмарних послуг, тоді під часом відповіді розглядають загальний час, витрачений постачальником на обслуговування запиту. Сюди входять надання і завантаження віртуальної машини, призначення IP-адреси та запуск процесу розгортання.

Існують певні чинники, наприклад середній і максимальний час відповіді, які впливають на час реакції:

– середній час відповіді розраховується за допомогою $\sum T_x / n$, де T_x – час від надсилання запиту користувачем x до хмарної служби до моменту отримання відповіді від сервера, а n – загальну кількість запитів хмарної служби;

– максимальний час відповіді – це максимальний обіцяний час реакції, необхідний хмарній службі для обробки запиту;

– час затримки відповіді ($PTOR$) визначається випадками (у відсотках), коли час відповіді хмарної служби перевищує максимальний обіцяний час відповіді.

$$PTOR = \frac{\text{кількість_затриманих_запитів}}{\text{загальна_кількість_запитів}} \times 100, \quad (1.3)$$

4. Пропускна здатність (Throughput) – вказує кількість завдань, виконаних хмарним сервісом за певний час. Для системи обробки транзакцій пропускна здатність вимірюється як кількість транзакцій за секунду. Для систем обробки масових даних, таких як аудіо- та відео-сервер, пропускна здатність вимірюється як швидкість передачі даних (у мегабайтах за секунду). Крім того, пропускна здатність залежить від різних чинників, таких як кількість завдань і машин, затримка зв'язку між завданнями та затримка ініціації служби, що іноді може вплинути на виконання завдання.

Загальна пропускна здатність TT розраховується за формулою

$$TT = \frac{n}{T_e(m, n) + T_o}, \quad (1.4)$$

де n – загальна кількість завдань;

m – загальна кількість машин, на яких подано n завдань;

$T_e(n, m)$ – час виконання n завдань на m машинах;

T_o – витрати часу через різні чинники (затримка запуску інфраструктури, затримка зв'язку між завданнями тощо).

5. Вартість (Cost) – завжди є важливим чинником прийняття рішень. Нелегко порівнювати ціни на різні послуги, оскільки вони пропонують різні функції, а тому мають багато вимірів. У хмарному сценарії користувач платить лише на основі використання. Вартість у хмарному середовищі залежить від двох основних атрибутів: вартість придбання (acquisition) та вартість на-вимогу (on-demand).

Вартість придбання зазвичай використовується в SaaS. Сюди входять підписання угоди на послуги, оплата щотижневих і щомісячних рахунків посеред інших форм. Модель постійної (on-going) ціни є однією з найпоширеніших моделей ціноутворення для обчислення послуг. Вона також відома як utility pricing, оскільки оплата постачальнику послуг базується на кількості використаних одиниць.

Вартість на-вимогу стосується вартості використання одиниці ресурсу (ЦП, сховища, пропускної здатності чи пам'яті) за одиницю часу (годину, хвилину). Наприклад, в IaaS вартість визначається як сума за надання часу для використання

ресурсів віртуальної машини. Для розрахунку вартості використання віртуальної машини VM_c можна скористатися формулою:

$$VM_c = \frac{P}{CPU * a + Storage * b + Net * c + RAM * d}, \quad (1.5)$$

де a, b, c і d – вага відповідного атрибута ресурсу (a – процесора (CPU), b – сховища (Storage), c – мережі (Net), d – оперативної пам'яті (RAM)); $a+b+c+d=1$;

P – ціна віртуальної машини.

Вага кожного атрибута може варіюватися від програми до програми. Наприклад, для деяких додатків оперативна пам'ять важливіша використання процесора, тому для цього додатка $d > a$. Можна використовувати різні ваги для кожного атрибута залежно від програми користувача. Зазвичай, користувачам потрібно передавати дані, що також спричиняє витрати. Отже, загальну поточну вартість можна розрахувати як суму передачі даних, зберігання та використання обчислювальних ресурсів для конкретного хмарного постачальника і сервісу.

6. Безпека (Security) – важлива характеристика, коли йдеться про збереження важливих даних компанії в хмарі. Безпека хмарних обчислень – це набір технологій і політик на основі контролю, призначених для дотримання правил відповідності нормативним вимогам і захисту інформації, програм та інфраструктури, пов'язаних із використанням хмарних обчислень. Найчастіше постачальники хмарних послуг мають декілька стандартів заходів безпеки. Функція безпеки дає змогу обмежити доступ до ресурсів і допомагає захистити дані від зловмисників. Це важливий якісний показник, який визначається згідно із шкалою від 1 до 10 і оцінюється користувачем послуги.

7. Стабільність (Stability) – визначається як «мінливість» з точки зору продуктивності в SLA хмарної служби. Для сервісу хмарного сховища він показує зміну середнього часу читання/запису, а для обчислювальних ресурсів – ступінь мінливості продуктивності, заданої в SLA. Змінність V_r обчислюється за допомогою рівняння

$$V_r = \sum_i \frac{\alpha_i^{avg} - \frac{\alpha_i^{SLA}}{T_s}}{N_u}, \quad (1.6)$$

де α – одиниця ресурсу для зберігання, продуктивності та мережі;

α_i^{avg} – спостережувана середня продуктивність користувача i ;

α_i^{SLA} – обіцяні значення продуктивності в SLA;

T_s – час обслуговування;

N_u – загальна кількість користувачів.

8. Масштабованість (Scalability). Масштабування займається ефективним розподілом і керуванням ресурсами програми для мінімізації суперечок. Термін «масштабованість» визначає, чи було масштабовано хмарну службу в час пік.

Масштабованість у хмарі має два основні підходи:

- горизонтальне масштабування;
- вертикальне масштабування.

Горизонтальне масштабування досягається однорідним збільшенням хмарних ресурсів (віртуальних машин), тобто одного типу під час пікового навантаження. Кожен додатковий хмарний ресурс зазвичай додає еквівалентну ємність, наприклад той самий обсяг фізичної пам'яті та однакові блоки ЦП. Це поширена форма масштабування в хмарному середовищі.

Вертикальне масштабування зміцнює хмарний сервіс (віртуальну машину), збільшуючи ЦП, фізичну пам'ять або пропускну здатність мережі. Іноді такі додаткові ресурси допомагають швидше виконувати пакетні завдання. Однак такий підхід рідше зустрічається в хмарному середовищі через необхідний час простою упродовж процесу заміни.

9. Пропозиція зберігання та розташування центру обробки даних. Є два типи дискових томів для надання послуг. Вони бувають локальними та зовнішніми. Томи локального сховища розташовані на тому ж фізичному обладнанні, що й обчислюваний ресурс, тоді як томи зовнішньої пам'яті знаходяться у зовнішній системі. Частіше обчислювані служби мають центри обробки даних у кількох місцях, і це допомагає вирішити, які сервіси розгорнути в обчислювальних інстанціях. Коли місцезнаходження максимальної кількості користувачів стане відомим, вказані інстанції можна розташувати ближче до користувачів для оперативнішої роботи.

10. Портативність (Portability) – це здатність переміщувати сутність з однієї системи в іншу, щоб вона була придатна для використання в цільовій системі. У контексті хмари портативність поділяється на дві окремі сфери: портативність даних і портативність додатків. Портативність даних визначається як здатність легко передавати дані з одного хмарного сервісу в інший без повторного введення даних. Легкість переміщення даних є основною сутністю переносимості даних. Портативність програми – це можливість переносити програму чи її компоненти з одного хмарного сервісу до іншого. Це також сприяє безперебійній роботі додатків у хмарному середовищі. Легкість переміщення програми (її компонентів) є ключем до переносимості програми.

11. Інтероперабельність (Interoperability) або сумісність – визначає здатність служби/програми обмінюватися інформацією або взаємодіяти з іншою службою та програмою системи. У контексті хмарних обчислень сумісність визначається як здатність різнотипних хмар розуміти одна одну. У хмарному середовищі користувач не хоче бути прив'язаним до одного постачальника хмарних послуг. Крім того, цей атрибут включає свободу зміни постачальників хмарних послуг. Цей параметр має якісний характер і визначається згідно з досвідом користувачів. Інтероперабельність (I) розраховується за допомогою рівняння

$$I = N_{pp} / N_{pu}, \quad (1.7)$$

де N_{pp} – загальна кількість платформ, що надаються постачальниками послуг;
 N_{pu} – загальна кількість платформ, необхідних користувачам для взаємодії.

12. Адаптивність (Adaptability) – забезпечує здатність хмарного сервісу адаптувати зміни на основі вимог клієнта. Можна визначити адаптивність як час, необхідний на оновлення або змін у хмарних службах згідно з вимогами клієнтів.

13. Юзабіліті (Usability) – цей критерій визначає ступінь зручності використання хмарних сервісів. Він розраховується на основі середнього часу, який витрачається клієнтом хмари на роботу, вивчення, встановлення та розуміння, відповідно. Для SaaS показник визначає ступінь юзабіліті програми в хмарі. Для PaaS – ступінь простоти можливості розгортання програми та використання мови програмування, бібліотек, служб та інструментів, які підтримуються хмарними постачальниками. Для IaaS – юзабіліті в умовах використання віртуальної

машини/хосту/сховища.

14. Придатність (Suitability) – визначається як ступінь пошуку хмарних сервісів, які найкраще відповідають бізнес-вимогам клієнта. За допомогою необхідних і непотрібних вимог клієнти можуть фільтрувати хмарні сервіси. Оцінювання придатності може бути на основі того, наскільки добре вони відповідають функціям, потрібним клієнтові. Якщо всі функції задоволені, показник рівний 1, у протилежному випадку – 0.

Отже, проблема вибору провайдера хмарних сервісів може бути оцінена з допомогою кількох критеріїв, які визначаються на основі використовуваного набору даних або переваг користувача. Однак вирішити завдання вибору хмарного сервісу за всіма перерахованими критеріями дуже складно та й практично неможливо. Тому в наступних розділах дослідження нами враховано лише частину, які найбільш відповідні вибору найкращого постачальника хмарних послуг за наявності низки альтернатив.

Висновки до розділу 1

1. Аналіз тенденцій ринку хмарних обчислень демонструє інтенсивність його зростання та різноманіття надаваних провайдерами послуг (сервісів). Різноманітність хмарних послуг і їхніх постачальників значно ускладнює клієнтам вибір найкращого сервісу згідно з їхніми потребами.

2. Користувачам доводиться розглядати широкий спектр різних критеріїв оцінювання, особливо при виборі хмарних сервісів, що пропонуються різними провайдерами. Не завжди вони спроможні це зробити самостійно

3. Для виявлення множини можливих критеріїв оцінювання якості хмарних послуг і вибору їх постачальника здійснено аналіз стандартного індексу вимірювання як методу вимірювання та порівняння бізнес-послуг у хмарному середовищі. Завдяки цьому аналізу відібрано дев'ять критеріїв відбору: масштабованість; сталість; інтероперабельність; юзабіліті; управління безпекою; вартість; ремонтпридатність; час реагування сервісу; надійність.

2. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИХ МЕТОДІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ І ЗАСТОСУВАННЯ ЇХ В ПРОЦЕСІ ВИБОРУ ХМАРНОГО ПРОВАЙДЕРА

2.1. Порівняння сучасних методів багатокритеріального прийняття рішень

Багатокритеріальне прийняття рішень є найадекватнішим методом для вирішення багатоцільових (багатокритеріальних) проблем у сфері хмарних обчислень. До основних переваг, які вказані моделі пропонують у прийнятті рішень, належать:

- систематизація комплексних завдань оцінювання;
- повнота процесу оцінювання, що досягається шляхом впровадження як кількісних, так і якісних критеріїв оцінювання;
- прозорість оцінок для підтримки рішень;
- можливість впровадження гнучких, комплексних, реалістичних наукових методів у прийнятті рішень.

Для підтримки тих, хто приймає рішення, розроблено різні обчислювальні багатокритеріальні інструменти прийняття рішень. Тому надзвичайно важливо оцінити сучасний рівень MCDM для кращого розуміння, вибору та застосування в дослідженнях.

Найкращий хмарний сервіс потрібно вибирати, враховуючи низку несумісних кількісних і якісних критеріїв. Тому вибір хмарного сервісу можна вважати проблемою багатокритеріального прийняття рішень (multi-criteria decision-making, MCDM).

За наявності низки критеріїв MCDM зазвичай прагне визначити найкращу альтернативу серед усіх можливих альтернатив. Метою MCDM в цьому випадку є ранжування та оцінювання альтернатив на основі обраних критеріїв [38].

У задачах MCDM різноманітні альтернативи оцінюються на основі різних критеріїв, котрі характеризують ці альтернативи, щоб вибрати найкращу альтернативу. Різні особи, що приймають рішення (ОПР) по-різному оцінюють (зважують) критерії, тому вибір найкращої альтернативи залежить від уподобань ОПР [39].

Сьогодні така важлива та популярна галузь досліджень теорії прийняття рішень як багатокритеріальне прийняття рішень досягла значного успіху як в науковій, так і практичній сфері.

Задачі MCDM зазвичай поділяються на дві групи щодо вирішення проблемного простору [40]: неперервні MCDM, також відомі як багатоцільове прийняття рішень (Multiple Objective Decision Making, MODM), і дискретні MCDM, також звані як багатоатрибутне прийняття рішень (MADM). Основна відмінність між MODM і MADM полягає в кількості оцінюваних альтернатив. MODM мають справу з невизначеною наперед кількістю альтернатив, проте останні обмежені множиною оптимальних об'єктивних обмежень; тоді як у задачах MADM кількість альтернатив заздалегідь визначена й обмежена.

У контексті теорії прийняття рішень відмінності між MODM та MADM можна проілюструвати через табл.2.1. Далі будемо використовувемо назву «MCDM» для представлення дискретного MCDM (тобто MADM), оскільки багато вчених використовують ці терміни як взаємозамінні.

Таблиця 2.1 – Порівняння MODM і MADM

Характеристики	MODM	MADM
Критерії	цілі	атрибути
Ціль	неясна	ясна
Атрибут	неявний	ясний
Обмеження	ясні	неясні
Режим вибору	нескінчений/неясний	скінчений/ясний
Взаємодія з ОНР	висока	низька

В MADM оцінювання ґрунтується на заздалегідь визначених альтернативах рішення щодо зважених атрибутів (тобто варіантах рішень або переваг, доступних для ОНР). Припускається, що ці альтернативи обмежені чи скінченні. Вони повинні бути перевірені, пріоритетні та остаточно ранжовані або відсортовані відповідно до заявлених критеріїв рішень або цілей.

Для вибору відповідного методу прийняття рішень для будь-якого типу

проблеми важливо розуміти їх класифікацію. Сьогодні науковцями розроблено багато методів MCDM і, відповідно, вони вимагають комплексної класифікації. Вказані методи можна класифікувати за різними ознаками.

Далі розглянемо декілька найпоширеніших підходів до класифікації багатокритеріальних методів.

На рис.2.1 наведено категоризацію згідно з уже згадуваним поділом методів на MODM і MADM.

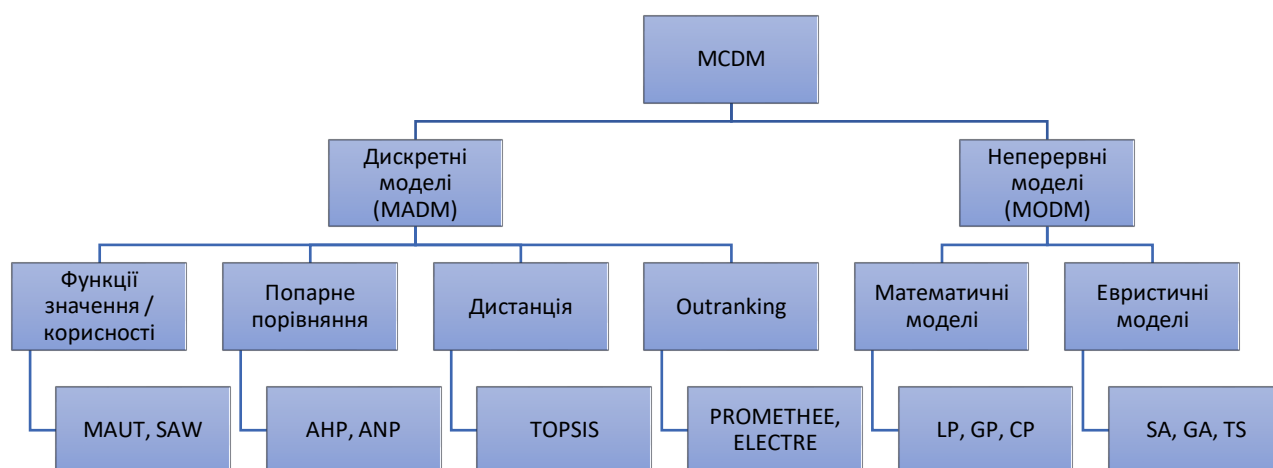


Рисунок 2.1 – Класифікація методів MCDM

Назви методів: MAUT – Multi-Attribute Utility Theory; SAW – simple additive weighting; AHP – Analytic Hierarchy Process; ANP – analytic network process; TOPSIS – Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution; PROMETHEE – Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations; ELECTRE – ÉLimination Et Choix Traduisant la REalité; LP – linear programming; GP – goal programming; CP – compromise programming; SA – simulating annealing; GA – genetic algorithm; TS – tabu search.

Дискретні методи (MADM) тут класифікуються за використанням функції корисності (значення), попарних порівнянь, обчислення відстаней, а також без ранжування (outranking). Методи MODM переважно використовуються для задач неперервної оптимізації, де кількість альтернатив нескінченна, тобто простір рішень неперервний. Загалом, він придатний для проектування найкращих альтернативних проблем планування, де альтернативи не визначені заздалегідь, а натомість набір цільових функцій оптимізується відповідно до набору обмежень. Методи MODM згруповані в моделі математичного програмування та евристичні алгоритми.

У роботі [41] запропоновано класифікацію методів MCDM на основі обробки даних, де крім дихотомії дискретний-неперервний, вводяться поділи на групи індивідуального та колективного прийняття рішень, а також групи компенсаційних і некомпенсаційних методів. Компенсаційна стратегія прийняття рішень зважає позитивні та негативні атрибути розглянутих альтернатив і дає змогу позитивним атрибутам компенсувати негативні. Тоді як некомпенсаційна стратегія усуває альтернативи, які не відповідають певному критерію. Прикладами компенсаційних методів є ELECTRE, SAW, TOPSIS, некомпенсаційних – макси-мін, лексикографічні та домінантні методи.

Коротко охарактеризуємо найуживаніші методи багатокритеріального прийняття рішень.

1. Analytic Hierarchy Process (AHP) [42]. Метод аналізу ієрархії був розроблений Томасом Сааті в 1970-х рр. і сьогодні залишається одним з найпопулярніших методів MCDM. Він оцінює критерії, а також альтернативи щодо кожного критерію шляхом парного порівняння. У результаті отримується вектор ваг критеріїв і вектори пріоритетів альтернатив для кожного з критеріїв. Ці вектори синтезуються для створення глобального пріоритету альтернатив.

2. Analytic Network Process (ANP) [43]. Цей метод також розроблений Т. Сааті як розширення AHP на основі концепції ланцюгів Маркова. Математичне моделювання ANP характеризується системою рішень, яка долає проблему взаємозалежності елементів на всіх рівнях ієрархії та в межах одного рівня.

3. Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) [44]. Цей метод заснований на обчисленні евклідової відстані для оцінювання відстані між ідеальним позитивним і негативним рішеннями. Тому остаточна класифікація альтернатив відбувається як за найкоротшою відстанню до ідеального позитивного рішення, так і за найдовшою відстанню від негативного.

4. VišeKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) [45]. З сербської мови VIKOR означає «Багатокритеріальна оптимізація та компромісне рішення». Метод розроблений С. Опріцовічем і спрямований на вирішення проблем прийняття рішень із суперечливими критеріями з допомогою життєздатного компромісного рішення, отриманого за допомогою введення даних

(ваг і критеріїв).

5. Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE) [46]. Його вперше представив Ж.-П. Бранс у 1980-х рр. Це метод із сімейства outranking з некомпенсаторними характеристиками і складається з функції переваги, пов'язаної з кожним критерієм, з ваговими коефіцієнтами, що описують їхню відносну важливість. Початкове визначення методу розрізняло стандарти для часткової (PROMETHEE I) або повної (PROMETHEE II) класифікації альтернатив. Пізніші дослідження створили нові розширення (III, IV, V і VI).

6. ÉLimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE) [47]. З французької назва ELECTRE означає «усунення та вибір, що виражає реальність». Цей метод також належить до сімейства outranking, тобто некомпенсаційних методів, розроблених для ситуацій, у яких існують численні альтернативи із сильною неоднорідністю між критеріями. Серед своїх розширень ELECTRE IV виділяється тим, що не використовує загальний набір ваг.

7. Data envelopment analysis (DEA) [48]. На відміну від більшості існуючих методів MCDM, метод аналізу середовища функціонування не використовує загальний набір вагових коефіцієнтів, які можуть виражати переваги ОПР. Математичне моделювання DEA базується на застосуванні техніки лінійного програмування для оцінювання відносної ефективності кожної альтернативи за шкалою суджень від 0 до 1. Метод визначає зв'язки між змінними, які інші методи нездатні виявити.

8. Weighted Aggregates Sum Product Assessment (WASPAS) [49]. Елементарний і компенсаційний багатокритеріальний метод, розроблений Е. Завадскасом шляхом поєднання двох методів: WSM (Weighted Sum Model, модель зваженої суми) і WPM (Weighted Product Model, модель зваженого продукту). Завдяки простому математичному моделюванню та узгодженому результату він застосовувався при вирішенні багатьох задач у різних сферах.

Переваги і недоліки розглянутих методів MCDM згруповані в табл.2.2.

Таблиця 2.2 – Переваги і недоліки основних методів MCDM

Метод	Переваги	Недоліки
АНР	(1) обчислює індекс неузгодженості, важливий для забезпечення узгодженості суджень ОНР; (2) швидке застосування порівняно з іншими методами; (3) перетворює складну проблему на просту, гнучку та інтуїтивно зрозумілу ієрархію; (4) ефективний метод, коли критерії незалежні.	(1) втрата інформації через високий рівень агрегації; (2) труднощі в інтерпретації якісної шкали через людську природу; (3) точність може сильно відрізнятися в суб'єктивних проблемах; (4) реалізація відносно незручна через свою складність; (5) якісні попарні порівняння можуть означати невизначеність.
ANP	(1) має всі позитивні характеристики АНР, у т.ч. простоту, гнучкість, одночасне використання кількісних і якісних критеріїв, а також здатність переглядати узгодженість суджень; (2) допускає залежність і включає в себе незалежність, а також має можливість визначати пріоритети для груп або кластерів елементів.	(1) чутливий до кількох критеріїв – зі збільшенням кількості критеріїв розміри суперматриць збільшуються, що призводить до розширення та/або неможливості процесу розв'язання; (2) якісний характер порівнянь, проведених у парах, може передбачати невизначеність; (3) має такі ж слабкі сторони, як і АНР.
TOPSIS	(1) залежить лише від ваги та внутрішніх характеристик кожної альтернативи; (2) швидке застосування порівняно з іншими методами; (3) послідовний і надійний; (4) простий у реалізації та зрозумілий принцип; (5) задовільно працює в різних сферах застосування.	(1) втрата інформації через високий рівень агрегації; (2) не передбачає, як визначити ваги для різних критеріїв, вважається, що він уже має цю інформацію; (3) використання евклідової відстані не враховує кореляції атрибутів.
VIKOR	(1) толерантний до відхилень значень протягом періоду оцінювання; (2) алгоритм може виконуватися без інтерактивної участі ОНР.	(1) можливі помилки в розрахунках; (2) лінійна нормалізація необхідна для вирішення багатовимірних проблем критеріїв; (3) не передбачає, як визначити вагові коефіцієнти для різних критеріїв.
PROMETHEE	(1) простий у використанні та має низьку складність; (2) особливо корисний, коли виникають труднощі з узгодженням альтернатив; (3) чіткість і стабільність; (4) можна використовувати якісні та кількісні дані.	(1) дуже тривалий процес обчислення порівняно з іншими методами; (2) не передбачає, як визначити ваги для різних критеріїв; (3) користувачеві важко отримати чітке уявлення про проблему, використовуючи багато критеріїв.
DEA	(1) не використовує змодельовану інформацію про переваги (наприклад, вагові коефіцієнти чи функцію корисності); (2) здатний обробляти кілька входів і виходів, а також виявляти зв'язки, приховані для інших методів; (3) можна навіть використовувати для попереднього аналізу, визначення основних ефективних альтернатив, а потім застосувати звичайний метод.	(1) не працює з неточними даними і передбачає, що всі вхідні та вихідні дані точно відомі; (2) не використовує набір ваг, які виражають переваги ОНР; (3) користувач може не розуміти логіки та припущень методу.

ELECTRE	(1) застосовний, навіть якщо інформація відсутня; (2) може використовувати якісні та кількісні дані; (3) вагові коефіцієнти використовуються як коефіцієнти важливості, щоб компенсація не була передбачена; (4) головна перевага – враховує невизначеність і неточність.	(1) дуже тривалий процес обчислення порівняно з іншими методами; (2) лише привертає увагу до переваг й ігнорує рівень різниці між альтернативами; (3) довготривалий без використання спеціального програмного забезпечення; (4) вважається досить складним.
WASPAS	(1) складається з двох об'єднаних математичних методів, WSM і WPM; (2) досить комплексний за своєю природою і може бути успішно застосований до будь-якої ситуації прийняття рішення; (3) містить просту та надійну математичну модель.	(1) можливі помилки в розрахунках; (2) відсутній процес аналізу узгодженості вхідних даних, тому вони мають бути надійними, щоб результат був узгодженим.

Більшість традиційних методів мають обмеження, і їх недостатньо для вирішення реальних проблем [50]. Вибір кращого постачальника хмарних послуг є складною проблемою, яка потребує великої кількості інформації та різних точок зору. А тому прийняття рішень має враховувати складність реального світу. Нові тенденції та концепції гібридних моделей MCDM можуть вирішити ці обмеження [51,52].

Гібридні MCDM (скорочено HMCDM) включають чотири групи методів прийняття рішень або їхні комбінації з іншими методами. На рис.2.2 показано, як методи MCDM можна поєднувати з іншими методами для обчислення відносної значущості критеріїв, а також нечітких або сірих (grey) множин.

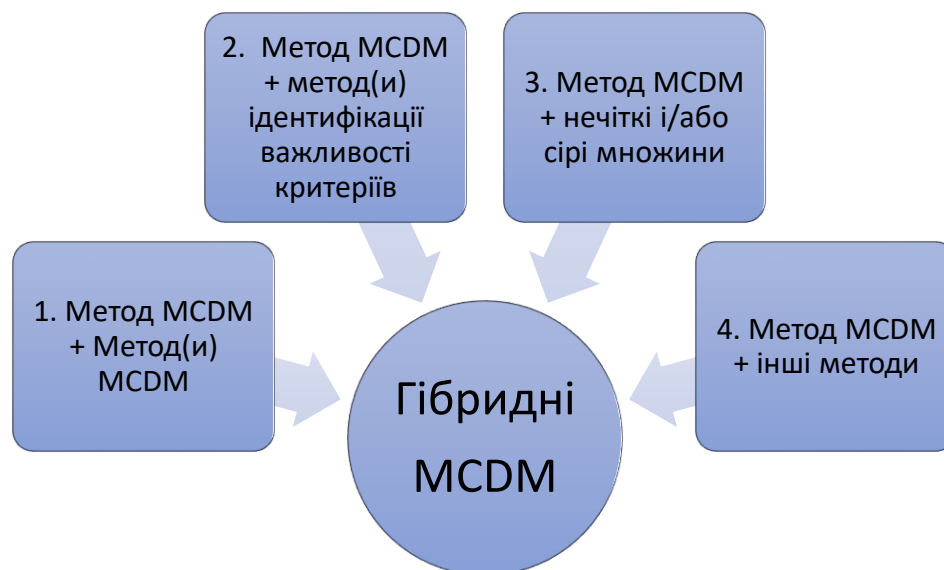


Рисунок 2.2 – Композиція гібридних MCDM [53]

За допомогою застосування гібридних методів можна усунути існуючі недоліки звичайних класичних методів MCDM, зокрема:

- різні методи MCDM іноді дають різні рейтинги альтернатив. Жоден метод не можна вважати найкращим як для загальної, так і для конкретної проблеми [54]. Тому рекомендується використовувати більше одного методу MCDM та інтегрувати результати для остаточного прийняття рішення;

- порядок ранжування та остаточне рішення можуть значно відрізнитися залежно від важливості кожного критерію в аналізованій проблемі. Гібридний підхід передбачає вирішення двох завдань одночасно, наприклад, визначення ваг і значень критеріїв та їх інтегрування до значення функції корисності з кількома атрибутами. Крім того, інтеграція ваг критеріїв, визначених за допомогою різних об'єктивних і суб'єктивних методів зважування, допомагає точніше відобразити переваги зацікавлених сторін;

- моделі прийняття рішень мають бути максимально наближеними до реальних життєвих проблем. Нечіткість у процесі прийняття рішень часто виникає в контексті управлінської невизначеності, коли неоднозначність і труднощі ускладнюють прийняття правильного рішення. Тому інтеграція MCDM з нечіткими множинами чи сірими числами є кращим варіантом. Нечітка логіка може допомогти подолати невизначеність, яка виникає внаслідок людських якісних суджень і неповних відносин переваг;

- для додаткового обґрунтування формулювання проблеми також можна застосувати деякі інші методи. Через відсутність загальновизнаних показників оцінювання можна використати кількісні та якісні методи для узагальнення інформації, вибору показників та отримання критеріїв оцінювання для подальшого багатокритеріального аналізу.

Поточні класифікації методів MCDM побудовані на спробі класифікувати розроблені методи MCDM за даними, критеріями, альтернативами або кількістю ОПР. На наш погляд, можливо класифікувати розроблені методи ще й за ознакою аналітичного способу розв'язання багатокритеріальної проблеми. Це пов'язано з тим, що методи аналізу, у т.ч. методи розв'язання задач MCDM, також

відрізняються поміж собою. Для цього пропонується наступна схема класифікації, показана на рис.2.3.



Рисунок 2.3 – Запропонована класифікація MCDM за типом аналізу

Програмне забезпечення для аналізу багатокритеріальних рішень може допомогти ОПР на різних етапах процесу прийняття рішень, включаючи дослідження та формулювання проблеми, ідентифікацію альтернатив рішень і обмежень рішення, структурування переваг і компромісних суджень. Порівняльний аналіз вказаних програмних засобів наведено в [84].

2.2 Аналіз використання багатокритеріальних методів у сфері хмарних обчислень

Зростаючий ринок хмарних технологій і експоненціальне збільшення кількості постачальників хмарних послуг дали імпульс дослідникам до вивчення їх

ефективності для різних застосунків, таких як електронна комерція, вебдодатки, управління ресурсами тощо. Дослідники зосередилися на оцінюванні ефективності провайдерів і проектуванні структур для пошуку відповідних хмарних сервісів. Методи MCDM широко використовувалися науковцями для вирішення проблеми вибору в різних сферах. Не минули вони і використання цих методів для вибору хмарних сервісів і їх постачальників, про що свідчить подальший аналіз.

Вибір хмарного сервісу є однією з важливих проблем у сфері хмарних обчислень для хмарних користувачів. Тому переважно різними авторами пропонувалися методи вибору саме хмарного сервісу, а не хмарного постачальника.

Регман та ін. [56] показують корисність методів MCDM для вибору послуг IaaS. Вони демонструють застосування методів PROMETHEE, ANP, ELECTRE та TOPSIS для вибору IaaS.

Сайлас та ін. [79] розробили систему для оцінювання та вибору хмарних сервісів залежно від потреб хмарних користувачів. Метод ELECTRE використовувався для синтезу даних, зібраних від клієнтів хмари (критерії переваг) і хмарних провайдерів (критерій ефективності). Загалом було обчислено відносну вагу та швидкість хмарних служб, і було вибрано ядро хмарної служби. ELECTRE можна використовувати лише для вибору найкращої альтернативи, яка перевершує всі інші, однак з його допомогою неможливо ранжувати альтернативи.

Вайдузаман та ін. [80] представили таксономію вибору хмарних сервісів на основі методів MCDM. Вони обговорили різні методи MCDM з їхнім порівняльним аналізом та застосуванням у різних сферах.

Чой і Чен [76] розробили метод оцінювання хмарного сервісу, щоб допомогти клієнтам хмари оцінити та ранжувати хмарні SaaS на основі аналітичного мережевого процесу (ANP). З кількох стандартів було зібрано шість критеріїв якості для формування матриці критеріїв якості. Експерти проводять мережевий аналіз між критеріями якості. Загальний рейтинг якості для хмарних служб обчислюється за допомогою ANP із застосуванням матриці попарного порівняння та власного вектора матриці.

Гарг та ін. [31] представили структуру SMICLOUD для порівняння та ранжування трьох хмарних сервісів IaaS на основі критеріїв індексу вимірювання

хмарних сервісів (SMI) [35]. У цьому дослідженні консорціум ініціативи з вимірювання хмарних послуг (CSMIC) представляє багато вимірюваних ключових показників ефективності (KPI) для критеріїв QoS, і різні постачальники хмарних послуг порівнюються за допомогою цих KPI. Автори використали підхід ANP для розрахунку ваги критеріїв SMI на основі уподобань користувачів, а потім використали розраховані ваги для порівняння трьох хмарних служб IaaS. Вони враховували лише критерії CSMIC, що піддаються кількісному вимірюванню, і не визнавали критеріїв надійності QoS, які не підлягають кількісному вимірюванню, при виборі провайдера.

Гарг та ін. [73] розробили метод допомоги клієнтам хмари для оцінювання та вибору IaaS, зберігаючи при цьому правові та нормативні обмеження. У цьому підході використовували мову цільових вимог, ANP і TOPSIS. Щоб представити вплив законодавчих і нормативних обмежень на ранжирування альтернатив на основі критеріїв, які не підлягають кількісній оцінці, була використана цільова мова вимог. ANP використовується для виконання попарних порівнянь і оцінки значень ваги та швидкості, а TOPSIS використовується для ранжування альтернатив хмарних служб на основі критеріїв оцінки.

Баранвал і Відьярті [67] розробили вдосконалену структуру на основі методу рейтингового голосування для ранжування хмарних сервісів. Вони також додали ще кілька параметрів QoS, щоб розширити існуючу структуру SMI, яка допомагає користувачам хмари оцінювати хмарні служби. Вони класифікували метрики QoS на дві широкі категорії, а саме, специфічні для користувача та специфічні для програми. Спеціальний для користувача QoS важливий з точки зору конкретного користувача та складається з QoS, пов'язаного з хмарним користувацьким досвідом, тоді як специфічний для додатка показник пов'язаний з продуктивністю додатка. Для вибору найкращого хмарного сервісу використовувався вдосконалений метод рейтингового голосування. Він розглядає хмарні сервіси як кандидатів, а QoS, наданий ними, як виборець. Кожен CSP ранжується для кожного QoS на основі послуг, які вони надають. Нарешті, ранги кожного CSP, що відповідають кожному QoS, були агреговані для обчислення найкращої хмарної служби.

Лі та Сео [61] розробили структуру для пошуку найкращої хмарної служби

IaaS у нечіткому середовищі. Вони використовували збалансовану систему показників для визначення метрик QoS, важливих з таких аспектів, як фінанси, бізнес-процеси тощо, і нечіткий метод Дельфи, щоб знайти найважливіші параметри QoS з кожного аспекту. Нарешті, АНР із трикутними нечіткими числами використовувався для агрегування та обчислення вектора пріоритету кожного параметра QoS для ранжирування хмарних служб.

Наваз та ін. [17] спроектували архітектуру хмарного брокера для вибору хмарних послуг шляхом ідентифікації шаблонів зміни налаштувань користувача.

Сідху та Сінгх [37] розробили структуру оцінювання довіри до провайдерів, використовуючи АНР і TOPSIS для пошуку надійної хмарної служби. Важливість кожного параметра QoS розраховується на основі суб'єктивних оцінок кожного QoS користувачем хмари за допомогою АНР. TOPSIS використовувався для пошуку найкращого хмарного сервісу на основі їхньої якості обслуговування та ваги, розрахованої за допомогою АНР. Запропонованим методом оцінювалась надійність з використанням дев'яти критеріїв QoS (доступність, час відгуку, вартість, швидкість, ємність зберігання, функції, простота використання, технічна підтримка та обслуговування клієнтів) з різних точок зору. Ті ж автори [75] використовували той самий метод оцінювання для тієї ж мети, але для різних наборів критеріїв і провайдерів.

Тріпаті та ін. [64] представили метод оцінювання хмарних сервісів за наявності взаємозалежних метрик QoS. Їхня структура використовує АНР для моделювання взаємодії параметрів QoS і ранжування хмарних сервісів. АНР представляє хмарні служби та параметр QoS як вузол орієнтованого графа та ребра для взаємозалежності. Пріоритет взаємозалежних показників обчислюється за допомогою матриці попарного порівняння, а всі вектори пріоритетів агрегуються для ранжування хмарних служб. АНР стає складнішим із збільшенням кількості хмарних сервісів і параметрів QoS.

Кумар та ін. [62] представили структуру вибору хмарних послуг для нечіткого середовища, яка забезпечує гнучкість і дозволяє хмарним експертам і користувачам висловлювати свою думку в лінгвістичних термінах. Вони використовували АНР і нечіткий TOPSIS для вибору хмарних сервісів. Вага

параметрів QoS була обчислена за допомогою АНР, тоді як TOPSIS інтегровано з трикутним нечітким числом для обробки нечіткості та рейтингу хмарних служб.

Ці ж автори [36] також запропонували іншу структуру шляхом інтеграції АНР і TOPSIS для рейтингу хмарних сервісів у чіткому середовищі. Вага кожної метрики QoS за суб'єктивною оцінкою користувачів хмари обчислюється за допомогою методу АНР. Нарешті, хмарні сервіси були ранжовані за допомогою TOPSIS на основі їхніх звітів про оцінку QoS постачальників хмарних послуг.

Басу та Гош [63] розробили стійку структуру зміни рангів для ранжування хмарних сервісів у нечіткому середовищі за допомогою нечіткого TOPSIS. Але метод не може обробляти взаємозалежні метрики QoS.

Джатот та ін. [57] запропонували гібридну структуру вибору послуг з використанням методів АНР і Grey TOPSIS. Вони використовували АНР для обчислення важливості параметрів QoS та інтегрували теорію множин Грея з TOPSIS для ранжування хмарних сервісів.

А. Малхотра та ін. [72] представили цілочисельний мультиплікативний метод на базі АНР як простий і ефективний підхід до ранжування з метою вибору найкращого серед доступних хмарних сервісів на основі переваг користувача щодо різних параметрів і минулого досвіду роботи з постачальниками хмарних сервісів. Запропонований метод допомагає пришвидшити процес прийняття рішень на основі переваг клієнта.

Аль-Файфі та ін. [78] створили гібридний підхід MCDM для оцінювання та ранжування хмарних провайдерів на основі розумних даних. Гібридний підхід складається з двох частин: перша частина відповідає за кластеризацію провайдерів з подібними характеристиками за допомогою алгоритму k-середніх, а друга частина використовує DEMATEL-АНР для ранжування кластерів і отримання остаточного висновку.

Араухо та ін. [81] розробили підхід MCDM для вибору інфраструктур хмарних обчислень, які найкраще відповідають потребам підприємств і споживачів з точки зору надійності та вартості.

Сун та ін. [82] представили структуру вибору хмарних сервісів із взаємодією критеріїв, яка вимірює та агрегує нелінійні зв'язки між критеріями,

використовуючи нечітку міру та інтеграл Шоке.

Наваз і Джанджуа [69] розробили метод вибору хмарних сервісів на основі брокера, який використовує нещодавно відстежені дані QoS для розрахунку зваженої оцінки задоволеності за часовим інтервалом, котра показує, наскільки послуга відповідає очікуванням користувача QoS. Тоді зважена оцінка задоволеності за часовим інтервалом була використана для ранжування хмарних служб за методом найкращий-найгірший. Вони оцінили свій метод, використовуючи дані про продуктивність хмарних сервісів обчислювальної хмари Amazon.

Радулеску та ін. [65] представили структуру для ранжування хмарних сервісів на основі методу розширення елементів матерії (Matter Element Extension Method) та розширеного методу TOPSIS. Вони модифікували традиційний TOPSIS, замінивши евклідову відстань на відстань Мінковського, і використали її для вибору найкращого хмарного сервісу.

Отай та Їлдіз [77] представили інтегровану нечітку техніку AHP-VIKOR, засновану на однозначних нечітких числах Піфагора, для вирішення проблеми оцінювання та вибору постачальника хмарних послуг. У своєму дослідженні вони реальну проблему оцінювали за шістьма критеріями: фінансами, продуктивністю, безпекою та конфіденційністю, гарантією, гнучкістю та зручністю використання.

Більш повніший перелік наукових праць, присвячених оцінюванню хмарних сервісів і вибору постачальника хмарних послуг, із вказівкою використаних багатокритеріальних методів представлено в табл.2.3.

З наведених вище обговорень можна зазначити, що вибір хмарної служби є проблемою прийняття рішень, і більшість авторів використовували методи MCDM для вибору найкращого хмарного провайдера.

Разом з тим, у проведеному огляді джерел виявлено, що для оцінювання хмарних провайдерів було використано велику кількість критеріїв, що призвело до збільшення обчислювальної складності для методів парного порівняння. Крім того, багато з цих критеріїв є якісними за своєю природою, що призводить до меншої узгодженості в попарних порівняльних значеннях і, відповідно, до менш надійних рішень.

Таблиця 2.3 – Використання методів MCDM для оцінювання хмарних сервісів

Публікація	Рік	Використані методи MCDM
Rehman & al. [56]	2012	PROMETHEE, AHP, ELECTRE, TOPSIS
Silas S. & al. [79]	2012	ELECTRE
Garg & al. [31]	2013	Структура SMICloud на основі AHP
Repschlaeger J. & al. [60]	2013	AHP
Ghafori V., Sarhadi R. M. [58]	2013	Інтегрований ANP-DEMATEL
Choi C.-R., Jeong H.-Y. [76]	2014	ANP
Lee Y.-H., T. U. [74]	2014	AHP
Garg & al. [73]	2015	ANP + TOPSIS
Lee S., Seo K. K. [61]	2016	BSC, fuzzy Delphi, fuzzy AHP
Baranwal G., Vidyarthi D. P. [67]	2016	Метод рейтингового голосування
Rai D., Kumar V. P. [71]	2016	TOPSIS + VIKOR.
Boutkhoul O. [68]	2016	Fuzzy AHP + PROMETHEE
Chahal R. K., Singh S. [70]	2016	Fuzzy AHP
Upadhyay N. [12]	2017	AHP + TOPSIS
Kumar R.R., Mishra S., Kumar C. [62]	2017	AHP + fuzzy TOPSIS
Tripathi & al. [64]	2017	ANP
Sidhu J. & Singh S. [37]	2017	AHP + TOPSIS
Sidhu J. & Singh S. [75]	2017	AHP + TOPSIS
Nawaz F. & al. [17]	2018	Markov chain and the best-worst method
R. R. Kumar, Mishra S., Kumar C. [36]	2018	AHP + TOPSIS
Araujo J. & al. [81]	2018	Стохастичні мережі Петрі
Basu A., Ghosh S. [63]	2018	Fuzzy TOPSIS
Jatoh C. & al. [57]	2019	AHP + Grey TOPSIS
Al-Faifi A. & al. [78]	2019	Алгоритм k-середніх, DEMATEL-ANP
Sun L. & al. [82]	2019	Стохастичні моделі, інтеграл Чоке
Supriya M. [66]	2020	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
Rasulescu C.Z. & al. [65]	2021	Matter Element Extension Method
Kumar R. R., Kumari B., Kumar C. [13]	2021	TOPSIS + Best worst method
Otay I., Yıldız T. [77]	2021	AHP +VIKOR, на основі нечітких чисел Піфагора
Malhotra A. & al. [72]	2021	Integer multiplication ranking method
Nawaz F., Janjua N. K. [69]	2021	best-worst method, timeslot weighted satisfaction scores

Тому, на наш погляд, для вирішення проблем обчислювальної складності та узгодженості, також пошуку адекватного, ефективного й повністю узгодженого рішення проблеми вибору хмарної служби доцільно використати модифікований метод MCDM.

2.3 Багатокритеріальний метод вибору постачальника хмарних послуг

У цьому підрозділі нами застосовано «лише-найкращий» метод (best-only method, BOM), який представляє багатокритеріальний підхід до вибору постачальника хмарних послуг. Цей метод є модифікацією відомого методу «найкращий-найгірший» (best-worst method, BWM) розробленого Джафаром Резаеї [14]. Згідно з цим підходом ОПР вибирає два критерії: найкращий та найгірший. Найкращий вважається критерій, який відіграє найважливішу роль у прийнятті рішення, тоді як найгірший критерій – протилежну роль. Потім ОПР вказує переваги кращого критерію щодо інших критеріїв, а також переваги всіх критеріїв порівняно з гіршим критерієм. Для цього застовується заздалегідь визначена шкала (наприклад, цілі числа від 1 до 9). Такі набори попарних порівнянь використовуються як вхідні дані для проблеми оптимізації, результатами якого є оптимальні ваги критеріїв. Відмітною рисою BWM є використання структурованого способу генерування попарних порівнянь, що забезпечує надійні результати.

На відміну від BWM, у BOM ОПР має визначити лише найкращий критерій, перш ніж проводити попарне порівняння між цим критерієм та іншими критеріями. Це гарантує, що оцінки матриці попарних порівнянь є ідеально узгодженими. Далі опишемо етапи запропонованого підходу до вибору провайдера хмарних обчислень, узагальнена схема якого представлена на рис.2.4.



Рисунок 2.4 – Загальна схема запропонованого підходу

Крок 1. Визначення множини критеріїв $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, де n – кількість критеріїв.

Крок 2. Визначення набору провайдерів хмарних послуг $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$, де m – кількість провайдерів.

Крок 3. Припущення про найкращий (наприклад, найважливіший) критерій C_B щодо обраної мети/завдання.

Крок 4. Встановлення важливості найкращого критерію над усіма іншими критеріями, використовуючи цілочисельну шкалу від 1 до 9, де 1 відповідає найвищій важливості, а 9 – найменшій. Результируючий вектор найкращих до інших (Best-to-Others) буде $A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$, де a_{Bj} позначає важливість найкращого критерію B над критерієм j , а $a_{BB} = 1$.

Крок 5. Знаходження оптимальної ваги критеріїв у вигляді вектора $CW = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, де w_B – значення оптимальної ваги для найкращого критерію. Для обчислення значень оптимальних ваг можна скористатися такими формулами

$$\frac{w_B}{w_i} = a_{Bi}, \forall i \neq B, a_{Bi} \in A_B, \quad (2.1)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (2.2)$$

Через проблему неузгодженості в BWM вагові співвідношення двох критеріїв або альтернатив можуть дещо відрізнятись від значення парного порівняння, встановленого ОПР, що призводить до похибки при обчисленні оптимальних ваг. Однак у рівняннях (2.1) і (2.2), оскільки WOM є повністю узгодженим методом, різниця між співвідношенням ваг двох критеріїв або альтернатив і значенням парного порівняння, встановленим ОПР, дорівнює 0, вони обидва рівні.

Крок 6. Вибір першого критерію C_1 для подальших обчислень.

Крок 7. Визначення кращого провайдера S_B стосовно першого критерію.

Крок 8. Знаходження значень попарних порівнянь кращого провайдера S_B з іншими провайдерами за критерієм C_1 . Результати записуються у вектор CS_B .

Крок 9. Обчислення оптимальних ваг провайдерів згідно з критерієм C_1 . Розрахунок проводиться за формулами (2.1)-(2.2), причому значення a_{Bj} належать вектору CS_B .

Крок 10. Знаходження оптимальних ваг провайдерів для всіх решти критеріїв (повторюються кроки 7-9).

Крок 11. Побудова матриці ваг провайдерів SW розміром $n \times m$, де кожен рядок матриці представляє оптимальні ваги провайдера щодо критерію, що відповідає цьому рядку.

Крок 12. Обчислення загальної оцінки кожного провайдера за формулою:

$$V_j = \sum_{i=1}^n CW_i \times SW_{ij}, j = 1, \dots, m. \quad (2.3)$$

Крок 13. Визначення рангу всіх провайдерів на основі їхніх загальних оцінок.

Крок 14. Вибір серед провайдерів найкращого.

Тепер зупинимося на алгоритмі розрахунку оцінок провайдерів хмарних послуг, блок-схема якого проілюстрована на рис.2.5-2.6.

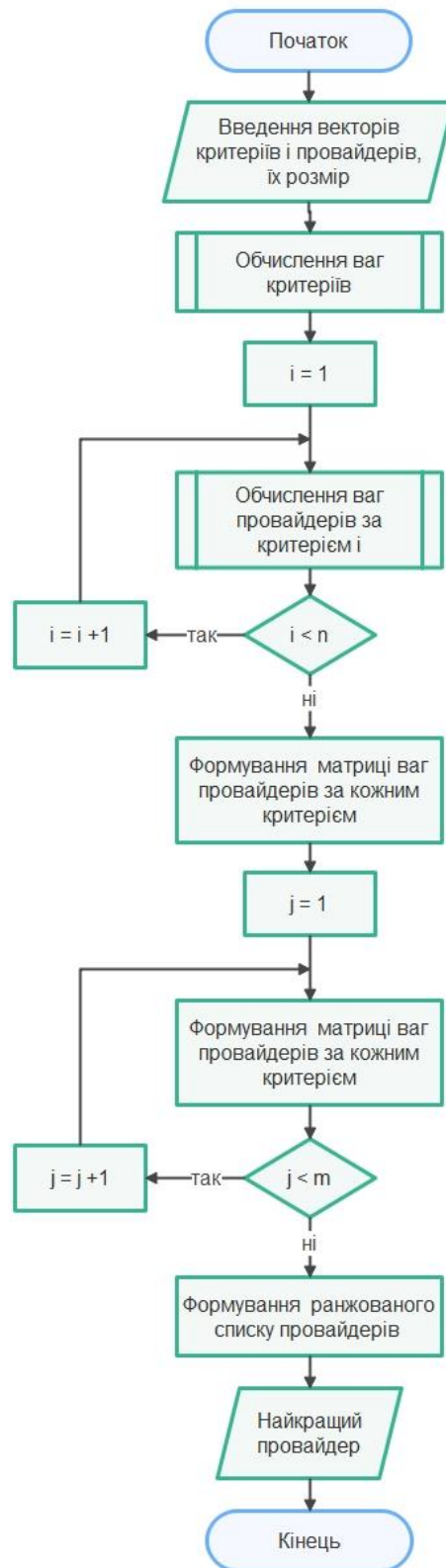


Рисунок 2.5 – Схема алгоритму оцінювання провайдерів



Рисунок 2.6 – Схема підпрограми визначення оптимальних ваг

Запропонований метод вибору хмарного провайдера на основі WOM вимагає вибраних наборів критеріїв і провайдерів як вхідних даних, а також векторів попарного порівняння найкращого критерію (або найкращого провайдера) з іншими критеріями (провайдерами), а на завершення повертає остаточний рейтинг провайдерів після виконання відповідних обчислень.

Згідно з основним алгоритмом насамперед визначаються вхідні та вихідні параметри. Спочатку визначають три проміжні параметри, необхідні для розрахунку остаточного рейтингу. Такими проміжними параметрами є вектор ваг вибраних критеріїв, матриця ваг кожного провайдера щодо кожного критерію і вектор загальних оцінок усіх провайдерів. Далі алгоритм викликає допоміжний

алгоритм (підпрограму), щоб обчислити ваги критеріїв. Для обчислення ваг провайдерів за певним критерієм повторно викликається підпрограма для кожного критерію. Потім обчислюються загальні оцінки кожного провайдера на основі всіх критеріїв. І нарешті усі провайдери ранжуються на основі їхніх загальних оцінок у списку. На основі результатів ранжування ОПР може здійснити вибір найкращого провайдера.

Допоміжний алгоритм (підпрограма) обчислює ваги набору критеріїв (або набору провайдерів щодо конкретного критерію). Параметри, необхідні для розрахунку ваг, надходять з головної програми. Цими параметрами є множина вибраних критеріїв (або провайдерів), кількість елементів у множині, а також вектор попарних порівнянь найкращого критерію (провайдера) з іншими елементами множини. Далі визначається вектор ваг вибраних критеріїв (провайдерів), який обчислюється за описаним вище алгоритмом. У режимі діалогу ОПР вказує найкращий критерій (або провайдера). Значення попарного порівняння найкращого критерію із собою було встановлено як 1. На наступному кроці ОПР вказує перевагу найкращого критерію (або найкращого провайдера) над іншими критеріями (або провайдерами), вибираючи значення переваги з цілочисельного списку $\{1, \dots, 9\}$. Попарні порівняльні значення потім використовуються для розв'язку рівнянь (2.1)-(2.2), в яких ваги є змінними, а порівняльні значення – коефіцієнтами. Результатом цієї операції є оптимальні ваги, які повертаються до основного алгоритму.

Запропонований підхід оцінено та апробовано у наступному розділі.

Висновки до розділу 2

1. У розділі проведено аналіз джерел, присвячених проблемі вибору постачальника хмарних послуг. Переважно різними авторами пропонувалися методи вибору саме хмарного сервісу, а не хмарного постачальника.

2. Найкращий хмарний сервіс і його провайдера потрібно вибирати, враховуючи низку несумісних кількісних і якісних критеріїв. Тому такий можна вважати проблемою багатокритеріального прийняття рішень (multi-criteria

decision-making, MCDM).

3. Обґрунтовано доцільність використання модифікації відомого методу «найкращий-найгірший» (best-worst method, BWM). Модифікація методу BWM полягає у спрощенні його алгоритму за рахунок відмови від вибору найгіршого варіанту, через що отримав назву «лише-найкращий» метод (best-only method, BOM).

4. Запропонований метод вибору сервіс-провайдера на основі методу «лише-найкращий» вимагає вибраних наборів критеріїв і провайдерів як вхідних даних, а також векторів попарного порівняння найкращого критерію (провайдера) з іншими критеріями (провайдерами), а потім повертає остаточний рейтинг послуг після виконання відповідних обчислень.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ ВИБОРУ ПОСТАЧАЛЬНИКА ХМАРНИХ ПОСЛУГ І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В ХМАРНИХ БРОКЕРАХ

3.1. Апробація розробленого методу вибору постачальника хмарних послуг

Для оцінювання постачальників хмарних послуг було відібрано наступних 9 критеріїв (табл.3.1):

Таблиця 3.1 – Відібрані критерії оцінювання постачальників хмарних послуг

	Критерій	Опис
C ₁	Масштабованість (Scalability)	Здатність постачальника хмарних послуг збільшувати або зменшувати кількість доступних послуг для задоволення вимог клієнта та згідно з SLA.
C ₂	Сталість (Sustainability)	Вплив постачальника хмарних послуг на економіку, суспільство та навколишнє середовище.
C ₃	Інтероперабельність (Interoperability)	Здатність сервісу легко взаємодіяти з іншими сервісами (того ж постачальника хмарних послуг та інших постачальників).
C ₄	Юзабіліті (Usability)	Простота (легкість), з якою можна використовувати хмарний сервіс
C ₅	Управління безпекою (Security Management)	Здатності постачальників хмарних послуг забезпечити безпеку додатків, даних та інфраструктури на основі вимог безпеки клієнта.
C ₆	Вартість (Cost)	Витрати клієнта на використання послуги упродовж певного часу.
C ₇	Ремонтопридатність (Maintainability)	Здатність постачальника хмарних послуг вносити зміни в сервіси, щоб підтримувати їх у належному стані.
C ₈	Час реагування сервісу (Service Response Time)	Інтервал часу між запитом на послугу та отриманням відповіді.
C ₉	Надійність (Reliability)	Міра того, як сервіс працює без збоїв за певних умов протягом заданого періоду часу.

Наступним кроком було формування множини альтернатив (постачальників хмарних послуг). Нами обрано такі шість провайдерів (сервісів): Amazon Web Services (P_1), Google Cloud Platform (P_2), IBM Cloud (P_3), Linode (P_4), Microsoft Azure (P_5), Oracle Cloud (P_6).

Тоді ієрархічна структура для вибору хмарного провайдера матиме вигляд (рис.3.1):

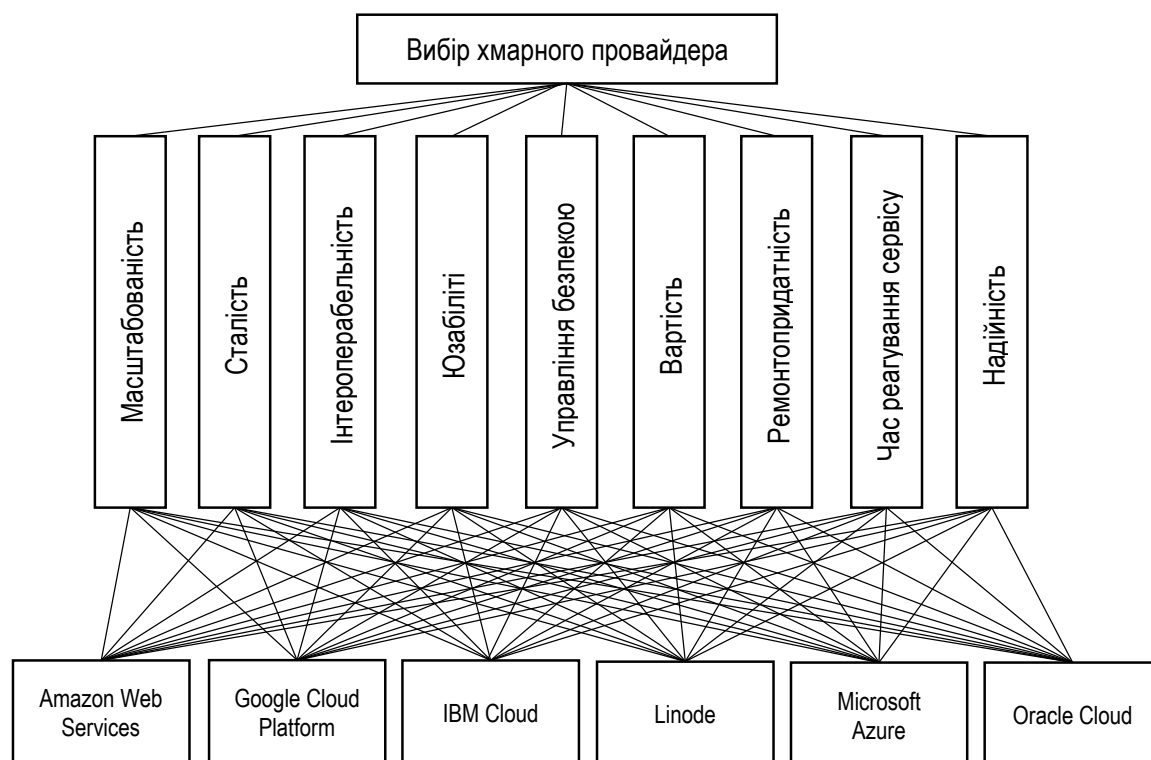


Рисунок 3.1 – Ієрархічна структура прийняття рішень для вибору постачальника хмарних послуг

Після проектування цієї ієрархії переходимо до задання кращого критерію. Нехай це буде C_5 – Управління безпекою. Особа, яка приймає рішення, далі має визначити значення попарного порівняння найкращого критерію (C_5) з кожним іншим критерієм із їхнього набору. Результати представлені в табл.3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняльні значення найкращого (C_5) критерію з іншими

C_5 -3-	C_5 -3-	C_5 -3-	C_5 -3-	C_5 -3-	C_5 -3-	C_5 -3-	C_5 -3-	C_5 -3-
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
5	9	3	8	1	6	7	2	4

Табл.3.3 і рис.3.2 демонструють оптимальні ваги критеріїв, обчислені за формулами (2.1)-(2.2).

Таблиця 3.3 – Оптимальні ваги критеріїв

Критерій	Вага
C_1	0,070697
C_2	0,039276
C_3	0,117829
C_4	0,044186
C_5	0,353486
C_6	0,058914
C_7	0,050498
C_8	0,176743
C_9	0,088371

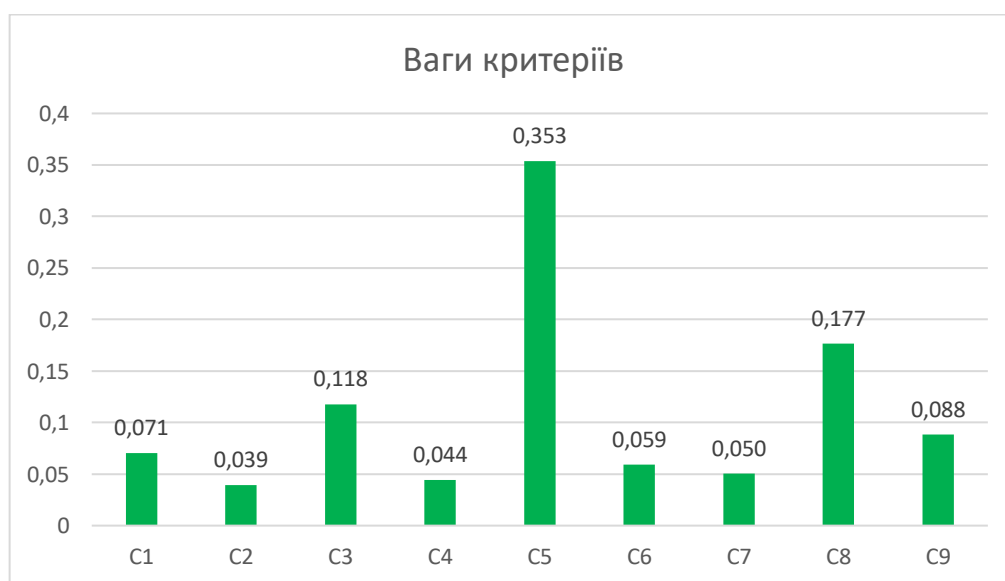


Рисунок 3.2 – Оптимальні ваги обраних критеріїв

Аналогічно до розрахунків, пов'язаних з критеріями, проводяться обчислення стосовно провайдерів. Припустимо, ОПР вибирає P_1 як найкращий сервіс-провайдер. Далі визначає величини попарних порівнянь найкращого провайдера (P_1) з іншими провайдерами згідно з критерієм C_1 . Табл.3.4 показує такі

порівняльні значення щодо критерію C_1 .

Таблиця 3.4 – Порівняльні значення найкращого провайдера (P_1) з іншими провайдерами за критерієм C_1 .

P_1 -з- P_1	P_1 -з- P_2	P_1 -з- P_3	P_1 -з- P_4	P_1 -з- P_5	P_1 -з- P_6
2	5	4	3	8	1

Табл.3.5 і рис.3.3 демонструють оптимальні ваги провайдерів за критерієм C_1 , обчислені за формулами (2.1)-(2.2).

Таблиця 3.5 – Оптимальні ваги провайдерів за критерієм C_1

Провайдер	Вага
P_1	0,207612
P_2	0,083044
P_3	0,103806
P_4	0,138408
P_5	0,051903
P_6	0,415224

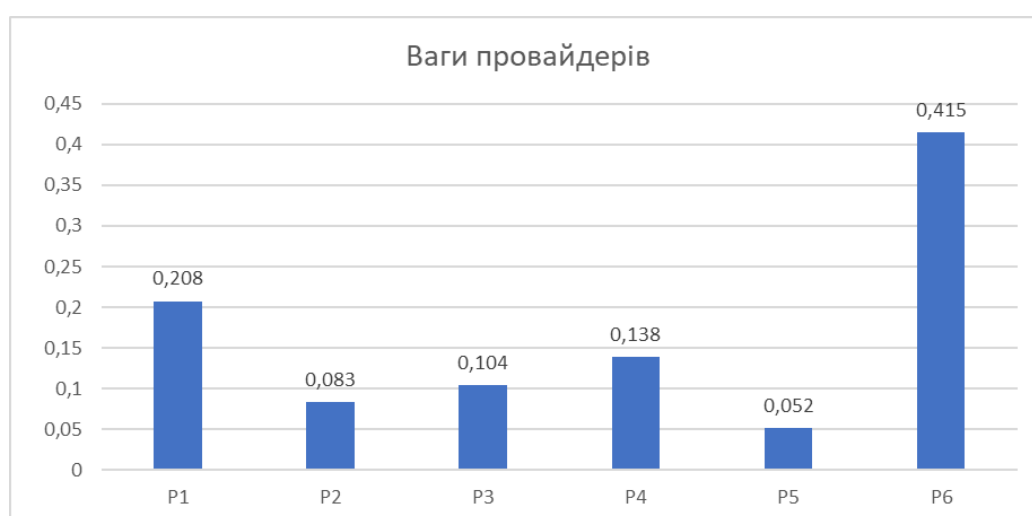


Рисунок 3.3 – Оптимальні ваги провайдерів за критерієм C_1

Процедуру обчислення оптимальних ваг провайдерів повторимо для всіх

інших критеріїв. Для кожного критерію C_i ОПР має вибрати найкращого провайдера (P_B) і оцінити попарні порівняльні значення його з іншими (відповідно за черговим критерієм C_i). В табл.3.6 зібрано всі попарні порівняльні значення провайдерів у розрізі кожного критерію. Кожен рядок таблиці представляє значення попарних порівнянь найкращого провайдера з іншими за даним критерієм. Матриця оцінок охоплює 9 критеріїв (рядків) і 6 провайдерів (стовпців). ОПР вибирає найкращого провайдера для кожного критерію та оцінює його попарні порівняльні значення з іншими провайдерами. У таблиці заштриховані комірки відображають найкращого провайдера за кожним критерієм.

Таблиця 3.6 – Значення попарних порівнянь найкращого провайдера з іншими в розрізі кожного критерію

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
C_1	2	5	4	3	8	1
C_2	1	2	3	4	3	8
C_3	3	7	7	6	1	5
C_4	7	4	5	5	1	8
C_5	2	9	5	5	4	2
C_6	4	4	2	2	7	9
C_7	9	4	6	1	5	3
C_8	2	1	9	6	5	2
C_9	7	5	6	4	1	4

Таблиця показує, що Microsoft Azure (P_5) було обрано тричі як найкращий хмарний сервіс-провайдер за критеріями C_3 , C_4 і C_9 . Amazon Web Services і Oracle Cloud виявилися двічі найкращими провайдерами відповідно за критеріями C_2 , C_5 і C_1 , C_5 .

Таблиця 3.7 – Матриця ваг провайдерів

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
C_1	0,028855	0,009618	0,005771	0,007213	0,014427	0,004809
C_2	0,015452	0,007726	0,005150	0,003863	0,005150	0,001931
C_3	0,019779	0,008476	0,008476	0,009889	0,059338	0,011867
C_4	0,003291	0,005759	0,004607	0,004607	0,023039	0,002879
C_5	0,100358	0,022301	0,040143	0,040143	0,050179	0,100358
C_6	0,008397	0,008397	0,016794	0,016794	0,004798	0,003732
C_7	0,002722	0,006125	0,004083	0,024500	0,004900	0,008166
C_8	0,035665	0,071331	0,007925	0,011888	0,014266	0,035665
C_9	0,006282	0,008795	0,007329	0,010994	0,043976	0,010994

На наступному кроці обчислюємо загальну оцінку кожного провайдера за формулою (2.3). Кінцевий результат наведено в табл.3.8.

Таблиця 3.8 – Рейтинг постачальників хмарних послуг

Провайдер	Вага	Рейтинг
P_1	0,220805	1
P_2	0,148532	4
P_3	0,100834	6
P_4	0,129895	5
P_5	0,220076	2
P_6	0,180405	3

Очолює рейтинг провайдерів Amazon Web Services, який з мінімальним відривом випереджує Microsoft Azure. Далі слідують Oracle Cloud, Google Cloud Platform, IBM Cloud, Linode.

3.2 Багатокритеріальний метод вибору хмарного сервісу як ядро хмарного брокера

Хмарні обчислення належать до найперспективніших нових технологій і стали популярнішою моделлю для організацій різного рівня. Ці обчислення є моделлю PAYG (pay-as you-go, оплата в міру споживання) оплати хмарних сервісів за принципом «плачу лише за те, що використовую», яка дає змогу організаціям значно скоротити витрати шляхом перенесення ІТ-обладнання та програмного забезпечення в хмарне середовище. Однак наявність кількох постачальників хмарних послуг робить вибір хмарних сервісів складним завданням для користувача.

Тому виникає потреба в хмарних брокерах, як посередниках, в управлінні послугами для допомоги як постачальникам хмарних послуг, так і користувачам. Необхідність хмарного брокера була доведена багатьма організаціями в сфері хмарних обчислень, такими як Gartner і NIST [87]. Очікується, що до 2023 р. глобальний ринок брокерських послуг у хмарних службах досягне розміру в 15,03 млрд доларів США [86].

Прикладом архітектури хмарного брокера є Equinix [16], де понад 500 зареєстрованих хмарних провайдерів пропонують різні типи хмарних послуг [17], з яких лише Amazon налічує понад 70 [18].

Хмарний брокер є важливою концепцією, пов'язаною з технологією хмарних обчислень, і розглядається як ключова проблема в майбутньому [87]. Він відіграє роль посередника між хмарним користувачем і хмарним провайдером, а його основна функція полягає в допомозі користувачеві знайти постачальника хмарних послуг, який відповідає його функціональним і нефункціональним вимогам, тобто звільнити користувачів від складності пошуку найкращого хмарного провайдера. Брокер також дає змогу керувати службами та хмарними ресурсами, завдяки чому користувач не вникає в технічні деталі різних хмарних платформ. Також вони спрощують керування кількома хмарними службами через єдиний інтерфейс.

Узагальнена архітектура хмарного брокера наведена на рис.3.5.

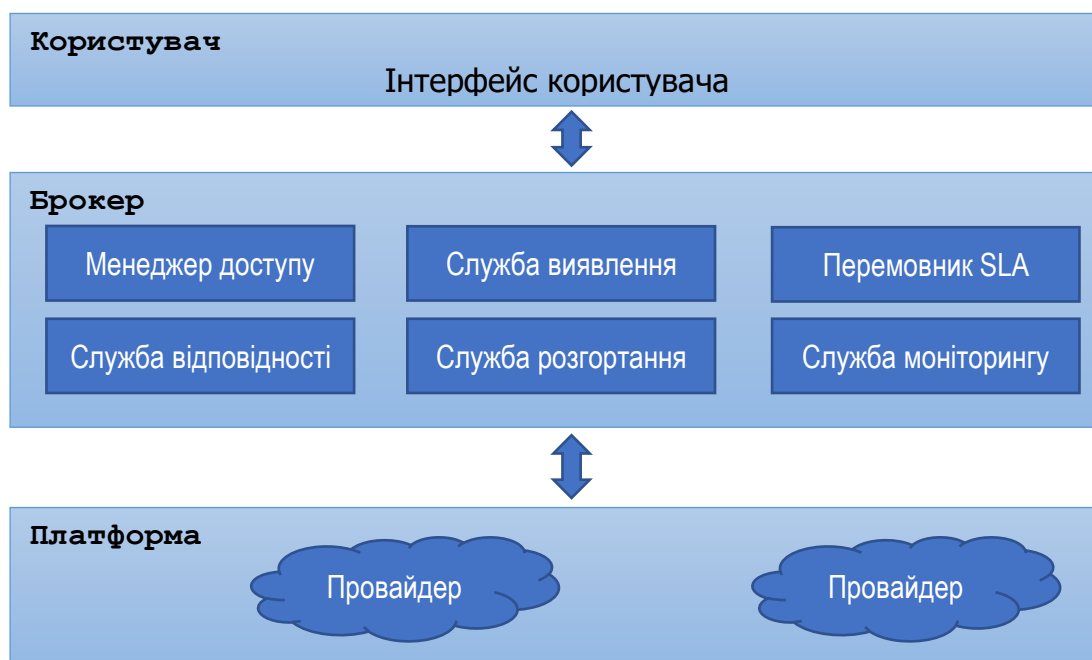


Рисунок 3.5 – Архітектура хмарного брокера

До основних компонентів архітектури хмарного брокера належать:

1. Інтерфейс користувача – дає змогу користувачеві отримати доступ до платформи брокера, подати запит на обслуговування, описати його функціональні та нефункціональні вимоги, а також бажану угоду про рівень обслуговування (SLA). З його допомогою користувач може контролювати якість наданих послуг і керувати зберіганням нових знань.
2. Менеджер доступу – допомагає запобігти несанкціонованому доступу та захистити дані та всю брокерську систему від хакерів, вірусів або шкідливих програм.
3. Служба виявлення – дає змогу періодично сканувати та виявляти нові хмарні сервіси, доступні на ринку хмарних обчислень.
4. Служба відповідності – представляє основне завдання брокера хмарних послуг – вибирає найкращий хмарний сервіс, який відповідає функціональним і нефункціональним вимогам користувача, дотримуючись певного алгоритму. Після цього встановлюється з'єднання між користувачем і вибраним хмарним провайдером.
5. Перемовник SLA – допомагає користувачеві та постачальнику хмарних

технологій досягти угоди, котра задовольняє обидві сторони. Після досягнення угоди укладається SLA.

6. Служба розгортання – компонент, що відповідає за розгортання додатків користувача після вибору хмарного сервісу, який найбільше відповідає його вимогам.

7. Служба моніторингу – перевіряє, чи користувач і постачальник хмарних послуг дотримуються SLA, а також відсутність випадків порушення цих угод. Подібним чином перевіряються ресурси, які використовуються для кожної програми, а щоденні, щотижневі та щомісячні звіти надсилаються користувачам, щоб дати їм можливість перевірити вартість різних наданих хмарних сервісів.

8. Хмарні платформи – забезпечують зв'язок між брокером і хмарними провайдерами за стандартними інтерфейсами.

Механізм роботи цієї архітектури можна описати таким чином.

1. Насамперед користувач підключається до системи брокера через відповідний інтерфейс.

2. Менеджер доступу перевіряє особу користувача, й між брокером і користувачем встановлюється з'єднання.

3. Користувач надсилає запит щодо хмарної міграції до служби відповідності, який містить специфікації завдання та функціональні та нефункціональні вимоги.

4. Служба відповідності отримає цей запит і попросить службу виявлення надіслати список доступних хмарних сервісів.

5. Потім вона зв'яжеться з хмарною платформою для збору необхідних даних про доступні хмарні сервіси й вибере найприйнятнішу послугу, застосовуючи алгоритм вибору хмарного сервісу.

6. Користувач отримає відповідь від брокера з деталями обраної послуги. Якщо користувач буде задоволений, тоді буде встановлено SLA. Якщо ні, перемовник SLA втрутиться, щоб допомогти користувачеві та постачальнику послуг досягти угоди, котра задовольнить обидві сторони.

7. Після вибору сервісу служба розгортання розгорне сервіс на вибраному хмарному провайдері.

8. Служба моніторингу регулярно перевірятиме, чи дотримуються SLA

користувач і постачальник хмарних послуг, і надсилатиме користувачеві звіти, котрі містять докладну інформацію про продуктивність послуги та використані ресурси.

Ключову роль у цій архітектурі відіграє компонент «служба відповідності». Щоб виконати своє завдання, цей компонент повинен слідувати певному алгоритму. Однією з версій такого алгоритму є багатокритеріальний метод, запропонований в п.2.3.

Однак указаній архітектурі хмарного брокера притаманні певні недоліки.

Кожен хмарний сервіс характеризується набором атрибутів. Тому перед вибором хмарної служби, що найбільше відповідає вимогам користувача, важливо визначити значення кожного такого атрибута. Правильне призначення вагових коефіцієнтів для різних атрибутів допомагає користувачеві вибрати хмарний сервіс, найвідповідніший його вимогам. Однак оцінювання важливості кожного атрибута, засноване лише на суб'єктивному виборі користувача, може зробити процес вибору послуг довільним і ненадійним, а через це й унеможливити правильний вибір, який відповідає вимогам користувача.

Отже, вага різних атрибутів має враховувати як суб'єктивне судження користувача, так і об'єктивне судження інших користувачів з подібними вимогами до обслуговування.

З цієї причини в роботі хмарного брокера варто використати зворотний зв'язок, який враховує відгук користувачів. Хмарний брокер має зберігати всю інформацію, пов'язану з послугами, та відгуки користувачів про ці сервіси для надання найкращих послуг кінцевим користувачам.

Тому, на наш погляд, в структурі хмарного брокера доцільно використати модель вибору, яка використовуватиме інтегрований підхід встановлення ваг при виборі хмарних послуг. У такий спосіб суб'єктивні та об'єктивні ваги атрибутів QoS поєднуються для обчислення інтегрованої загальної ваги.

Подальший розвиток структури хмарного брокера (рис.3.5) можна запропонувати наступним чином (рис.3.6).

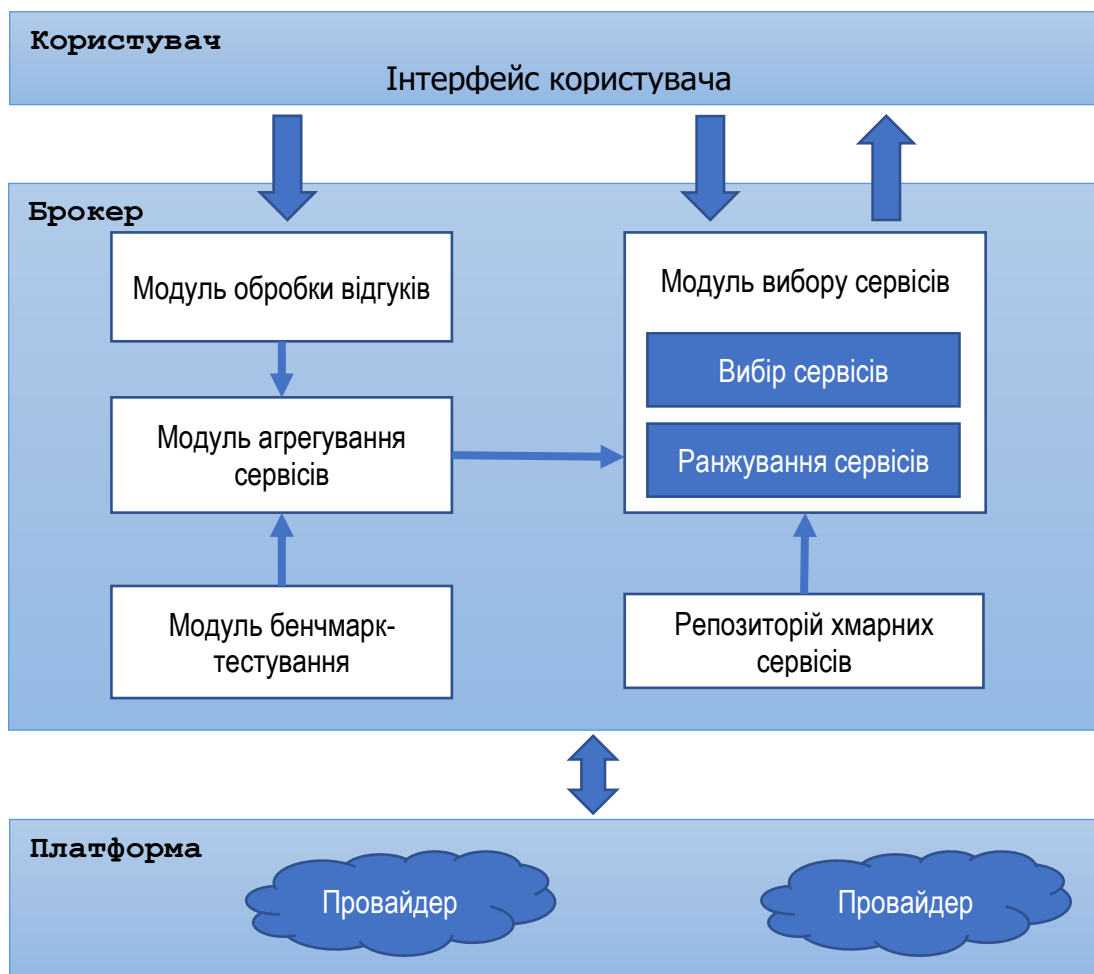


Рисунок 3.6 – Запропонована модель хмарного брокера

Система хмарного брокера складається з чотирьох модулів: вибору сервісу, обробки користувацьких відгуків, агрегування відгуків і бенчмарк-тестування. Користувачі взаємодіють з брокером для пошуку відповідного сервісу згідно зі своїми потребами. Користувачі вказують функціональні та нефункціональні вимоги щодо QoS, а також перевагу параметрів QoS. Брокер повертає послугу або набір послуг на основі заданого пошуку.

Ядром хмарного брокера є модуль вибору сервісу. Він отримує запити від користувачів, котрі вказують функціональні та нефункціональні параметрами QoS. Користувачі можуть вказувати перевагу цих параметрів у лінгвістичній формі. Цей модуль виконує початкову обробку незалежно від того, чи можна отримати послугу чи ні. Він надсилає запити до іншого модуля для отримання необхідних даних хмарного сервісу. Модуль вибору працює зі списком сервісів із репозиторію

хмарних сервісів, де зберігаються доступні на даний момент сервіси. З цього списку модуль вибирає, які служби можуть задовольнити суб'єктивні та об'єктивні вимоги користувача. Він збирає агреговані відгуки про вибраний список хмарних сервісів. Базуючись на зібраних даних, модуль ранжує ці хмарні сервіси. Користувачеві в кінці надається список послуг із зазначенням їхнього рангу.

Модуль обробки відгуків відповідає за збір і керування відгуками користувачів, які користувалися хмарними службами. Цей модуль відповідає за збір і відповідність даних якості послуг (QoS). Важливий момент – зібрати правильні дані QoS. Саме кінцеві користувачі є основним джерелом отримання таких даних, проте в конкурентних умовах вони можуть надавати завищені дані хмарних сервісів, що може спричинити неправильне рішення при виборі послуги. Для полегшення користувачі можуть надавати свою суб'єктивну оцінку щодо параметра якості хмарного сервісу в лінгвістичному вигляді. Цю оцінку можна розглядати як суб'єктивний атрибут критеріїв QoS з нечіткою природою. З допомогою нечіткої логіки можна перетворити значення зворотного зв'язку в чіткі значення.

Модуль порівняльного тестування (або бенчмарк-тестування) використовується для пошуку загальної статистики продуктивності хмарних сервісів. У цей процес доцільно залучити довірені треті сторони, які використовують різні сценарії тестування як еталон для отримання продуктивності хмарних служб за різними показниками (доступність, час відгуку, надійність тощо). Загалом для цього використовують два види еталонних тестів: 1) загальні тести (виконуються у кожній хмарній службі для вимірювання атрибутів якості); 2) спеціальні тести (виконуються відповідно до потреб користувача, наприклад, тести високопродуктивних обчислень, тест швидкості шифрування тощо).

На відміну від суб'єктивних оцінок користувачів, ці тести можна розглядати як отримання об'єктивних атрибутів хмарної служби. Значення об'єктивних атрибутів представляють у кількісному форматі, наприклад, доступність – 99,9%, час відгуку – 100 мс тощо. Порівняльне тестування зазвичай виконується для визначення продуктивності хмарних служб за різними сценаріями та багато разів, динамічно змінюючи робоче навантаження на хмару. Для цього можна

скористатися загальновідомими системами тестового порівняння, такими як CloudHarmony [88] і CloudSpectator [89]. Об'єктивні значення атрибутів хмарних сервісів зберігаються для подальшого використання.

Модуль агрегування сервісів виконує агрегування суб'єктивних і об'єктивних відгуків стосовно хмарних сервісів. Щоб описати функціональність хмарного сервісу, потрібно використати як суб'єктивні, так і об'єктивні відгуки. Модуль обробки відгуків забезпечуватиме суб'єктивний відгук на основі зворотного зв'язку користувачів, тоді як модуль порівняльного тестування забезпечуватиме об'єктивний відгук про хмарний сервіс. В результаті обчислень отримаємо комбіноване значення ваги певного хмарного сервісу.

Репозиторій хмарних сервісів є каталогом для зберігання інформації про хмарні сервіси та їхні параметри, надані постачальниками послуг. Він містить інформацію, пов'язану з хмарними сервісами, пропоновані різними постачальниками послуг. З його допомогою зберігається минула інформація хмарних сервісів. Модуль вибору послуг отримує доступ до інформації про хмарні сервіси, котра зберігається в сховищі, для їх подальшого ранжування.

Отже, запропонована система хмарного брокера є надійним засобом для ранжування та вибору послуг у хмарному середовищі, який враховує суб'єктивні та об'єктивні оцінки продуктивності хмарних сервісів. У перспективі система може бути розширена для групового прийняття рішень у процесі ранжування та вибору хмарних сервісів. Ієрархічна структура критеріїв вибору послуг, запропонована в розділі 2, може бути використана для перевірки їх значення при обчисленні ваги та виборі послуг.

Висновки до розділу 3

1. Для оцінювання постачальників хмарних послуг було відібрано дев'ять критеріїв і шість альтернативних сервіс-провайдерів. Проведені розрахунки підтвердили ефективність запропонованого підходу. Модифікований метод WOM продемонстрував, що використовує меншу кількість попарних порівнянь для критеріїв і альтернатив порівняно з методом BWM.

2. Наявність кількох постачальників хмарних послуг робить вибір хмарних сервісів складним завданням для користувача. Тому виникає потреба в хмарних брокерах, як посередниках, в управлінні послугами для допомоги як постачальникам хмарних послуг, так і користувачам.

3. У структурі хмарного брокера доцільно використати модель вибору, яка використовуватиме інтегрований підхід встановлення ваг при виборі хмарних послуг. У такий спосіб суб'єктивні та об'єктивні ваги атрибутів якості послуг поєднуються для обчислення інтегрованої загальної ваги.

4. Запропонована система хмарного брокера є надійним засобом для ранжування та вибору послуг у хмарному середовищі, який враховує суб'єктивні та об'єктивні оцінки продуктивності хмарних сервісів. Ієрархічна структура критеріїв вибору послуг, запропонована в розділі 2, може бути використана для перевірки їх значення при обчисленні ваги та виборі послуг.

ВИСНОВКИ

1. У кваліфікаційній роботі проведено аналіз ситуації на ринку хмарних обчислень, який засвідчив інтенсивність його зростання та різноманіття послуг (сервісів), котрі надаються постачальниками. Сьогодні на ринку хмарних послуг різні постачальники пропонують подібні послуги з різними функціями за різними цінами та рівнями продуктивності. Велика кількість різних постачальників послуг хмарних обчислень ускладнює користувачам порівняння та вибір найкращого сервісу відповідно до їхніх потреб. Прийняття правильного рішення щодо вибору хмарних послуг і провайдера має вирішальне значення для успіху бізнесу, і це може заощадити клієнтам багато витрат і вирішити проблеми у довгостроковій перспективі.

2. При виборі найвідповіднішого провайдера хмарних послуг деякі з критеріїв відбору є незрозумілими клієнтові, наприклад, часто немає непрозорості щодо того, як здійснюється доступ до хмарних ресурсів і хто до них має доступ. Інші критеріїв (наприклад, юзабіліті та безпека) нелегко визначити кількісно через природу хмари. Також приходиться шукати компроміс між багатьма з цих критеріїв, такими як продуктивність і ціна. За таких умов користувачам доводиться самостійно розглядати широкий спектр різних критеріїв оцінювання, які характеризують кілька хмарних послуг, запропонованих багатьма провайдерами.

3. Сьогодні постачальники хмарних послуг постійно конкурують за клієнтів. Ця конкуренція спочатку базувалася насамперед на вартості наданих ресурсів, але кількісна оцінка та порівняння фактичних можливостей тепер стають все критичнішими. Для встановлення набору можливих критеріїв оцінювання якості хмарних послуг і вибору їх постачальника було проаналізовано стандартний індекс вимірювання (Standard Measurement Index) як метод вимірювання та порівняння бізнес-послуг у хмарному середовищі. За результатами аналізу відібрано 9 критеріїв: масштабованість; сталість; інтероперабельність; юзабіліті; управління безпекою; вартість; ремонтпридатність; час реагування сервісу; надійність.

4. У роботі проведено дослідження методів вибору якості надання хмарних послуг і їх постачальників. Показано, що для вирішення проблеми вибору

постачальника хмарних послуг найкраще підходять багатокритеріальні методи прийняття рішень. Зокрема, обґрунтовано доцільність використання модифікації відомого методу «найкращий-найгірший» (best-worst method, BWM).

5. Модифікація методу BWM полягає у спрощенні його алгоритму за рахунок відмови від вибору найгіршого варіанту. Це дає змогу скоротити кількість попарних порівнянь при оцінюванні альтернатив. Розроблено детальну схему нового алгоритму.

6. Проведено апробацію запропонованого підходу до вибору хмарного постачальника. Для цього використано ієрархічну структуру прийняття рішень, яка охоплює дев'ять критеріїв і шість альтернативних провайдерів. Результати апробації підтвердили ефективність розробленого методу.

7. Автором запропоновано модернізовану структуру хмарного брокера на основі багатокритеріального методу вибору постачальника. Запропонована система хмарного брокера підвищує надійність ранжування та вибору послуг у хмарному середовищі, завдяки врахуванню суб'єктивних і об'єктивних оцінок продуктивності хмарних сервісів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cloud Computing Market Share, Market Size and Industry Growth Drivers, 2018-2024. URL: <https://www.t4.ai/industry/cloud-computing-market-share> (дата звернення: 10.08.2022)
2. Gartner Says More Than Half of Enterprise IT Spending in Key Market Segments Will Shift to the Cloud by 2025. URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2022-02-09-gartner-says-more-than-half-of-enterprise-it-spending> (дата звернення: 10.08.2022).
3. US NIST SP 800-145, The NIST Definition of Cloud Computing, Sept. 2011. URL: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-145/final>. (дата звернення: 10.08.2022).
4. International standard ISO/IEC 17788:2014. Information technology – Cloud computing – Overview and vocabulary. 9 p.
5. International standard ISO/IEC 22123-1: 2021. Information technology – Cloud computing – Part 1: Vocabulary.
6. International Telecommunication Union. The ITU-T Focus Group on Cloud Computing. Part 1: Introduction to the cloud ecosystem: definitions, taxonomies, use cases and high-level requirements. 2012.
7. Varghese B., Buyya R. Next generation cloud computing: new trends and research directions. *Future Gener. Comput. Syst.* 2018. Vol.79. P.849-861.
8. Service Level Agreement (SLA): все о соглашении об уровне сервиса. URL: <https://sbercloud.ru/ru/warp/sla-about> (дата відвідання: 01.12.2021).
9. Namasudra S., Roy P. A new table-based protocol for data accessing in cloud computing. *J. Inf. Sci. Eng.* 2017. Vol.33, No.3. P. 585-609.
10. Li S., Wang G., Yang J. Survey on cloud model-based similarity measure of uncertain concepts. *CAAI Trans. Intell. Technol.* 2019. Vol.4, No.4. P.223-230.
11. International standard ISO/IEC 17789:2014. Information technology – Cloud computing – Reference architecture. 15 p.
12. Upadhyay N. Managing cloud service evaluation and selection. *Procedia Comput. Sci.* 2017. Vol.122. P.1061-1068.

13. Kumar R. R., Kumari B., Kumar C. CCS-OSSR: A framework based on hybrid MCDM for optimal service selection and ranking of cloud computing services. *Cluster Comput.* 2021. Vol. 24, No. 2. P.867–883.

14. Hofer C. N., Karagiannis G. Cloud computing services: Taxonomy and comparison. *J. Internet Services Appl.* 2011. Vol. 2, No. 2. P.81-94.

15. Nawaz F., Janjua N. K., Hussain O. K., Hussain F. K., Chang E., Saberi M. Event-driven approach for predictive and proactive management of SLA violations in the cloud of things. *Future Gener. Comput. Syst.* 2018. Vol. 84. P.78-97.

16. Equinix Fabric Service Provider Availability. URL: <https://www.equinix.se/interconnection-services/equinix-fabric/provider-availability> (дата відвідання: 01.12.2021).

17. Nawaz F., Janjua N. K., Hussain O. K., Hussain F. K., Chang E., Saberi M. An MCDM method for cloud service selection using a Markov chain and the best-worst method. *Knowl.-Based Syst.* 2018. Vol.159. P.120-131.

18. Lin D., Squicciarini A. C., Dondapati V. N., Sundareswaran S. A cloud brokerage architecture for efficient cloud service selection. *IEEE Trans. Services Comput.*, 2019. Vol.12, No.1. P.144–157.

19. PaaS vs IaaS vs SaaS – differences, pros, and cons. URL: <https://www.artifakt.com/blog/paas/paas-vs-iaas-vs-saas-differences-pros-and-cons/> (дата відвідання: 01.12.2021).

20. Elbe D. PaaS vs IaaS vs SaaS – differences, pros, and cons. URL: <https://www.artifakt.com/blog/paas/paas-vs-iaas-vs-saas-differences-pros-and-cons/> (дата відвідання: 01.12.2021).

21. Rountree D., Castrillo I. Cloud Deployment Models. *The Basics of Cloud Computing. Understanding the Fundamentals of Cloud Computing in Theory and Practice.* Elsevier. 2014. P.35-47.

22. Regions and Availability Zones in Azure. URL: <https://docs.microsoft.com/uk-ua/azure/availability-zones/az-overview> (дата відвідання: 01.12.2021).

23. Top 10 Cloud Service Providers Globally in 2022. URL: <https://dgtlinfra.com/top-10-cloud-service-providers-2022/> (дата відвідання: 01.08.2022).

24. Gartner Report. 2021 Magic Quadrant for Cloud Infrastructure & Platform Services. URL: <https://aws.amazon.com/resources/analyst-reports/gartner-mq-cips-2021/> (дата відвідання: 01.08.2022).

25. Huge Cloud Market Still Growing at 34% Per Year; Amazon, Microsoft & Google Now Account for 65% of the Total. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/huge-cloud-market-still-growing-at-34-per-year-amazon-microsoft--google-now-account-for-65-of-the-total-301535935.html> (дата відвідання: 01.08.2022).

26. Q2 Cloud Market Grows by 29% Despite Strong Currency Headwinds; Amazon Increases its Share. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/q2-cloud-market-grows-by-29-despite-strong-currency-headwinds-amazon-increases-its-share-301595858.html>. (дата відвідання: 01.08.2022).

27. Шевчук І. Б., Депутат Б. Я. Економічний аспект використання хмарних технологій у діяльності органів публічної влади та бізнес-структур. *Економіка та суспільство*. 2021. Вип.31. С.

28. Агеев М. Ринок хмарних сервісів в Україні в 2020 році. URL: <https://ua.interfax.com.ua/news/blog/708733.html> (дата відвідання: 01.08.2022).

29. Мельник Т. Через війну український бізнес побіг переносити дані у хмару. Чому цей ринок росте попри все. URL: <https://forbes.ua/innovations/cherez-viynu-ukrainskiy-biznes-perenosit-dani-u-khmaru-chomu-tsey-rinok-roste-popri-vse-05042022-5296> (дата відвідання: 21.08.2022).

30. Закон «Про хмарні послуги». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2075-20#Text> (дата відвідання: 21.08.2022).

31. Garg S. K., Versteeg S., Buyya R. A framework for ranking of cloud computing services. *Future Gener. Comput. Syst.* 2013. Vol.29, No.4. P.1012-1023.

32. Marks E. How to Compare Cloud Providers, Services, and Prices in 2020. URL: <https://cloudspectator.com/how-to-compare-cloud-providers-services-and-prices> (дата відвідання: 21.08.2022).

33. Mell P., Grance T. NIST SP 800-145 the NIST definition of cloud computing. Nat. Inst. Standards Technol., Gaithersburg, MD, USA, Tech. Rep., 2011.

34. Guerron X., Abrahão S., Insfran E., Fernández-Diego M., González-Ladrón-De-Guevara F. A taxonomy of quality metrics for cloud services. *IEEE Access*. 2020.

Vol.8. P.131461-131498.

35. Service Measurement Index Framework Version 2.1. Cloud Services Measurement Initiative Consortium. July 2014. 8 p.

36. Kumar R. R., Mishra S., Kumar C. A novel framework for cloud service evaluation and selection using hybrid MCDM methods. *Arabian J. Sci. Eng.* 2018. Vol.43, No.12. P.7015–7030.

37. Sidhu J., Singh S. Improved TOPSIS Method Based Trust Evaluation Framework for Determining Trustworthiness of Cloud Service Providers. *Journal of Grid Computing.* 2017. Vol.15, Iss.1. P.81-105.

38. Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys. Ed: Greco S., Ehrgott M., Figueira J. R. 2nd ed. Springer, 2016. 1365 p.

39. Mi X., Tang M., Liao H., Shen W., Lev B. The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next? *Omega.* 2019. Vol.87. P.205-225.

40. Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega.* 2015. Vol.53. P.49-57.

41. Korhonen P., Moskowitz H., Wallenius J. Multiple criteria decision support – A review. *Eur. J. Oper. Res.* 1992. Vol.63, No.3. P.361-375.

42. Saaty T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *Interfaces.* 1994. Vol.24, No.6. P.19-43.

43. Saaty T. L. Decision making – the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering.* 2004. Vol.13. P.1–35.

44. Hwang C. L., Yoon K. Methods for Multiple Attribute Decision Making. Multiple Attribute Decision Making. (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems). Berlin: Springer, 1981. P.58-191.

45. Opricovic S. Multicriteria Optimization in Civil Engineering (in Serbian), Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 1998. 302 p.

46. Brans J. P. L'ingénierie de la décision: élaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE. Presses de l'Université Laval. 1982.

47. Roy B. Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode

ELECTRE). *La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO)*. 1968 (8). P.57–75.

48. Charnes A., Cooper W. W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*. 1978. Vol.2. P.429-444.

49. Zavadskas E. K., Turskis Z., Antucheviciene J., Zakarevicius A. Optimization of weighted aggregated sum product assessment. *Electronics and Electrical Engineering*, 2012. Vol.122, No.6. P.3-6.

50. Gavade R. Multi-criteria decision making: An overview of different selection problems and methods. *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.* 2014. Vol.5, No.4. P.5643–5646.

51. Liou J. J. H. New concepts and trends of MCDM for tomorrow – In honor of Professor Gwo-Hshiung Tzeng on the occasion of his 70th birthday. *Technol. Econ. Dev. Econ.* 2013. Vol.19. P.367–375.

52. Tzeng, G.-H.; Shen, K.-Y. *New Concepts and Trends of Hybrid Multiple Criteria Decision Making*; CRC Press; Taylor and Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2017.

53. Zavadskas E. K., Govindan K., Antucheviciene J., Turskis Z. Hybrid multiple criteria decision-making methods: a review of applications for sustainability issues. *Economic Research - Ekonomska Istraživanja*, 2016. Vol.29:1. P.857-887.

54. Saaty T. L., Ergu D. When is a Decision-Making Method Trustworthy? Criteria for Evaluating Multi-Criteria Decision-Making Methods. *International Journal of Information Technology & Decision Making*. 2015. Vol.14, No.06. P.1171-1187.

55. Building Return on Investment from Cloud Computing – Cloud Computing Key Performance Indicators and Metrics. URL: http://www.opengroup.org/cloud/wp_cloud_roi/p5.htm (дата відвідання: 21.08.2022).

56. Rehman Z., Hussain F. K., Hussain O. K. IaaS cloud selection using MCDM methods. *Proc. IEEE 9th Int. Conf. e-Bus. Eng. Sep.* 2012. P.246-251.

57. Jatoth C., Gangadharan G. R., Fiore U., Buyya R. SEL-CLOUD: A hybrid multi-criteria decision-making model for selection of cloud services. *Soft Comput.* 2019. Vol.23, No.13. P.4701–4715.

58. Ghafori V., Sarhadi R. M. Best Cloud Provider Selection using Integrated ANP-DEMATEL and Prioritizing SMI Attributes. *International Journal of Computer*

Applications. June 2013. Vol.71– No.16. P.18-25.

59. Mouratidis H., Islam S., Kalloniatis C., Gritzalis S. A framework to support selection of cloud providers based on security and privacy requirements. *J. Syst. Softw.*, Sep. 2013. Vol. 86, No. 9. P.2276–2293.

60. Repschlaeger J., Wind S., Zarnekow R., Turowski K. Decision model for selecting a cloud provider: A study of service model decision priorities. *Proc. 19th Americas Conf. Inf. Syst.*, Chicago, IL, USA, Aug. 2013, pp.1–11.

61. Lee S., Seo K. K. A hybrid multi-criteria decision-making model for a cloud service selection problem using BSC, fuzzy Delphi method and fuzzy AHP. *Wireless Pers. Commun.* 2016. 86 (1). P.57–75.

62. Kumar R. R., Mishra S., Kumar C. Prioritizing the solution of cloud service selection using integrated MCDM methods under Fuzzy environment. *J. Supercomputing.* 2017. 73 (11). P. 4652–4682.

63. Basu A., Ghosh S., Implementing Fuzzy TOPSIS in cloud type and service provider selection. *Adv. Fuzzy Systems.* 2018. P. 1–12.

64. Tripathi A., Pathak I., Vidyarthi D. P. Integration of analytic network process with service measurement index framework for cloud service provider selection. *Concurrency Computation: Practice Exp.* 2017. 29 (12). P.1–16.

65. Radulescu C. Z. & al. Multicriteria Framework for Cloud Service Providers Selection Based on the Matter Element Extension Method. *Studies in Informatics and Control.* 2021. Vol.30(1), pp. 77–87.

66. Supriya M. Cloud Service Provider Selection using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm. *4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI).* 2020, P. 800-807.

67. Baranwal G., Vidyarthi D. P. A cloud service selection model using improved ranked voting method. *Concurrency Computation: Practice Exp.* 2016. 28(13). P.3540–3567.

68. Boutkhoul O., Hanine M., Agouti T., Tikniouine A. Selection problem of cloud solution for big data accessing: Fuzzy AHP PROMETHEE as a proposed methodology. *J. Digit. Inf. Manag.*, Dec. 2016. vol. 14, no. 6, pp. 368–382.

69. Nawaz F., Janjua N. K. Dynamic QoS-aware cloud service selection using best-

worst method and timeslot weighted satisfaction scores. *Comput. J.*, Sep. 2021. Vol. 64, no. 9, P.1326–1342.

70. Chahal R. K., Singh S. Fuzzy logic and AHP-based ranking of cloud service providers. *Computational Intelligence in Data Mining*. New Delhi, India: Springer, 2016, vol.1. P.337–346.

71. Rai D., Kumar V. P. Instance based multi criteria decision model for cloud service selection using TOPSIS and VIKOR. *Int. J. Comput. Eng. Technol.*, 2016. Vol. 7, no.1. P.78–87.

72. Malhotra A., Dhurandher S. K., Gupta M., Kumar B. Integer multiplication ranking method for cloud services selection. *J. Ambient Intell. Hum. Comput.* Feb. 2021. Vol.12, no.2, P. 2003-2017.

73. Garg R., Naudts B., Verbrugge S., Stiller B. Modeling legal and regulative requirements for ranking alternatives of cloud-based services. *Proc. IEEE 8th Int. Workshop Requirements Eng. Law (RELAW)*, Aug. 2015, P. 25–32.

74. Lee Y.-H., T. U. Business Administration, A decision framework for cloud service selection for SMEs: AHP analysis. *SOP Trans. Marketing Res.*, May 2014. Vol.1, No. 1, P.51–61.

75. Singh S., Sidhu J. Compliance-based multi-dimensional trust evaluation system for determining trustworthiness of cloud service providers. *Future Gener. Comput. Syst.*, Feb. 2017. vol. 67, pp. 109–132.

76. Choi C.-R., Jeong H.-Y. Quality evaluation and best service choice for cloud computing based on user preference and weights of attributes using the analytic network process. *Electron. Commerce Res.*, Nov. 2014. Vol.14, No.3. P.245–270.

77. Otay I., Yıldız T. Multi-criteria cloud computing service provider selection employing Pythagorean fuzzy AHP and VIKOR. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham, Switzerland: Springer, AISC, 2021.

78. Al-Faifi A., Song B., Hassan M. M., Alamri A., Gumaei A. A hybrid multi criteria decision method for cloud service selection from smart data. *Future Gener. Comput. Syst.*, Apr. 2019. vol. 93, pp. 43–57.

79. Silas S., Rajsingh E. B., Ezra K. Efficient service selection middleware using ELECTRE methodology for cloud environments. *Inf. Technol. J.*, 2012. Vol. 11, no. 7,

P.868–875.

80. Whaiduzzaman M., Gani A., Anuar N. B., Shiraz M., Haque M. N., Haque I. T. Cloud service selection using multicriteria decision analysis. *Sci. World J.* 2014.

81. Araujo J., Maciel P., Andrade E., Callou G., Alves V., Cunha P. Decision making in cloud environments: An approach based on multiple-criteria decision analysis and stochastic models. *J. Cloud Comput.* 2018. Vol.7, No.1, P.1–19.

82. Sun L., Dong H., Hussain F. K., Hussain O. K., Liu A. X. A framework of cloud service selection with criteria interactions. *Future Gener. Comput. Syst.* 2019. Vol. 94, pp. 749–764.

83. Sun L., Dong H., Hussain F. K., Hussain O. K., Ma J., Zhang Y., Multicriteria decision making with fuzziness and criteria interdependence in cloud service selection. *Proc. IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Jul. 2014, P.1929–1936.

84. Decision-making software. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Decision-making_software (дата відвідання: 21.08.2022).

85. Super Decisions. URL: <https://www.superdecisions.com/> (дата відвідання: 21.08.2022).

86. Cloud Services Brokerage Market Growing at CAGR of 17.3%. URL: <https://www.digitaljournal.com/pr/4572032#ixzz7kheZQHUM> (дата відвідання: 21.08.2022).

87. Fowley F., Pahl C., Zhang L. A comparison framework and review of service brokerage solutions for cloud architectures. service-oriented computing. *ICSOC 2013 Workshops*. 8377. pp.137-149.

88. CloudHarmony. URL: <https://cloudharmony.com/> (дата відвідання: 21.08.2022).

89. CloudSpectator. URL: <https://cloudspectator.com> (дата відвідання: 21.08.2022).

90. Закаляк Р. Ф. Багатокритеріальний метод вибору постачальника хмарних послуг. *Мультидисциплінарна наукова інтернет-конференція «Світ наукових досліджень»* (Тернопіль – Пшеворськ, 29-30 вересня 2022 р.). Випуск 12. С. 106-109.

91. Закаляк Р. Ф. Критерії вибору постачальників хмарних послуг.

Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: Випуск 71», (м. Тернопіль, 18-19 жовтня 2022 р.). С.13-16.

Додаток А

Атрибути якості хмарних послуг і їх визначення
(Cloud Services Measurement Initiative Consortium.
Service Measurement Index Framework, version 2.1)

1. Accountability (Підзвітність)

Ця категорія містить атрибути, які використовуються для вимірювання властивостей, пов'язаних з організацією постачальника хмарних послуг. Ці властивості можуть бути незалежними від наданої послуги.

Атрибути	Визначення атрибутів SMI
Аудитованість	Здатність клієнта перевірити, чи постачальник хмарних послуг дотримується стандартів, процесів і політик.
Дотримання	Дотримання стандартів, процесів і політик, прийнятих постачальником хмарних послуг.
Досвід контрактації	Індикатори зусиль клієнта та задоволеності процесом укладання угод, необхідних для користування послугою..
Простота ведення бізнесу	Задоволеність клієнтів можливістю вести бізнес із постачальником хмарних послуг.
Управління	Процеси, що використовуються постачальником хмарних послуг для керування очікуваннями клієнтів, проблемами та ефективністю послуг.
Право власності	Рівень прав, які клієнт має на дані клієнта, ліцензії на програмне забезпечення та інтелектуальну власність, пов'язану з послугою..
Стабільність бізнесу провайдера	Імовірність того, що постачальник хмарних послуг продовжуватиме існувати протягом усього строку дії контракту.
Сертифікати постачальника	Постачальник хмарних послуг підтримує поточні сертифікати за стандартами, що відповідають вимогам їхніх клієнтів.
Перевірка контракту постачальника/SLA	Постачальник хмарних послуг надає клієнтам угоди SLA, достатні для керування послугою та зменшення ризиків збою служби.
Етичність постачальника	Етичність означає спосіб, у який постачальник хмарних послуг веде бізнес; вона включає ділову практику та етику поза сферою дотримання нормативних вимог. Етичність включає чесне ставлення до постачальників, клієнтів і працівників.
Вимоги до персоналу провайдера	Наскільки персонал постачальника хмарних послуг має навички, досвід, освіту та сертифікати, необхідні для ефективного надання послуги.
Ланцюг постачання постачальника	Постачальник хмарних послуг забезпечує підтримку будь-яких угод про рівень обслуговування, які повинні підтримуватися його постачальниками.
Підтримка провайдера	Ступінь, до якого постачальник хмарних послуг включає або надає допомогу клієнту в його зусиллях щодо користування послугою, у т.ч. відповіді на запитання щодо сервісу та вирішення будь-яких проблем, які можуть виникнути.
Сталість	Вплив постачальника хмарних послуг на економіку, суспільство та навколишнє середовище.

2. Agility (Гнучкість)

Вказують на вплив послуги на здатність клієнта змінювати напрямок, стратегію чи тактику швидко та з мінімальними порушеннями.

Атрибути	Визначення атрибутів SMI
Адаптивність	Здатність постачальника хмарних послуг пристосовуватися до змін у вимогах клієнта.
Еластичність	Здатність постачальника хмарних послуг регулювати споживання ресурсів для сервісу досить швидко, щоб задовольнити попит клієнта.
Розширюваність	Можливість додавати нові функції чи послуги до існуючих.
Гнучкість	Можливість додавати або видаляти попередньо визначені функції служби.
Мобільність	Здатність клієнта легко переміщати послугу від одного постачальника хмарних послуг до іншого з мінімальними збоями.
Масштабованість	Здатність постачальника хмарних послуг збільшувати або зменшувати кількість доступних послуг для задоволення вимог клієнта та узгоджених SLA.

3. Assurance (Упевненість)

Ця категорія включає ключові атрибути, які вказують на те, наскільки ймовірно, що послуга буде доступна, як зазначено.

Атрибути	Визначення атрибутів SMI
Доступність	Відповідність вікна доступності послуги, а також ймовірність того, що вікно доступності дійсно буде надано клієнтам.
Ремонтопридатність	Здатність постачальника хмарних послуг вносити зміни в сервіси, щоб підтримувати їх у належному стані.
Відновлюваність	Ступінь здатності сервісу швидко відновити нормальний стан роботи після незапланованого збою.
Надійність	Відображає, як сервіс працює без збоїв за певних умов упродовж певного періоду часу.
Відмовостійкість	Здатність сервісу продовжувати працювати належним чином у випадку збою в одному чи кількох її компонентах.
Сервісна стабільність	Ступінь стійкості послуги до змін, погіршення чи переміщення.
Обслуговуваність	Простота та ефективність виконання технічного обслуговування та усунення проблем із сервісом.

4. Financial (Фінанси)

Сума коштів, витрачених клієнтом на послугу.

Атрибути	Визначення атрибутів SMI
Процедура виставлення рахунків	Рівень інтеграції, доступний між білінговими системами клієнта та постачальника хмарних послуг, і передбачуваність сплати періодичних рахунків.
Вартість	Витрати клієнта на використання послуги протягом певного часу.
Фінансова маневреність	Гнучкість і еластичність фінансових аспектів послуг хмарного провайдера
Фінансова структура	Наскільки компоненти тарифікації та виставлення рахунків постачальника хмарних послуг відповідають потребам клієнта.

5. Performance (Продуктивність)

Ця категорія охоплює особливості та функції наданих послуг

Атрибути	Визначення атрибутів SMI
Точність	Ступінь відповідності послуги вимогам до неї.
Функціональність	Специфічні функції, які надає послуга.
Придатність	Наскільки можливості пропонованої послуги відповідають функціям, потрібним клієнту.
Інтер-операбельність	Здатність сервісу легко взаємодіяти з іншими сервісами (того ж постачальника хмарних послуг та інших постачальників).
Час відгуку сервісу	Індикатор часу між надходженням запиту на послугу та отриманням відповіді.

6. Security and Privacy (Безпека і конфіденційність)

Ця категорія включає атрибути, які вказують на ефективність контролю постачальника хмарних послуг щодо доступу до послуг, даних сервісу та фізичних об'єктів, з яких надаються послуги.

Атрибути	Визначення атрибутів SMI
Контроль доступу та керування привілеями	Політики та процеси, що використовуються постачальником хмарних послуг, щоб гарантувати, що лише персонал, якому надано відповідні привілеї, може використовувати або змінювати дані/робочі продукти.
Географічні / політичні дані	Обмеження клієнта щодо місця надання послуг, засновані на географічному чи політичному ризику.
Цілісність даних	Зберігання даних, які створюються, використовуються та зберігаються, у правильній формі, щоб клієнти могли бути впевнені, що вони точні та дійсні.
Конфіденційність даних і втрата даних	Клієнтські обмеження щодо використання та спільного використання даних клієнта накладаються постачальником хмарних послуг. Будь-які збої цих засобів захисту негайно виявляються та повідомляються клієнту.
Фізична та екологічна безпека	Політики та процеси, що використовуються постачальником хмарних послуг для захисту засобів постачальника від несанкціонованого фізичного доступу, пошкодження або втручання.
Проактивне керування загрозами та вразливістю	Існують механізми, які гарантують захист сервісу від відомих повторюваних загроз, а також від нових вразливостей.
Зберігання / відчуження	Процеси зберігання та видалення даних постачальника хмарних послуг відповідають вимогам клієнтів.
Управління безпекою	Здатності постачальників хмарних послуг забезпечити безпеку додатків, даних та інфраструктури на основі вимог безпеки клієнта.

7. Usability (Зручність користування)

Легкість, з якою можна використовувати сервіс

Атрибути	Визначення атрибутів SMI
Доступність	Ступінь доступності послуги користувачам з обмеженими можливостями.
Вимоги до персоналу клієнта	Мінімальна кількість персоналу, який відповідає ролям, навичкам, досвіду, освіті та сертифікації, які необхідні клієнтові для ефективного використання послуги.
Інсталяційність	Можливість інсталяції характеризує час і зусилля, необхідні для готовності сервісу до доставки (якщо це можливо).
Навчальність	Зусилля, необхідні користувачам, щоб навчитися користуватися сервісом
Оперативність	Здатність користувачів легко керувати послугою.
Прозорість	Ступінь, до якого користувачі можуть визначати, коли відбуваються зміни в функції чи компоненті служби, і чи впливають ці зміни на зручність використання.
Зрозумілість	Легкість, з якою користувачі можуть зрозуміти можливості та роботу сервісу.

Додаток Б
Копії публікацій автора