

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ДИХОТОМІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ПІДПРИЄМСТВАХ УКРАЇНИ

*Д. І. Цвях, Н. А. Потапова*

*Анотація.* У статті досліджено динаміку впровадження хмарних обчислень як ключового чинника цифрової трансформації українських підприємств. Проведено аналіз статистичних даних щодо витрат на ІТ-послуги та економічного ефекту від інтеграції хмарних рішень у бізнес-процеси. Для визначення критичних точок ефективності і точок беззбитковості інвестиційних проєктів із цифровізації застосовано чисельний метод дихотомії (метод ділення відрізка навпіл). Побудовано математичну модель, що описує залежність доданої вартості від рівня технологічного забезпечення. Отримані результати підтверджують доцільність використання ітераційних методів обчислень для високоточного прогнозування показників розвитку цифрової економіки та оптимізації витрат на хмарну інфраструктуру.

*Ключові слова:* методи обчислень, метод дихотомії, хмарні технології, цифрова трансформація.

**Вступ.** Сучасний етап розвитку глобальної економіки характеризується тотальною зміною парадигми управління бізнес-процесами, де ключовим фактором стійкості стає швидкість адаптації до хмарно-орієнтованих архітектур [3]. Хмарні обчислення (Cloud Computing) перестали бути допоміжним інструментом і перетворилися на фундамент для розгортання складних корпоративних систем, що забезпечують безперервність діяльності підприємств навіть у кризових умовах.

Для українського бізнесу, особливо в секторі інформаційних технологій, перехід на хмарні моделі обслуговування (SaaS, PaaS, IaaS) став життєво необхідним рішенням [3]. Це дає змогу нівелювати ризики, пов'язані з фізичним утриманням серверної інфраструктури, та суттєво знизити поріг входу для нових інноваційних проєктів. Зокрема, у сегментах комп'ютерного програмування та ІТ-консалтингу спостерігається найвища концентрація використання віртуалізованих потужностей, що прямо впливає на динаміку доданої вартості та масштабованість послуг.

Незважаючи на очевидні переваги, інтеграція хмарних сервісів супроводжується значними експлуатаційними витратами, що потребує від менеджменту чіткого розуміння точки окупності. Наукова проблема полягає у тому, що зростання прибутковості від впровадження хмар має нелінійний характер: на початкових етапах витрати можуть перевищувати вигоди через складність міграції даних та адаптації персоналу. Отже, виникає гостра потреба у застосуванні точних математичних інструментів для ідентифікації критичних значень ефективності.

Використання чисельних методів аналізу дає змогу трансформувати емпіричні дані у чіткі аналітичні моделі. Серед наявного математичного апарату особливої уваги заслуговує метод дихотомії. Він відзначається високою надійністю під час роботи з нелінійними функціями та допомагає шляхом послідовного звуження інтервалу пошуку знайти нульову точку ефективності з мінімальною похибкою [1].

**Метою статті** є висвітлення результатів розробки та апробації моделі для визначення критичних точок ефективності використання хмарних ресурсів на підприємствах ІТ-сфери України. У роботі використано статистичну базу за період 2017–2024 рр. для побудови функції рентабельності та подальшого її розв'язання ітераційним методом дихотомії.

**Основна частина.** В умовах цифрової трансформації економіки використання хмарних обчислень стає не просто технологічною перевагою, а необхідною умовою виживання бізнесу. Оцінка ефективності таких рішень потребує застосування методів обчислень, що дають змогу моделювати нелінійні процеси. Одним із найбільш точних підходів для знаходження критичних точок у таких моделях є побудова апроксимуючої функції з наступним застосуванням методу дихотомії для розв'язання отриманих рівнянь. Припустимо, що динаміка впровадження хмарних технологій описується неперервною функцією  $f(x)$  на відрізку  $[a, b]$ . Якщо на кінцях цього відрізка функція набуває значень різних знаків ( $f(a) \cdot f(b) < 0$ ), то на цьому проміжку існує принаймні один корінь рівняння  $f(x) = 0$ .

Метод дихотомії (метод бісекції) полягає у послідовному розподілі відрізка  $[a, b]$  навпіл [1]. На кожному кроці ітерації обчислюється значення функції в середній точці  $x_c$ :

$$x_c = \frac{a + b}{2}. \quad (1)$$

Кількість ітерацій  $n$ , необхідна для досягнення заданої точності  $\epsilon$ , дає змогу отримати результат із гарантованою похибкою, що у даному дослідженні встановлена на рівні  $\epsilon = 1 \cdot 10^{-5}$ .

Для проведення розрахунків використано статистичні дані щодо рівня впровадження інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) підприємствами України [4]. У табл. 1 представлено динаміку частки підприємств, що використовували хмарні сервіси середньої та високої складності у період 2017–2024 рр.

Таблиця 1

**Вихідні дані для моделювання впровадження хмарних технологій, 2017–2024 рр.**

Роки	Аргумент ( $x_i$ )	Частка підприємств, $y(i)$ %
2017	0	5,8
2018	1	7,1
2019	2	8,4
2020	3	11,9
2021	4	14,2
2022	5	18,5
2023	6	21,3
2024	7	24,8

Джерело: Державна служба статистики України [4]

Для аналізу динаміки впровадження хмарних рішень доцільно побудувати апроксимуючу функцію у вигляді поліному третього степеня, що дає змогу врахувати характеристики нелінійності процесу [2]. За допомогою методу математичного моделювання, аналогічного до розв'язання задач у середовищі Excel, отримано таку модель:

$$f(x) = 0,028x^3 + 0,15x^2 + 0,95x + 5,8. \quad (2)$$

Завданням дослідження є визначення моменту, коли частка ринку досягне критичного рівня 20 %, що свідчить про глибоку цифровізацію галузі. Для цього розв'язуємо рівняння:

$$F(x) = 0,028x^3 + 0,15x^2 + 0,95x - 14,2 = 0. \quad (3)$$

Отримані результати показують, що за досліджуваний період швидкість нарощування частки даних підприємств досягла максимального піку в період 2021–2022 рр., поступово зменшуючись у 2023 р. (рис. 1).

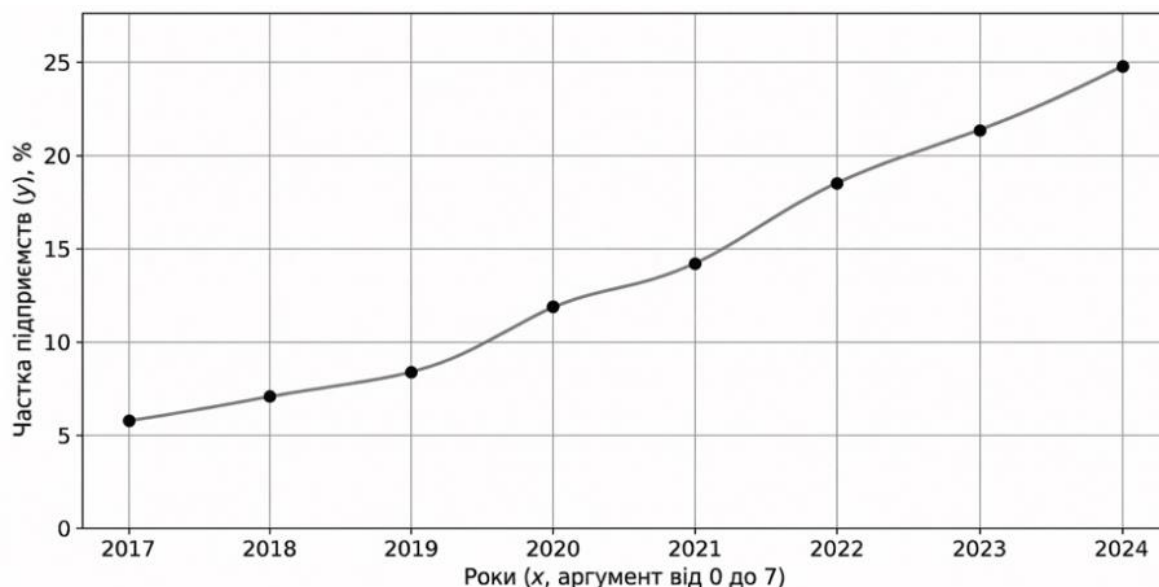


Рис. 1. Модель нелінійної динаміки впровадження хмарних технологій (2017–2024 рр.)

Відповідно до алгоритму, для пошуку кореня обрано інтервал [5; 6]. Перевірка умови існування кореня на даному відрізку показує, що знаки функції на його кінцях є протилежними  $F(5) = -2,22$  та  $F(6) = 2,96$ . Оскільки виконується умова  $F(a) \cdot F(b) < 0$ , це підтверджує наявність щонайменше одного розв'язку на обраному проміжку.

Для отримання уточненого значення критичного показника проведено цикл ітерацій (табл. 2), дотримуючись методики послідовного ділення відрізка навпіл, що представлена у сучасних наукових працях з чисельних методів [1].

Таблиця 2

**Результати уточнення кореня рівняння ефективності  
впровадження хмарних технологій методом дихотомії**

№ ітерації	Межа $a$	Межа $b$	Середина $x_c$	Значення $F(x_c)$	Похибка $ b - a $
1	5,00000	6,00000	5,50000	0,21450	1,00000
2	5,00000	5,50000	5,25000	-1,03487	0,50000
3	5,25000	5,50000	5,37500	-0,42036	0,25000
4	5,37500	5,50000	5,43750	-0,10551	0,12500
5	5,43750	5,50000	5,46875	0,05385	0,06250
6	5,43750	5,46875	5,45313	-0,02598	0,03125
7	5,45313	5,46875	5,46094	0,01390	0,01563
8	5,45313	5,46094	5,45703	-0,00605	0,00781
9	5,45703	5,46094	5,45906	0,00392	0,00391
10	5,45703	5,45906	5,45805	-0,00107	0,00195

Джерело: розраховано авторами на основі даних [4]

Як видно з розрахунків, шукане значення  $x = 5,458$ . Це відповідає приблизно червню 2022 р. Дана точка є критичною, оскільки позначає перехід до масового використання хмарних сервісів підприємствами України.

Для повного аналізу нелінійності процесу розрахуємо швидкість зміни частки підприємств через першу похідну отриманої функції:

$$f'(x) = 0,084x^2 + 0,3x + 0,95. \quad (4)$$

Проведемо порівняльний аналіз швидкості у початковій та знайденій точках. При  $x = 0$  (2017 р.) швидкість становила 0,95 % на рік. У знайденій критичній точці  $x = 5,458$  швидкість зросла до:

$$f'(5,458) = 0,084(5,458)^2 + 0,3(5,458) + 0,95 = 5,09 \%. \quad (5)$$

Отримані результати підтверджують стрімку інтенсифікацію цифрових перетворень: за досліджуваний період темпи впровадження хмарних рішень в Україні зросли у понад 5 разів. Така динаміка зумовлена стратегічною необхідністю переходу на віддалені формати роботи, підвищенням вимог до безпеки даних та системною оптимізацією витрат на ІТ-інфраструктуру в умовах глобальної диджиталізації.

**Висновки.** Інтерполяційний підхід та чисельний метод дихотомії виявилися ефективними інструментами для проведення високоточного аналізу поточних змін у сфері впровадження хмарних технологій на підприємствах України. Проведене дослідження підтвердило, що використання даного математичного апарату дає змогу будувати адекватні аналітичні моделі для оцінки динаміки цифровізації та визначення критичних точок технологічного розвитку. Застосування методу дихотомії допомогло з високою точністю визначити критичну точку ефективності впровадження хмарних сервісів, яка відповідає значенню  $x = 5,458$ , що приблизно припадає на середину 2022 р. Встановлено, що саме в цей період частка підприємств, які використовують хмарну інфраструктуру, досягла межі у 20 %, що позначає перехід до етапу масової цифрової трансформації в ІТ-секторі та суміжних галузях.

Аналіз першої похідної побудованої моделі показав значну інтенсифікацію процесів, за якої швидкість впровадження технологій зросла з 0,95 % у 2017 р. до 5,09 % у знайденій критичній точці, що свідчить про п'ятикратне прискорення темпів цифровізації. Виявлена нелінійна динаміка зумовлена стратегічною адаптацією бізнесу до віддалених форматів роботи,

підвищенням вимог до кібербезпеки та необхідністю системної оптимізації операційних витрат на утримання фізичної ІТ-інфраструктури. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості адаптації бізнес-стратегій до мінливих умов ринку та підвищенні ефективності прийняття управлінських рішень щодо інвестування в цифрові активи. Варто врахувати, що складний характер процесів вимагає постійного моніторингу та поєднання ітераційних методів обчислень із підходами прогнозування для отримання більш точних оцінок у довгостроковій перспективі.

*Abstract.* The article investigates the dynamics of cloud computing implementation in Ukrainian enterprises using the numerical dichotomy method. A mathematical model in the form of a third-degree polynomial was constructed to identify critical efficiency points in the digitalization process. The study determined that the 20 % market penetration threshold was reached in mid-2022 ( $x \approx 5,458$ ), with a fivefold intensification of growth rates observed over the analyzed period. The results demonstrate the high precision of iterative computational methods for forecasting digital economy indicators and optimizing IT infrastructure costs. The proposed approach provides a reliable basis for strategic decision-making in the context of global digital transformation.

*Keywords:* calculation methods, dichotomy method, cloud technologies, digital transformation.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Метод інтерполяції для прогнозування метрик використання хмарних обчислень в статистичному навчанні / Н. А. Потапова, Л. О. Волонтир, І. П. Частоколенко, М. С. Григоренко. *Наука і техніка сьогодні*. 2024. № 4(32). С. 1192–1205. URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/10943>
2. Чисельні методи: навчальний посібник / Л. О. Волонтир, О. В. Зелінська, Н. А. Потапова, І. А. Чіков. Вінниця: ВНАУ, 2020. 322 с. URL: <https://r.donnu.edu.ua/handle/123456789/1805>
3. Березовська Л., Кириченко А. Розвиток електронної комерції в Україні та ЄС. *Економіка та суспільство*. 2022. № 42. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/1614/1551>
4. Офіційний сайт Державної служби статистики України. Звіт про використання інформаційно-комунікаційних технологій на підприємствах у 2017–2024 рр. URL: [https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/zv/ikt/arh\\_ikt\\_u.html](https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/zv/ikt/arh_ikt_u.html)

УДК 004:005:51

## ЗАСТОСУВАННЯ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ НАВЧАННЯ МОДЕЛЕЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

*А. О. Шевчук, Р. М. Бабаков*

*Анотація.* У статті досліджено роль чисельних методів оптимізації у розвитку систем штучного інтелекту. Проведено порівняльний аналіз трьох найбільш поширених методів: SGD, AdamW та mL-BFGS. Досліджено математичний апарат кожного алгоритму, принципи роботи з градієнтами першого та другого порядків, а також стратегії адаптивності. Особливу увагу приділено механізмам стабілізації апроксимації матриці Гессе в умовах стохастичного шуму. Наведені результати тестування підтверджують ефективність методів другого порядку для прискорення збіжності моделей.

*Ключові слова:* чисельна оптимізація, градієнтний спуск, AdamW, mL-BFGS, збіжність.

**Вступ.** Ефективність навчання сучасних моделей штучного інтелекту безпосередньо залежить від вибору та застосування чисельних методів оптимізації [1]. Дане дослідження зосереджене на аналізі ітераційних процесів мінімізації функції втрат – математичної міри помилки, що відображає розбіжність між прогнозом моделі та реальними даними. В умовах роботи з великими масивами даних (Big Data) виникає потреба у методах, які здатні ефективно маневрувати у багатовимірних ландшафтах параметрів, уникаючи сідлових точок та локальних мінімумів.

Дослідження охоплює еволюцію алгоритмів від базових градієнтних підходів до складних квазі-ньютонівських структур. Основний акцент зроблено на вирішенні проблеми стохастичного шуму, який виникає під час обчислення градієнтів на малих випадкових вибірках даних. Це потребує впровадження механізмів стабілізації, як-от моменти та демпфування, для