

УДК 004.94+519.816.2

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-4\(32\)-1192-1205](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-4(32)-1192-1205)

Потапова Надія Анатоліївна кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, Донецький національний університет імені Василя Стуса, 21021, м. Вінниця, вул. 600-річчя, 21, тел.: (067) 582-81-32, <https://orcid.org/0000-0003-4566-4102>

Волонтир Людмила Олексіївна кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри протидії кіберзлочинності, Харківський національний університет внутрішніх справ, 21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3, тел.: (096) 4571298, <https://orcid.org/0000-0001-9022-9332>

Частоколенко Ігор Павлович кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики та інформаційних технологій Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, 18034, м. Черкаси, вул. Онопрієнка, 8, тел.: (095) 8999297, <https://orcid.org/0000-0001-9323-2684>

Григоренко Марина Сергіївна здобувач, Донецький національний університет імені Василя Стуса, 21021, м. Вінниця, вул. 600-річчя, 21, тел.: (096) 3316314.

МЕТОД ІНТЕРПОЛЯЦІЇ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕТРИК ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ОБЧИСЛЕНЬ В СТАТИСТИЧНОМУ НАВЧАННІ

Анотація. В статті висвітлюються питання використання методів обчислень для інтерполяції та прогнозування кількості підприємств в Україні, що використовують хмарні обчислення та мають доступ до мережі Інтернет. Наведено основні категорії хмарних послуг, визначені на законодавчому рівні України. Розкриваються такі особливості використання хмарних технологій як-от: економія використання ресурсів, мобільність та здатність до масштабованості, дотримання безпеки даних.

Обумовлюється можливість використання методу інтерполяції для розробки базової моделі прогнозування в статистичному навчанні. Підтверджується можливість використання інтерполяції поліномами Лагранжа та Ньютона в системі статистичного навчання з позиції встановлення базового опису функції для навчальної вибірки даних та її адаптації із зменшенням похибки. З використанням методів обчислення проведено оцінювання

динаміки статистичних метрик використання хмарних технологій підприємствами України як: частка кількості підприємств, що купують послуги хмарних обчислень; кількість підприємств, які мають доступ до мережі Інтернет в Україні. Інформаційну базу обчислення та розробки функції прогнозу становила неповна вибірка статистичних даних діяльності підприємств України за 2018-2022 рр., поновлення якої отримано методом інтерполяції. Підтверджено гіпотезу про спадаючу тенденцію кількості підприємств, які використовують хмарні обчислення та мають доступ до мережі Інтернет. Порівнюються результати оцінювання прогнозу на основі поліномів Лагранжа та Ньютона. Обґрунтовується важливість перспектив подальших досліджень у цій галузі для виявлення потенційних викликів та можливостей для українських підприємств у впровадженні технологій хмарних обчислень.

Ключові слова: методи обчислень, інтерполяція, поліном Лагранжа, поліном Ньютона, статистичне навчання.

Potapova Nadiia Anatoliivna Candidate of Economic Sciences, Associate professor, Associate Professor of Information Technology Department, Vasyl' Stus Donetsk National University, 21021, Vinnytsia, St. 600-richchia, 21, tel.: (067) 582-81-32, <https://orcid.org/0000-0003-4566-4102>

Volontyr Liudmyla Oleksiivna Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Cybercrime Countermeasures Department, Kharkiv National University of Internal Affairs, 21008, Vinnytsia, 3, Soniachna St., tel.: (096) 457-12-98, <https://orcid.org/0000-0001-9022-9332>

Chastokolenko Ihor Pavlovich Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology and Higher Mathematics of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine. 18034, Cherkasy, St. Onoprienka, 8, tel.: (095) 899-92-97, <https://orcid.org/0000-0001-9323-2684>

Hryhorenko Maryna Serhiivna acquisition of Vasyl' Stus Donetsk National University, Vasyl' Stus Donetsk National University, 21021, Vinnytsia, St. 600-richchia, 21, tel.: (096) 331-63-14.

INTERPOLATION METHOD FOR PREDICTING METRICS OF THE USE OF CLOUD COMPUTING IN STATISTICAL LEARNING

Abstract. The article highlights the issue of using calculation methods for interpolation and forecasting the number of enterprises in Ukraine that use cloud

computing and have access to the Internet. The main categories of cloud services defined at the legislative level of Ukraine are given. Such features of the use of cloud technologies are disclosed, such as: saving resources, mobility and scalability, compliance with data security.

The possibility of using the interpolation method for the development of a basic forecasting model in statistical training is stipulated. The possibility of using interpolation by Lagrange and Newton polynomials in the system of statistical learning from the standpoint of establishing a basic description of the function for the training data sample and its adaptation with error reduction is confirmed. With the use of calculation methods, an assessment of the dynamics of statistical metrics of the use of cloud technologies by enterprises of Ukraine was carried out, such as: the share of the number of enterprises purchasing cloud computing services; the number of enterprises that have access to the Internet in Ukraine. The information base for the calculation and development of the forecast function was an incomplete sample of statistical data on the activities of Ukrainian enterprises for 2018-2022, the update of which was obtained by the method of interpolation. The hypothesis of a decreasing trend in the number of enterprises that use cloud computing and have access to the Internet has been confirmed. The results of forecast evaluation based on Lagrange and Newton polynomials are compared. The importance of the prospects of further research in this field to identify potential challenges and opportunities for Ukrainian enterprises in the implementation of cloud computing technologies is substantiated.

Keywords: calculation methods, interpolation, Lagrange polynomial, Newton polynomial, statistical learning.

Постановка проблеми. Доступ до великих обсягів даних та можливості їх обробки зумовлюють необхідність впровадження нових технологій, здатних забезпечити обчислювальні потужності та економію ресурсів підприємств. Актуальність такого підходу обґрунтовує використання хмарних технологій в різних напрямках людської життєдіяльності, як від звичайного користувача, так і для підприємницьких структур, спрямованих на масштабування бізнесу.

Трансформація ринку хмарних послуг України у 2023 р. зумовлена низкою чинників, одним із яких є вплив ризиків війни на можливість високоякісної та швидкої обробки даних, а також оплата за надання таких послуг (зокрема безкоштовні сервіси від таких компаній як Microsoft та Amazon). За оцінками експертів даної галузі, ринок хмарних послуг має значні перспективи для росту. За висновком Агеєва М. (CEO at De Novo) наближена оцінка ємкості ринку хмарних сервісів класу IaaS України у 2023 р. скала 2,7-2,8 млрд гривень без урахування чинника реальної вартості сервісів, наданих безкоштовно західними провайдерами. У порівнянні з 2021 р. показник росту збільшився втричі. Отже, хмарні послуги в Україні є надто затребуваними,

прогнозування їх динаміки дозволяє оцінити темпи росту та основні тенденції часових зрушень [1].

Від прогнозованої оцінки хмарних технологій та інтернету залежить планування стратегії розвитку підприємств та урядових органів на ринку ІТ-послуг. З огляду на різновиди, задачі прогнозування мають широкий спектр досліджень і залежать від низки складників. Такими складниками є обсяги реальних наборів даних (датасетів), їх часовий розподіл, доступність, метрики оцінювання та інші. Можливість отримати необхідний набір даних зменшується внаслідок специфічності формування звітності та запізнення термінів оприлюднення (фіксації) інформації. Усунення таких наслідків можливе попереднім застосуванням методу інтерполяції, та подальшою оцінкою отриманої функції прогнозу.

Збір даних та їх аналіз є складним процесом через швидку зміну технологій та відсутність повної статистики, що потрібна для точного прогнозування. Метод інтерполяції дозволяє заповнити прогалину відсутніх даних та зробити приблизну оцінку майбутнього розвитку ринку при плануванні діяльності у відповідному сегменті. При використанні методу інтерполяції вибіркова сукупність може бути обмежена невеликою кількістю точок передісторії, що надає перевагу в умовах обмеженості даних. Отже, поєднання методологічного підходу експериментального оцінювання обсягів даних та прогнозування на основі статистичних метрик використання хмарних технологій дозволить не тільки визначити аналітичну функцію прогнозу, а й сформулювати основу для статистичного навчання на різних обсягах вибірок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В літературі питання застосування методів інтерполяції в прогнозуванні розкривають практичні та теоретичні аспекти даної проблематики залежно від специфіки прикладної галузі. В роботах Гончарова О. А., Васильєвої Л. В., Юнди А. М., Кашпура О. Ф., Хлобистова В. В. та інших висвітлюються питання побудови інтерполяційних функцій, особливості їх використання та похибки оцінювання [2-6]. Проте, особливості застосування інтерполяційних поліномів в комплексних дослідженнях прикладних галузей залишаються відкритими для подальших досліджень.

Метою статті є виявлення підходів щодо використання методу інтерполяції із застосуванням поліномів Лагранжа та Ньютона для прогнозування метрик використання хмарних обчислень в статистичному навчанні, а також отримання конкретних результатів прогнозу на базі наборів даних статистики діяльності підприємств.

Виклад основного матеріалу.

1. Особливості використання хмарних технологій.

Основним завданням хмарних технологій є своєчасне, безпекове та швидкісне забезпечення користувачів дистанційним доступом до об'єктів

хмарної інфраструктури. Утворення віртуального ланцюга постачання інформаційної пересилки та зберігання даних сприяло створенню як об'єктів самої інфраструктури, так і відносини між забезпеченням та користуванням. В Законі України "Про хмарні послуги" [7] визначено правові відносини, що виникають при наданні хмарних послуг, та встановлено особливості використання хмарних послуг органами державної влади та іншими суб'єктами ведення господарсько-економічної діяльності. Основними категоріями, які визначені даним Законом є [7]: технологія хмарних обчислень, хмара (хмарна інфраструктура), хмарна послуга, хмарні ресурси, користувач хмарних послуг, надавач хмарних послуг, центр обробки даних. Отже, держава визнає відносини сфері надання-отримання хмарних послуг на платній основі та застосовує відповідні регуляторні механізми. Утворення та функціонування ринкових механізмів хмарних послуг невід'ємно пов'язане з плануванням витрат ресурсів, ціновими аспектами, поведінкою користувачів та ін. Це обґрунтовує розробку систем аналітичного оцінювання із використанням методів аналізу даних, в тому числі методів обчислень, для вирішення задач планування та прогнозування динаміки ринку хмарних технологій.

За допомогою хмарних технологій підприємства мають змогу зберігати, обробляти та передавати інформацію з використанням зовнішніх серверів та ресурсів, замість розгортання та обслуговування власної ІТ-інфраструктури. В такому випадку відсутня необхідність інвестування в інфраструктуру та обладнання для забезпечення доступу до комп'ютерних ресурсів, таких як обчислювальна потужність, пам'ять, мережеві з'єднання та програмне забезпечення. Серед основних чинників, які обумовлюють використання підприємствами хмарних технологій є [8, 9]:

1. Зменшення витрат на інфраструктуру та технічне обслуговування, оскільки хмарні технології не потребують встановлення та підтримки великої кількості фізичного обладнання, а процеси орієнтовані на використання віртуальних ресурсів та послуг, які надаються на хмарних платформах.

2. Розширення нових видів бізнесу, орієнтованих на обробку та аналіз великих обсягів даних. Отже, хмарні обчислення орієнтовані на оптимізацію інформаційної логістики по використанню трафіку повідомлень [10].

3. Забезпечення підприємствам більшої мобільності та доступності для співробітників (доступ до файлів та документів можна отримати з будь-якого пристрою, підключеного до інтернету). Забезпечується дистанційний доступ до інтернету з будь-якого місця, що підвищує рівень продуктивності та ефективності, особливо при роботі із клієнтами різних країн.

4. Зростання рівня конкурентоспроможності підприємств, що полягає у швидкому реагуванні на зміни на ринку, розширенні комунікації із клієнтами та співробітниками, розміщенні онлайн-реклами та організації маркетингових онлайн-кампаній.

5. Підвищення рівня безпеки даних. Хмарні провайдери забезпечують високий рівень захисту даних, включаючи резервне копіювання, шифрування та захист від зламів, які можуть статися на місці. Додатково, використання хмарних технологій може забезпечити більш ефективний моніторинг даних та захист від кібератак.

Прогнозування кількості підприємств, які матимуть доступ до інтернету та хмарних обчислень, є важливим завданням для урядових органів та організацій, що займаються розвитком інфраструктури. Знання про попит на інтернет-послуги та хмарні обчислення дає змогу запроваджувати проекти, спрямовані на залучення якомога більшої кількості підприємств. Оцінювання метрик можливої кількості користувачів обґрунтовує розрахунки розміру черг доступу в центрах обробки даних, що є важливим інструментом для провайдерів інтернет-послуг та хмарних платформ. Отже, знання про те, які підприємства можуть зацікавитися їхніми послугами, надає змогу розробляти та обирати оптимальні стратегії залучення нових клієнтів та підтримки вже існуючих.

2. Статистичне навчання та його зв'язок з інтерполяцією даних.

Досвід роботи з даними через створення та налаштування прогнозних функцій має достатньо широкий спектр використання в машинному навчанні та його окремому напрямку статистичному навчанні. Статистичним навчанням визначають сукупність методів статистичної обробки для оцінювання функції f , яка відтворює опис деякого кількісного відгуку Y та p -кількість ідентифікованих предикторів x_1, x_2, \dots, x_p . [11].

Попереднім є припущення про існування причинно-наслідкового зв'язку між Y та $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_p\}$, який в загальному виді можна записати як:

$$Y = f(X) + e, \quad (1)$$

де $f(X)$ – це деяка невідома функція від x_1, x_2, \dots, x_p ,

e – похибка, яка не залежить від X і має нульове середнє значення.

Отже, функція $f(X)$ характеризує систематичну інформацію про Y , який міститься в X . Оцінка функції $f(X)$ обґрунтовується наступними ознаками: передбаченням та статистичним висновком.

Сутність передбачення полягає в можливості визначення найбільш точної форми відгуку. Якщо прийняти, що помилки опису функції мають нульове середнє значення, тоді передбачуване значення буде в повній мірі описуватись оціненою функцією $\hat{f}(X)$:

$$\hat{Y} = \hat{f}(X) \quad (2)$$

де $\hat{f}(X)$ – оцінка $f(X)$,

\hat{Y} – значення Y , що передбачається.

Якщо припустити, що ідеальна точність оцінки $f(X)$ буде в повній мірі описуватись $\hat{Y} = f(X)$, то все одно передбачуване значення має містити в собі деяку неусувну похибку ϵ .

Статистичне навчання охоплює використання методів, які призначені для оцінювання $f(X)$ з метою мінімізації усувної похибки. Неусувна похибка завжди буде забезпечувати верхню межу точності передбачення Y .

В ситуації, коли необхідно визначити ступінь впливу змінної x_1, x_2, \dots, x_p на Y проводять оцінку $f(X)$ і з'ясовують взаємовідношення між Y та x_1, x_2, \dots, x_p . В цьому випадку $\hat{f}(X)$ неможливо розглядати як невідому форму залежності і встановлюють точну форму цієї функції.

В основу оцінки функції $f(X)$ покладено метод статистичного навчання на відомому наборі даних за n окремих спостережень (навчаючі дані). Вони використовуються для тренування або навчання методу, що визначає те, як оцінити функцію.

Ідентифікаторами вибірки є:

- x_{ij} – значення j -го предиктора (вхідної змінної) в спостереженні i , де $i=1, 2, \dots, n$, а $j=1, 2, \dots, p$;
- y_i – відгук у i -го спостереження;
- навчаючі дані тоді складаються з пар $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$, де $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})^T$.

Мета статистичного навчання полягає в тому, що необхідно обрати деякий метод статистичного навчання до вхідних даних для знаходження невідомої функції $f(X)$ [11]. Отже, потрібно знайти таку функцію $\hat{f}(X)$, що $Y \approx \hat{f}(X)$ для будь-якого спостереження (X, Y) .

Більшість методів статистичного навчання можна поділити на параметричні та непараметричні. Метод, який найбільш використовується для підгонки лінійної моделі є метод найменших квадратів. Окрім нього існують інші методи. Потенційний недолік параметричного підходу полягає в тому, що обрана модель зазвичай не буде співпадати з істиною невідомою формою $f(X)$. Якщо обрана модель сильно відрізняється від істинної, то оцінка $f(X)$ буде незадовільною. Ця проблема вирішується вибором гнучких моделей, які здатні описувати велику множину функціональних форм $f(X)$. До таких гнучких методів можна віднести поліноми Лагранжа, Ньютона, Єрміта та інші.

Непараметричні методи не дають явних припущень відносно функціональної форми $f(X)$, яка максимально наближена до даних. Такі підходи мають суттєві переваги в порівнянні з параметричними методами: вони здатні точно описати більш широкий спектр можливих форм $f(X)$, уникаючи припущень відносно конкретної функціональної форми. Недоліком непараметричних методів мають суттєвий недолік, який полягає в тому, що

для отримання точної оцінки $f(X)$ потрібна велика кількість спостережень в порівнянні з будь-яким параметричним методом. Це відбувається тому, що непараметричні методи не зводять проблему оцінювання $f(X)$ до обмеженого набору параметрів.

Отже, для оцінювання $f(X)$ можуть бути використані інтерполяційні поліноми Ньютона, Лагранжа. Такий підхід не передбачає надання $f(X)$ наперед визначену модель. Проте, намагаються отримати таку оцінку $f(X)$, яка б максимально близько підходила до спостережень, за умови наявності згладженої апроксимації.

3. Експериментальне оцінювання набору даних по метриках використання хмарних технологій підприємствами в Україні.

Оцінювання метрик використання хмарних обчислень по кількості підприємств із загальної сукупності може будуватись на використанні інтерполяції Лагранжа та Ньютона. Інтерполяційним багаточленом Лагранжа називають поліном мінімального степеня, який інтерполює функцію $f(x)$ при відомих значеннях y_j функції $f(x)$ в n точках x_j , $i = 1, n$, матиме степінь $n-1$ і записаний у вигляді:

$$L_{n-1}(x) = \sum_{i=1}^n \left[\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left(\frac{x-x_j}{x_i-x_j} \right) \right] y_i. \quad (3)$$

Погрішність наближення інтерпольованої функції багаточленом Лагранжа сильно залежить від розкиду точок x_i , тобто чим менше інтервал (x_1, x_n) , тим точніше $L_{n-1}(x)$ наближає значення функції $f(x)$ в точках $x \in (x_1, x_n)$ [2].

Інтерполяція метрик частки кількості підприємств, що купують послуги хмарних обчислень та мають доступ до мережі Інтернет в Україні проведена по вхідному набору даних за статистикою 2018-2022 рр. з метою встановлення значень метрики (упущена за отриманою статистикою) за 2020 р. (табл. 1). Поліном Лагранжа за експериментальними даними матиме вигляд:

$$y = \frac{(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4) \times y_0}{(x_0-x_1)(x_0-x_3)(x_0-x_4)} + \frac{(x-x_0)(x-x_3)(x-x_4) \times y_1}{(x_1-x_0)(x_1-x_3)(x_1-x_4)} + \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_4) \times y_3}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_4)} + \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3) \times y_4}{(x_4-x_0)(x_4-x_1)(x_4-x_3)}$$

Таблиця 1

Вхідний набір даних для інтерполяції частки кількості підприємств, що купують послуги хмарних обчислень та мають доступ до мережі Інтернет в Україні, 2018 – 2022 рр.

Метрики оцінювання	2018	2019	2020	2021	2022
	0	1	2	3	4
Частка кількості підприємств, що купують послуги хмарних обчислень, у загальній кількості підприємств України, %	9,8	10,3	*	10,2	9,8
Кількість підприємств, які мають доступ до мережі Інтернет в Україні, у % до загальної кількості підприємств	88,0	86,4	*	86,6	85,1

Джерело: складено авторами на підставі [12]

Для обрахунку частки кількості підприємств, що купують послуги хмарних обчислень, у загальній кількості підприємств України, %, отримуємо Y_{L1i} :

$$Y_{L1i} = \frac{(x-1)(x-3)(x-4) \times 9,8}{(0-1)(0-3)(0-4)} + \frac{(x-0)(x-3)(x-4) \times 10,3}{(1-0)(1-3)(1-4)} + \frac{(x-0)(x-1)(x-4) \times 10,2}{(3-0)(3-1)(3-4)} + \frac{(x-0)(x-1)(x-3) \times 9,8}{(4-0)(4-1)(4-3)}$$

Після спрощення поліном Лагранжа матиме вигляд:

$$Y_{L1i} = 9,8 + 0,73x - 0,25x^2 + 0,017x^3 \quad (4)$$

Для обрахунку частки кількості підприємств, що купують послуги хмарних обчислень, у загальній кількості підприємств України, %, отримуємо Y_{L2i} :

$$Y_{L2i} = \frac{(x-1)(x-3)(x-4) \times 88,0}{(0-1)(0-3)(0-4)} + \frac{(x-0)(x-3)(x-4) \times 86,4}{(1-0)(1-3)(1-4)} + \frac{(x-0)(x-1)(x-4) \times 86,6}{(3-0)(3-1)(3-4)} + \frac{(x-0)(x-1)(x-3) \times 85,1}{(4-0)(4-1)(4-3)}$$

Після спрощення поліном матиме вигляд:

$$Y_{L2i} = 88 - 2,99x + 1,67x^2 - 0,275x^3 \quad (5)$$

При підстановці значень точок, по яким проводився розрахунок, результати зійшлись. Отже, спрогнозуємо частку підприємств на 2023, 2024, 2025 та 2026 і також знайдемо значення на 2020 рік (табл. 2).

Таблиця 2

Результати обчислень інтерполяції частки кількості підприємств, що купують послуги хмарних обчислень та мають доступ до мережі Інтернет в Україні за допомогою поліному Лагранжа, 2018 – 2025 рр.

Метрики	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
	0	1	2	3	4	5	6	7
Частка кількості підприємств, що купують послуги хмарних обчислень, у загальній кількості підприємств України, %, (y_{L1i})	9,8	10,3	10,4	10,2	9,8	9,3	8,8	8,4
Кількість підприємств, які мають доступ до мережі Інтернет в Україні, у % до загальної кількості підприємств, (y_{L2i})	88,0	86,4	86,5	86,6	85,1	80,3	70,65	54,4

Джерело: розраховано авторами на підставі [12]

Поліном мінімального степеня Інтерполяційний поліном Ньютона, що інтерполірує функцію $f(x)$ в n точках x_i , $i = \overline{1, n}$ може бути записаний в іншому вигляді. Вводяться такі позначення: розділені різниці 1-го порядку:

$$f(x_1; x_2) = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1}, \dots, f(x_{n-1}; x_n) + \frac{f(x_n) - f(x_{n-1})}{x_n - x_{n-1}};$$

розділені різниці 2-го порядку:

$$f(x_1; x_2; x_3) = \frac{f(x_2; x_3) - f(x_1; x_2)}{x_3 - x_1}, \dots,$$

$$f(x_{n-2}; x_{n-1}; x_n) = \frac{f(x_{n-1}; x_n) - f(x_{n-2}; x_{n-1})}{x_n - x_{n-2}}$$

розділена різниця $(n-1)$ -го порядку:

$$f(x_1; x_2; \dots; x_n) = \frac{f(x_2; x_2; \dots; x_n) - f(x_1; x_2; \dots; x_{n-1})}{x_n - x_1}$$

Тоді розглядається поліном $(n - 1)$ -го степеня виду:

$$H_{n-1}(x) = f(x_1) + (x - x_1)f(x_1; x_2) + (x - x_1)(x - x_2)f(x_1; x_2; x_3) + \dots + (x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_{n-1})f(x_1; x_2; \dots; x_n).$$

Використаємо метод Ньютона для складання поліному.

Таблиця 3

Результати обчислення розподілених різниць для інтерполювання поліномом Ньютона по метрикам частки кількості підприємств, що купують послуги хмарних обчислень та мають доступ до мережі Інтернет в Україні

Кінцеві різниці по метриці часу x_i				Розділені кінцеві різниці по метриці $\Delta^{(i)}y_{N1i}$				Розділені кінцеві різниці по метриці $\Delta^{(i)}y_{N2i}$			
x_i	1	2	3	y_{N1i}	1	2	3	y_{N2i}	1	2	3
0	1	3	4	9,8	0,500	-0,183	0,017	88	-1,6	0,567	-0,275
1	2	3		10,3	-0,050	-0,117		86,4	0,1	-0,533	
3	1			10,2	-0,400			86,6	-1,5		
4				9,8				85,1			

Джерело: розраховано авторами

Отриманий поліном Ньютона має вигляд :

$$y_{N1i} = f(x) = 9,8 + 0,5(x - 0) - 0,18(x - 0)(x - 1) + 0,017(x - 0)(x - 1)(x - 3) = 9,8 + 0,731x - 0,248x^2 + 0,017x^3$$

$$y_{N2i} = f(x) = 88 - 1,6(x - 0) + 0,57(x - 0)(x - 1) - 0,275(x - 0)(x - 1)(x - 3) = 88 - 2,995x + 1,67x^2 - 0,275x^3$$

Отже, спрогнозуємо частку підприємств на 2023, 2024, 2025 та 2026 і знайдемо значення на 2020 рік (табл. 3).

Таблиця 3

Результати обчислень інтерполяції частки кількості підприємств, що купують послуги хмарних обчислень та мають доступ до мережі інтернет в Україні за допомогою поліному Ньютона, 2018 – 2025 рр.

Метрики	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
	0	1	2	3	4	5	6	7
Частка кількості підприємств, що купують послуги хмарних обчислень, у загальній кількості підприємств України, %, (y_{N1i})	9,8	10,3	10,4	10,2	9,8	9,4	8,9	8,6
Кількість підприємств, які мають доступ до мережі Інтернет в Україні, у % до загальної кількості підприємств, (y_{N2i})	88,0	86,4	86,49	86,6	85,1	80,4	70,75	54,54

Джерело: розраховано авторами на підставі [12]

Отже, діапазон прогнозних передбачуваних значень за поліномами Лагранжа та Ньютона характеризують загальну спадаючу тенденцію кількості підприємств, що купують послуги хмарних обчислень та мають доступ до мережі інтернет зберігається.

Висновки. З метою прогнозування кількості підприємств в Україні, що використовують хмарні обчислення та мають доступ до мережі Інтернет, використовувався метод інтерполяції. Інтерполяційні поліноми описують поведінку процесів на малих вибірках даних і дають змогу поновити відсутні дані без порушення загальної тенденції. Використання методів інтерполяції при розробці прогнозів дозволяє отримати форму функції динаміки, яка може бути використана для начального набору даних в статистичному навчанні. Отриманий поліном має мінімізовану похибку в вузлах інтерполяції, підгін функції в точках між вузлами інтерполяції відбувається під час процедури навчання. У результаті обрахунків було отримано спадаючий прогноз, що може свідчити про зменшення кількості таких підприємств в майбутньому.

Література:

1. Агеев М. Про українські хмари у 2023 р. Есе в трьох частинах - 1. Показники ринку. Цифрове недовкрів'я. Продаж страху. URL: https://ko.com.ua/pro_ukrayinski_hmari_u_2023_r_ese_v_troh_chastinah_1_pokazniki_rinku_cifrove_nedokriv_ya_prodazh_strahu_146148.

2. Волонтир Л.О., Зелінська О.В., Потапова Н.А., Чіков І.А. Чисельні методи. Навчальний посібник. *Вінниця: ВНАУ*, 2020. 322 с.
3. Гончаров О. А., Васильєва Л. В., Юнда А. М. Чисельні методи розв'язання прикладних задач: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2020. 142 с.
4. Кашпур О. Ф., Хлобистов В. В. Інтерполяційний поліном Лагранжа в лінійному просторі зі скалярним добутком. *Доповіди національної академії наук України*. 2018. № 8. С. 12 – 17.
5. Neamvonk A., Sriponpaew B. Solving the First Order Differential Equations using Newton's Interpolation and Lagrange Polynomial. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2023. №16(2). P. 965-974. URL: <https://ejpam.com/index.php/ejpam/article/view/4727>
6. Ibrahim S. Explicit Solution of First-Order Differential Equation Using Aitken's and Newton's Interpolation Methods. *Eurasian Journal of Science and Engineering*. 2023. №9. P. 46-56. URL: <https://ejse.tiu.edu.iq/index.php/volume-9-issue-1-article-4/>
7. Офіційний сайт Верховної Ради України. Закон України «Про хмарні послуги». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2075-20#Text>
8. Нікітенко К. С., Осадчий А. А. Упровадження хмарних технологій у діяльність сучасних підприємств. *Підприємництво і торгівля*. 2020. Вип. 27. С. 53-57. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Torg_2020_27_11.
9. Івченко Є. І. Інноваційні підходи до управління підприємствами: перспективи впровадження та використання хмарних технологій. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія: Економічні науки*. 2011. №3. С. 113-120. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvpush_2011_3_22.
10. Потапова Н.А. Логістика онлайн-торгівлі в контексті проявів глобалізації цифрової економіки. *Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2019. № 3. С. 62 – 77.
11. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer, 2001. 745 p.
12. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/zv/ikt/arh_ikt_u.html

References:

1. Ahieiev M. (2024). *Pro ukrainski khmary u 2023 r. Ese v trokh chastynakh - 1. Pokaznyky rynku. Tsyfrove nedokrivia. Prodazh strakhu. [About Ukrainian clouds in 2023. Essay in three parts - 1. Market indicators. Digital anemia. Selling fear]*. Retrieved from: https://ko.com.ua/pro_ukrayinski_hmari_u_2023_r_ese_v_troh_chastinah_1_pokazniki_rinku_ci_frove_nedokriv_ya_prodazh_strahu_146148 [in Ukrainian].
2. Volontyr L.O., Zelinska O.V., Potapova N.A., Chikov I.A. (2020). *Chyselni metody. [Numerical Methods]*. Vinnytsia: VNAU [in Ukrainian].
3. Honcharov O. A., Vasylieva L. V., Yunda A. M. (2020). *Chyselni metody rozv'iazannia prykladnykh zadach [Numerical methods of solving applied problems]*. Sumy: Sumskiy derzhavnyi universytet [in Ukrainian].
4. Kashpur O. F., Khlobystov V. V. (2018). *Interpoliatsiyni polinom Lahranzha v liniinomu prostori zi skaliarnym dobutoom [Lagrangian interpolation polynomial in linear space with scalar product]*. *Dopovidi natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 8. 12 – 17 [in Ukrainian].
5. Neamvonk A., Sriponpaew B. (2023). Solving the First Order Differential Equations using Newton's Interpolation and Lagrange Polynomial. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*. 16(2). 965-974. Retrieved from: <https://ejpam.com/index.php/ejpam/article/view/4727> [in USA].

6. Ibrahim S. (2023). Explicit Solution of First-Order Differential Equation Using Aitken's and Newton's Interpolation Methods. *Eurasian Journal of Science and Engineering*. 9. 46-56. Retrieved from: <https://ejse.tiu.edu.iq/index.php/volume-9-issue-1-article-4/> [in Iraq].
7. Ofitsiynyi sait Verkhovnoi Rady Ukrainy. Zakon Ukrainy "Pro khmarni posluhy" [Official website of the Verkhovna Rada of Ukraine. Law of Ukraine "On cloud services"]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2075-20#Text> [in Ukrainian].
8. Nikitenko K. S., Osadchyi A. A. (2020). Uprovadzhennia khmarnykh tekhnolohii u diialnist suchasnykh pidpriemstv [Implementation of cloud technologies in the activities of modern enterprises]. *Pidpriemnytstvo i torhivlia – Entrepreneurship and trade*. 27. 53-57. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Torg_2020_27_11 [in Ukrainian].
9. Ivchenko Ye. I. (2011). Innovatsiini pidkhody do upravlinnia pidpriemstvamy: perspektyvy vprovadzhennia ta vykorystannia khmarnykh tekhnolohii [Innovative approaches to enterprise management: prospects for the implementation and use of cloud technologies]. *Naukovyi visnyk Poltavskoho universytetu ekonomiky i torhivli. Serii: Ekonomichni nauky. – Scientific Bulletin of the Poltava University of Economics and Trade. Series: Economic Sciences*. 3. 113-120. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvpusk_2011_3_22 [in Ukrainian].
10. Potapova N.A. (2019). Lohistyka onlain-torhivli v konteksti proiaviv hlobalizatsii tsyfrovoy ekonomiky [Logistics of online trade in the context of manifestations of globalization of the digital economy]. *Ekonomika. Finansy. Menedzhment: aktualni pytannia nauky i praktyky. – Economy. Finances. Management: topical issues of science and practice*. 3. 62–77 [in Ukrainian].
11. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. (2001). *The Elements of Statistical Learning, Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer. 745 [in USA].
12. Ofitsiynyi sait Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy [Official website of the State Statistics Service of Ukraine]. Retrieved from: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/zv/ikt/arh_ikt_u.html [in Ukrainian].