

DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-73-46>

УДК 519.866

# МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ КЛАСТЕРНИХ СТРУКТУР ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

## MODELLING THE STATE OF CLUSTER STRUCTURES USING QUEUING SYSTEM MODELS

**Артеменко Андрій Вікторович**

старший викладач,

Львівський торговельно-економічний університет

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7375-9911>**Artemenko Andrii**

Lviv University of Trade and Economics

Моделювання стану кластерних структур із використанням моделей системи масового обслуговування є важливим інструментом для аналізу їхньої ефективності та прогнозування розвитку. Кластерні структури, як динамічні системи, складаються з підприємств, наукових установ, органів влади та інших учасників, які взаємодіють у межах спільного економічного простору. Моделі системи масового обслуговування дозволяють враховувати специфіку цих взаємодій, зокрема потоки ресурсів, інновацій та інформації. У статті досліджено підходи до використання таких моделей для оцінки завантаженості кластерів, їх продуктивності, а також визначення «вузьких місць», які можуть обмежувати їхній розвиток. Особливу увагу приділено аналізу параметрів, які впливають на стан кластерних структур, зокрема інтенсивності надходження запитів, часу їх обробки та рівня взаємодії між учасниками. За допомогою методів масового обслуговування можна моделювати сценарії розвитку кластерів за різних умов, таких як зростання навантаження на інфраструктуру або збільшення конкуренції. У статті також розглядається вплив інноваційних технологій на оптимізацію функціонування кластерів, зокрема цифрових платформ, що сприяють координації дій учасників. Запропонований підхід до моделювання дозволяє забезпечити глибше розуміння функціонування кластерних структур, що сприяє ухваленню обґрунтованих управлінських рішень. Практичне застосування результатів дослідження дозволяє оптимізувати процеси у межах кластерів, підвищити їхню ефективність і конкурентоспроможність. Використання моделей системи масового обслуговування є перспективним напрямом для досліджень у галузі регіональної економіки, оскільки це сприяє формуванню стійких механізмів розвитку кластерів у динамічних умовах сучасного ринку.

**Ключові слова:** кластерні структури, системи масового обслуговування, моделювання, оптимізація, інновації, цифрові платформи, економічна ефективність, управління ресурсами.

Modeling the state of cluster structures using queuing system models is a vital tool for analyzing their efficiency and forecasting development. Cluster structures, as dynamic systems, consist of enterprises, research institutions, government bodies, and other participants interacting within a shared economic space. Queuing system models enable consideration of the specific features of these interactions, including resource flows, innovation exchange, and information distribution. This article explores approaches to using such models to evaluate cluster workload, productivity, and identify bottlenecks that may limit their development. Special attention is given to analyzing parameters influencing the state of cluster structures, including the intensity of incoming requests, processing times, and interaction levels between participants. Queuing system methods allow the modeling of cluster development scenarios under various conditions, such as increased infrastructure load or growing competition. The article also examines the impact of innovative technologies, particularly digital platforms, on optimizing cluster operations and enhancing participant coordination. The proposed modeling approach provides deeper insights into the functioning of cluster structures, aiding in informed managerial decision-making. Practical application of the study's findings allows for process optimization within clusters, improving their efficiency and competitiveness. The use of queuing system models is a promising research direction in regional economics, as it facilitates the development of sustainable mechanisms for cluster growth in the dynamic conditions of modern markets.

**Keywords:** cluster structures, queuing systems, modeling, optimization, innovation, digital platforms, economic efficiency, resource management.

**Постановка проблеми.** Моделювання стану кластерних структур із використанням моделей системи масового обслуговування є актуальним напрямом досліджень у сфері регіонального розвитку та економічного планування. Кластерні структури функціонують як складні динамічні системи, що об'єднують підприємства, наукові установи, державні органи та інші суб'єкти. Їх ефективність залежить від здатності швидко і раціонально обробляти потоки інформації, ресурсів та інновацій. Моделі системи масового обслуговування дають змогу виявляти «вузькі місця» в цих процесах і оптимізувати взаємодію між учасниками кластерів. Застосування таких моделей дозволяє аналізувати робоче навантаження, оцінювати продуктивність і прогнозувати наслідки управлінських рішень у кластерній системі.

Системи масового обслуговування є потужним інструментом для моделювання взаємодії між елементами кластерів у різних умовах, наприклад, за підвищення конкуренції або зростання навантаження на інфраструктуру. Їх перевага полягає в універсальності підходу, що дозволяє адаптувати моделі до специфіки конкретного кластеру чи галузі. У сучасних умовах цифровізації економіки такі інструменти стають ще більш актуальними, адже вони враховують вплив інноваційних технологій, наприклад, цифрових платформ та великих даних. Це сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

У статті розглядається потенціал моделей СМО для оптимізації функціонування кластерних структур у різних галузях. Також аналізується можливість їх адаптації до сучасних умов, таких як цифровізація та глобальні виклики. Особлива увага приділена практичному використанню цих моделей для підвищення ефективності кластерів, зокрема через інтеграцію новітніх технологій.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Моделювання систем масового обслуговування активно досліджується у різних галузях, зокрема в інформаційних технологіях та економіці. У роботі Прокопець Н. А. і Глоба Л. С. [1] розглядаються математичні моделі для аналізу навантаження в інформаційно-комунікаційних мережах. Автори акцентують увагу на тому, що правильне моделювання дозволяє значно підвищити ефективність систем. Аналогічно Бай В. Х. та інші (Bai, W. H., Xi, J. Q., Zhu, J. X., Huang, S. W.) [2], П. О. Куцик і О. І. Ковтун [7] у дослідженні аналізують продуктивність

гетерогенних дата-центрів, використовуючи складні моделі СМО. Їх робота демонструє важливість врахування різноманітності компонентів системи для підвищення енергетичної ефективності та продуктивності.

Дослідження Глоба Л. і Гвоздецької Н. (Globa, L., Gvozdetzka, N.) [3; 4] спрямовані на розробку енергоефективних підходів до управління розподіленням навантаження у комунікаційних мережах. Вони підкреслюють важливість оптимізації процесів обслуговування в умовах зростання складності систем. Інше дослідження Мейснера і Веніша (Meisner, D., Wenisch, T. F.) [5] зосереджене на використанні стохастичного моделювання для аналізу робочих навантажень у дата-центрах. Автори доводять, що варіативність запитів і часу їх обробки потребує детального врахування для підвищення ефективності системи.

Робота Ван дер Боора і Комте (Van der Boor, M., Comte, C.) [6] розширює застосування моделей СМО для аналізу балансування навантаження в гетерогенних серверних кластерах. Автори використовують продуктово-орієнтовані моделі черг, які демонструють високу точність прогнозування стану систем за змінних умов. Загалом, попередні дослідження показують значний потенціал моделей СМО для оптимізації функціонування складних систем, але залишають поза увагою специфіку кластерних структур у контексті регіональної економіки.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Хоча моделі системи масового обслуговування активно застосовуються в різних сферах, є кілька важливих аспектів, які потребують подальшого дослідження. По-перше, недостатньо розроблені методики, які дозволяють адаптувати ці моделі до специфіки кластерних структур у різних регіонах та галузях. Більшість існуючих підходів зосереджені на технічних системах, тоді як економічні, соціальні та організаційні аспекти кластерів залишаються поза увагою. Це створює прогалини у розумінні взаємодії між учасниками кластерів та їх впливу на загальну продуктивність.

По-друге, існує потреба у більш глибокому вивченні впливу інноваційних технологій на функціонування кластерних структур. Наприклад, впровадження цифрових платформ та аналіз великих даних може значно покращити координацію між учасниками кластерів, але ці аспекти поки що недостатньо інтегровані у моделі СМО. Крім того, моделювання повинно

враховувати глобальні виклики, такі як екологізація економіки та зростання конкуренції на міжнародних ринках, що також залишається мало дослідженим.

Нарешті, недостатньо уваги приділено практичному застосуванню моделей СМО у кластерних структурах. Хоча багато досліджень пропонують теоретичні підходи, їх практична ефективність не завжди підтверджується. Це вимагає створення експериментальних моделей, які б враховували реальні умови функціонування кластерів, та проведення емпіричних досліджень для підтвердження їхньої придатності.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Метою роботи є розробка та адаптація моделей системи масового обслуговування для аналізу стану кластерних структур у різних галузях економіки. Це дозволить забезпечити ефективність функціонування кластерів шляхом оптимізації використання ресурсів, покращення взаємодії між учасниками та підвищення конкурентоспроможності в умовах динамічного середовища. Особливу увагу приділено інтеграції інноваційних технологій, таких як цифрові платформи та аналіз великих даних, для вдосконалення управління процесами всередині кластерів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Кластерні структури є складними організаційними системами, які об'єднують різні типи учасників задля досягнення синергії в економічному та інноваційному розвитку. Відповідно до моделі системи масового обслуговування, такі структури можна розглядати як мережі вузлів, через які проходять запити на обробку інформації, виконання послуг або координацію дій. Важливим параметром є інтенсивність запитів, що впливають на загальну продуктивність системи. Якщо завантаженість кластеру перевищує допустимий рівень, ефективність знижується через затримки або недостатнє використання ресурсів. Це доводить необхідність розробки моделей, здатних оптимально розподіляти навантаження та прогнозувати стан системи залежно від зміни параметрів. Використання таких моделей є важливим кроком у вдосконаленні управління кластерними структурами. Вони сприяють підвищенню їхньої гнучкості в умовах динамічного середовища.

Ключовим аспектом у моделюванні кластерів є врахування їхньої ієрархічної структури, яка передбачає різні рівні взаємодії: локальні вузли, регіональні кластери та глобальні мережі. СМО дозволяють деталізувати

ці рівні, моделюючи специфічні процеси на кожному етапі. Наприклад, у локальних вузлах важливо забезпечити швидке обслуговування внутрішніх запитів, тоді як регіональні рівні зосереджуються на інтеграції зовнішніх ресурсів та обміні інформацією з іншими кластерами. Для глобальних мереж актуальним є моделювання взаємодії з міжнародними ринками. Це вимагає використання різних типів моделей, адаптованих до умов конкретного рівня. Універсальність моделей СМО дозволяє ефективно їх застосовувати у багаторівневих структурах. Такий підхід забезпечує стабільність роботи кластерів (рис. 1).

Вибір заявки на обслуговування в якийсь момент часу здійснюється відповідно до деякого правила, що називається дисципліною обслуговування. Далі заявка обслуговується і після завершення обслуговування заявка залишає систему. Вихідний потік заявок, що обслуговуються, може виявитися дуже важливим у тих випадках, коли він є вхідним для іншої СМО.

Дослідження використання СМО в різних галузях для прогнозування навантаження на певний вузол проводились різними науковцями. Н. Прокопець у роботі [1] досліджує використання СМО для моделювання навантаження на інформаційно-комунікаційну мережу.

Науковці, які проводили дослідження [8], запропонували модель серверного кластера як СМО, у якій навантаженням виступають запити користувачів. Вхідне навантаження розподіляється між окремими серверами за допомогою брокера планування навантаження. Недоліком даного підходу є те, що автори напряму зіставляють запити користувачів із запитами СМО, що значно спрощує процес. Адже у реальній системі один запит користувача може потребувати для своєї обробки більш ніж одне обчислювальне ядро сервера, а сервери зі свого боку можуть мати різну кількість обчислювальних ядер.

Автори роботи [5] D. Meisner, T. Wenisch замість представлення СМО у вигляді двох частин запропонували багатоканальну модель із пуассонівським вхідним потоком, що може бути розділена на  $k$  одноканальних систем шляхом декомпозиції.

На сьогодні існує низка підходів щодо вирішення проблеми математичного моделювання процесу обслуговування навантаження у розподіленій обчислювальній системі. Bai W., Xi, J. в роботі [2] запропонували модель процесу обслуговування навантаження у

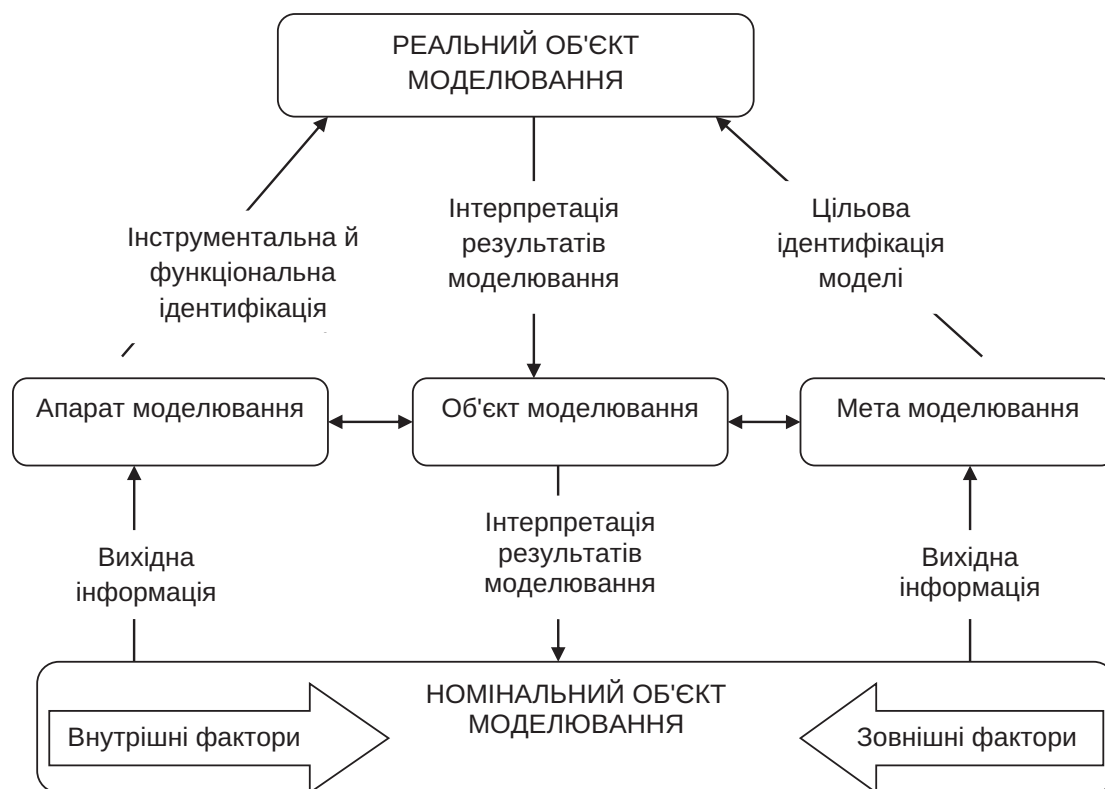


Рис. 1. Схема побудови й застосування економіко-математичної моделі кластерної структури

гетерогенному центрі обробки даних (ЦОД) як системи масового обслуговування. Автори пропонують представити систему у вигляді двох СМО, що взаємодіють між собою. Основним недоліком такої моделі є те, що автори не розглядають можливість обробки одного запиту користувача на багатьох процесорах, тобто не розглядають можливість паралелізації задач.

У роботі [4] запропоновано модель кластера зі скінченної кількості гетерогенних серверів, що мають різну інтенсивність обробки запитів як СМО. У роботі також розглядаються окремі черги до кожного з серверів, при чому довжина цих черг у запропонованій СМО є скінченною. Основним недоліком СМО у дослідженні [4] є те, що автори розглядають лише вхідний пуассонівський потік запитів зі сталою інтенсивністю. Для обчислювальних робіт у межах навантаження ІКМ інтенсивність надходження зазвичай є змінною та представлена випадковою величиною.

Одним із інноваційних напрямів є використання аналітики великих даних для покращення прогнозування стану кластерів. Аналіз часових рядів запитів дозволяє оцінити сезонність або пікові навантаження, що впливають

на функціонування кластерів. Крім того, такі інструменти дозволяють ідентифікувати аномалії в роботі системи, які можуть бути спричинені помилками в координації або зовнішніми факторами. Наприклад, виявлення нерівномірного розподілу запитів дозволяє уникнути перевантаження окремих вузлів. У результаті управління отримують можливість своєчасно реагувати на проблеми, що виникають. Такі підходи забезпечують стабільність функціонування кластерів навіть у складних умовах. Використання великих даних робить прогнозування точнішим і надійнішим.

Інтеграція цифрових платформ для управління кластерними процесами є ще одним важливим інструментом для покращення їхньої ефективності. Такі платформи забезпечують автоматизацію обміну інформацією, синхронізацію дій між учасниками та зниження адміністративних витрат. Наприклад, у виробничих кластерах цифрові платформи можуть координувати поставки сировини, керувати замовленнями та розподіляти ресурси між підприємствами. Усе це знижує ризик простоїв або надмірних витрат на зберігання продукції. Автоматизація також дозволяє значно підвищити швидкість реагування на зовнішні зміни. Усі ці переваги роблять цифрові платформи

невід'ємною складовою сучасних кластерів. Завдяки цьому забезпечується підвищення продуктивності системи.

Серед переваг моделей СМО також можна виділити їхню здатність враховувати фактори зовнішнього середовища, такі як глобальні економічні зміни чи технологічні тренди. Наприклад, зростання попиту на екологічно орієнтовану продукцію впливає на стратегії розвитку зелених кластерів. Моделі дозволяють оцінити, як впровадження екологічних стандартів вплине на завантаження системи та загальну продуктивність. Це сприяє не лише підвищенню стійкості кластерів, але й забезпечує їх відповідність сучасним ринковим вимогам. Врахування таких зовнішніх факторів дозволяє кластерам бути більш адаптивними.

Окремим завданням є адаптація моделей СМО до умов високої невизначеності, характерної для сучасної економіки. Стохастичні підходи дозволяють враховувати випадкові зміни в параметрах системи, такі як раптове зростання попиту чи зовнішні кризи. Наприклад, у процесі моделювання можна аналізувати вплив несподіваних збоїв у постачанні ресурсів на роботу кластерів. Такі сценарії формують резервні стратегії, які забезпечують адаптивність і стабільність системи. Крім того, моделювання може враховувати сезонність у роботі кластерів, що є важливим для галузей із нерівномірним попитом. Застосування цих підходів допомагає забезпечити гнучкість кластерів до змін у зовнішньому середовищі. В результаті управління отримують надійний інструмент для прогнозування та підтримки стабільної роботи системи навіть у критичних ситуаціях.

Практична реалізація запропонованих підходів передбачає створення програмних інструментів для моделювання стану кластерів. Важливим аспектом є розробка інтерфейсів для візуалізації результатів, які дозволяють швидко оцінювати стан системи. Наприклад, інтерактивні графіки потоків ресурсів та навантаження вузлів дають змогу оперативно виявляти проблемні місця. Це спрощує процес прийняття управлінських рішень, оскільки

інформація представлена у зрозумілому та доступному форматі. Також такі інструменти можуть інтегруватися з платформами аналізу великих даних, що підвищує точність прогнозів. Крім того, моделювання може стати основою для навчання персоналу, оскільки допомагає імітувати різні сценарії функціонування кластерів. У результаті створюється ефективна система управління, яка враховує динамічність середовища.

**Висновки.** Моделювання стану кластерних структур із використанням системи масового обслуговування є ефективним інструментом для аналізу їхньої продуктивності, прогнозування розвитку та ухвалення обґрунтованих управлінських рішень. Використання СМО дозволяє враховувати інтенсивність запитів, завантаження ресурсів та взаємодію учасників, що забезпечує точне оцінювання стану системи. Інтеграція інноваційних технологій, таких як цифрові платформи та аналітика великих даних, підвищує ефективність кластерів завдяки автоматизації процесів, швидшій координації дій та оптимізації використання ресурсів. Важливим аспектом є здатність моделей адаптуватися до змін у зовнішньому середовищі, таких як коливання попиту або технологічні нововведення, що забезпечує гнучкість і стійкість кластерів у динамічних умовах.

Перспективними напрямками подальших досліджень є адаптація моделей до специфіки різних галузей та регіонів, інтеграція екологічних стандартів у моделювання, а також розробка програмних інструментів для підтримки управлінських рішень. Стохастичні методи дозволяють враховувати невизначеність та ризики, що є критично важливим у сучасній економіці. Практична реалізація запропонованих підходів сприяє підвищенню конкурентоспроможності кластерних структур, їх здатності швидко адаптуватися до глобальних викликів і забезпечувати стійкий розвиток. Таким чином, використання моделей СМО є перспективним шляхом вдосконалення управління кластерними структурами та підвищення ефективності їхньої роботи в сучасних умовах.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Прокопець Н. А., Глоба Л. С. Математичне моделювання процесу обслуговування навантаження в інформаційно-комунікаційній мережі. *Проблеми телекомунікацій*. 2022. № 1 (30). С. 18–31.
2. Bai, W.H., Xi, J.Q., Zhu, J.X., Huang, S.W. (2015). Performance analysis of heterogeneous data centers in cloud computing using a complex queuing model. *Mathematical Problems in Engineering*, No. 2015. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/980945>

3. Globa, L., Gvozdetska, N. (2021), "Experimental analysis of PCPB-2: Comprehensive energy-efficient approach to distributed workload processing in communication networks", Proceedings of the 2021 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom52164.2021.9527759>
4. Globa, L., Gvozdetska, N., Prokopets, V. (2021), "Providing Energy-efficient and High- performance Infrastructure for Smart Network", Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), P. 133–136. DOI: <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716620>
5. Meisner, D., Wenisch, T.F. (2010), "Stochastic queuing simulation for data center workloads", Proceedings of the Exascale Evaluation and Research Techniques Workshop, No. 16, p. 1–9.
6. Van der Boor, M., Comte, C. (2021), "Load balancing in heterogeneous server clusters: Insights from a product-form queueing model", Proceedings of the 2021 IEEE/ACM 29th International Symposium on Quality of Service (IWQOS), P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWQOS52092.2021.9521355>
7. Куцик П. О., Ковтун О. І. Застосування технологій штучного інтелекту в системі обґрунтування стратегічних рішень управління бізнесом. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Підприємство і торгівля*. 2024. № 42. С. 94–109. DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-1256-2024-42-13>
8. Kutsyk P. O uso da engenharia econômica no contexto da gestão estratégica empresarial (Використання економічної інженерії в контексті стратегічного управління бізнесом) / Kutsyk P., Kovtun O., Klochan, V., Klochan I., Krakhmalova N., Prokopenko, O. // *Laplace Em Revista*, 2021, 7 (Extra-E), p. 427–436.

## REFERENCES:

1. Prokopets N. A., Hloba L. S. (2022). Matematychnye modelyuvannya protsesu obsluhovuvannya navantazheniya v informatsiyno-komunikatsiyniy mrezhzi. *Problemy telekomunikatsiy*. № 1 (30). P. 18–31.
2. Bai, W. H., Xi, J. Q., Zhu, J. X., Huang, S. W. (2015). Performance analysis of heterogeneous data centers in cloud computing using a complex queueing model. *Mathematical Problems in Engineering*, No. 2015, pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/980945>
3. Globa, L., Gvozdetska, N. (2021), "Experimental analysis of PCPB-2: Comprehensive energy-efficient approach to distributed workload processing in communication networks", Proceedings of the 2021 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 33. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom52164.2021.9527759>
4. Globa, L., Gvozdetska, N., Prokopets, V. (2021), "Providing Energy-efficient and High- performance Infrastructure for Smart Network", Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 33. 133–136. DOI: <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716620>
5. Meisner, D., Wenisch, T. F. (2010), "Stochastic queuing simulation for data center workloads", Proceedings of the Exascale Evaluation and Research Techniques Workshop, No. 16, pp. 1–9.
6. Van der Boor, M., Comte, C. (2021), "Load balancing in heterogeneous server clusters: Insights from a product-form queueing model", Proceedings of the 2021 IEEE/ACM 29th International Symposium on Quality of Service (IWQOS), P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWQOS52092.2021.9521355>
7. Kutsyk P. O., Kovtun O. I. (2024) Zastosuvannya tekhnolohiy shtuchnoho intelektu v systemi obhruntuvannya stratehichnykh rishen upravlinnya biznesom. *Pidpryyemnytstvo i torhivlya*. № 42, pp. 94–109. DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-1256-2024-42-13>
8. Kutsyk P. O uso da engenharia econômica no contexto da gestão estratégica empresarial (Using economic engineering in the context of strategic business management) / Kutsyk P., Kovtun O., Klochan, V., Klochan I., Krakhmalova N., Prokopenko, O. // *Laplace Em Revista*, 2021, 7 (Extra-E), pp. 427–436.