

УДК 004.94:658.5:519.872

DOI: 10.32626/2308-5878.2025-28.5-16

Д. А. Андрєєв,

К. Є. Золотько, канд. техн. наук

Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара, м. Дніпро

МОДЕЛЮВАННЯ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ІТ-ПРОЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕОРІЇ ЧЕРГ

Стаття присвячена моделюванню бізнес-процесів ІТ-проектів за допомогою теорії черг, де бізнес-процеси трактуються як системи масового обслуговування з випадковими потоками завдань і обмеженими ресурсами. Актуальність дослідження зумовлена зростаючою складністю ІТ-проектів, де випадкове надходження завдань, зміни вимог і варіативність часу виконання призводять до черг, перевитрат ресурсів та порушення термінів. В умовах конкуренції та потреби в швидкому виведенні продуктів на ринок, застосування теорії черг стає інструментом для науково обґрунтованого управління, що допомагає мінімізувати затримки, підвищувати продуктивність і забезпечувати стійкість систем. Мета дослідження полягає в розробці математичного апарату на основі теорії масового обслуговування для моделювання бізнес-процесів ІТ-проектів, що дозволить оптимізувати розподіл ресурсів, визначити оптимальну кількість виконавців та мінімізувати затримки в реалізації завдань. У дослідженні використано аналітичні методи теорії черг, для розрахунку ключових показників, таких як коефіцієнт завантаження ρ , середня кількість завдань у системі, час очікування та ймовірність втрат. Додатково застосоване імітаційне моделювання з використанням програмних інструментів, як-от Arena, для симуляції динаміки процесів з варіативними розподілами часу обслуговування. Отримані наукові результати демонструють, що моделювання бізнес-процесів ІТ-проектів за допомогою теорії черг дозволяє забезпечити стійкість системи за умови, коли завантаження ресурсів не перевищує критичний рівень. Оптимальна кількість виконавців визначається через оцінку ймовірності очікування, що сприяє зменшенню затримок у черзі та загальному циклі виконання завдань. Аналітичні моделі, такі як одноканальна та багатоканальна системи, виявили ефективність розподілу навантаження між командами, особливо в умовах обмеженої черги, де зменшується ризик втрати завдань. Перспективи подальших досліджень передбачають інтеграцію теорії черг з методами машинного навчання для адаптивного моделювання реальних ІТ-проектів, врахування пріоритетних черг та мультиагентних систем.

Ключові слова: *теорія черг, бізнес-процеси, IT-проекти, системи масового обслуговування, математичне моделювання, оптимізація ресурсів.*

Вступ. Сучасні IT-проекти працюють у середовищі з випадковими надходженнями завдань і обмеженими ресурсами, що саме і породжує черги, затримки та нерівномірне завантаження команд. Теорія черг надає формальний апарат для опису такої динаміки. У моделі завдання утворюють потік із інтенсивністю λ . Виконавці або сервіси є каналами обслуговування з інтенсивністю μ . Кількість каналів позначається n і визначає пропускну здатність. Поєднання цих параметрів дозволяє оцінювати стійкість, час циклу та ймовірність очікування. Мережеве подання процесів відображає послідовні й паралельні етапи, що важливо для реальних ланцюгів розробки, тестування та впровадження. Доволі актуальною проблемою стає непередбачуваність надходження завдань від користувачів, зміни вимог та варіативність часу виконання різних типів робіт. І це призводить до перевитрат ресурсів, порушення термінів та зниження якості продукту. Застосування теорії черг дозволяє науково обґрунтувати рішення щодо розподілу ресурсів, визначити оптимальну кількість виконавців та передбачити критичні точки перевантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковому просторі все більше уваги приділяється використанню теорії черг для аналізу та оптимізації бізнес-процесів, зокрема у сфері IT-проектів, де характерним є динамічне середовище із високою невизначеністю та стохастичною природою потоків завдань. У працях [1, 2] виділено значення моделювання бізнес-процесів як систем масового обслуговування, що дозволяє оцінювати навантаження на ресурси, визначати середній час очікування та прогнозувати поведінку системи за різних сценаріїв. Окремі дослідники [3, 4] пишуть про моделі з обмеженою довжиною черги, які відображають практичні ситуації, коли кількість одночасно опрацьованих завдань обмежується ресурсами, та на моделі M/G/1, що може враховувати складні розподіли часу обслуговування. У публікаціях авторства [5-7] також наголошується на доцільності поєднання аналітичних методів із імітаційним моделюванням за допомогою програмних інструментів, що може сприяти відтворенню складних сценаріїв реальних проектів.

Загалом, проведений аналіз показує, що теорія черг є потужним інструментом для кількісної оцінки ефективності бізнес-процесів IT-проектів, а її інтеграція з імітаційними методами створює підґрунтя для обґрунтованих управлінських рішень, спрямованих на мінімізацію затримок і підвищення продуктивності.

Постановка завдань. Сучасні ІТ-проекти характеризуються випадковим надходженням завдань і обмеженими ресурсами, що призводить до утворення черг, затримок та нерівномірного завантаження команд. Традиційні методи управління проектами не завжди ефективно передбачають та контролюють ці процеси.

Метою дослідження є оптимізація математичного апарату для моделювання бізнес-процесів ІТ-проектів на основі теорії масового обслуговування, що дозволить оптимізувати розподіл ресурсів та мінімізувати затримки.

Основні завдання включають:

- формалізацію бізнес-процесів як систем масового обслуговування з потоком завдань інтенсивністю λ та каналами обслуговування інтенсивністю μ ;
- визначення оптимальної кількості виконавців для забезпечення стійкості системи; аналіз впливу обмежень черги на ймовірність втрати завдань;
- дослідження мережевих моделей для послідовних та паралельних етапів розробки.

Виклад основного матеріалу. Бізнес-процес у межах ІТ-проекту може бути описаний як математичний об'єкт, у якому кожна одиниця роботи, кожне завдання або звернення користувача постає у вигляді елемента певної множини входних подій, що надходять у систему з певною інтенсивністю, і саме ця інтенсивність, яка в класичній термінології теорії масового обслуговування позначається символом λ , визначає динаміку формування черги, адже потік вимог не завжди синхронізований із можливостями виконавців, а отже виникає потреба у математичному моделюванні цього дисбалансу з метою пошуку оптимальних стратегій розподілу ресурсів та мінімізації затримок у реалізації завдань [8]. В такому разі, бізнес-процес трактується як система масового обслуговування, у якій існують канали виконання і це можуть бути окремі розробники, команди тестувальників, аналітики чи автоматизовані програмні модулі, котрі характеризуються власною продуктивністю, яку в моделі позначають як μ , і саме цей параметр у поєднанні з λ формує ключові показники функціонування системи, зокрема коефіцієнт завантаження, що визначає ймовірність утворення черги та середній час перебування завдання у системі. У випадку одного виконавця ми отримуємо модель $M/M/1$, де всі завдання надходять у спільну чергу, однак в умовах ІТ-проектів частіше використовується модель $M/M/n$, оскільки одночасно працює кілька ресурсів, і саме правильне математичне визначення числа каналів обслуговування дозволяє оцінити, чи буде система стабільною, чи навпаки схильною до нескінченного накопичення запитів.

Ключовим у такому підході є розуміння того, що бізнес-процес не є хаотичним набором операцій, а підпорядковується чітким закономірностям, які можна виразити через формули теорії черг, адже середня кількість завдань у системі L визначається співвідношенням параметрів потоку та продуктивності каналів, а середній час очікування W_q і розраховується через відношення завантаженості до інтенсивності обслуговування, що дозволяє ще на етапі планування ІТ-проєкту передбачати можливі затримки й здійснювати коригування ресурсів, перш ніж вони стануть критичними для кінцевого результату (рис. 1) [9].

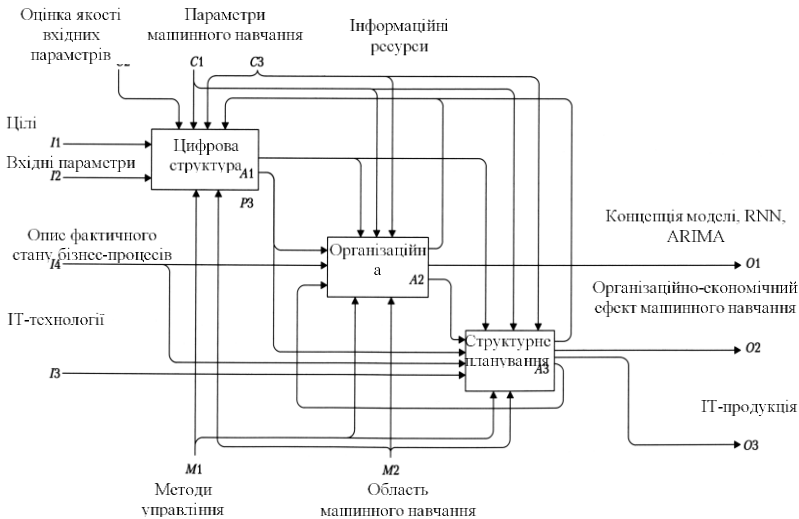


Рис. 1. Приклад організаційного планування бізнес-процесів ІТ-проєктів із використанням теорії черг та методів машинного навчання

Джерело: побудовано авторами.

Оскільки завдання у межах ІТ-проєкту мають різний ступінь складності, різний розподіл часу виконання та можуть відрізнятися за пріоритетністю, у математичній моделі доцільно враховувати не лише класичні пуасонівські потоки з експоненційним розподілом часу обслуговування, але й більш складні варіації, наприклад $M/G/1$, де розподіл часу виконання завдання може мати довгі «хвости» і значно відхилятися від середнього, що особливо характерно для процесів налагодження програмного забезпечення чи роботи з клієнтськими запитами. За таких умов розширюються можливості аналізу й дозволяє отримати більш реалістичні оцінки часу завершення критичних етапів проєкту. Крім того, важливим аспектом є моделювання поведінки системи у разі обмеженої кількості місць у черзі, коли надлишкові завдання можуть відхилятися або відкла-

датися на інший період, що безпосередньо відповідає практиці роботи ІТ-команд, які вимушені відмовлятися від низькопріоритетних задач у моменти пікового навантаження [10].

Для таких випадків застосовують моделі з відмовами, у яких ймовірність відмови визначається за формулою Ерланга, і ці результати можуть бути використані менеджерами проєктів для прийняття рішень про збільшення кількості ресурсів або зміну пріоритетів завдань. Також у межах одного ІТ-проєкту бізнес-процеси часто є ізольованими, а здебільшого утворюють послідовні або паралельні ланцюги, тому для адекватного математичного опису необхідно розглядати мережі масового обслуговування, де вихід одного вузла стає входом для іншого, і саме в таких моделях проявляється ефект накопичення затримок, який у підсумку може призвести до суттєвого зміщення термінів реалізації проєкту, навіть якщо кожен окремий етап працює у відносно стабільному режимі [11].

1. Формалізація постановки задачі у контексті управління бізнес-процесами ІТ-проєктів дозволяє трактувати робочий процес як систему масового обслуговування (СМО), у якій завдання формують вхідний потік із певною інтенсивністю λ , що описує кількість нових заявок на одиницю часу, тоді як виконавці проєкту або програмні агенти розглядаються як канали обслуговування із середньою інтенсивністю μ , а кількість таких каналів дорівнює n , що у сукупності створює модель, здатну передбачати поведінку системи при різних навантаженнях і рівнях ресурсного забезпечення [12]. Середня завантаженість системи може бути виражена відношенням інтенсивності надходження завдань до максимальної продуктивності всіх виконавців, тобто:

$$\rho = \frac{\lambda}{n \cdot \mu}, \quad (1)$$

де ρ – показник завантаження системи. Він показує яка частка часу виконавці завантажені роботою; λ – інтенсивність надходження завдань (потіку заявок); μ – інтенсивність обслуговування (швидкість виконання); n – кількість каналів обслуговування (виконавців). Це кількість незалежних ресурсів, які можуть одночасно виконувати завдання (наприклад, програмісти, сервери, тестувальники).

Якщо $\rho < 1$, система вважається стійкою, тобто черга не зростає безмежно, а якщо $\rho \geq 1$, то бізнес-процес переходить у стан перенавантаження, і завдання накопичуються швидше, ніж їх встигають виконати. Для моделі $M/M/1$ середня кількість завдань у системі визначається наступним співвідношенням [13]:

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (2)$$

і це дає змогу оцінити очікувану кількість активних заявок, які перебувають або у черзі, або у процесі виконання, а середній час очікування у черзі визначається як:

$$W_q = \frac{p}{\mu(1-p)}, \quad (3)$$

що показує, скільки в середньому часу витрачатиме завдання на очікування, перш ніж розпочнеться його обробка. Припустимо, що в ІТ-проекті середня кількість завдань, які надходять від користувачів або відділу бізнес-аналітики, дорівнює $\lambda = 12$ заявок за годину, а один виконавець ($n = 1$) здатен опрацьовувати їх із середньою швидкістю $\mu = 15$ заявок за годину. У такому випадку коефіцієнт завантаження системи становитиме:

$$\rho = \frac{\lambda}{n \cdot \mu} = \frac{12}{1 \cdot 15} = 0,8 \quad (4)$$

це свідчить, що виконавець завантажений у середньому на 80% свого робочого часу. Далі середня кількість заявок у системі обчислюємо як:

$$L = \frac{p}{1-p} = \frac{0,8}{0,2} = 4, \quad (5)$$

тобто у будь-який момент часу в системі в середньому перебуває чотири завдання (одне в роботі та три в черзі) [14]. Середній час очікування завдання у черзі буде дорівнювати тоді:

$$W_q = \frac{p}{\mu(1-p)} = \frac{0,8}{15 \cdot 0,2} = 0,27 \text{ години} \approx 16 \text{ хвилин}, \quad (6)$$

що дає змогу менеджеру проекту оцінити очікувану затримку у виконанні завдань і прийняти рішення про необхідність залучення додаткових ресурсів чи автоматизації. У випадках, коли кількість виконавців більша за один, система переходить до класу моделей $M/M/n$, де потік завдань рівномірно розподіляється між кількома каналами, і для оцінки середніх характеристик використовують формулу Ерланга для визначення ймовірності очікування:

$$P_{wait} = \frac{\frac{(np)^n}{n!(1-p)}}{\sum_{k=0}^{n-1} \frac{(np)^k}{k!} + \frac{(np)^n}{n!(1-p)}}, \quad (7)$$

де n – кількість виконавців.

Після визначення цієї ймовірності можна розрахувати середню кількість заявок у черзі L_q , а також середній час очікування у черзі W_q що дозволяє більш точно планувати навантаження між командами. Після виконання обчислень можна отримати значення близьке до

$P_{wait} \approx 0,45$, тобто майже половина завдань все одно очікуватиме у черзі, однак час очікування вже буде порівняно невеликим. Отримане значення ймовірності очікування P_{wait} розраховано для моделі з трьома каналами обслуговування $n = 3$, що відповідає системі типу $M/M/3$. За інтенсивності потоку завдань $\lambda = 40$ та середній швидкості обслуговування одного виконавця $\mu = 20$. Наведена конфігурація забезпечує стійку роботу системи, збалансоване завантаження ресурсів і прийнятний рівень чергових затримок.

2. Результати аналітичного та імітаційного моделювання бізнес-процесів ІТ-проектів на основі теорії черг. Розгляд бізнес-процесів ІТ-проектів через призму теорії масового обслуговування дає змогу виявляти закономірності, що не завжди очевидні при використанні лише управлінських або інтуїтивних методів, адже саме формалізація потоку завдань і ресурсів у вигляді математичних співвідношень визначає оптимальні умови роботи системи, а також прогнозувати її поведінку в разі зміни параметрів. Для цього використовуються не лише класичні моделі $M/M/1$ чи $M/M/n$, але й моделі з обмеженою чергою ($M/M/1/K$), а також багатоступеневі системи, де одне завдання після завершення в одному вузлі потрапляє в інший, що надзвичайно схоже на реальні ІТ-проекти, де робота програмістів передається тестувальникам, а потім аналітикам чи відділу впровадження [15]. Важливим параметром, що використовується для характеристики якості системи, є середня кількість зайнятих каналів:

$$B = \lambda \cdot (1 - P_0) \cdot \frac{1}{\mu}, \quad (8)$$

де P_0 – ймовірність відсутності заявок у системі, яку можна обчислити за спеціальними формулами залежно від типу моделі. Значення показника B демонструє, наскільки ефективно завантажені виконавці, і слугує критерієм оцінки доцільності розширення ресурсів.

Для визначення рівня ефективності також застосовується показник середнього часу перебування завдання у системі, що включає як час очікування, так і час обробки ми виразимо як:

$$W = W_q + \frac{1}{\mu}, \quad (9)$$

де W_q – середній час очікування. Цей показник важливий для ІТ-проектів, оскільки він демонструє не лише затримку у черзі, але й сумарний цикл виконання завдання від моменту його надходження до завершення, що прямо впливає на тривалість спринтів в Agile чи Scrum підходах [16]. У випадку обмеженої кількості місць у черзі (модель $M/M/1/K$), де K – максимальна кількість заявок, що можуть перебувати у системі, застосовується формула для ймовірності втрати завдання:

$$p_{\text{loss}} = \frac{(1-p)p^K}{1-p^K}, \quad (10)$$

яка демонструє, яку частку заявок доведеться відхилити у разі перевантаження системи. Отримані показники у реальних умовах відповідає ситуаціям, коли ІТ-команда вимушена відкладати частину завдань або передавати їх на наступні ітерації, що знижує швидкість розробки. Припустимо, що для процесу підтримки користувачів у ІТ-проекті вхідний потік заявок становить $\lambda = 40$ на годину, швидкість обробки одного виконавця дорівнює $\mu = 20$, а кількість виконавців $n = 3$. Коефіцієнт завантаження обчислюється так:

$$\rho = \frac{\lambda}{n \cdot \mu} = \frac{40}{3 \cdot 20} = 0,67. \quad (11)$$

Ймовірність того, що система буде вільною, визначається як:

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^{n-1} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{k!} + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!(1-p)} \right]^{-1}. \quad (12)$$

Підставивши значення, отримаємо $P_0 \approx 0,12$. Тоді середня кількість заявок у черзі визначається як:

$$L_q = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot p}{n!(1-p)^2} \cdot P_0. \quad (13)$$

Розрахунок дає $L_q \approx 2,3$, що означає, що в середньому трохи більше двох заявок очікують у черзі. Далі середній час очікування обчислюємо за формулою:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{2,3}{40} = 0,0575 \approx 3,5 \text{ хвилини}. \quad (14)$$

Таким чином, навіть при значному потоці завдань система із трьома виконавцями функціонує досить ефективно, забезпечуючи швидке обслуговування користувачів.

3. Імітаційний експеримент. Аналітичні розрахунки дозволяють оцінити середні характеристики роботи системи, однак у складних ІТ-проектах важливо враховувати варіативність розподілу часу обробки, наявність пріоритетів у завдань та обмеження ресурсів, що потребує використання імітаційного моделювання. Поточна модель побудована як генератор подій, де заявки надходили з інтенсивністю $\lambda = 25$ заявок за годину, а час обслуговування визначався за розподілом Ерланга, що краще відповідає реальним умовам порівняно з екс-

поненційним розподілом [17]. Результати експерименту показали, що при одному виконавці черга зростає неконтрольовано вже через перші дві години, при двох виконавцях утворюється стабільна, але довга черга, а при трьох система досягає стану стійкості з прогнозованим середнім часом очікування 5-6 хвилин, що підтвердило правильність аналітичних оцінок. В *Arena* модель було використано для візуалізації процесу, що дає змогу показати замовникам динаміку зміни черги в реальному часі, продемонструвавши, як накопичуються завдання при нестачі ресурсів і як стабілізується система при оптимальній кількості виконавців [18].

Розглянемо модель з обмеженою чергою $M/M/1/K$, що відображає ситуацію, коли система може прийняти не більше ніж $K = 5$ заявок одночасно. Нехай $\lambda = 12$, а $\mu = 15$. Коефіцієнт завантаження:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{12}{15} = 0,8. \quad (15)$$

Підставивши дані, отримаємо:

$$p_{loss} = \frac{(1-\rho)\rho^K}{1-\rho^K} = \frac{(1-0,8) \cdot 0,8^5}{1-0,8^6} = 0,089. \quad (16)$$

Отже, близько 9% заявок буде втрачено через перевантаження системи, що у реальних умовах означає відкладення частини завдань на наступні цикли або необхідність ескалації на інші команди. Середня кількість заявок у системі при таких параметрах обчислюється вже як:

$$L = \sum_{k=0}^K k \cdot P_k. \quad (17)$$

де P_k – ймовірність перебування у системі k заявок, яку можна знайти через нормувальний коефіцієнт. Розрахунок показує, що середнє значення дорівнює приблизно 2,7 заявки, що є прийнятним показником при обмежених ресурсах.

Таким чином, результати моделювання на прикладі як аналітичних розрахунків, так і імітаційних експериментів підтверджують доцільність застосування теорії черг для оптимізації бізнес-процесів ІТ-проектів, оскільки вона дозволяє як кількісно оцінити ефективність використання ресурсів, так і виявити критичні точки, у яких система може стати нестійкою, що у свою чергу дає змогу завчасно вживати заходів для збалансування навантаження, зменшення ймовірності втрати завдань і підвищення результативності проектного менеджменту.

Висновки. Дослідження виявило стохастичні закономірності функціонування бізнес-процесів ІТ-проектів, обумовлені нерівномірним надходженням завдань, варіативністю складності операцій та ресурсними обмеженнями. Встановлено, що ці фактори є первинними

детермінантами черг, затримок та системних збоїв на критичних етапах розробки програмного забезпечення. Математична формалізація дозволяє трактувати бізнес-процеси як структуровані системи з прогнозованими характеристиками, замість хаотичних послідовностей операцій. Виявлено кореляцію між організаційною структурою виконавців та системною стабільністю та доведено, що багатоканальний розподіл завдань оптимізує ефективність, мінімізує перевантаження та скорочує тривалість очікування. Однак було і підкреслено, що масштабування людських ресурсів не є універсальним рішенням – критичного значення набувають алгоритми пріоритезації, диспетчеризації та управління гетерогенними завданнями.

Досліджено функціонування бізнес-процесів в умовах обмеженої пропускну здатності та селективного відхилення завдань, що моделює реальні сценарії ІТ-команд під час пікових навантажень. Оцінено системний вплив таких обмежень та продемонстровано, що оптимізована конфігурація черг, раціональне ресурсокористування та встановлення граничних параметрів знижують втрати та підвищують продуктивність. Було обґрунтовано практичну релевантність теорії черг для ІТ-менеджменту та запропоновано її імплементацію як універсального прогностичного інструменту, що забезпечує підтримку стратегічних рішень, ресурсне планування та ризик-менеджмент у динамічному середовищі цифрової економіки.

Список використаних джерел:

1. Долга Г. В., Хитрова О. А. Розвиток і тенденції цифровізації управління бізнес-процесами. *Сталый розвиток економіки*. 2024. № 2 (49). С. 141-145. DOI: 10.32782/2308-1988/2024-49-22.
2. Семенюк С. С. Інноваційні підходи до формування бізнес-процесів ІТ-підприємств у цифрову епоху. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління*. 2024. № 16. С. 11-20. DOI: 10.54929/2786-5738-2024-16-04-11.
3. Zolotko K. E., Krasnoshapka D. V., Stepanova N. I., Siryk S. F. Using machine learning methods to optimize business processes in IT projects. *Project, Program, and Portfolio Management*. 2024. № 1. P. 81-86. DOI: 10.15421/322427.
4. Шматковська Т., Коробчук Т. Сучасні інформаційні та комунікаційні технології в моделюванні бізнес-процесів. *Економічний форум*. 2023. № 1 (3). С. 156-161. DOI: 10.36910/6775-2308-8559-2023-3-20.
5. Рожко В. І., Хлестун А. А. Моделювання бізнес-процесів у сучасному бізнес-середовищі. *Проблеми економіки*. 2023. № 4 (58). С. 159-164. DOI: 10.32983/2222-0712-2023-4-159-164.
6. Amjath M., Kerbach L., Elomri A., Smith J. M. G. Queueing network models for the analysis and optimisation of material handling systems: a systematic literature review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2024. Vol. 36 (2). P. 668-709. DOI: 10.1007/s10696-023-09505-x.

7. Zhao X., Gilbert K. A queuing theory-based approach to evaluate service delivery quality. *International Journal of Quality and Service Sciences*. 2025. DOI: 10.1108/IJQSS-10-2024-0149.
8. Rece L., Vlase S., Ciuuiu D., Neculoiu G., Mocanu S., Modrea A. Queueing Theory-Based Mathematical Models Applied to Enterprise Organization and Industrial Production Optimization. *Mathematics*. 2022. Vol. 10 (14). Art. 2520. DOI: 10.3390/math10142520.
9. Македон В. В., Байлова О. О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. Вип. 47. С. 16-26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3.
10. Петруха Н. М., Петруха С. В. Державне регулювання інтегрованих корпоративних об'єднань в умовах структурно-інституціональної та функціональної трансформації сільської економіки: проблеми методології, теорії, соціально-економічної та секторальної політики: монографія. Київ: ТОВ «Видавничий дім «Професіонал», 2020. 496 с.
11. Bernardi M. L., Casciani A., Cimitile M., Marrella A. A preliminary study on Business Process-aware Large Language Models. *Ital-IA 2024: Intelligenza Artificiale – Thematic Workshops co-located with the 4th CINI National Lab AIFS Conference on Artificial Intelligence (Ital-IA 2024)*. 2024. P. 441-446.
12. Станасюк Н. С. Бізнес-процеси як об'єкт імітаційного моделювання. *Економіка та суспільство*. 2025. № 71. С. 135-142. DOI: 10.32782/2524-0072/2025-71-135.
13. Zhyvko Z., Petrukha N. Formation and development of digital competencies in the conditions of digitalization of society. The development of innovations and financial technology in the digital economy: monograph. OÜ Scientific Center of Innovative Research. 2023. P. 62-85. DOI: 10.36690/DIFTDE-2023-62-85.
14. Pajak K., Omelyanenko V., Makedon V., Shevchenko V., Ovcharenko I. Raising the level of financial security of the enterprise based on the basic risks differentiation. *Journal of Security and Sustainability Issues*. 2020. № 10 (1). P. 115-130. DOI: 10.9770/jssi.2020.10.1(9).
15. Dbeis Ayman, Al-Sahili Khaled. Enhancing queuing theory realism: analysis of renegeing behavior impact on M/M/1 drive-thru service system. *Journal of Management Analytics*. 2024. Vol. 11 (4). P. 659-674. DOI: 10.1080/23270012.2024.2408528.
16. Machangara D. T., Boubacar H. A., Andreatta G., Ndolo A. Predictions and Application of Queueing Analysis: A Case of Regional Hospital Limbe, Cameroon. *Decision Making in Manufacturing and Services*. 2024. Vol. 18. P. 39-64. DOI: 10.7494/dmms.2024.18.6442.
17. Makedon V., Kostyshyna T., Tuzhyllkina O., Stepanova L., Filippov V. Ensuring the efficiency of integration processes in the international corporate sector on the basis of strategic management. *Academy of Strategic Management Journal*. 2019. Vol. 18. Special Issue 1. URL: <https://www.abacademies.org/articles/Ensuring-the-efficiency-of-integration-processes-in-the-international-corporate-sector-on-the-basis-of-strategic-management-1939-6104-18-SI-1-452.pdf>.
18. Riepina I. Using the Lean Manufacturing Methodology to Improve the Quality of the Enterprise's Business Processes. *Management*. 2023. № 1 (37). P. 39-49. DOI: 10.30857/2415-3206.2023.1.4.

MODELING BUSINESS PROCESSES OF IT PROJECTS USING QUEUEING THEORY

The article is devoted to the modeling of business processes of IT projects using queueing theory, where business processes are interpreted as service systems with random task flows and limited resources. The relevance of the research is determined by the growing complexity of IT projects, where random task arrivals, changing requirements, and variability in execution time lead to queues, resource overuse, and deadline violations. In today's competitive environment and the need for rapid product delivery to the market, the application of queueing theory becomes an instrument for scientifically grounded management, enabling minimization of delays, improvement of productivity, and ensuring system stability. The aim of the study is to develop a mathematical framework based on service system theory for modeling business processes of IT projects, which will optimize resource allocation, determine the optimal number of performers, and minimize delays in task execution. The research applies analytical methods of queueing theory for calculating key indicators such as utilization factor, average number of tasks in the system, waiting time, and probability of losses. Additionally, simulation modeling was carried out using software tools such as Arena to reproduce the dynamics of processes with variable service time distributions. The obtained scientific results demonstrate that modeling IT project business processes with queueing theory ensures system stability under conditions when resource utilization does not exceed the critical level. The optimal number of performers is determined through the assessment of waiting probability, which contributes to the reduction of delays in queues and the overall task execution cycle. Analytical models, such as single-channel and multi-channel systems, have shown the effectiveness of workload distribution among teams, especially under conditions of limited queue length, where the risk of task loss decreases. Prospects for further research include the integration of queueing theory with machine learning methods for adaptive modeling of real IT projects, taking into account priority queues and multi-agent systems.

Key words: *queueing theory, business processes, IT projects, service systems, mathematical modeling, resource optimization.*

Отримано: 30.11.2025