

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-28>

УДК 519.876:004.94:004.056

О. В. Скляренко¹, к.ф.-м.н., доц.Г. М. Терещук², асистентО. Ю. Ніколаєвський¹, к.т.н., доц.О. А. Скляренко¹, аспірант

ORCID: 0000-0001-6555-1223

ORCID: 0000-0001-7573-9748

ORCID: 0000-0002-0786-5432

ORCID: 0009-0003-4908-0187

¹ Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

e-mail: olena.skliarenko@e-u.edu.ua

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка

e-mail: ganna.tereschuk@gmail.com

АНАЛІТИЧНЕ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ СЕРВІСНОГО ЦЕНТРУ ТЕХНІЧНОЇ ПІДТРИМКИ КОМП'ЮТЕРІВ

Анотація. У статті досліджується вплив аналітичного та імітаційного моделювання на ефективність функціонування сервісних центрів технічної підтримки комп'ютерної техніки в умовах зростання попиту на ІТ-послуги та ускладнення структури систем масового обслуговування (СМО). Розглядається актуальність застосування математичних методів для оптимізації структури автоматизованих сервісних систем, зокрема з метою скорочення часу очікування, підвищення ймовірності миттєвого обслуговування заявки та зменшення кількості відмов.

У дослідженні запропоновано поєднання аналітичного підходу з імітаційним моделюванням, що дозволяє комплексно аналізувати функціонування СМО на основі моделей типу M|M|1 та стохастичних мереж Петрі. Виявлено, що таке поєднання забезпечує високу точність прогнозування навантаження, дозволяє виявити вузькі місця системи, сформувати оптимальну структуру обслуговування та приймати обґрунтовані управлінські рішення. Продемонстровано використання моделювання для визначення критичних параметрів і оцінювання ефективності роботи системи.

Ключові слова: системи масового обслуговування, аналітичне моделювання, імітаційне моделювання, стохастичні мережі Петрі.

Постановка проблеми. У сучасних умовах високої конкуренції та стрімкого розвитку ІТ-технологій сервісні центри технічної підтримки комп'ютерної техніки відіграють важливу роль у забезпеченні стабільної роботи інформаційної інфраструктури. Для ефективного функціонування таких центрів важливо враховувати вплив черг, часових затримок та раціонального використання ресурсів. З цієї метою доцільним є використання методів аналітичного та імітаційного моделювання.

Виникає задача зробити систему масового обслуговування ефективною. В організації роботи тієї або іншої системи масового обслуговування варто прагнути скорочення середнього числа заявок, що знаходяться в черзі, скорочення часу очікування обслуговування. Хотілося б зробити максимальною ймовірність того, що заявка, яка надійшла до системи, буде негайно прийнята до обслуговування, а середній відсоток заявок, яким відмовлено, хотілося б звести до мінімуму. Для цього треба збільшувати продуктивність системи (зменшувати час обслуговування заявки), раціоналізувати режим роботи системи, збільшувати число каналів обслуговування [2; 4].

Будь-яка куплена система вимагає адаптації, а отже, й модернізації. Усі ці особливості зумовлюють необхідність застосування математичних методів для аналізу, моделювання та оцінювання характеристик елементів автоматизованої системи сервісного центру (АССЦ). Виникає задача оптимізації структури системи з метою підвищення її надійності, швидкодії та ефективного використання.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз наукових праць та публікацій свідчить про актуальність використання аналітичного та імітаційного моделювання для оптимізації функціонування систем масового обслуговування (СМО), зокрема у сфері сервісної підтримки комп'ютерних систем. Застосування сучасних математичних моделей, алгоритмів моделювання та симуляційних підходів дозволяє достовірно прогнозувати навантаження на систему, визначати її критичні параметри, а також виявляти можливості для підвищення ефективності обслуговування [1; 3; 5–10; 11].

У наукових працях українських дослідників окрема увага приділяється мультиагентному імітаційному моделюванню як інструменту побудови гнучких моделей реальних СМО [1]. Це дозволяє враховувати поведінку клієнтів, операторів та змінні умови середовища. Такі моделі ефективно використовуються для аналізу організації роботи сервісних центрів, а також для прийняття управлінських рішень на основі результатів моделювання.

Аналітичні підходи до дослідження СМО, зокрема моделі типу GI/M/1 з урахуванням післядії, розглядаються як важливий метод формалізації стохастичних процесів у системах з нерегулярним надходженням заявок [2; 5; 12]. Це сприяє більш точному аналізу показників продуктивності системи та стабільності її функціонування.

Інша частина досліджень зосереджується на побудові імітаційних моделей СМО з очікуванням та без нього, що є важливим для вивчення поведінки клієнтів у чергах, оптимізації кількості обслуговувальних каналів та часу обслуговування [6]. Зокрема, автори також акцентують увагу на змінності інтенсивності інформаційних потоків у СМО та досліджують вплив різких навантажень на продуктивність системи [3].

У роботі [7] розглянуто застосування time-aware шейпера, що адаптується до конкретного користувача. Цей підхід є перспективним для застосування в сервісних системах із високим рівнем навантаження, де необхідно забезпечити QoS (якість обслуговування) залежно від ідентифікатора запиту.

Автори [8] представили інтелектуальну систему моніторингу з використанням алгоритмів класифікації зображень, що може бути адаптовано до оброблення графічних даних у сервісних центрах. Схожим чином у [9] розроблено систему автоматизованого моніторингу викидів вуглецю на базі ШІ-алгоритмів, яка демонструє ефективність оброблення великих потоків інформації в реальному часі.

У роботі [10] автори застосовують алгоритм Isolation Forest для аналізу споживання енергії, що дозволяє виявляти аномалії в даних. Такий підхід можна ефективно адаптувати для виявлення відхилень у системах технічної підтримки, наприклад, для діагностики збоїв чи незвичних шаблонів запитів.

Таким чином, як вітчизняні, так і зарубіжні публікації підтверджують доцільність використання аналітичного та імітаційного моделювання як ефективного інструменту для підвищення якості функціонування СМО. Це дозволяє не лише оптимізувати технічні ресурси, а й забезпечити високу якість обслуговування, мінімізувати час очікування та покращити загальну ефективність сервісної системи.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є дослідження впливу аналітичного та імітаційного моделювання на оптимізацію роботи сервісного центру технічної підтримки комп'ютерів, а також побудова ефективної структури автоматизованої системи

масового обслуговування. Дослідження спрямовано на формалізацію трифазного оброблення заявок, аналіз часових характеристик обслуговування та визначення ключових параметрів, що впливають на якість і швидкість надання технічної допомоги. Особливу увагу приділено оцінюванню ефективності використання моделювання для прийняття управлінських рішень у сфері технічного сервісу в умовах зростання попиту на ІТ-послуги.

Основна частина. Використовуючи імітаційне та аналітичне моделювання для побудови моделі сервісного центру технічної підтримки комп'ютерів, можна створити різні моделі обслуговування й оцінити їх з погляду вартості й ефективності. Це дозволяє не лише формалізувати процес обслуговування заявок на кожному етапі, а й гнучко враховувати зміни в інтенсивності потоку звернень, доступних ресурсах і умовах функціонування системи. Поєднання підходів дає змогу отримати як точні розрахункові оцінки, так і практичні висновки на основі експериментального моделювання.

У даній роботі запропоновано нові алгоритми розрахунку характеристик систем масового обслуговування на основі мереж Петрі, а також новий підхід до аналізу роботи системи масового обслуговування з поєднанням двох методів дослідження: імітаційного і аналітичного моделювання.

Постановка задачі 1.

Побудувати аналітичну модель сервісного центру технічної підтримки комп'ютерів.

Для розв'язання поставленої задачі доцільно використовувати методи теорії масового обслуговування, теорії випадкових процесів, математичної статистики.

Імітаційна модель дозволяє дослідити поведінку системи за змінних параметрів потоку заявок, часу обслуговування і кількості обслуговувального персоналу. Структуру АССЦ зображено на рис. 1. Вона включає вхідний потік, трифазну чергу та блоки обслуговування для кожної фази.

Вхідним потоком у системі є потік звернень клієнтів, які подають заявки на обслуговування чи ремонт комп'ютерної техніки. Заявки послідовно проходять три етапи оброблення в сервісному центрі:

- 1) первинний прийом і реєстрація заявки адміністратором;
- 2) передача обладнання або інформації до технічного спеціаліста для діагностики;
- 3) ремонт або програмне налаштування техніки відповідно до виявлених проблем.

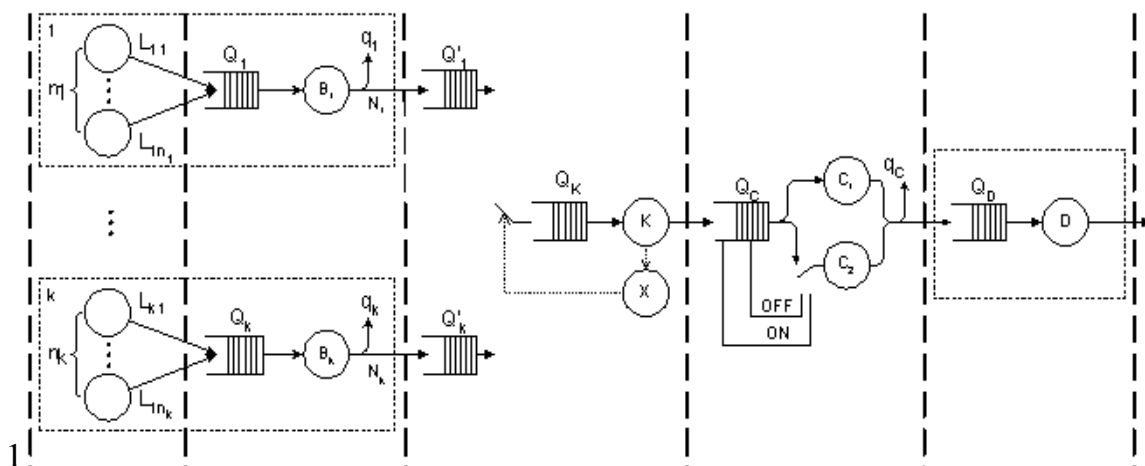


Рис. 1. Структура автоматизованої системи сервісного центру.

Джерело: розроблено авторами.

Заявки вводяться на робочих місцях адміністраторів, які здійснюють первинне оцінювання звернень, перевіряють комплектність техніки, правильність заповнення інформації та наявність супровідних документів. У разі виявлення помилок або некоректного оформлення частина заявок відсівається (тобто відбувається проріджування вхідного потоку). Заявки, що пройшли перевірку, передаються у відділ діагностики, де розпочинається другий етап.

На другому етапі технічні спеціалісти здійснюють апаратну та/або програмну діагностику обладнання. Якщо виявлено несправності, що не підлягають ремонту (наприклад, критичні пошкодження або несумісність), заявки також можуть бути відхилені – вторинне проріджування потоку.

Заявки, які пройшли діагностику, переходять до третьої фази обслуговування – ремонту або налаштування. Після завершення робіт техніка повертається адміністратору, а клієнту надсилається сповіщення про готовність до видачі. Таким чином, завершується цикл трифазного оброблення заявки в сервісному центрі.

Першу фазу обслуговування становлять k рівнобіжних систем типу $M|M|1$ (M – марковський процес), на вхід кожної з яких надходить потік L_j ($j=1, \dots, k$), що є суперпозицією n_j ($j=1, \dots, k$) незалежних потоків $L_{j1}, \dots, L_{jn_j}$ ($j=1, \dots, k$). Потік L_{jr} ($j=1, \dots, k, r=1, \dots, n_j$) надходить з r -го джерела заявок j -го каналу, незалежного від інших джерел. Заявки стають у чергу Q_j ($j=1, \dots, k$), з якої вибираються приладом B_j ($j=1, \dots, k$) (рис. 1). Час обслуговування на приладі B_j ($j=1, \dots, k$) розподілено експоненціально в загальному випадку з параметром m_j ($j=1, \dots, k$), що підтверджується експериментальними даними. Вихідний потік приладу B_j ($j=1, \dots, k$) незалежно проріджується з імовірністю q_j ($j=1, \dots, k$). Потік, отриманий у результаті проріджування N_j ($j=1, \dots, k$), надходить у другу фазу обслуговування на прилад С.

Вхідним потоком другої фази обслуговування, реалізованою системою $M|M|1$, є суперпозиція k незалежних вихідних потоків першої фази обслуговування N_j ($j=1, \dots, k$). З черги Q_c , до якої попадають заявки, вони вибираються приладом С. Час обслуговування на приладі С розподілено експоненціально з параметром m_c . Вихідний потік приладу С піддається незалежному проріджуванню з імовірністю q_c . Потік, отриманий у результаті незалежного проріджування N_c , є вихідним потоком другої фази і надходить на третю фазу обслуговування.

Третя фаза обслуговування реалізується системою типу $M|M|1$ (прилад D). Заявки надходять у чергу Q_D , з якої вибираються відповідно до дисципліни «перша заявка, що надійшла, обслуговується першою» приладом D. Час обслуговування на приладі D розподілено експоненціально з параметром m .

Пройшовши послідовно три фази обслуговування, заявки залишають систему.

Слід зазначити, що вибір представленої схеми СМО зумовлений насамперед організаційно-функціональною структурою сервісних центрів і тому досить точно для даного рівня деталізації відбиває всю організаційно-функціональну ієрархію системи сервісного центру.

Для знаходження імовірнісних характеристик використано аналітичну модель системи масового обслуговування з чистим очікуванням ($M|M|n$). Для такої моделі кожен канал може одночасно обслуговувати одну заявку. Вважаємо, що час обслуговування однієї заявки є випадковою величиною m , що підкоряється показниковому закону розподілу:

$$p(m < t) = 1 - e^{-mt}. \quad (1)$$

Потік заявок, що знаходяться в системі обслуговування, обмежений, тобто одночасно в системі обслуговування не може знаходитися більш k заявок, де k – скінчене число.

Нехай є n каналів, на які надходить потік заявок з інтенсивністю λ . Потік обслуговувань має інтенсивність μ .

У цьому випадку, якщо $\alpha < n$, де $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$, у системі встановлюється стаціонарний режим і розрахункові формули, за якими програма обчислює імовірнісні характеристики для СМО з чергою, мають вид [4]:

$$p_k = \frac{\frac{\alpha^k}{k!}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n!(n-\alpha)}}, \quad 0 \leq k \leq n; \quad (2)$$

де p_k – ймовірність того, що k каналів СМО зайняті, а інші $(n-k)$ вільні;

$$p_{n+s} = \frac{\frac{\alpha^{n+s}}{n!n^s}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n!(n-\alpha)}}, \quad k = n + s, s \geq 0. \quad (3)$$

де p_{n+s} – ймовірність того, що всі n каналів зайняті, а s заявок стоїть у черзі.

Середнє число заявок, що очікують обслуговування (тобто довжина черги), обчислюється за формулою:

$$d = \frac{\frac{\alpha^{n+1}}{nn! \left(1 - \frac{\alpha}{n}\right)^2}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n!(n-\alpha)}}. \quad (4)$$

У нашому випадку, коли СМО одноканальна, у формулах (2)–(4) потрібно прийняти $n=1$ [1].

Постановка задачі 2. Проаналізувати характеристики й оцінити ефективність роботи обчислювальних засобів із застосуванням імітаційного моделювання, побудувати імітаційну модель, використовуючи експериментальні дані.

З розвитком обчислювальної техніки і дискретного аналізу дедалі ширшого розвитку та використання набувають алгоритмічні (імітаційні) моделі.

Етапи процесу імітаційного моделювання такі [2]:

- аналіз характеристик і закономірностей функціонування керованого (досліджуваного) об'єкта;
- конструювання імітаційної моделі: перехід від реального об'єкта до логічних схем та алгоритмів, які імітують його поведінку, формальна постановка задач, що розв'язуються за допомогою імітаційного моделювання;
- підготовка системи даних для моделі: формування інформаційного забезпечення, необхідного для функціонування імітаційної моделі, зокрема, визначення структури та способів подання даних, форм і режимів зберігання, встановлення взаємозв'язків і взаємозалежності між різними масивами та базами даних;
- програмна реалізація імітаційної моделі: створення чи адекватне використання наявних програмних продуктів;
- оцінювання адекватності моделі: порівняння результатів, накопичених у процесі дослідної експлуатації моделі, на підставі інформації, отриманої про реальний об'єкт, виявлення та аналіз розбіжностей і, в разі необхідності, внесення корекцій до моделі;
- проведення імітаційних експериментів.

Під час розгляду АССЦ виникла необхідність у розробленні математичної та імітаційної моделі (рис. 1) для розрахунку низки характеристик. Аналіз результатів моделювання на основі стохастичних мереж Петрі дозволив виділити місця з недостатньою пропускну здатністю та визначити оптимальне завантаження системи.

Мережі Петрі – це графічне і математичне моделювання характеристик багатьох систем. Вони надають можливість опису і вивчення функціонування сучасних систем, що характеризуються як конкретні, здатні, асинхронні, розподілені, рівнобіжні і/чи стохастичні. Аналіз комунікаційних протоколів – це те місце, де мережі Петрі можуть бути використані для показу майбутньої системи.

Маркірування μ є присвоєння фішок позиціями мережі Петрі. Фішка – це примітивне поняття мереж Петрі (подібно позиціям і переходам). Фішки привласнюються (можна вважати, що вони належать) позиціям. Кількість і положення фішок у разі виконання мережі Петрі можуть змінюватися. Фішки використовуються для визначення виконання мережі Петрі.

Маркірування μ мережі Петрі $C = (P, T, I, O)$ є функція (P – позиція, T – перехід, I – вхід, O – вихід), що відображає безліч позицій P у безліч невід’ємних цілих чисел N .

$$\mu: P \rightarrow N.$$

Маркірування μ може бути також визначено як n -вектор $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$, де $n = |P|$ і кожне $\mu_i \in N$, $i = 1, \dots, n$. Вектор μ визначає для кожної позиції p_i мережі Петрі кількість фішок у цій позиції. Кількість фішок у позиції $p_i \in \mu_i$, $i = 1, \dots, n$. Зв’язок між визначеннями маркірування як функції і як вектора очевидним чином установлюється співвідношенням $\mu(p_i) = \mu_i$. Позначення його у виді функції є трохи більш загальним і тому вживається набагато частіше.

Маркірована мережа Петрі $M = (C, \mu)$ є сукупністю структури мережі Петрі $C = (P, T, I, O)$ і маркірування μ й може бути записана у виді $M = (P, T, I, O, \mu)$.

На графі мережі Петрі (рис. 2) фішки зображуються маленькою крапкою в кружку, що представляє позицію мережі Петрі.

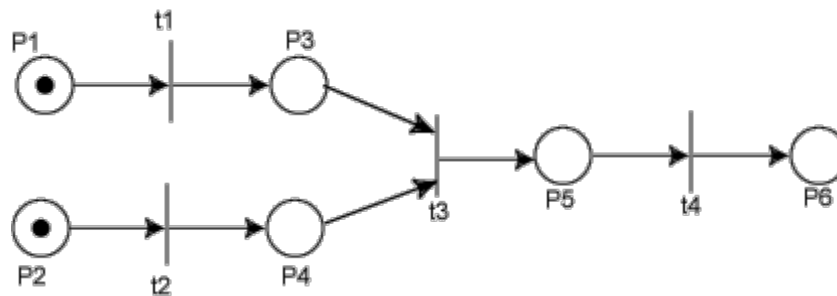


Рис. 2. Маркірування мережі Петрі

Джерело: розроблено авторами

Порівняльний аналіз характеристик наявної мережі, знятих за допомогою вимірів, і характеристик проектованої, отриманих у результаті моделювання, дозволяє виявити недоліки в наявній мережі й розробити проєкт реорганізації з метою поліпшення найбільш важливих характеристик функціонування АССЦ. Проведена побудова стохастичних мереж дозволила отримати і сформулювати оптимальні вимоги до необхідного для реорганізації мережі устаткування і каналів зв’язку.

Без знання характеристик вхідного потоку заявок неможливо провести повноцінний аналіз проектованого об’єкта.

Оскільки імітаційні моделі за своєю природою є лише засобом для проведення деякого числового експерименту, то результати, отримані за їх допомогою, являють собою не що інше, як поодинокі випадки (можливі варіанти) розвитку модельованого об'єкта. Отже, всі висновки та твердження, зроблені на їх підставі, мають евристичний характер і в певних випадках можуть суттєво викривляти дійсний стан речей. Аналітичний метод є закономірним.

Комбінація цих методів дає більш точні результати.

В основу процесу імітації покладено деякий статистичний експеримент, у ході якого використовуються генератори псевдовипадкових величин.

Варто також звернути увагу на пізнавальний зворотний вплив, який дають результати, отримані в межах імітаційних експериментів, на отримання інформації, яку використовують теоретичні (аналітичні) економіко-математичні моделі. Справді, аналіз та узагальнення накопичених у процесі імітаційних експериментів даних досить часто дозволяє краще зрозуміти якісні та кількісні закономірності, притаманні функціонуванню керованих об'єктів, і відобразити їх в аналітичному вигляді. Це додатково вказує на справедливність того, що успішне розв'язання задач моделювання та управління функціонуванням таких складних слабоформалізованих систем, як економічні об'єкти і процеси, потребує комплексного використання цілісної системи моделей і методів як теоретично-аналітичної, так і емпіричної (імітаційної) природи. Нагадаймо, що імітаційні моделі широко використовують аналітичні моделі як органічні складники, котрі є основою, на якій ґрунтуються концептуальні співвідношення, характеристики в структурі будь-якої більш-менш складної імітаційної моделі.

Висновки. Під час розгляду моделі АСЦЦ виникла необхідність у розробленні аналітичної та імітаційної моделі для розрахунку низки характеристик, таких як ступень завантаження каналів зв'язку мережі.

Під час аналітичного моделювання було введено обмеження, і вхідний потік вважався стаціонарним. Це дало можливість використати уже наявний математичний апарат для дослідження, а саме формули Ерланга. Однак у дійсності вхідний потік заявок є нестаціонарним. Тому для одержання характеристик розроблюваної системи з урахуванням нестаціонарності вхідного потоку побудовано імітаційну модель. Розглянуто особливості й задачі застосування імітаційного моделювання. Приведено результати розрахунку характеристик, отримані на основі імітаційної моделі.

За допомогою характеристик можна побудувати оптимальну структуру організації сервісного центру, зокрема оптимізувати розподіл ресурсів та підвищити якість обслуговування клієнтів.

Список використаних джерел

1. Барабаш О.В., Колумбет В.П. Дослідження систем масового обслуговування на основі імітаційного моделювання з урахуванням мультиагентного підходу. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2022. № 4(2). С. 115–121.
2. Складенко О.В., Терещук Г.М., Колодінська Я.О. Економіко-математичне моделювання : навч. посібник. Київ : Вид-во Європейського університету, 2024. 200 с.
3. Гнатушенко В.В., Витовтов Г.К. Аналіз СМО при стрибкоподібній зміні інтенсивностей потоків. *Проблеми прикладної математики та моделювання*. 2021. С. 76–83.
4. Колодінська О.В., Медведєв М.Г. Дослідження операцій. навч. посіб. Київ : Вид-во Європ. ун-ту, 2006. 158 с.
5. Послайко Н.І. Дослідження стаціонарного режиму в системі масового обслуговування типу GI/M/1 зі слабкою післядією. *Проблеми математичної моделі мультисервісних систем*. 2021. С. 190–199.
6. Сенік А., Пиріг Ю., Шпур О. Дослідження інтелектуального алгоритму моніторингу якості інформаційного обслуговування користувачів. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології електроніки*. 2024. № 4(2). С. 103–112.



7. Kawakami Y., Kawata H., Kubo T., Yasuhara N., Yoshihara S., Yoshida T. Applying Time-aware Shaper Considering User Identifier to Service Provider Network. *IEEE CCNC*. 2022. pp. 505–506. DOI: 10.1109/CCNC49033.2022.9700587
8. Lina Y., Xiuming Y. Design of Intelligent Pest Monitoring System Based on Image Classification Algorithm. 2020 3rd International Conference on Control and Robots (ICCR), Tokyo, Japan, 2020, pp. 21–24, DOI: 10.1109/ICCR51572.2020.9344213
9. Wang Y., Luo D. Design of Carbon Emission Accounting and Monitoring System Based on Artificial Intelligence Algorithm. *IEEE EASCT*, 2023, pp. 1–5. DOI: 10.1109/EASCT59475.2023.10393747
10. Yin J., Sun J., Zhao X., Li Q., Li J. Intelligent Monitoring of Power System Electricity Consumption Based on Isolation Forest Algorithm. *IEEE ICNEPE*, 2023, pp. 1051–1054. DOI: 10.1109/ICNEPE60694.2023.10429584
11. Особливості аналітичного забезпечення експлуатації інформаційних систем та обладнання в сучасних умовах / А.В. Невзоров та ін. *Журнал «Прикладні питання математичного моделювання»*. 2023. Т. 6. № 1. С. 117–123. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/38308/62-67-PB%20%281%29.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
12. Lakhno, V.A., Kasatkin, D.Y., Skliarenko, O.V., Kolodinska, Y.O. Modeling and Optimization of Discrete Evolutionary Systems of Information Security Management in a Random Environment. *Machine Learning and Autonomous Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies, Springer, Singapore*. 2022. vol 269. p. 9–22. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-16-7996-4_2

Стаття надійшла до редакції 21.04.2025 р.

O. Skliarenko¹, H. Tereshchuk², O. Nikolaievskyi¹, O. Skliarenko¹
¹Private Higher Educational Establishment «European University»
²Taras Shevchenko National University of Kyiv

ANALYTICAL AND SIMULATION MODELING OF A QUEUING SYSTEM BASED ON THE CASE OF A COMPUTER TECHNICAL SUPPORT SERVICE CENTER

Summary

The article examines the impact of analytical and simulation modeling on the operational efficiency of computer technical support service centers under the conditions of increasing demand for IT services and the growing complexity of queuing system (QS) structures. The relevance of applying mathematical methods to optimize the structure of automated service systems is discussed, particularly with the aim of reducing waiting times, increasing the probability of immediate request processing, and minimizing rejection rates.

The study proposes a combination of analytical and simulation modeling approaches, enabling a comprehensive analysis of QS performance using M|M|1 models and stochastic Petri nets. This integrated approach ensures high-precision workload forecasting, identification of system bottlenecks, formation of an optimal service structure, and data-driven decision-making.

The article outlines the request handling mechanisms within a service center, which include three stages: registration, diagnostics, and repair, taking into account the possibility of stream thinning at each phase. The use of modeling for identifying critical system parameters and evaluating performance is demonstrated.

Particular attention is paid to the practical significance of modeling, namely its ability to enhance service reliability and performance, as well as adapt to variable conditions and unstable incoming requests. The findings can be applied to improve service quality in support centers and to implement innovative management approaches in the IT support.

The integration of these modeling techniques facilitates the analysis of resource allocation scenarios and their impact on service continuity. The approach allows for stress testing of system capacity under peak loads, offering valuable insights for contingency planning. Simulation experiments based on real-time parameters enable a more accurate depiction of dynamic behavior within queuing environments. This ensures that management strategies are not only theoretically sound but also practically feasible and responsive to real-world challenges.

Keywords: queuing systems, analytical modeling, simulation modeling, stochastic Petri nets.