

УДК 519.8: 004.6: 004.9

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-20

Олещук Т. С., Гуменюк Л. О.

Луцький національний технічний університет

МОДЕЛЬ РОБОТИ СУПЕРМАРКЕТУ З ДИНАМІЧНИМ КЕРУВАННЯМ ЧЕРГАМИ

У роботі досліджено ключові аспекти оптимізації обслуговування клієнтів. Розроблено алгоритм та виконано програмну реалізацію динамічного управління кількістю функціонуючих кас, що адаптуються до поточної інтенсивності потоку клієнтів та довжини черг, з метою оптимізації часу очікування та завантаженості персоналу. Модель дозволяє оцінити такі ключові показники ефективності, як середній час очікування клієнтів, довжина черг, коефіцієнт завантаження кас, кількість клієнтів, що залишили чергу не дочекавшись обслуговування, та загальна кількість обслужених клієнтів. Результати симуляції можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень щодо кількості та типів кас, стратегій управління персоналом та покращення клієнтського досвіду.

Ключові слова: системи масового обслуговування, моделювання, черга, динамічне керування чергами.

Постановка проблеми. У сучасному світі роздрібно́ї торгівлі, де клієнти цінують свій час, ефективне управління чергами стало критично важливим для успіху супермаркетів. Проблема тривалого очікування в чергах є однією з найпоширеніших причин невдоволення покупців. Довгий час очікування або затримки в обслуговуванні викликають розчарування у покупців, що може призвести до погіршення загального враження від магазину. Неефективне керування чергами не лише дратує клієнтів, але й призводить до втрати потенційного доходу, оскільки покупці можуть покинути чергу або взагалі відмовитися від покупок у магазинах з довгими чергами. З іншого боку, добре організована черга сприяє підвищенню задоволеності клієнтів, а швидке та ефективне обслуговування на касі може безпосередньо збільшити обсяг продажів.

Сучасні споживачі, звикнувши до зручності та швидкості онлайн-магазинів, стають дедалі нетерплячішими щодо часу очікування у фізичних магазинах. Дослідження показують, що покупці готові чекати в черзі обмежений час, після чого їхня лояльність до магазину може знизитися. Тому для супермаркетів надзвичайно важливо не лише скорочувати фактичний час очікування, але й керувати сприйняттям цього часу клієнтами.

Моделювання роботи системи керування чергами є важливим інструментом для розуміння та оптимізації процесів обслуговування в супермаркетах. Воно охоплює аналіз потоку клієнтів, застосування теорії масового обслуговування та імітаційного моделювання, а також використання технологій для покращення ефективності черг. Мета такого моделювання полягає в мінімізації часу очікування, запобіганні скупченню людей та забезпеченні ефективного обслуговування.

Метою роботи є аналіз та розробка імітаційних моделей роботи системи керування чергами в супермаркетах, що дозволяють оцінити ефективність різних структур черг та стратегій динамічного управління касовими вузлами для підвищення якості обслуговування клієнтів та оптимізації роботи персоналу.

Аналіз досліджень і публікацій. В основі ефективної системи управління чергами в супермаркетах лежать кілька принципів. Перш за все, це організація та контроль потоку клієнтів, які очікують на обслуговування. Головна мета полягає у зменшенні часу очікування та забезпеченні справедливого та ефективного обслуговування кожного покупця. Системи керування чергами призначені для оптимізації процесу обслуговування клієнтів шляхом ефективного управління їхнім потоком. Вони спрямовані на те, щоб контролювати потік клієнтів, зменшувати час їх очікування, підвищувати продуктивність працівників та покращувати якість обслуговування [1].

Важливим аспектом є баланс між сподіваннями клієнтів щодо мінімального часу очікування та операційною ефективністю використання ресурсів супермаркету, таких як касири та каси. Ефективні системи керування чергами не лише організують лінії очікування, але й надають інструменти для систематичного управління потоком клієнтів та покращення їхнього досвіду протягом усього процесу обслуговування [2].

Ключовим принципом є також розуміння різниці між сприйнятим та фактичним часом очікування. На задоволеність клієнтів більше впливає те, скільки часу, на їхню думку, вони чекають, ніж реальна тривалість очікування [3]. Тому стратегії керування чергами повинні бути спрямовані не лише на скорочення фактичного часу очікування, але й на покращення психологічного досвіду очікування для клієнтів.

У роздрібній торгівлі, зокрема в супермаркетах, використовується кілька типів систем керування чергами, кожен з яких має свої переваги та недоліки.

Традиційні системи черг, також відомі як лінійні, базуються на принципі «перший прийшов – перший обслужений» [4]. У контексті супермаркетів це зазвичай означає наявність окремих черг до кожної каси, де покупці самостійно обирають, до якої саме черги стати.

Системи керування чергами з однією лінією функціонують за принципом, коли всі клієнти стоять в єдиній, зазвичай змієподібній черзі та прямують до першої вільної каси [5]. Такий підхід повністю усуває необхідність вибору черги, оскільки черга єдина, а розподіл клієнтів до кас відбувається автоматично або через направлення персоналу.

Віртуальні системи черг – це сучасний підхід до організації обслуговування, який усуває потребу у фізичних чергах. Клієнти реєструються дистанційно через мобільний додаток, веб-сайт або інтерактивний кіоск і отримують електронний номер у черзі. Інформація про статус їхнього очікування оновлюється в реальному часі, клієнт бачить своє місце, прогнозований час виклику та наближення своєї черги [6].

Системи черг на основі попереднього запису функціонують за принципом бронювання часу: клієнт заздалегідь обирає конкретний часовий слот для свого візиту [7]. Це дозволяє уникати живих черг і хаотичного накопичення людей у пікові години, створюючи прогнозований і контрольований потік відвідувачів.

Гібридні системи черг – це комплексні рішення, які поєднують функціональні елементи кількох типів чергування, зокрема лінійних, однолінійних, віртуальних і систем попереднього запису [8]. Такий підхід дозволяє максимально адаптувати систему обслуговування до реальних умов та потреб клієнтів.

Системи черг самообслуговування передбачають мінімальну участь персоналу в обслуговуванні клієнтів. У таких системах відвідувачі самостійно проходять усі етапи обслуговування – за допомогою інтерактивних кіосків, сканерів або мобільних додатків [9].

Пріоритетні системи черг організують обслуговування клієнтів не за черговістю прибуття, а за визначеними правилами пріоритету. Це можуть бути, наприклад, учасники програм лояльності, клієнти з меншою кількістю товарів або ті, хто оплатив преміум-доступ до послуг.

Інтелектуальні системи керування чергами базуються на застосуванні штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання для автоматичного аналізу поведінки клієнтів і операційних процесів. Їхній принцип роботи передбачає використання відеоаналітики для відстеження вхідного трафіку, довжини черг та швидкості обслуговування, а також інтеграцію з POS-системами і сенсорами для отримання точних і оперативних даних. Система в режимі реального часу прогнозує навантаження, виявляє затори та генерує рекомендації щодо розподілу персоналу або відкриття додаткових кас [10].

Основні підходи до моделювання управління обслуговуванням клієнтів у супермаркетах широкі – від класичної теорії масового обслуговування до імітаційних та інтелектуальних методів.

Аналіз черг базується на використанні методів теорії масового обслуговування, зокрема моделей типу M/M/1 і M/M/c, що забезпечують базові аналітичні оцінки часу очікування, завантаженості та ефективності обслуговування [11]. Проте через спрощені припущення ці моделі обмежені у застосуванні до реальних сценаріїв. Саме тому сучасні підходи дедалі більше орієнтовані на використання імітаційного моделювання та оптимізаційних алгоритмів.

Дискретна подієва імітація (DES) дозволяє моделювати послідовність дій у черзі з врахуванням варіативності поведінки клієнтів [12], а агентне моделювання (ABM) додає рівень автономності кожному учаснику системи – клієнту чи касиру [13]. Це забезпечує більш реалістичне відображення соціальної динаміки та виникнення небажаних явищ, таких як черги або колективне невдоволення.

Додатково, для пошуку оптимальних конфігурацій кас, що враховують обмеження на персонал, простір та змінні потоки клієнтів, ефективно використовуються евристичні алгоритми – зокрема генетичні (GA) [14] та ройові (PSO) [15]. Перші базуються на еволюційних принципах

природного добору, другі – на моделюванні колективної поведінки. Обидва дозволяють знаходити баланс між витратами та якістю обслуговування навіть у складних багатовимірних умовах.

У поєднанні з методами машинного навчання – такими як навчання з підкріпленням чи рекурентні нейронні мережі – сучасні системи управління чергами поступово трансформуються в адаптивні, самонавчальні платформи [16]. Вони здатні не лише реагувати на зміну ситуації, а й прогнозувати навантаження та змінювати конфігурацію обслуговування в реальному часі.

Викладення основного матеріалу. Об'єктом моделювання є система обслуговування клієнтів у типовому супермаркеті. Ця система включає клієнтський потік, що складається з різноманітних покупців (VIP, звичайні, літні), які прибувають з певною інтенсивністю та мають різні характеристики, такі як тип, пріоритет та терпіння.

До системи також входять касові зони, які поділяються як на звичайні каси, що обслуговуються касирами, так і каси самообслуговування. Клієнти обирають касу з найменшою чергою, а обслуговування в черзі відбувається за пріоритетним принципом. Ключовим компонентом об'єкта є система динамічного управління касами – алгоритм, який в реальному часі аналізує стан черг і приймає рішення про відкриття або закриття кас. Касові вузли можуть бути звичайними касами, касами самообслуговування та тимчасовими (додатковими) звичайними касами, що відкриваються та закриваються залежно від навантаження. Черги формуються з покупців перед кожною активною касою.

Основною метою моделювання є оцінка ефективності роботи супермаркету з динамічним управлінням касами, що включає адаптивне відкриття та закриття тимчасових кас на основі показників черг.

Алгоритм моделі описує систему обслуговування з чітким поділом клієнтів, організацією черг, управлінням касами та постійним спостереженням за процесом.

Клієнти поділяються на три групи: VIP, звичайні та літні люди. Для кожної групи встановлені свої правила – хто має вищий пріоритет, скільки часу триває обслуговування, скільки часу клієнт готовий чекати.

Кількість кас змінюється залежно від навантаження. Якщо покупців стає більше, відкриваються додаткові каси. Якщо менше – частина кас закривається. Клієнти автоматично переходять до нових кас.

Є система спостереження. Вона фіксує довжину черг, збирає дані по кожному типу клієнтів, а також оцінює, як працюють різні типи кас – звичайні та самообслуговування.

Для черг використовується структура даних, яка дозволяє швидко обробляти клієнтів за правилами: спочатку по пріоритету, далі по часу приходу, потім по порядку.

Клієнти з'являються випадково, але з урахуванням заданої частоти. Тип клієнта також обирається випадково.

Обслуговування враховує, що час може трохи змінюватися. Якщо клієнт чекає занадто довго, він може піти. Для кожного типу клієнтів визначено, скільки вони готові чекати. Якщо час перевищено – клієнт залишає чергу.

Алгоритм заснований на теорії масового обслуговування, що описує взаємодію клієнтів із системою черг і процесами обслуговування, охоплюючи надходження, очікування та обробку запитів.

У структуру алгоритму включено елементи пріоритетного планування та принципи адаптивного управління ресурсами, що дозволяє враховувати різні умови обслуговування залежно від типу клієнтів і навантаження на систему.

Функціонування алгоритму реалізовано на основі методів дискретно-подієвого моделювання, у межах якого зміни в системі відбуваються в моменти настання визначених подій.

Програмна реалізація моделі виконана на Python, як найбільш ефективному інструменті завдяки своїй гнучкості, широкому спектру спеціалізованих бібліотек (SimPy, Mesa, AgentPy, Queueing-tool, Salabim) та здатності поєднувати імітаційне моделювання з аналітикою й візуалізацією. Це забезпечує точність моделювання, масштабованість і адаптивність, що критично важливо для комплексного аналізу та оптимізації управління чергами в супермаркетах.

Модель показала, що середній час очікування клієнтів становить 1,95 хвилини. Час очікування переважно залишається низьким, система відкриває додаткові каси при перевищенні порогу в 8 хвилин, максимально до восьми активних кас. Більшість випадків (346 з 480) демонструють зниження часу очікування нижче 3 хвилин, що свідчить про можливість зменшення кількості відкритих кас в періоди низького попиту. Реакція системи на зміни

навантаження має ступінчастий характер і інерційність, що іноді призводить до затримок у балансуванні пікових навантажень. Водночас у 98,1 % випадків підтримується стабільність у кількості активних кас.

Довжина черг варіюється від 0 до 8 осіб з середнім значенням 3,26. Черги швидко змінюються на коротких проміжках часу, що впливає на час очікування. Наприкінці симуляції спостерігається накопичення навантаження. Звичайні каси мають середню завантаженість 59,75 % з різкими коливаннями, тоді як каси самообслуговування працюють стабільніше та з вищою середньою завантаженістю 71,48 %. Відсутність випадків втрати клієнтів свідчить про надійність системи.

Час очікування різниться за категоріями клієнтів та типом кас. На звичайних касах пріоритетні покупці чекають в середньому 2,89 хвилин, літні – 5,28 хвилин. Каси самообслуговування скорочують час для пріоритетних до 2,97 хв і звичайних до 3,24 хв. Для літніх покупців час на самообслуговуванні зростає до 7,58 хв, що свідчить про складнощі в користуванні цим типом кас і вимагає додаткової уваги.

Система динамічного керування чергами ефективно адаптується до змін потоку клієнтів і запобігає втратам клієнтів.

Висновки. Модель дозволяє оцінити такі ключові показники ефективності, як середній час очікування клієнтів, довжина черг, коефіцієнт завантаження кас, кількість клієнтів, що залишили чергу не дочекавшись обслуговування, та загальна кількість обслужених клієнтів. Результати симуляції можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень щодо кількості та типів кас, стратегій управління персоналом та покращення клієнтського досвіду.

Інформаційні джерела

1. How to Choose the Best Queue Management System. URL: <https://waitwell.ca/resources/articles/a-guide-to-queue-management-systems/> (дата звернення: 18.07.2025).
2. Design Principles for Effective Digital Queue Management. URL: <https://www.nemo-q.com/blog/design-principles-digital-queue-management/> (дата звернення: 18.07.2025).
3. A Complete Guide to Queue Management Systems. URL: <https://facit.ai/insights/queue-management-system> (дата звернення: 18.07.2025).
4. Single-Line Queues Vs Multiple-Line Queues: Which One Is Better? URL: <https://www.qminder.com/blog/queue-management/single-line-vs-multiple-line-queues/> (дата звернення: 18.07.2025).
5. Single-Line Queues Vs Multiple-Line Queues: Which One Should You Choose? URL: <https://blog.shrivra.com/single-line-queues-vs-multiple-line-queues-which-one-should-you-choose/> (дата звернення: 18.07.2025).
6. Comprehensive Guide to Queue Management Systems. URL: <https://www.queuebee.com.sg/resources/blog/guide-to-queue-management-system-all-you-need-to-know.php> (дата звернення: 18.07.2025).
7. Retail Queue Management System. URL: <https://qwaiting.com/industries/retail-queue-system> (дата звернення: 18.07.2025).
8. Transforming In-Store Experiences With Modern Queue Management. URL: <https://www.mytotalretail.com/article/transforming-in-store-experiences-with-modern-queue-management/> (дата звернення: 18.07.2025).
9. Enhancing the Customer Experience with Self-Checkout and Queuing. URL: <https://www.cspdailynews.com/snacks-candy/enhancing-customer-experience-self-checkout-queuing> (дата звернення: 18.07.2025).
10. How Intelligent Video Analytics Transformed Retail Stores. URL: <https://www.iotforall.com/how-intelligent-video-analytics-transformed-retail-stores> (дата звернення: 18.07.2025).
11. Application of Queuing Theory: Analysis of Services of Grocery Bazaar (GB) Supermarket, Akesan, Lasu Igando, Lagos State, Nigeria. URL: <https://www.irjweb.com/VII6IRJEdT-9.pdf> (дата звернення: 18.07.2025).
12. Chapter 3 – General Principles. URL: https://www.mi.fu-berlin.de/inf/groups/ag-tech/teaching/SS/L19540_Modeling_and_Performance_Analysis_with_Simulation/03.pdf (дата звернення: 18.07.2025).

13. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC128598/> (дата звернення: 18.07.2025).

14. Genetic Algorithm. URL: <https://www.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm.html> (дата звернення: 18.07.2025).

15. Particle swarm optimization (PSO). URL: https://procaccia.info/courses/15381f16/c_slides/781f16-26.pdf (дата звернення: 18.07.2025).

16. Queue-Learning: A Reinforcement Learning Approach for Providing Quality of Service. URL: <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/16123/15930> (дата звернення: 18.07.2025).

Oleshchuk T., Gumeniuk L.

Lutsk national technical university, Lutsk, Ukraine

MODEL OF A SUPERMARKET WITH DYNAMIC QUEUE MANAGEMENT

The paper investigates key aspects of customer service optimization. A model has been developed and software implementation of dynamic control of the number of operating cash desks that adapt to the current intensity of customer flow and queue length has been performed in order to optimize waiting time and staff workload. The model allows you to evaluate such key performance indicators as the average customer waiting time, queue length, cash register utilization rate, the number of customers who left the queue without waiting for service, and the total number of customers served. The simulation results can be used to make informed decisions about the number and types of cash registers, human resource management strategies, and customer experience.

Keywords: *queuing systems (QMS), modeling, queue, dynamic queue management.*

Дата першого надходження
статті до видання
19.10.2025 р.

Дата прийняття статті
до друку
21.11.2025 р.

Дата
оприлюднення
25.12.2025 р.