

**Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЧЕРГАМИ В
СУПЕРМАРКЕТАХ**

**MODELING THE OPERATION OF A QUEUE MANAGEMENT SYSTEM IN
SUPERMARKETS**

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АВм - 21
Олещук Тарас Святославович

(підпис)

Керівник:
к. т. н., доцент
Гуменюк Лариса Олександрівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2025 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Гуменюк П. О.

(підпис)

Луцьк – 2025

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

О. Ю. Повстяной

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ДРУГОГО (МАГІСТЕРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Олещука Тараса Святославовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Моделювання роботи системи керування чергами в супермаркетах*

Керівник роботи: *к.т.н., доцент Гуменюк Лариса Олександрівна*

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 27 » 06 2025 року N 304/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: « 1 » 12 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: дані з Internet

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Системи управління обслуговуванням клієнтів у супермаркетах. Моделювання управління

обслуговуванням клієнтів у супермаркетах. Аналіз програмного забезпечення для

моделювання черг у супермаркетах. Дискретно-подієве моделювання касового вузла

з різними структурами черг. Модель роботи супермаркету з динамічним керуванням чергами.

Аналіз результатів моделювання роботи супермаркету з динамічним керуванням чергами.

5. Перелік графічного матеріалу :

графічний матеріал виконано у вигляді презентації, яка складається з 16 слайдів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Гуменюк Л. О.		
Розділ 2	Гуменюк Л. О.		
Розділ 3	Гуменюк Л. О.		
Розділ 4	Гуменюк Л. О.		
Розділ 5	Гуменюк Л. О.		
Розділ 6	Гуменюк Л. О.		
Нормоконтроль	Лапченко Ю. С.		
Показник запозичень тексту			
Академічна доброчесність	Федік Л. Ю.		

7. Дата видачі завдання 27.06.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз проблеми за темою роботи та постановка задач	01.09.2025 р.	
2	Аналіз і вибір напрямків дослідження	10.09.2025 р.	
3	Теоретичне дослідження та практична реалізація	20.09.2025 р.	
4	Опис засобів розробки об'єкта проектування	01.10.2025 р.	
5	Загальні висновки та рекомендації	20.10.2025 р.	
6	Оформлення роботи	10.11.2025 р.	
7	Оформлення презентації	20.11.2025 р.	
8	Здача чистового варіанту кваліфікаційної роботи на кафедру	01.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)Олещук Т. С.
(прізвище та ініціали)Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис)Гуменюк Л. О.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Олещук Т. С. Моделювання роботи системи керування чергами в супермаркетах. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Луцький національний технічний університет, Луцьк 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, шести розділів, загальних висновків та рекомендацій, переліку використаних джерел та додатків.

У кваліфікаційній роботі досліджено ключові аспекти оптимізації обслуговування клієнтів. Розроблено модель 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.

Об'єм графічної частини магістерської роботи складає 16 слайдів. Обсяг пояснювальної записки становить 86 друкованих сторінок.

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

ANNOTATION

Oleshchuk T. Modeling the operation of a queue management system in supermarkets. Manuscript.

Master's qualification work of OP "Automation and computer-integrated technologies" specialty 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics. Lutsk National Technical University, Lutsk 2025.

The master's qualification work consists of an introduction, six chapters, general conclusions and recommendations, a list of references and appendices.

The qualification work investigates the key aspects of customer service optimization. A model was developed and software implementation of dynamic control of the number of operating cash desks, which adapt to the current intensity of customer flow and the length of queues, was 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 results of the simulation can be used to make informed decisions about the number and types of cash registers, staff management strategies, and customer experience.

The volume of the graphic part of the master's thesis is 16 slides. The volume of the explanatory note is 86 printed pages.

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

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОБСЛУГОВУВАННЯМ КЛІЄНТІВ У СУПЕРМАРКЕТАХ	11
1.1 Основні принципи роботи систем управління чергами в супермаркетах	12
1.2 Типи систем управління чергами в роздрібній торгівлі	12
1.3 Фактори, що впливають на роботу системи керування чергами в супермаркетах	19
1.4 Ключові показники ефективності для оцінки роботи системи керування чергами в супермаркетах	20
1.5 Сучасні тенденції в системах керування чергами в супермаркетах	22
Висновок до розділу 1	23
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ОБСЛУГОВУВАННЯМ КЛІЄНТІВ У СУПЕРМАРКЕТАХ	25
2.1 Аналітичне моделювання з використанням теорії черг	26
2.2 Дискретна подієва імітація	30
2.3 Агентне моделювання	32
2.4 Оптимізаційні алгоритми	33
2.5 Машинне навчання	35
2.6 Системи реального часу	36
2.7 Відмінності моделювання черг у супермаркетах від класичних моделей	37
Висновок до розділу 2	38
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЧЕРГ У СУПЕРМАРКЕТАХ	40
3.1 Програмне забезпечення для керування чергами (комерційні рішення)	41

	7
3.2 Програмне забезпечення для імітаційного моделювання	43
3.3 Аналітичні інструменти	44
Висновок до розділу 3	46
РОЗДІЛ 4 ДИСКРЕТНО-ПОДІЄВЕ МОДЕЛЮВАННЯ КАСОВОГО ВУЗЛА З РІЗНИМИ СТРУКТУРАМИ ЧЕРГ	48
4.1 Алгоритм роботи моделі	50
4.2 Програмна реалізація моделі	52
Висновок до розділу 4	59
РОЗДІЛ 5 МОДЕЛЬ РОБОТИ СУПЕРМАРКЕТУ З ДИНАМІЧНИМ КЕРУВАННЯМ ЧЕРГАМИ	61
5.1 Алгоритм роботи моделі	62
5.2 Програмна реалізація моделі	63
5.3 Роль та функціонування відеокамер у моделі супермаркету	68
Висновок до розділу 5	70
РОЗДІЛ 6 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СУПЕРМАРКЕТУ З ДИНАМІЧНИМ КЕРУВАННЯМ ЧЕРГАМИ	71
Висновок до розділу 6	76
ВИСНОВКИ	78
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
ДОДАТКИ	87

ВСТУП

Сучасна роздрібна торгівля, невід'ємною частиною якої є супермаркети, відіграє ключову роль у забезпеченні населення товарами першої необхідності та повсякденного попиту. В умовах високої конкуренції та зростаючих вимог споживачів до якості обслуговування, ефективна організація роботи торговельних підприємств набуває критичного значення. Одним із найважливіших аспектів, що безпосередньо впливає на задоволеність клієнтів та економічні показники супермаркету, є процес обслуговування на касових вузлах та управління чергами.

За даними численних досліджень споживчої поведінки, надмірні черги призводять до зниження лояльності клієнтів, відмови від покупок та, як наслідок, до втрати прибутку супермаркетами. Неефективне управління касовими лініями також спричиняє неоптимальне використання трудових ресурсів та простоювання обладнання, що збільшує операційні витрати. Такі ситуації, як пікові навантаження у вечірні години та вихідні дні, проведення промоакцій чи непередбачені збої в роботі кас, лише загострюють проблему, вимагаючи гнучких та оперативних рішень.

В останні роки спостерігається тенденція до пошуку та впровадження технологічних та організаційних інновацій для оптимізації процесу обслуговування в ритейлі. Зростання доступності обчислювальних потужностей та розвиток програмних засобів для моделювання складних систем відкривають нові можливості для аналізу та вдосконалення систем управління чергами. Однак, багато існуючих підходів не повною мірою враховують динамічний характер попиту та специфіку роботи конкретних супермаркетів, що обмежує їх ефективність.

Ці аспекти підкреслюють високий рівень актуальності розробки та дослідження моделей роботи систем керування чергами, здатних адаптуватися до мінливих умов та оптимізувати ключові показники ефективності касової зони

супермаркету. У цьому контексті особливо важливим стає використання методів імітаційного моделювання для оцінки різних стратегій управління чергами та вибору найбільш ефективних рішень.

Метою дослідження 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.

Об'єктом дослідження виступає процес обслуговування покупців на касових вузлах супермаркетів та системи масового обслуговування, що при цьому виникають.

Предметом дослідження є моделі, методи та алгоритми дискретно-подієвого моделювання для аналізу роботи касового вузла супермаркету з різними структурами черг та розробка моделі з динамічним керуванням кількістю активних кас.

Наукова новизна полягає у розробці комплексної імітаційної моделі роботи супермаркету, яка враховує різні типи структур черг (індивідуальні до кожної каси, загальна черга) та реалізує алгоритм динамічного управління кількістю відкритих кас на основі поточного завантаження, що дозволяє адаптувати систему до змін інтенсивності потоку покупців та підвищити ефективність використання ресурсів.

Практична новизна: результати дослідження можуть бути використані для обґрунтування вибору оптимальної конфігурації касової зони супермаркетів, розробки рекомендацій щодо стратегій управління персоналом на касах, а також як інструмент для прогнозування показників якості обслуговування та зниження операційних витрат у сфері роздрібною торгівлі.

У процесі виконання роботи необхідно вирішити такі задачі.

1. Дослідити основні фактори, що впливають на формування черг у касових зонах супермаркетів, та проаналізувати їхній вплив на рівень

задоволеності клієнтів та загальну операційну ефективність торговельного підприємства.

2. Проаналізувати існуючі теоретичні підходи, математичні моделі систем масового обслуговування (СМО) та практичні методи управління чергами, що застосовуються в супермаркетах.

3. Виконати аналіз сучасних програмних засобів для моделювання черг у супермаркетах.

4. Розробити алгоритм та реалізувати дискретно-подієву імітаційну модель касового вузла супермаркету для різних конфігурацій організації черг (індивідуальні черги до кожної каси, одна загальна черга), враховуючи стохастичний характер потоку покупців та часу обслуговування.

5. Розробити алгоритм та реалізувати модель динамічного управління кількістю функціонуючих кас, що адаптуються до поточної інтенсивності потоку клієнтів та довжини черг, з метою оптимізації часу очікування та завантаженості персоналу.

6. Виконати аналіз результатів моделювання роботи супермаркету з динамічним керуванням чергами.

Апробація результатів дослідження. Оpubлікована стаття Олещук Т. С., Гуменюк Л. О. Модель роботи супермаркету з динамічним керуванням чергами. *Перспективні технології та прилади. Збірник статей*. Луцьк: ЛНТУ, 2025. Випуск 27. С. 42-46.

РОЗДІЛ 1

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОБСЛУГОВУВАННЯМ КЛІЄНТІВ У СУПЕРМАРКЕТАХ

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 [1]. Довгий час очікування або затримки в обслуговуванні викликають розчарування у покупців, що може призвести до погіршення загального враження від магазину. Неefективне 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 [2]. 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 [3]. Тому для супермаркетів надзвичайно важливо не лише скорочувати фактичний час очікування, але й керувати сприйняттям цього часу клієнтами [2, 4].

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 [5]. Мета такого моделювання полягає в мінімізації часу очікування, запобіганні скупченню людей та забезпеченні ефективного обслуговування.

1.1 Основні принципи роботи систем управління чергами в супермаркетах

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 [5].

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 [6].

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 [2]. Тому стратегії керування чергами повинні бути спрямовані не лише на скорочення фактичного часу очікування, але й на покращення психологічного досвіду очікування для клієнтів [2, 4].

1.2 Типи систем управління чергами в роздрібній торгівлі

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

1.2.1 Багатолінійні черги (традиційні системи черг)

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

Основною перевагою традиційної системи є її простота. Вона інтуїтивно зрозуміла як для покупців, так і для працівників торговельної точки, що знижує потребу у спеціальному інструктуванні або додаткових технічних засобах. Цей формат чергування давно усталений у суспільстві, тому не викликає спротиву: більшість клієнтів автоматично орієнтуються у процесі.

Проте ця система має суттєві недоліки. Найголовніший – це нерівномірність обслуговування. Оскільки клієнти стоять у різних чергах до різних кас, швидкість обслуговування може бути непередбачуваною. У випадку, якщо касир на одній лінії працює повільніше або у черзі опиняється клієнт з великою кількістю товарів, загальний час очікування значно зростає, хоча сусідня черга може рухатися швидше. Це породжує відчуття несправедливості – клієнти вважають, що обрали «неправильну» чергу, навіть якщо фактична різниця в часі не є критичною [7].

Загалом традиційні черги залишаються популярними через свою звичність і простоту, однак їх ефективність може бути обмеженою в умовах високого трафіку або нерівномірного навантаження на каси.

1.2.2 Системи керування чергами з однією лінією

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

Основною перевагою цієї моделі є забезпечення справедливості: кожен клієнт обслуговується у суворій послідовності прибуття, що ліквідує будь-які

сумніви щодо чесності процесу. Це суттєво знижує психологічний дискомфорт, характерний для систем із кількома чергами, де завжди залишається ризик «неправильного» вибору лінії. Така система також спрощує роботу адміністрації, оскільки для контролю потрібно відстежувати лише одну чергу, що зменшує потребу в додаткових співробітниках або складних алгоритмах обліку [8].

Водночас, недоліком однолінійної черги є її візуальне сприйняття. Оскільки черга часто виглядає довгою, особливо при великому потоці клієнтів, у частини покупців може виникати враження, що очікування займе надто багато часу. Це іноді призводить до того, що люди відмовляються від покупок або шукають інший момент для відвідування магазину.

1.2.3 Віртуальні системи черг (на основі програмного забезпечення)

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. Завдяки цьому він може очікувати не у фізичному просторі біля каси, а у зручному місці – наприклад, прогулюючись торговельним центром, перебуваючи в автомобілі чи навіть дома.

Основною перевагою таких систем є зручність: клієнти не прив'язані до конкретного місця і можуть ефективніше використовувати свій час. Це значно знижує рівень напруження, пов'язаний з очікуванням, оскільки сам факт перебування в черзі менш помітний. Додатково, віртуальні черги підвищують організаційну ефективність – персонал краще бачить динаміку потоку, може гнучко реагувати на навантаження, а система надає детальні аналітичні дані щодо кількості відвідувачів, середнього часу обслуговування, пікових періодів тощо.

Попри переваги, існують і певні обмеження. Головним недоліком є технічна недоступність або цифрова некомпетентність частини клієнтів –

зокрема, літніх людей чи осіб без доступу до смартфонів та Інтернету. Крім того, для повноцінного функціонування системи потрібна відповідна інфраструктура, а саме стабільне мережеве підключення, цифрові термінали, дисплеї з інформацією тощо. Впровадження таких рішень вимагає інвестицій і технічної підтримки, але у довгостроковій перспективі вони значно підвищують якість клієнтського досвіду [9].

1.2.4 Системи черг на основі попереднього запису

Системи черг на основі попереднього запису функціонують за принципом бронювання часу: клієнт заздалегідь обирає конкретний часовий слот для свого візиту. Це дозволяє уникати живих черг і хаотичного накопичення людей у пікові години, створюючи прогнозований і контрольований потік відвідувачів. Такий формат широко використовується в установах, де важлива точність і стабільність навантаження, зокрема у медичних, адміністративних або сервісних структурах, однак поступово інтегрується і в роздрібну торгівлю.

Основна перевага цієї системи – можливість клієнта самостійно планувати час візиту відповідно до свого розкладу, що підвищує комфорт і задоволеність. Для бізнесу це означає більш рівномірний розподіл навантаження протягом дня, оскільки немає перевантаження в пікові години і простоїв у непопулярні періоди. Водночас персонал має змогу чіткіше розподіляти змінний графік, адаптуючись до кількості очікуваних клієнтів у кожному часовому інтервалі [10,11].

Втім, така система теж не позбавлена недоліків. Її негнучкість може бути незручною для тих, хто звик до спонтанних візитів без попереднього планування. Додатковим викликом є ризик неявки, оскільки клієнти, які забронювали час, можуть не прийти, не попередивши, що створює «порожні слоти» і призводить до втрати потенційних продажів або неефективного використання ресурсів персоналу. Для зниження цього ризику необхідні механізми нагадування, штрафні політики чи системи резервних клієнтів. У цілому, попередній запис особливо ефективний у середовищах з передбачуваним попитом або при обслуговуванні високої вартості.

1.2.5 Гібридні системи черг

Гібридні системи черг – це комплексні рішення, які поєднують функціональні елементи кількох типів чергування, зокрема лінійних, однолінійних, віртуальних і систем попереднього запису. Такий підхід дозволяє максимально адаптувати систему обслуговування до реальних умов та потреб клієнтів. Наприклад, у супермаркеті може одночасно функціонувати одна віртуальна черга, яка спрямовує клієнтів або до звичайної каси, або до каси самообслуговування, залежно від наявності та типу клієнта. Інший варіант – комбінація однолінійної системи в години пік з можливістю попереднього запису на менш навантажені періоди.

Перевага гібридного підходу полягає у гнучкості – такі системи здатні обслуговувати як спонтанних клієнтів, так і тих, хто звик планувати візити. Це знижує навантаження на окремі каси, оптимізує розподіл клієнтських потоків, покращує сприйняття черги та дозволяє адаптуватися до різних сценаріїв – наприклад, під час пікових годин, технічних збоїв чи змін у поведінці покупців. Водночас зберігається можливість гнучкого управління персоналом і простору.

Однак саме поєднання різнорідних елементів створює складність. Для ефективної роботи гібридної системи потрібна чітка інтеграція програмного забезпечення, злагоджене функціонування різних форматів кас, адаптоване навчання персоналу та ретельне інформування клієнтів. Без цього система може спричинити плутанину і втрату ефективності. Успішне впровадження гібридної моделі вимагає стратегічного планування та постійного моніторингу, проте за умови якісної реалізації вона дозволяє досягти високого рівня обслуговування і задовольнити максимально широкий спектр запитів [12].

1.2.6 Системи черг самообслуговування

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. У супермаркетах найпоширенішим прикладом

є каси самообслуговування, які дозволяють покупцям швидко здійснити покупку без участі касира.

Головною перевагою є швидкість – усунення необхідності чекати в основній черзі дає змогу пришвидшити обслуговування окремих категорій клієнтів, особливо у випадках невеликої покупки. Це також надає клієнтам більший контроль над процесом, оскільки вони самі обирають темп взаємодії, мають змогу уникати соціальної взаємодії і можуть уникати довгих черг у години пік. З боку супермаркетів впровадження таких систем дозволяє знизити навантаження на персонал і використовувати його ресурс ефективніше [13,14].

Однак повна автономність має і свої ризики. Технічні збої в роботі обладнання, помилки в скануванні, несправність платіжних терміналів або непередбачувана поведінка систем можуть спричинити затримки та потребу в участі персоналу. Додатково, не всі клієнти – особливо старші люди або ті, хто не має досвіду користування технологіями – почуваються впевнено під час самообслуговування, що створює потребу в консультаціях і уповільнює процес.

Ефективність таких систем значною мірою залежить від якості програмного забезпечення, продуманості інтерфейсу, стабільності роботи пристроїв і наявності підтримки для користувачів у режимі реального часу. У разі якісного впровадження вони здатні істотно підвищити продуктивність обслуговування та задоволеність частини клієнтів.

1.2.7 Пріоритетні системи черг

Пріоритетні системи черг організовують 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. Така система дозволяє керувати потоком відвідувачів більш стратегічно, забезпечуючи обслуговування тих, хто потенційно затримається найменше або є ціннішим для бізнесу.

Одна з ключових переваг полягає у підвищенні загальної ефективності, коли клієнти з коротшим часом обслуговування отримують доступ першими,

черга рухається швидше, що зменшує середній час очікування для всіх. Окрім цього, система може служити інструментом заохочення, бо пріоритет для учасників програми лояльності або постійних клієнтів підвищує їхню задоволеність і спонукає інших приєднуватись до таких програм.

Однак головна проблема полягає у сприйнятті справедливості. Клієнти, які не мають пріоритету, можуть почуватися менш цінними або навіть ігнорованими. Це особливо актуально в супермаркетах або сферах масового обслуговування, де очікується рівне ставлення до всіх. Такий ефект може погіршити клієнтський досвід і створити конфліктні ситуації.

1.2.8 Системи керування чергами на основі штучного інтелекту

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.

До ключових переваг належить можливість приймати обґрунтовані рішення на основі актуальних даних, підвищуючи ефективність управління і зменшуючи втрати, пов'язані з перевантаженням або неефективною організацією черг. Інтелектуальні системи також дозволяють реалізувати персоналізовані підходи до клієнтів – наприклад, прогнозувати потреби або автоматично змінювати сценарії обслуговування залежно від ситуації в магазині. Такий підхід сприяє покращенню як операційних показників, так і загального клієнтського досвіду [15].

Проте впровадження таких систем потребує значних капіталовкладень у обладнання, програмне забезпечення та навчання персоналу. Крім того, виникають законодавчі та етичні питання, пов'язані з обробкою персональних

даних та відеозаписів – зокрема, щодо збереження конфіденційності та дотримання норм захисту даних. Успішне впровадження інтелектуальної системи черг вимагає не лише технологічної готовності, а й чітко прописаних політик безпеки та комунікації з клієнтами щодо збору інформації.

1.3 Фактори, що впливають на роботу системи керування чергами в супермаркетах

Продуктивність системи керування чергами в супермаркетах залежить від багатьох факторів.

1. Кількість відкритих кас – це ключовий показник, який впливає на швидкість обслуговування та довжину черг у супермаркетах. Збільшення кількості відкритих кас суттєво скорочує час очікування клієнтів, особливо в години пік, коли навантаження максимальне. Водночас це пов'язано з додатковими витратами на персонал, тому важливо знайти баланс між якістю обслуговування та економічною доцільністю.

Для оптимізації цього процесу все частіше використовуються прогнозуючі системи керування чергами на основі штучного інтелекту. Вони аналізують поточні та історичні дані про потік клієнтів і допомагають визначити оптимальну кількість кас, яку слід відкривати у конкретний момент часу. Це дозволяє підвищити ефективність роботи супермаркету, зменшити черги і при цьому контролювати витрати на персонал.

2. Інтенсивність потоку покупців змінюється залежно від часу доби, дня тижня та сезону. У години пік – наприклад, вечірні години чи вихідні – потік клієнтів зростає, що створює підвищене навантаження на каси. Сезонність (свята, розпродажі) також суттєво впливає на кількість відвідувачів.

Такі коливання потрібно враховувати при плануванні персоналу та ресурсів, щоб уникнути довгих черг і затримок. Неоднорідний потік із змінною

інтенсивністю вимагає складніших моделей прогнозування для точного розподілу навантаження.

Якщо пропускна спроможність кас не збільшується у відповідь на зростання інтенсивності потоку, це призводить до подовження часу очікування, що негативно впливає на задоволеність клієнтів і ефективність роботи супермаркету.

3. Час обслуговування клієнта залежить від кількості товарів, способу оплати та навичок касира, його тривалість може суттєво варіюватися, впливаючи на продуктивність роботи кас і довжину черг. Для оптимізації використовують ефективне навчання касирів, раціональне розташування кас і обладнання, заохочення клієнтів до використання кас самообслуговування при невеликих покупках, а також впровадження експрес-кас для клієнтів з малою кількістю товарів. Це дозволяє зменшити час обслуговування, скоротити довжину черг і час очікування, підвищуючи ефективність роботи супермаркету та покращуючи досвід клієнтів.

4. Планування магазину відіграє ключову роль у керуванні потоком покупців та уникненні скупчень, особливо в зонах кас. Важливо оптимізувати кількість і розташування кас, використовувати навігаційні знаки для спрямування покупців і мінімізувати вузькі місця, які затримують рух. Застосування однорядних змієподібних черг сприяє покращенню організації потоку і забезпечує більшу справедливість у порівнянні з багатолінійними системами, що підвищує загальну ефективність обслуговування.

1.4 Ключові показники ефективності для оцінки роботи системи керування чергами в супермаркетах

Для оцінки ефективності системи керування чергами в супермаркетах застосовують низку ключових показників (KPI), які допомагають вимірювати роботу системи та виявляти зони для покращення:

– середній час очікування – це середній проміжок часу, який клієнт проводить у черзі перед обслуговуванням. Цей показник безпосередньо впливає на задоволеність клієнтів і є одним із головних критеріїв ефективності;

– максимальний час очікування – це найбільший час, який будь-який клієнт провів у черзі. Він важливий для виявлення випадків надмірного очікування, що можуть призводити до негативного досвіду та відтоку клієнтів;

– довжина черги – показник, який відображає кількість клієнтів, що чекають у черзі у будь-який момент. Вимірюється як середня довжина та максимальна у пікові періоди. Довгі черги створюють дискомфорт і можуть відлякувати потенційних покупців;

– рівень відмов від черги – відсоток клієнтів, які залишили чергу, не дочекавшись обслуговування. Цей KPI показує, наскільки система не справляється із навантаженням або наскільки незадоволені клієнти тривалістю очікування;

– завантаженість касирів (рівень використання) – відсоток часу, коли касири активно обслуговують клієнтів. Висока завантаженість свідчить про ефективне використання персоналу, але надмірне навантаження може призводити до втоми і зниження якості обслуговування;

– час обслуговування – середній час, необхідний касиру для повного обслуговування одного клієнта. Цей показник залежить від складності покупок, навичок персоналу та автоматизації процесу;

– пропускна спроможність – кількість клієнтів, обслужених за одиницю часу. Вона характеризує продуктивність системи та здатність справлятися з піковими навантаженнями;

– показники задоволеності клієнтів – оцінка клієнтами їхнього досвіду очікування в черзі. Включає суб'єктивне сприйняття комфорту, швидкості обслуговування, справедливості та загального враження від процесу.

Встановлення чітких орієнтирів для цих KPI має важливе значення для оцінки ефективності стратегій керування чергами та визначення областей для

покращення. Ці орієнтири повинні враховувати очікування клієнтів та бізнес-цілі супермаркету. Наприклад, багато клієнтів не готові чекати більше 4-5 хвилин, а цільова довжина черги може бути встановлена на рівні не більше 4 осіб [16]. Рівень використання касирів необхідно збалансувати для забезпечення ефективності без перевантаження персоналу.

Комплексне застосування цих КРІ дозволяє не лише виявити слабкі місця у системі керування чергами, але й оптимізувати роботу супермаркету для підвищення якості обслуговування та ефективності бізнесу.

1.5 Сучасні тенденції в системах керування чергами в супермаркетах

Сучасні системи керування чергами в супермаркетах все активніше інтегрують штучний інтелект для прогнозування утворення черг і динамічного розподілу персоналу. Завдяки алгоритмам машинного навчання і комп'ютерному зору системи відстежують потік покупців, визначають вузькі місця та автоматизують оплату, що дозволяє ефективно управляти навантаженням у режимі реального часу.

Великий аналіз даних дає змогу глибоко досліджувати поведінку покупців, виявляти години пік і потенційні проблемні зони. Інтеграція даних з різних джерел, таких як система підрахунку відвідувачів і POS (точка продажу), допомагає приймати оптимальні рішення щодо кількості відкритих кас, розподілу персоналу та покращення планування магазину для зменшення часу очікування.

Персоналізовані рішення і мобільні додатки стають важливим інструментом у керуванні чергами, даючи можливість клієнтам приєднуватися до віртуальних черг, отримувати сповіщення про статус очікування та вибрати оптимальні варіанти обслуговування. Це підвищує рівень задоволеності та лояльності покупців.

Системи самообслуговування продовжують набирати популярність, пришвидшуючи оплату при невеликих покупках і звільняючи персонал для складніших завдань. Важливим є баланс між касами самообслуговування і традиційними касами, щоб задовольнити різноманітні потреби клієнтів і підвищити загальну продуктивність супермаркету.

Висновок до розділу 1

Проведено аналіз існуючих методів та систем управління чергами, що застосовуються в супермаркетах для оптимізації обслуговування клієнтів. Розглянуті підходи охоплюють як традиційні моделі (багатолінійні та однолінійні черги), так і інноваційні рішення: віртуальні черги, системи самообслуговування, гібридні моделі та інтелектуальні системи на основі штучного інтелекту (ШІ). Кожен із цих форматів має свої переваги – від простоти реалізації до гнучкості та персоналізації – проте вимагає врахування технічних, організаційних та етичних обмежень.

Управління чергами в супермаркетах базуються на комплексному аналізі факторів, таких як інтенсивність клієнтського потоку, час обслуговування, планування торговельного простору та інтеграція з POS-системами. Сучасні технології, зокрема алгоритми ШІ та аналітика даних, дозволяють прогнозувати навантаження, динамічно розподіляти ресурси й автоматизувати процеси. Ключові показники ефективності (KPI), такі як середній час очікування, довжина черги та рівень відмов, слугують інструментами для оцінки успішності систем та виявлення зон для вдосконалення.

Сучасні тенденції акцентують на інтеграції мобільних додатків для віртуальних черг, розширенні можливостей самообслуговування та використанні адаптивних моделей, стійких до динамічних змін у поведінці клієнтів. Водночас успішне впровадження цих рішень вимагає балансу між

технологічними інноваціями, економічною доцільністю та дотриманням норм конфіденційності даних.

Огляд методів і систем моделювання роботи систем керування чергами в супермаркетах свідчить про тенденцію до інтеграції класичних теоретичних підходів із сучасними людиноцентричними стратегіями, що враховують психологічне сприйняття часу очікування клієнтами. Такий підхід створює міцну теоретичну базу для розробки гібридних або інтелектуальних систем, які здатні адаптуватися до особливостей конкретного магазину, одночасно підвищуючи операційну ефективність і якість обслуговування.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ОБСЛУГОВУВАННЯМ КЛІЄНТІВ У СУПЕРМАРКЕТАХ

Управління чергами в супермаркетах є важливим чинником операційної ефективності та задоволеності клієнтів, особливо в умовах підвищеної конкуренції в роздрібній торгівлі. Тривале очікування не лише негативно впливає на враження покупців, а й знижує рівень продажів та шкодить репутації торговельного закладу. Традиційні методи регулювання кількості відкритих кас (такі як фіксовані графіки чи емпіричні правила) виявляються малоефективними при змінному потоці клієнтів.

Аналіз таких ситуацій 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. 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, а агентне моделювання (ABM) додає рівень автономності кожному учаснику системи – клієнту чи касиру. 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) та ройові (PSO). 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. Вони здатні не лише реагувати на зміну ситуації, а й прогнозувати навантаження та змінювати конфігурацію обслуговування в реальному часі.

Отже, моделювання обслуговування клієнтів у супермаркетах – це складне завдання, яке об'єднує різні підходи: математичні розрахунки, комп'ютерне моделювання та розумні алгоритми.

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

2.1 Аналітичне моделювання з використанням теорії черг

Теорія масового обслуговування надає аналітичний інструментарій для проектування та оцінки продуктивності систем черг, включаючи супермаркети [17]. Вона допомагає зрозуміти та спрогнозувати поведінку черг, такі як час очікування, довжина черги та коефіцієнт використання обслуговуючих пристроїв.

2.1.1 Класичні моделі $M/M/1$ та $M/M/c$

Модель $M/M/1$ є базовою моделлю теорії масового обслуговування, яка використовується для аналізу одноканальних систем [18, 19] Модель $M/M/1$ базується на наборі суттєвих припущень, які визначають її математичний апарат та сферу застосування.

По-перше, передбачається, що процес надходження клієнтів до системи (Markovian Arrival) описується пуассонівським розподілом з параметром λ , що характеризує середню інтенсивність вхідного потоку. Це припущення означає,

що інтервали між надходженнями клієнтів є незалежними випадковими величинами, які мають експоненційний розподіл.

По-друге, час обслуговування кожного клієнта (Markovian Service) також підпорядковується експоненційному розподілу з параметром μ , який визначає середню швидкість обслуговування. Це передбачає відсутність пам'яті у процесі обслуговування – тривалість поточного обслуговування не залежить від попередніх.

Ключовою характеристикою моделі є наявність лише одного обслуговуючого пристрою (One Server), що обмежує пропускну здатність системи. Черга в такій системі вважається необмеженої довжини (Infinite Queue Capacity), що дозволяє всім клієнтам чекати обслуговування скільки завгодно довго без втрат.

Дисципліна обслуговування передбачає строгий принцип «першим прийшов – першим обслужений» (First Come First Serve), що виключає будь-які пріоритети чи спеціальні правила обслуговування. Такі припущення дозволяють отримати аналітичні вирази для основних характеристик системи, хоча й накладають певні обмеження на її практичне застосування у реальних умовах.

Для моделі M/M/1 існують такі математичні формули [19].

Інтенсивність навантаження ρ (повинна бути < 1 для стабільної системи) – формула (2.1):

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}, \quad (2.1)$$

де λ – параметр, що характеризує середню інтенсивність вхідного потоку,

μ – параметр, що визначає середню швидкість обслуговування.

Середня кількість клієнтів у системі (L) – формула (2.2):

$$L = \frac{\rho}{1-\rho}. \quad (2.2)$$

Середня кількість клієнтів у черзі (L_q) – формула (2.3):

$$L_q = \frac{\rho^2}{1-\rho}. \quad (2.3)$$

Середній час перебування клієнта в системі (W) – формула (2.4):

$$W = \frac{1}{\mu-\lambda}. \quad (2.4)$$

Середній час очікування в черзі (W_q) – формула (2.5):

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu \cdot (\mu - \lambda)} = \frac{\rho}{\mu - \lambda}. \quad (2.5)$$

Ця модель застосовується для аналізу окремих касових ліній у супермаркетах, дозволяючи оцінити такі показники продуктивності, як середній час очікування та довжина черги.

Модель M/M/c є розширенням моделі M/M/1 для багатоканальних систем, де «с» – кількість паралельних обслуговуючих пристроїв, що обслуговують одну спільну чергу [18, 20]. Припущення цієї моделі аналогічні M/M/1, за винятком наявності кількох серверів. Модель M/M/c ефективно використовується для моделювання ситуацій з кількома касами в супермаркеті.

Для опису різних моделей черг використовується нотація Кендалла (A/S/c/K/N/D). Перший елемент A описує характер потоку прибуття клієнтів. Найчастіше використовуються літери «M» для позначення пуассонівського процесу та «D» для детермінованого (фіксованого) часу прибуття. Також зустрічається «G» – загальний розподіл.

Другий параметр S вказує на розподіл часу обслуговування. Як і для A , « M » означає експоненційний розподіл, « D » – фіксований час обслуговування, « G » – довільний розподіл.

Третя позиція c означає кількість обслуговуючих пристроїв (кас). Наприклад, $c = 1$ вказує на одноканальну систему, а $c > 1$ – на багатоканальну.

Четвертий параметр K визначає максимальну кількість клієнтів у системі, включаючи тих, хто обслуговується. Якщо місткість необмежена, параметр опускається або позначається як ∞ .

П'ятий елемент N задає розмір джерела заявок, тобто максимальну кількість потенційних клієнтів, які можуть згенерувати запит до системи.

Останній параметр D описує дисципліну черги – правило, за яким клієнти вибираються з черги для обслуговування. Найпоширеніше значення – FCFS (First Come First Serve), але можливі й інші варіанти, як LCFS (останній прийшов – перший обслуговується) чи пріоритетна система.

Ця нотація дозволяє легко класифікувати як прості моделі на кшталт $M/M/1$, так і складніші, наприклад, $G/M/3/10/100/LCFS$ [21].

Моделі $M/M/1$ та $M/M/c$ мають певні обмеження. Припущення про експоненційний час обслуговування та пуассонівський потік надходжень можуть не повністю відповідати реальним сценаріям у супермаркетах.

2.1.2 Багатоканальні системи з пріоритетами

Теорія масового обслуговування також дозволяє моделювати багатоканальні системи з пріоритетами, такі як експрес-каси для клієнтів з невеликою кількістю товарів [22]. Ці системи передбачають різні класи клієнтів з різними пріоритетами обслуговування, що може бути досягнуто шляхом введення різних інтенсивностей надходження та обслуговування для кожного класу [23].

Наприклад, експрес-каси можуть бути змодельовані як окремий канал обслуговування для клієнтів, які купують менше певної кількості товарів. При цьому для клієнтів з більшою кількістю товарів існують звичайні каси. Кожен

тип кас може мати власні параметри надходження та обслуговування, що дозволяє аналізувати ефективність такої пріоритетної системи.

Впровадження пріоритетних систем має на меті покращення задоволеності клієнтів для певних сегментів, наприклад, для тих, хто здійснює невеликі покупки, шляхом скорочення їхнього часу очікування. Однак ефективність таких систем залежить від інтенсивності надходження та швидкості обслуговування різних типів клієнтів, а також від обраного порогу класифікації (наприклад, максимальної кількості товарів для експрес-каси) [17, 23].

2.2 Дискретна подієва імітація

Дискретна подієва імітація (DES) є потужним методом моделювання систем як послідовності подій, що відбуваються в дискретні моменти часу [24, 25]. На відміну від аналітичних моделей теорії масового обслуговування, DES дозволяє більш реалістично моделювати черги в супермаркетах, враховуючи випадковий характер надходжень та часу обслуговування, а також послідовність індивідуального досвіду кожного клієнта.

2.2.1 Події

У контексті моделювання черг у супермаркетах динаміка системи описується як послідовність дискретних подій, кожна з яких змінює стан моделі. Основними подіями, що визначають хід моделювання, є прибуття клієнта, початок обслуговування та завершення обслуговування. Ці події обробляються в точному хронологічному порядку з використанням черги подій (event queue), що забезпечує коректну імітацію реального функціонування касової зони.

Прибуття клієнта означає, що новий клієнт підходить до каси або зони очікування. Система перевіряє, чи є вільний касир; якщо так – одразу ініціюється наступна подія: початок обслуговування. Якщо всі касири зайняті, клієнт стає в чергу відповідно до заданої дисципліни обслуговування (наприклад, FCFS).

Початок обслуговування фіксує момент, коли клієнт переходить із черги до касира. У цей момент планується подія завершення обслуговування через певний інтервал часу, який може бути заданий випадковою величиною з вибраного розподілу (часто експоненційного, нормального чи емпіричного, базованого на реальних спостереженнях).

Завершення обслуговування означає, що клієнт залишає систему, а касир стає вільним. Якщо в черзі є інші клієнти, обробка продовжується з новим початком обслуговування для наступного.

Ці три типи подій формують цикл обробки, який дозволяє моделі адаптуватися до змінної інтенсивності потоку клієнтів, кількості касирів та конфігурації самої системи. Завдяки цьому можна тестувати різні сценарії – як, наприклад, ефект від додавання нової каси або зміна логіки розподілу клієнтів між чергами – у віртуальному середовищі, без втручання в реальні процеси. Це дає змогу виявити вузькі місця, оцінити ефективність змін і прийняти обґрунтовані управлінські рішення на основі результатів симуляції.

2.2.2 Алгоритм Next-event time advance

Алгоритм Next-event time advance є базовим механізмом дискретно-подієвого моделювання (DES), що керує перебігом симуляції шляхом стрибків симуляційного часу від однієї події до наступної. Замість того, щоб покроково оновлювати стан системи на кожній часовій мітці, як у реальному часі або фіксованому часовому кроці, модель пересувається лише в моменти, коли справді щось відбувається – тобто, коли трапляються події, що змінюють стан системи.

Ключовим елементом цього підходу є список майбутніх подій (Future Event List, FEL) – впорядкована за часом структура даних, що містить усі заплановані події разом із моментами їх реалізації. Події включають прибуття клієнта, початок і завершення обслуговування, генерацію нових подій тощо.

Алгоритм працює за наступним циклом. По-перше, з FEL вибирається найближча за часом подія. Це забезпечує точну хронологічну обробку. Далі

симуляційний годинник переміщується до моменту цієї події – симуляція фактично «перескакує» періоди без активності, підвищуючи ефективність обчислень. Після цього виконується обрана подія та оновлюється стан системи, наприклад, клієнт стає в чергу або завершує обслуговування, звільняючи касира. Насамкінець, якщо поточна подія породжує нові – наприклад, після завершення обслуговування потрібно запланувати прибуття наступного клієнта чи новий початок обслуговування – ці події формуються й додаються назад до FEL.

Такий підхід забезпечує ефективне моделювання складних систем із великою кількістю елементів, де події трапляються нерівномірно в часі. Він дозволяє моделі «фокусуватися» лише на змінах стану системи, що особливо цінне в прикладних задачах, таких як управління чергами в супермаркетах, логістичних центрах, або в телекомунікаційних мережах [25, 26].

2.3 Агентне моделювання

Агентне моделювання (Agent-Based Modeling, ABM) є сучасним підходом до дослідження складних систем, заснованим на імітації взаємодії автономних агентів. На відміну від класичних методів, які аналізують систему в цілому, ABM фокусується на окремих сутностях, їхній поведінці та впливі один на одного. Це дозволяє відтворити реальні процеси з високою точністю, враховуючи індивідуальні особливості кожного учасника системи.

Агентне моделювання ґрунтується на взаємодії трьох частин. Це агенти, середовище та явища, що виникають у результаті їхньої взаємодії. Агенти є активними елементами моделі, які можуть уособлювати як конкретних людей, наприклад клієнтів у магазині, так і технічні пристрої на зразок касових апаратів або навіть абстрактні об'єкти, як-от логістичні вузли. Кожен агент має власні характеристики, зокрема стан, цілі та обмеження. Він діє за певними правилами, наприклад за алгоритмом вибору черги. Агент може взаємодіяти з іншими агентами і з навколишнім середовищем.

Для клієнтів супермаркету це можуть бути правила вибору черги (наприклад, вибір найкоротшої черги, випадковий вибір), рішення про відмову від черги або про вихід з черги після очікування.

Поведінка касирів може включати швидкість обслуговування, графіки перерв та рішення про відкриття чи закриття кас залежно від довжини черг.

Моделювання різних стратегій вибору черги серед клієнтів може суттєво вплинути на довжину черг та час очікування [27, 28].

Середовище, у якому функціонують агенти, може бути як фізичним (наприклад, планування простору магазину), так і абстрактним (як-от структура соціальної мережі). Воно не лише впливає на поведінку агентів, а й змінюється під впливом їхніх дій, утворюючи динамічну взаємозалежність.

У межах агентного моделювання можуть застосовуватися мережеві моделі для відтворення просторової організації супермаркету та моделювання переміщення клієнтів між його зонами. Такі моделі дозволяють досліджувати як взаємодії між самими клієнтами, зокрема утворення заторів у проходах, так і взаємодії між клієнтами та середовищем, наприклад аналізувати тривалість перебування в окремих відділах. Складна поведінка системи з'являється через багато простих дій агентів. Ці явища не прописані заздалегідь, а виникають природно під час взаємодій. Показовим прикладом є утворення черг, які не є наслідком централізованого керування, а виникають із сукупності індивідуальних рішень клієнтів і персоналу [27-29].

2.4 Оптимізаційні алгоритми

Для оптимізації кількості та конфігурації кас у супермаркетах використовують низку оптимізаційних алгоритмів, серед яких особливу увагу приділяють генетичним алгоритмам (GA) та ройовим алгоритмам (PSO).

2.4.1 Генетичні алгоритми (GA)

Генетичні алгоритми (GA) – це еволюційний метод оптимізації, який моделює процес природного відбору для пошуку найкращих рішень у складних задачах. У контексті оптимізації кількості та розміщення кас у супермаркетах, GA починають з формування початкової популяції різних варіантів конфігурації кас. Кожен варіант кодується у вигляді певного набору параметрів, що описують, скільки кас відкрито, де вони розташовані та як розподілені ресурси.

Для оцінки ефективності кожного варіанту застосовується функція пристосованості, яка може враховувати такі фактори, як середній час очікування клієнтів у чергах, завантаженість касирів, а також операційні витрати супермаркету. Це дозволяє кількісно порівнювати різні конфігурації і відсортувати їх за ступенем ефективності.

Далі реалізується процес відбору, де з популяції вибираються найбільш пристосовані рішення, які мають більше шансів «спаруватися» і створити нове покоління. За допомогою операції кросинговеру (рекомбінації) відбувається обмін частинами інформації між двома обраними рішеннями, що дозволяє поєднати їхні найкращі характеристики. Мутації – випадкові зміни у параметрах рішень – вводять різноманітність, допомагаючи уникнути локальних оптимумів і досліджувати ширший простір можливих варіантів.

У процесі повторення цих кроків (ітерування поколінь) популяція поступово «еволюціонує», наближаючись до оптимальної конфігурації кас. При цьому алгоритм може враховувати реальні обмеження, наприклад максимальну кількість доступного персоналу, розміри торгової площі або технічні характеристики обладнання.

Такий підхід дозволяє ефективно шукати рішення навіть у складних і багатовимірних задачах, де традиційні методи оптимізації не дають результатів через великий простір можливостей і нелінійність системи [30, 31].

2.4.2 Ройові алгоритми (PSO)

Ройові алгоритми, або алгоритми рою частинок (PSO), це метод оптимізації, що базується на імітації колективної поведінки природних роїв, таких як зграї птахів чи косяки риб. У задачах оптимізації кас у супермаркетах PSO застосовують для пошуку найкращої кількості та розташування кас, де кожна частинка рою відповідає одному можливому рішенняю.

У процесі роботи алгоритму кожна частинка рухається у багатовимірному просторі пошуку, оновлюючи своє положення на основі двох факторів: власного найкращого досягнутого результату та найкращого результату, знайденого усім роєм. Ця взаємодія дозволяє частинкам швидко зближуватися до оптимальних або близьких до них рішень [32].

Подібно до генетичних алгоритмів, PSO ефективно справляється зі складними задачами оптимізації, особливо коли простір рішень великий і нелінійний. Завдяки здатності швидко адаптуватися до змінних умов, ройові алгоритми часто використовують для підвищення ефективності обслуговування та зменшення часу очікування клієнтів у супермаркетах.

2.5 Машинне навчання

Методи машинного навчання також застосовуються для керування чергами в супермаркетах, забезпечуючи адаптивність і точність у прийнятті рішень [33].

Один із підходів – навчання з підкріпленням (RL), зокрема Q-learning. У цьому випадку система виступає в ролі агента, який взаємодіє з динамічним середовищем супермаркету, навчаючись оптимально відкривати або закривати каси. Агент поступово формує стратегію через багаторазові ітерації, отримуючи винагороду, наприклад, за скорочення середнього часу очікування клієнтів або підвищення загального рівня обслуговування. Такий механізм дає змогу моделі

адаптуватися до різних ситуацій у реальному часі та приймати гнучкі, контекстно залежні рішення.

Ще один напрям – застосування передбачувальних моделей на основі LSTM-мереж (Long Short-Term Memory), які спеціалізуються на обробці часових рядів. Вони здатні враховувати часові залежності в даних про клієнтопотік, дозволяючи точно прогнозувати навантаження на каси впродовж дня або тижня. Такі прогнози дозволяють заздалегідь планувати розклад касирів і кількість відкритих кас у пікові години, що зменшує ймовірність утворення черг та підвищує ефективність роботи персоналу.

2.6 Системи реального часу

Системи реального часу забезпечують оперативне реагування на зміну навантаження в супермаркеті, дозволяючи гнучко керувати чергами завдяки аналізу поточних даних [34, 35].

Калманівські фільтри відіграють ключову роль у такому підході. Це алгоритми, які дозволяють оцінити реальний стан системи на основі зашумлених або неповних даних. У контексті супермаркету такі моделі використовуються для корекції прогнозів навантаження на каси. При цьому враховуються актуальні дані з сенсорів, наприклад лічильників клієнтів на вході або біля кас. Завдяки ітеративному підходу, який включає етапи прогнозування та оновлення, фільтр Калмана забезпечує точніше уявлення про поточний стан, ніж прості моделі.

Доповненням до цього є механізм динамічного відкриття та закриття кас. На основі встановлених порогів для довжини черг або інтенсивності потоку клієнтів система в реальному часі ухвалює рішення про відкриття нових кас для зменшення навантаження або про закриття зайвих кас за умов його зниження. Це дозволяє оптимізувати використання ресурсів і мінімізувати час очікування клієнтів без втручання оператора.

2.7 Відмінності моделювання черг у супермаркетах від класичних моделей

Моделювання черг у супермаркетах значно складніше, ніж традиційне моделювання черг, оскільки включає багатофакторну динаміку поведінки клієнтів та специфіку торгового середовища.

Перш за все, важливо враховувати складну поведінку покупців. Вони не лише стоять у чергах, а й взаємодіють із простором магазину, обирають черги за різними стратегіями, можуть відмовлятися від черги або змінювати рішення, реагуючи на чергу, ціну чи настрій. Просте моделювання черг здебільшого оперує припущенням про однорідність клієнтської поведінки та фіксовані правила входу в чергу.

Ще однією важливою відмінністю є просторовий контекст. У супермаркетах фізичне розташування товарів, кас і проходів суттєво впливає на маршрути покупців, час, витрачений у залі, та рішення щодо черг. Тому застосовуються мережеві та просторові моделі, які дозволяють дослідити взаємодію клієнтів у межах фізичного простору магазину. У звичайних моделях черг такі аспекти, як правило, ігноруються.

Модель має враховувати взаємодію кількох типів агентів. Це не лише клієнти, а й касири або автоматизовані системи, які змінюють режим роботи залежно від навантаження. Агентно-орієнтоване моделювання дає змогу динамічно відкривати або закрити каси, змінювати правила обслуговування та прогнозувати наслідки управлінських рішень – чого зазвичай не передбачає просте моделювання.

Ще одна характерна особливість – нестационарність. У супермаркетах потік клієнтів змінюється протягом дня, тижня або сезону. Для цього використовують складні стохастичні процеси, зокрема нестационарні пуассонівські процеси (NHPP), які дозволяють точно моделювати пікові години,

хвилеподібну активність або вплив зовнішніх подій. Традиційні моделі часто базуються на припущенні про постійну інтенсивність потоку.

Потрібно враховувати різні типи кас, такі як звичайні, експрес-каси та каси самообслуговування. Кожен тип відрізняється параметрами обслуговування, часом транзакції та привабливістю для різних клієнтів. Розподіл клієнтів між цими касами значно впливає на загальний потік, баланс завантаження та ефективність черг.

Нарешті, на супермаркети часто впливають зовнішні фактори. Це можуть бути акції, сезонні розпродажі, маркетингові тригери або такі події, як карантин чи святкові дні. Ці змінні повинні бути інтегровані в модель, щоб забезпечити реалістичну симуляцію, тоді як просте моделювання черг зазвичай не враховує такі аспекти.

Загалом, моделювання черг у супермаркетах потребує інтеграції стохастичного аналізу, агентного підходу, просторового моделювання та розуміння поведінки споживачів для створення адекватної та ефективної моделі управління.

Висновок до розділу 2

Управління процесами обслуговування клієнтів у супермаркетах є задачею, що вимагає поєднання класичних аналітичних підходів, імітаційного моделювання та сучасних інтелектуальних алгоритмів. Аналітичні моделі типу $M/M/1$ та $M/M/c$ забезпечують базовий рівень аналізу, проте їх застосування обмежується спрощеними припущеннями щодо розподілів і потоків. Значно ширші можливості надають імітаційні підходи: дискретна подієва імітація дозволяє точно моделювати події у часі, а агентне моделювання – індивідуальну поведінку клієнтів і персоналу.

Інтеграція оптимізаційних алгоритмів (GA, PSO) з імітацією підвищує точність і ефективність, дозволяючи знаходити найкращі конфігурації кас.

Інтелектуальні методи, зокрема навчання з підкріпленням та глибокі нейромережі (наприклад, LSTM), забезпечують адаптацію до змін попиту та підвищують оперативність прийняття рішень. Застосування систем реального часу (IoT, фільтри Калмана) підсилює здатність реагувати на динаміку клієнтських потоків.

Найкращий результат дає поєднання різних методів. Наприклад, якщо об'єднати агентне моделювання (ABM), оптимізаційні алгоритми (PSO) та прогнозування навантаження за допомогою нейромереж (LSTM), можна досягти і економії коштів, і кращого обслуговування клієнтів.

Для побудови сучасної системи управління обслуговуванням у супермаркетах необхідне комплексне поєднання теоретичних моделей, симуляційних технік та інтелектуальних технологій, що дозволяє створити адаптивні, масштабовані та ефективні рішення.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЧЕРГ У СУПЕРМАРКЕТАХ

Для ефективного моделювання роботи системи керування чергами в супермаркетах критично важливим є обґрунтований вибір відповідного програмного забезпечення (ПЗ). Цей вибір має ґрунтуватися на ретельному аналізі цілей моделювання, необхідного рівня деталізації та наявних ресурсів. Вибір ПЗ безпосередньо впливає на точність моделі, гнучкість сценаріїв, швидкість отримання результатів та можливості їх візуалізації й подальшого використання в управлінських рішеннях.

Існують програмні рішення, спрямовані на безпосереднє управління потоками клієнтів у реальному часі, які поєднують інструменти моніторингу, аналітики та інтеграції з внутрішніми процесами торговельного середовища.

Для дослідження поведінки системи в різних умовах ефективним є імітаційне моделювання, яке враховує стохастичний характер обслуговування та дозволяє аналізувати взаємодію елементів складної динамічної структури.

Теоретичний аналіз, заснований на класичних моделях теорії черг, забезпечує базове аналітичне підґрунтя для оцінки ефективності обслуговування, особливо у випадках із типовою або спрощеною конфігурацією системи. Усі ці підходи взаємодоповнюють один одного, формуючи основу для побудови точних і прикладних моделей функціонування супермаркету.

Окрему увагу слід приділити підходу до моделювання, що базується на програмуванні. Такий підхід забезпечує гнучкість у проєктуванні моделей, дозволяє точно задавати логіку поведінки об'єктів, модифікувати параметри системи та автоматизувати обчислення. Він особливо ефективний у випадках, коли необхідно враховувати специфічні умови функціонування, які важко реалізувати за допомогою готових програмних рішень.

Серед мов програмування найбільш поширеною для таких задач є Python. Ця мова поєднує простоту синтаксису з потужними можливостями для наукових і прикладних розрахунків, має широку підтримку з боку спільноти, розвинену документацію та інтегрується з іншими інструментами обробки даних і візуалізації.

Спеціалізовані бібліотеки Python поєднують можливості дискретно-подієвого, агентного та аналітичного моделювання. Вони дозволяють створювати адаптивні моделі з різним рівнем деталізації, що враховують індивідуальну поведінку клієнтів, структуру магазину, розклад персоналу та інші критично важливі параметри. Такий підхід особливо зручний для досліджень, створення пробних моделей і розробки симуляцій, адаптованих до конкретних умов.

Програмне забезпечення, призначене для моделювання черг у супермаркетах, умовно розділимо на програмне забезпечення для керування чергами, програмне забезпечення для імітаційного моделювання та аналітичні інструменти.

3.1 Програмне забезпечення для керування чергами (комерційні рішення)

Основна задача такого ПЗ полягає у тому, щоб оптимізувати потік відвідувачів, зменшити час, який вони витрачають на очікування, і підвищити загальну якість обслуговування. Це особливо важливо для місць із великим напливом людей, де традиційна організація черг часто призводить до невдоволення та втрати клієнтів.

Сучасні комерційні системи пропонують комплексний підхід до управління чергами, поєднуючи різні функції, які дозволяють максимально автоматизувати та покращити процес обслуговування. Наприклад, віртуальні

черги дають змогу клієнтам зареєструватися у списку очікування через інтернет або мобільний додаток, що усуває потребу стояти фізично в черзі.

Оновлення інформації в реальному часі дозволяє клієнтам бачити свій статус у черзі, а автоматичні сповіщення – отримувати нагадування або повідомлення про наближення їхньої черги. Аналітика, що вбудована в ці системи, дає можливість бізнесу оцінити ефективність обслуговування, виявити проблемні ділянки та оптимізувати роботу персоналу.

Використання хмарних технологій у таких рішеннях робить їх гнучкими і масштабованими. Підприємства можуть швидко адаптувати систему під свої потреби, розширювати її на кілька точок продажу чи віддалено керувати процесами, не залучаючи додаткових технічних ресурсів. Це особливо актуально для мереж супермаркетів або роздрібних мереж, де централізоване управління є критичним для підтримки стабільної якості обслуговування.

Мобільні додатки, що часто доповнюють такі системи, значно підвищують зручність для клієнтів.

Серед найбільш популярних систем виділимо наступні.

1. WaitWell – це система, орієнтована на організацію черг у державних установах, медичних закладах та великих сервісних центрах. Вона дозволяє клієнтам реєструватися у віртуальну чергу через мобільний додаток або термінали самообслуговування, що мінімізує фізичне очікування. WaitWell також пропонує можливості планування візитів заздалегідь, що допомагає розподілити потік відвідувачів рівномірно протягом дня. Система надає інструменти аналітики, які допомагають керівникам відстежувати ефективність обслуговування і приймати рішення для оптимізації процесів [36].

2. Qminder – це більш універсальне рішення, яке широко застосовується в роздрібній торгівлі, медичних центрах, банках і сервісних службах. Воно відрізняється інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом та інтеграцією з мобільними пристроями, що дозволяє персоналу і клієнтам легко взаємодіяти із системою. Qminder підтримує віртуальні черги, надає можливість віддаленого управління,

сповіщень в режимі реального часу, а також детальну аналітику з оцінкою якості обслуговування. Крім того, система пропонує інструменти для роботи зі зворотним зв'язком клієнтів [37].

3. Wavetec – це масштабована модульна платформа, яка підходить для великих організацій із складною інфраструктурою, таких як мережі супермаркетів, банки, аеропорти. Wavetec включає цифрові табло, інформаційні кіоски самообслуговування, системи бронювання і віртуальні черги. Її особливістю є висока гнучкість і можливість інтеграції з різними зовнішніми системами (POS, CRM). Wavetec також надає розвинену аналітику для оптимізації потоків клієнтів і оцінки роботи персоналу, а хмарна архітектура забезпечує надійність і масштабованість [38].

3.2 Програмне забезпечення для імітаційного моделювання

Програмне забезпечення для імітаційного моделювання використовується для створення точних цифрових копій систем керування чергами, що дозволяє аналізувати їхню продуктивність і прогнозувати поведінку в різних умовах. Завдяки можливості враховувати складні взаємодії, мінливість параметрів і динамічний характер процесів, такі інструменти допомагають тестувати різноманітні сценарії без ризику для реальної інфраструктури. Це сприяє оптимізації планування, укомплектуванню персоналом та налаштуванню операційних процесів для досягнення максимальної ефективності.

1. Arena – популярне програмне забезпечення для дискретно-подієвого моделювання, яке дозволяє детально описувати логіку черг, час обслуговування, змінність потоків клієнтів і ресурсів. Arena використовується для аналізу виробничих і сервісних процесів, зокрема в роздрібній торгівлі, допомагаючи визначати вузькі місця, оптимізувати розподіл персоналу і прогнозувати вплив різних змін на загальну продуктивність системи [39].

2. AnyLogic – більш універсальна платформа, що поєднує дискретно-подієве, агентне та системне моделювання. Вона ідеально підходить для складних систем з динамічними взаємодіями між клієнтами, персоналом та обладнанням. AnyLogic дозволяє створювати інтерактивні моделі, що підтримують аналіз різних стратегій управління чергами, оцінку ризиків і адаптацію до змін у режимі реального часу [40].

3. FlexSim – спеціалізований інструмент для 3D-моделювання виробничих і сервісних процесів, зокрема систем черг. Завдяки візуалізації процесів у тривимірному просторі, користувачі можуть краще розуміти потоки клієнтів, відстежувати навантаження на ресурси і оптимізувати розташування обладнання та персоналу. FlexSim підтримує складні сценарії, включаючи багаторівневі черги і взаємодію між різними відділами супермаркету [41].

3.3 Аналітичні інструменти

Аналітичні інструменти застосовуються для математичного моделювання та аналізу систем керування чергами. Вони дозволяють реалізовувати теоретичні моделі черг, виконувати розрахунки ключових показників ефективності та досліджувати вплив різних параметрів на роботу системи. Ці інструменти особливо корисні для розуміння фундаментальних принципів теорії черг і швидкого аналізу складних систем.

1. MATLAB – потужний інструмент для чисельних обчислень і моделювання, який забезпечує широкий спектр функцій для створення моделей теорії черг. Він має зручні засоби для візуалізації результатів, що допомагає краще розуміти поведінку системи. MATLAB часто використовується для академічних досліджень і розробки прототипів завдяки своїй стабільності та великій кількості вбудованих функцій [42].

2. Python – потужна і гнучка мова програмування, широко використовувана для моделювання систем черг у супермаркетах. Вона пропонує

цілий ряд спеціалізованих бібліотек, які дозволяють створювати моделі різного рівня складності, від простих структур даних до детального агентного чи дискретно-подієвого моделювання з візуалізацією [43].

3. SimPy – це бібліотека для дискретно-подієвого моделювання, яка імітує процеси як функції-генератори Python. Вона зручна для моделювання активних елементів системи – клієнтів і касирів – та забезпечує ресурси з обмеженою пропускною здатністю (касами, серверами). SimPy підтримує різні режими виконання подій, включно з можливістю покрокового управління, що робить її ефективним інструментом для тестування операцій супермаркетів у реальному чи прискореному часі [44].

4. Mesa – фреймворк для агентного моделювання, який дозволяє створювати складні системи, де кожен клієнт і касир моделюються як окремий агент із власною поведінкою. Mesa включає вбудовані компоненти для просторової організації та планування взаємодії агентів, що робить її корисною для вивчення впливу індивідуальних рішень на загальну динаміку черг [45].

5. AgentPy – ще один фреймворк для агентного моделювання, орієнтований на інтерактивну розробку і аналіз моделей у середовищах Python і Jupyter. Він поєднує можливості побудови моделей, числових експериментів і візуалізації, що допомагає детально досліджувати поведінку систем черг [46].

6. Queue – вбудований у Python модуль, що реалізує базові типи черг: FIFO, LIFO і пріоритетні. Цей інструмент особливо корисний у багатопотокових програмах, де потрібно безпечно організувати обмін даними між потоками, але має обмежені можливості для складного моделювання поведінки системи.

– Queueing-tool – спеціалізована бібліотека для моделювання мереж черг із застосуванням подієвого підходу. Вона базується на графах (черги та сервери представлені у вигляді вузлів і ребер), що дає змогу моделювати складні системи з кількома касами та різними маршрутами обслуговування [47].

– Qtheory – бібліотека, яка реалізує класичні розрахунки теорії черг, з можливістю зчитування даних з CSV-файлів. Вона корисна для швидкого теоретичного аналізу і розрахунку показників продуктивності системи.

7. Salabim – об’єктно-орієнтована бібліотека для дискретно-подієвого моделювання з підтримкою 2D/3D анімації. Вона дозволяє створювати складні моделі з моніторингом станів, ресурсів і черг, що корисно для візуального аналізу і презентації результатів [48].

Вибір конкретної бібліотеки залежить від задачі: для глибокого, детального моделювання поведінки окремих клієнтів і персоналу підходять Mesa і AgentPy, для процесного моделювання – SimPy та Salabim, а для швидкого аналізу простих структур – Queue або Qtheory. Якщо потрібно моделювати комплексні мережі з кількома точками обслуговування, доцільно використовувати Queueing-tool.

Python пропонує широкий інструментарій для побудови моделей черг у супермаркетах, що допомагає підвищити ефективність обслуговування та оптимізувати роботу кас.

Висновок до розділу 3

Ефективне моделювання систем черг у супермаркетах базується на інтегрованому підході, що об’єднує управління в реальному часі, імітаційне моделювання та аналітичні методи. Комерційні рішення (WaitWell, Qminder, Wavetec) забезпечують практичну оптимізацію потоку клієнтів та оперативну аналітику, ідеально пристосовані для впровадження в торгових мережах.

Імітаційні платформи (Arena, AnyLogic, FlexSim) дають можливість тестувати різні сценарії роботи та оптимізувати ресурси, тоді як аналітичні інструменти (MATLAB, Python) слугують теоретичною основою для оцінки продуктивності систем.

Серед існуючих підходів Python вирізняється як найбільш ефективний інструмент 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.

Отже, використання Python із відповідними бібліотеками є оптимальним рішенням для наукових досліджень, практичного моделювання та впровадження систем керування чергами в супермаркетах, що дозволяє поєднати теоретичні розрахунки з реальними експлуатаційними задачами та забезпечити ефективне управління клієнтськими потоками.

РОЗДІЛ 4

ДИСКРЕТНО-ПОДІЄВЕ МОДЕЛЮВАННЯ КАСОВОГО ВУЗЛА З РІЗНИМИ СТРУКТУРАМИ ЧЕРГ

В умовах зростаючої конкуренції на ринку та підвищених вимог споживачів до оперативності обслуговування, особливої значущості набуває проблема оптимізації функціонування систем масового обслуговування. Типовим прикладом таких систем є супермаркети з касовими вузлами. У них важливо раціонально організувати потоки клієнтів і черги. Це допомагає зменшити середній час очікування, а також забезпечується рівномірне навантаження персоналу.

Основним елементом таких систем є моделі черг, які визначають логіку обслуговування клієнтів і розподіл навантаження між касовими апаратами. У науковій літературі [49, 50] виділяють наступні ключові типи організації черг.

Системи з окремими чергами для кожної каси (MQMS) – клієнти самостійно обирають лінію, що часто призводить до нерівномірного розподілу навантаження та збільшення часу очікування через неефективний вибір.

Системи з жорстко закріпленими чергами (FIFO) – кожна каса має свою впорядковану чергу, що забезпечує передбачуваність, але може викликати затримки у разі повільного обслуговування на одній із кас.

Системи з єдиною чергою та декількома касами (SQMS) – клієнти стоять у спільній лінії та направляються до першої вільної каси.

Типи черг в супермаркетах проілюстровані на рисунку 4.1.

Для оцінки переваг і недоліків зазначених підходів до організації черг побудовано модель, що дозволяє порівняти їхню ефективність у типових умовах функціонування супермаркету.

Модель реалізована з використання бібліотеки SimPy із застосуванням мови програмування Python, що забезпечує точне відтворення динаміки черг та використання ресурсів. Основна увага приділяється порівнянню варіантів з

погляду середнього часу очікування клієнтів, рівня завантаження касирів і масштабу накопичення черг з метою виявлення найбільш ефективної організаційної структури обслуговування.

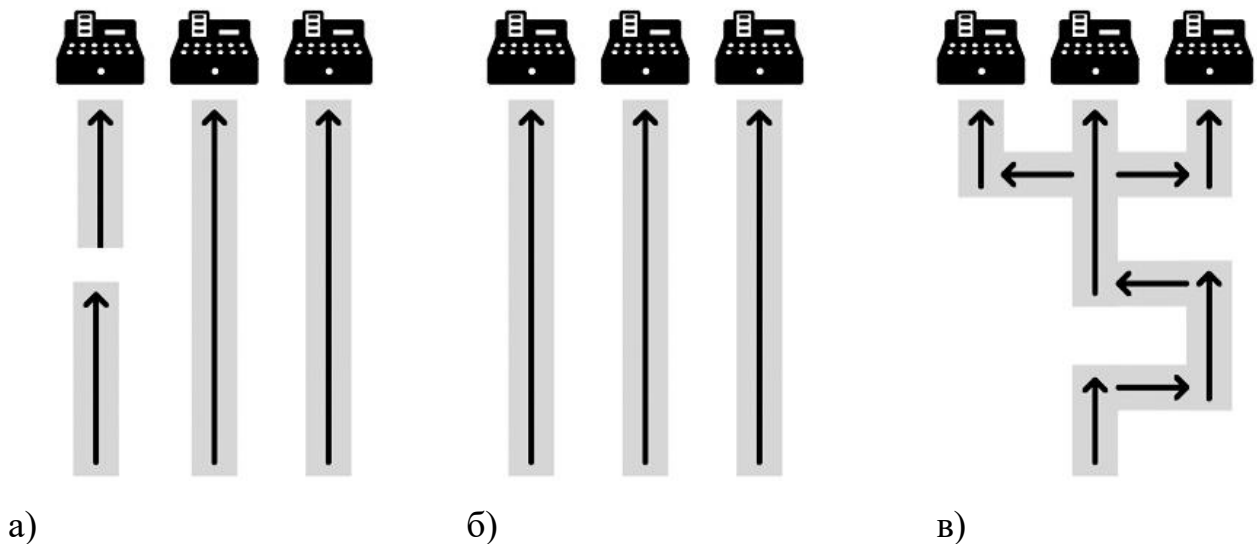


Рисунок 4.1 – Типи черг в супермаркетах: а) окремі черги для кожної каси (MQMS); б) жорстко закріплені черги (FIFO); в) єдина черга на декілька кас (SQMS)

Розглянуто такі типи систем:

- 1) тип 1 – N незалежних черг до N кас із вибором найменш завантаженої,
- 2) тип 2 – N незалежних черг з випадковим вибором черги клієнтом,
- 3) тип 3 – одна спільна черга до N кас (централізована модель).

Кожна симуляція триває 60 хвилин, а прибуття клієнтів моделюється за експоненційним розподілом зі змінним середнім інтервалом (від 0,5 до 1,1 хв). Час обслуговування задається рівномірним розподілом у межах від 2 до 5 хвилин.

Для досягнення статистично достовірних результатів проведено 100 незалежних запусків для кожної конфігурації. Результати симуляції збиралися за трьома основними метриками, а саме: середнім часом очікування клієнтів у

черзі, середнім рівнем завантаження касових апаратів та середньою довжиною черги, зваженою за часом перебування клієнтів у системі.

Симуляція реалізована з додатковими механізмами моніторингу ресурсів, що забезпечує точне вимірювання використання кас та динаміки черг. Візуалізація результатів включає KDE-графіки, гістограми, стовпчасті діаграми та boxplot-аналіз, що дозволяє комплексно порівняти системи обслуговування.

4.1 Алгоритм роботи моделі

4.1.1 Вхідні параметри симуляції

Модель симуляції налаштовується із фіксованими параметрами. Кількість кас (NUM_CASHIERS) становить 7 для всіх типів чергових систем. Кожен запуск триває 60 хвилин (SIM_TIME). Клієнти прибувають із середнім інтервалом у 0,5 хвилини згідно з експоненційним розподілом (ARRIVAL_RATE). Час обслуговування клієнтів моделюється рівномірним розподілом у межах від 2 до 5 хвилин (SERVICE_TIME). Кожна конфігурація черг проходить 100 незалежних симуляційних запусків (NUM_RUNS) з метою збору достовірної статистики.

4.1.2 Алгоритм одного запуску симуляції

Симуляція кожного окремого запуску передбачає п'ять послідовних етапів.

Перший етап – ініціалізація середовища. Створюється середовище симуляції (simpy.Environment) та об'єкт системи обслуговування згідно з обраним типом організації черг. Ініціалізується список для фіксації часу очікування клієнтів.

Другий етап – це генерація потоку клієнтів. Клієнти прибувають у систему з інтервалами, згенерованими за експоненційним законом. Кожен клієнт запускає окремий процес обробки, який імітує його перебування в системі.

Третій етап – обробка клієнта (`handle_customer`). Кожен клієнт фіксує момент прибуття та, залежно від типу системи: тип 1 (`Shortest Queue`) – обирає касу з найменшою чергою; тип 2 (`Random Queue`) – випадково обирає одну з кас; тип 3 (`Single Queue`) – стає в загальну чергу та очікує на першу вільну касу.

Після вибору ресурсу клієнт очікує доступу, фіксує початок обслуговування, обчислює час очікування та проходить обслуговування протягом випадкового інтервалу з діапазону `SERVICE_TIME`. Після завершення звільняє касу.

Запуск середовища. Симуляція виконується до досягнення встановленого часу (`env.run(until=SIM_TIME)`), після чого всі активні процеси завершуються.

Збір метрик. Розраховуються середній час очікування, середнє завантаження кас та середня довжина черги з урахуванням часової зваженості. Значення зберігаються для подальшої агрегації.

4.1.3 Алгоритм багаторазових запусків та статистичний аналіз

Алгоритм багаторазових запусків моделі передбачає статистичну обробку результатів для кожного з трьох типів систем обслуговування. Для кожного типу виконується серія з 100 незалежних запусків симуляції. Протягом кожного запуску фіксуються основні показники: середній час очікування клієнтів, середній рівень завантаження кас і середня довжина черги, що дозволяє оцінити продуктивність системи за об'єктивними метриками (глобальні списки `results`, `utilizations`, `queue_lengths`). Окрім цього, усі індивідуальні значення часу очікування акумулюються в окрему вибірку (`wait_distributions`) для подальшого аналізу емпіричного розподілу.

Після завершення всієї серії запусків проводиться статистичне опрацювання накопичених даних. Розраховуються середні значення кожної метрики разом зі стандартною похибкою середнього (`SEM`), що дає змогу оцінити достовірність отриманих результатів. Для наочності виконуються візуалізації, а саме: побудова кривих щільності розподілу (`KDE`) часу очікування дозволяє виявити характерні особливості розподілу, стовпчасті діаграми

демонструють середні значення з похибками для кожного типу системи, а box plots ілюструють варіабельність результатів між окремими запусками, відображаючи діапазон коливань та наявність потенційних викидів.

4.2 Програмна реалізація моделі

На початку коду задаються основні змінні NUM_CASHIERS, SIM_TIME, ARRIVAL_RATE, SERVICE_TIME, NUM_RUNS. Ці параметри дозволяють регулювати кількість кас, тривалість моделювання, інтенсивність потоку клієнтів (де ARRIVAL_RATE – це середній інтервал, а не λ , яка обчислюється як $1/ARRIVAL_RATE$), час обслуговування та кількість симуляцій відповідно.

Для збору метрик використовуються словники results, wait_distributions, utilizations, queue_lengths, реалізовані як defaultdict(list), що автоматично створює порожній список при першому зверненні за ключем.

Ключовою структурою для точного збору статистики є клас MonitorableResource, який розширює функціональність simpy.Resource. Він містить змінні busy_time, що накопичує час зайнятості ресурсу, та queue_sum, яка акумулює добуток довжини черги на тривалість цієї довжини. Змінні last_change і last_queue_update фіксують моменти останніх змін у стані сервера або черги. Метод _update_metrics() викликається при кожному request() або release() ресурсу й обчислює тривалість з моменту останнього оновлення, додаючи відповідні значення до busy_time і queue_sum. Методи utilization(until) та average_queue_length_over_time(until) дозволяють обчислити середнє завантаження ресурсу та середню довжину черги, зважену за часом, на завершення симуляції.

Клас ServiceSystem інкапсулює логіку роботи системи. Його ініціалізатор приймає середовище env, кількість серверів num_servers та тип системи system_type. Якщо тип системи – 3 (Single Queue), створюється один об'єкт MonitorableResource з місткістю, рівною кількості кас. Для типів 1 (Shortest

Queue) і 2 (Random Queue) створюється список з `num_servers` окремих ресурсів місткістю 1. Метод `serve_customer()` реалізує обслуговування клієнта. Методи `choose_server_randomly()` та `choose_best_server()` реалізують логіку вибору сервера для типів 2 і 1 відповідно.

Функція `simulate_run(system_type)` є ядром симуляції одного запуску. Вона створює середовище `env` та відповідний об'єкт `ServiceSystem`. У межах цієї функції визначається процес `customer_generator()`, який використовує `random.exprovariate (1/ARRIVAL_RATE)` для генерації інтервалів між прибуттями клієнтів згідно з експоненційним розподілом. Кожен клієнт при генерації активує підпроцес `handle_customer(cid)`, який фіксує час прибуття (`arrival_time`) та обирає ресурс залежно від типу системи. Далі клієнт очікує ресурс за допомогою конструкції `with resource.request() as req, yield req`, обчислює час очікування (`wait_time`) і додає його до `wait_times_run`. Після цього виконується `yield system.serve_customer()`, а ресурс автоматично звільняється. По завершенню процесу запускається `env.run(until=SIM_TIME)`, що приводить до моделювання всіх подій протягом заданого часу. Після цього розраховуються метрики `avg_wait`, `utilization` і `avg_queue`, які додаються до глобальних списків результатів.

Множинні запуски реалізовані подвійним циклом, а саме: спочатку за типами систем `for t in [1, 2, 3]`, потім – `for i in range(NUM_RUNS)`, що гарантує 100 незалежних симуляцій для кожної конфігурації. Отримані метрики накопичуються в словниках для подальшого аналізу.

Візуалізація результатів реалізована за допомогою бібліотек `matplotlib`, `seaborn` та `scipy`. Щільність розподілу (KDE) будується або через `seaborn.histplot`, або з використанням `scipy.stats.gaussian_kde`, що дозволяє оцінити форму розподілу часу очікування. Стовпчасті діаграми відображають середні значення метрик із смугами похибок (`ycerr`) для візуалізації довіри до результатів. `Box Plots` демонструють розкид значень метрик по окремих запусках, що дозволяє оцінити стабільність системи.

У завершальному блоці звіту розраховуються середні значення усіх метрик, їх стандартні похибки та максимальний час очікування серед усіх клієнтів з усіх запусків, після чого результати виводяться у консоль та відображаються на графіках, що дозволяє провести повноцінний порівняльний аналіз ефективності трьох моделей черг.

Ілюстрація розрахунків середніх значень усіх метрик, їх стандартних похибок та максимального часу очікування серед усіх клієнтів з усіх запусків, виведених у консоль, приведена на рисунку 4.2.

```

--- Результати (усереднені по 100 симуляціях) ---
(Похибка - стандартна похибка середнього)
Тип 1 (N неупор. черг):
  Середній час очікування в черзі: 3.92 +/- 0.15 хв
  Макс. час очікування в черзі (з усіх клієнтів): 17.10 хв
  Середнє використання кас: 87.17 +/- 0.60%
  Середня довжина черги (зважена за часом): 1.14 +/- 0.05

Тип 2 (N розд. черг):
  Середній час очікування в черзі: 5.20 +/- 0.13 хв
  Макс. час очікування в черзі (з усіх клієнтів): 32.08 хв
  Середнє використання кас: 80.93 +/- 0.52%
  Середня довжина черги (зважена за часом): 1.60 +/- 0.05

Тип 3 (1 спільна черга):
  Середній час очікування в черзі: 2.03 +/- 0.15 хв
  Макс. час очікування в черзі (з усіх клієнтів): 11.98 хв
  Середнє використання кас: 90.25 +/- 0.57%
  Середня довжина черги (зважена за часом): 4.22 +/- 0.33

```

Рисунок 4.2 – Вивід в термінал: середні значення усіх метрик, їх стандартні похибки та максимальний час очікування серед усіх клієнтів з усіх запусків

Повний код роботи скрипту приведений в Додатку А.

Візуалізація залежності щільності розподілу від часу очікування приведена в Додатку Б1.

Тип 1 – N неупорядкованих черг із вибором найменш завантаженої. Цей тип передбачає, що клієнти самостійно обирають касу з найменшою чергою.

Середній час очікування: 3,92 хв (з помірною варіацією між симуляціями).

Завантаження кас: 87,17 % – високе, але можливі перекося через нерівномірний розподіл клієнтів.

Довжина черги: 1,14 особи (у середньому).

Недоліки:

– клієнти обирають чергу на момент приходу, що може призводити до швидкого розбалансування системи,

– максимальний час очікування сягає 17,10 хв, що свідчить про можливі локальні затори.

Застосування:

– добрий варіант для систем, де важливо візуальне сприйняття черг (наприклад, каси самообслуговування).

Тип 2 – роздільні черги з випадковим вибором каси. Клієнти обирають касу навмання, незалежно від довжини черги.

Середній час очікування: 5,20 хв (найгірший показник).

Завантаження кас: 80,93 % – нижче, ніж у типу 1, через неефективний розподіл.

Довжина черги: 1,60 особи (середньозважена).

Максимальний час очікування: 32,08 хв (найвищий серед усіх типів).

Недоліки:

– велика дисперсія – деякі клієнти чекають дуже довго, інші проходять відразу,

– низька ефективність через прості частини кас.

Застосування:

– може працювати лише за дуже низького навантаження (наприклад, малі магазини).

Тип 3 – єдина спільна черга до всіх кас. Клієнти стоять в одній черзі та направляються на першу вільну касу.

Середній час очікування: 2,03 хв (найкращий показник).

Завантаження кас: 90,25 % – майже повне використання ресурсів.

Довжина черги: 4,22 особи (середньозважена, але це компенсується швидкістю обслуговування).

Максимальний час очікування: 11,98 хв (менше, ніж у інших типах).

Переваги:

- найбільш справедливий розподіл часу очікування,
- мінімальні простоя кас,
- найменший ризик локальних заторів.

Недоліки:

– візуально довша черга може сприйматися як негативний фактор, хоча на практиці система ефективніша.

Застосування:

– ідеальний варіант для банків, кол-центрів – будь-де, де важлива швидкість і стабільність.

Візуалізація виконаних розрахунків за типами черг в супермаркетах приведена в Додатку Б2.

Проаналізуємо отримані результати середніх значень.

1. Середній час очікування.

Найефективнішою є система типу 3, де середній час очікування становить приблизно 2 хвилини. Це свідчить про перевагу централізованої черги, яка забезпечує швидке обслуговування за рахунок оптимального розподілу клієнтів.

Система типу 1 демонструє помірний результат ($\approx 3,9$ хв), оскільки стратегія вибору найкоротшої черги не завжди гарантує мінімальний час очікування через нерівномірність обслуговування.

Найменш ефективним є тип 2 ($\approx 5,2$ хв), де випадковий розподіл клієнтів призводить до нерівномірного навантаження кас, що збільшує загальний час очікування.

2. Середнє завантаження кас.

Тип 3 знову демонструє найкращий показник ($\approx 90\%$), що підтверджує високу ефективність системи з єдиною чергою. Така організація мінімізує простої та забезпечує майже повне завантаження ресурсів.

Для типу 1 завантаження кас становить $\approx 87\%$, що свідчить про часткову неефективність жадібного вибору черг клієнтами.

У типі 2 спостерігається найнижчий рівень використання ($\approx 81\%$), оскільки нерівномірний розподіл клієнтів веде до простою частини кас.

3. Середня довжина черги.

Хоча тип 3 має найбільшу середню довжину черги ($\approx 4,2$ особи), це компенсується високою швидкістю обслуговування. Єдина черга забезпечує стабільний потік клієнтів до всіх кас.

У типі 1 і типі 2 черги коротші ($\approx 1,1$ та $\approx 1,6$ особи відповідно), проте це не свідчить про їхню ефективність. Короткість черг у цих системах обумовлена їхньою фрагментацією та менш оптимальним розподілом клієнтів, що призводить до загального збільшення часу очікування.

Розподіли середніх результатів наведені в Додатку Б3.

Проаналізуємо отримані результати розподілів середніх значень.

1. Розподіл середнього часу очікування.

Дослідження виявило суттєві відмінності між трьома типами організації черг.

Тип 3 (єдина спільна черга) демонструє найнижчий медіанний час очікування (≈ 2 хв) та найменший розкид значень, що свідчить про стабільність і високу ефективність системи. Відсутність тривалих затримок підтверджує перевагу централізованого розподілу клієнтів.

Тип 2 (розділені черги) показав найгірші результати: медіана часу очікування становить ≈ 5 хв, а широкий розподіл вказує на непередбачуваність обслуговування. Це пояснюється нерівномірним навантаженням кас через випадковий розподіл клієнтів.

Тип 1 (неупорядковані незалежні черги) займає проміжне положення: медіана нижча, ніж у типу 2, проте більший розкид свідчить про нестабільність у часі очікування.

Висновок: система з єдиною чергою (тип 3) є оптимальною для мінімізації часу очікування, тоді як розділені черги (тип 2) – найменш ефективні.

2. Розподіл середнього використання кас.

Аналіз завантаження кас підтверджує переваги централізованого управління чергами.

Тип 3 виділяється найвищим і найстабільнішим рівнем використання (медіана $\approx 0,95$), що свідчить про майже повне завантаження ресурсів.

Тип 1 також демонструє високу ефективність, але з трохи нижчими показниками (медіана $\approx 0,90$), що пояснюється частковим дисбалансом через самостійний вибір черг клієнтами.

Тип 2 має найнижче завантаження (медіана $\approx 0,85$) із значним розкидом, що вказує на неефективне використання кас через нерівномірний розподіл клієнтів.

Висновок: єдина черга (тип 3) забезпечує найкраще використання ресурсів, тоді як розділені черги (тип 2) призводять до простоїв і неефективності.

3. Розподіл середньої довжини черги.

Довжина черги не завжди корелює зі швидкістю обслуговування.

Тип 3 має найдовші черги (медіана ≈ 3 особи, максимум до 5+), що є логічним наслідком єдиної черги. Однак швидкий обіг компенсує цей фактор, забезпечуючи мінімальний час очікування.

Тип 1 характеризується коротшими чергами (медіана < 1), але нестабільністю через нерівномірний розподіл клієнтів.

Тип 2 демонструє аналогічну довжину черг (≈ 1 особа), проте через неефективне обслуговування загальний час очікування вищий.

Висновок: довжина черги в системі типу 3 не є недоліком, оскільки вона компенсується швидким обслуговуванням. Навпаки, короткі черги в типах 1 і 2 не гарантують ефективності через часті простой кас.

Висновок до розділу 4

Використання системи з єдиною спільною чергою (тип 3) є найдоцільнішим для застосування в контексті кас самообслуговування. Основним аргументом на користь цього вибору є найнижчий середній час очікування серед усіх розглянутих типів (2,03 хв), що вказує на високу швидкість обслуговування. Крім того, саме тип 3 забезпечує майже повне завантаження кас (понад 90 %), що свідчить про оптимальне використання ресурсів та мінімізацію простоїв. Водночас, незважаючи на візуально довшу чергу, цей недолік повністю компенсується стабільністю та справедливістю розподілу клієнтів, оскільки кожен обслуговується у порядку живої черги до першої вільної каси. У випадку кас самообслуговування, де клієнт взаємодіє безпосередньо з системою, саме така централізована модель забезпечує найвищу ефективність та простоту використання.

У разі типу 1, де клієнт самостійно обирає найменш завантажену касу, спостерігається помірний середній час очікування (приблизно 3,9 хв) та високе завантаження ресурсів, що вказує на задовільну адаптивність системи до змінного потоку. Такий підхід дозволяє покупцям реалізовувати індивідуальні стратегії вибору черги, що є психологічно важливим у середовищах, де переважає суб'єктивне сприйняття справедливості й контролю. Водночас, наявність високого максимуму часу очікування (до 17 хв) вказує на ризик локальних заторів, що може бути прийнятним лише у разі візуального контролю з боку персоналу.

Своєю чергою, тип 2, який передбачає випадковий вибір каси, демонструє найнижчу ефективність серед усіх моделей, що виражається як у найвищому середньому часі очікування (понад 5 хв), так і в найменшому завантаженні кас. Однак навіть ця система може бути доцільною у невеликих магазинах або за умов низького навантаження, де спрощення логіки обслуговування виправдовує зниження продуктивності. У таких контекстах випадковий вибір черги не створює критичних затримок, а простота процесу стає визначальним фактором зручності.

Загалом, результати дослідження свідчать про доцільність використання єдиної черги (тип 3) у середовищах, де важлива операційна ефективність, стабільність та автоматизація, зокрема в касах самообслуговування. Натомість моделі з розподіленими чергами (типи 1 і 2) можуть бути використані у середовищах із присутністю персоналу, де важливу роль відіграє гнучкість, візуальне сприйняття черг і суб'єктивний комфорт клієнтів.

РОЗДІЛ 5

МОДЕЛЬ РОБОТИ СУПЕРМАРКЕТУ З ДИНАМІЧНИМ КЕРУВАННЯМ ЧЕРГАМИ

Ефективне управління потоками клієнтів та мінімізація часу очікування в чергах є критично важливими завданнями для сучасних супермаркетів. Неоптимальна кількість працюючих кас може призводити або до надмірних витрат на персонал та простою обладнання, або до тривалого очікування клієнтів, зниження їхньої лояльності та потенційної втрати доходу через залишені покупки. Одним із підходів до вирішення цієї проблеми є впровадження системи динамічного управління кількістю активних кас, що адаптується до поточного навантаження.

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.

5.1 Алгоритм роботи моделі

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.

5.2 Програмна реалізація моделі

5.2.1 Вхідні дані

Вхідні дані моделі поділяються на постійні параметри симуляції, які задаються перед запуском симуляції, та динамічні характеристики агентів, що визначаються під час симуляції.

Постійні параметри симуляції встановлюються на початку симуляції та впливають на її загальну поведінку.

До них належать `SIMULATION_STEPS` – загальна тривалість симуляції в хвилинах (60×8 для 8 годин роботи). Змінна `num_regular_checkouts` визначає початкову кількість звичайних кас (задано 3), а `num_self_checkouts` – початкову кількість кас самообслуговування (в нашому випадку 2). Параметр `max_checkouts` обмежує максимальну кількість одночасно відкритих кас (в моделі 10).

Інтенсивність прибуття клієнтів задається параметром `lambda_param` для експоненційного розподілу часу між прибуттями, що розраховується як $1,0/\text{MEAN_INTERARRIVAL_TIME}$. Параметр `open_threshold` – це середній час очікування в хвилинах, при перевищенні якого відкривається нова тимчасова каса (8 хвилин), а `close_threshold` – середній час очікування, при зниженні нижче якого розглядається закриття тимчасової каси (3 хвилини). Змінна `idle_close_steps` визначає кількість послідовних хвилин простою тимчасової каси для її можливого закриття (задано 15 хвилин). Параметр `camera_check_interval` задає частоту в хвилинах, з якою модель збирає дані про довжину черг через монітори (2 хвилини).

Динамічні характеристики агентів визначаються або присвоюються агентам під час симуляції. Параметр `CustomerType` присвоюється кожному `CustomerAgent` випадково, а саме `VIP` (вищий пріоритет), `NORMAL` (стандартний пріоритет), або `ELDERLY` (нижчий пріоритет). Змінна `base_service_time` – це середній час обслуговування клієнта певного типу (`VIP = 3` хв, `NORMAL = 5` хв, `ELDERLY = 7` хв). Параметр `patience` визначає максимальний час очікування клієнта в черзі, розрахований на основі `base_service_time` та `patience_factor`.

Кількість хвилин, коли зявиться наступний покупець `interarrival_time`, генерується для кожного нового клієнта за допомогою експоненційного розподілу з параметром `lambda_param`.

Загальна тривалість симуляції встановлюється через `SIMULATION_STEPS`.

5.2.2 Основні методи

У класі `CustomerGenerator` ключовим є метод `step()`. На кожному кроці симуляції він перевіряє, чи настав час для прибуття нового клієнта. Якщо так, він викликає `generate_interarrival_time()` для визначення часу до наступного прибуття, створює екземпляр `CustomerAgent` з випадково обраним типом `CustomerType` і додає його до розкладу моделі.

Клас `CustomerAgent` має декілька важливих методів. Конструктор `__init__()` ініціалізує атрибути клієнта, такі як пріоритет, базовий час обслуговування та терпіння, на основі його типу `CustomerType` та параметрів з `CUSTOMER_TYPE_PARAMS`. Метод `choose_checkout()` реалізує логіку вибору каси, а саме клієнт аналізує доступні відкриті каси і обирає ту, що має найкоротшу чергу; при наявності кількох таких кас вибір відбувається випадково. Основна логіка поведінки клієнта зосереджена в методі `step()`. Якщо клієнт не перебуває в черзі, він намагається обрати касу. Якщо він вже в черзі, його час очікування `wait_time` збільшується. Якщо час очікування перевищує рівень терпіння `patience`, клієнт позначається як `abandoned` і видаляється з моделі.

Метод також обробляє ситуації, коли каса, до якої стоїть клієнт, закривається, змушуючи клієнта шукати нову.

Клас `CheckoutAgent` містить методи для управління процесом обслуговування. Конструктор `__init__()` налаштовує касу, вказуючи її тип (звичайна / самообслуговування, тимчасова / постійна) та ініціалізуючи порожню пріоритетну чергу `queue`. Метод `get_service_time_for_customer()` розраховує час обслуговування для конкретного клієнта, враховуючи базовий час клієнта, тип каси та додаючи випадкову варіацію. Метод `step()` керує роботою каси – якщо каса обслуговує клієнта (`processing`), зменшується час `time_left` до завершення. Після завершення обслуговування, клієнт позначається як `has_been_served`, фіксується його час очікування, і каса намагається взяти наступного клієнта з черги за допомогою `try_start_processing_next()`. Якщо каса вільна і черга не порожня, також викликається `try_start_processing_next()`. Цей метод витягує з пріоритетної черги (`heapq.heappop()`) клієнта з найвищим пріоритетом (і найменшим часом прибуття та порядковим номером) та починає його обслуговування.

Клас `SupermarketModel` має набір методів для управління симуляцією. Конструктор `__init__()` ініціалізує параметри симуляції, створює початкові каси та генератор клієнтів, а також структури для збору даних. Метод `get_next_heap_entry_seq()` генерує унікальні послідовні номери для забезпечення стабільності пріоритетної черги. Методи `add_checkout()` та `remove_checkout()` реалізують динамічне управління касами: перший додає нову тимчасову касу, якщо не перевищено ліміт `max_checkouts`, а другий закриває вказану тимчасову касу та перенаправляє клієнтів з її черги. Метод `remove_customer()` видаляє клієнта з розкладу та оновлює статистику обслужених або тих, хто пішов. Метод `record_wait_time_by_type()` зберігає дані про час очікування клієнтів залежно від їх типу та типу каси, що їх обслужила.

Логіка адаптивного управління касами зосереджена в `manage_checkouts()`, який аналізує середній час очікування та завантаженість кас для прийняття

рішень про відкриття / закриття. Метод `run_cameras()` періодично фіксує загальну довжину черг, `collect_step_data()` на кожному кроці збирає поточні значення метрик і додає їх до відповідних історій. Головний цикл симуляції на кожному кроці виконується методом `step()`, який послідовно викликає `run_cameras()`, `manage_checkouts()`, `self.schedule.step()` (що активує методи `step()` всіх агентів), та `collect_step_data()`.

5.2.3 Взаємодія класів та методів

Процес симуляції відбувається через взаємодію між описаними класами та їх методами. Клас `SupermarketModel` координує роботу системи, ініціалізує її та керує кожним кроком.

На кожному кроці симуляції виконується метод `step()` моделі, який викликає метод `step()` класу `CustomerGenerator`. Це призводить до створення нового об'єкта `CustomerAgent`.

Новий або існуючий `CustomerAgent`, який ще не вибрав касу, у своєму методі `step()` викликає `choose_checkout()`. Цей метод звертається до `SupermarketModel`, щоб отримати список активних `CheckoutAgent` та їхні черги для прийняття рішення.

Після вибору каси `CustomerAgent` додається до черги `queue` відповідного `CheckoutAgent` за допомогою `heapq.heappush`. Елементи черги представляють собою кортежі, що містять пріоритет клієнта, час його прибуття та унікальний порядковий номер, який отримується через `SupermarketModel.get_next_heap_entry_seq()`. Це забезпечує правильне сортування в пріоритетній черзі.

У методі `step()` `CheckoutAgent`, якщо він вільний або щойно завершив обслуговування, викликає метод `try_start_processing_next()`. Цей метод витягує клієнта з черги за допомогою `heapq.heappop` і перевіряє, чи клієнт ще чекає у черзі і не був обслугований раніше. Якщо умови виконані, починає його обслуговування. Час обслуговування визначається методом `get_service_time_for_customer()`.

Після завершення обслуговування `CheckoutAgent` позначає `CustomerAgent` як `has_been_served`. Далі викликається метод `SupermarketModel.record_wait_time_by_type()` для запису статистики часу очікування. Потім `SupermarketModel.remove_customer()` видаляє клієнта з активних агентів симуляції та оновлює загальні лічильники обслужених покупців.

Якщо `CustomerAgent` у своєму методі `step()` визначає, що його терпіння (`patience`) вичерпано, він встановлює атрибут `abandoned` у `True`. У такому випадку `SupermarketModel` також викликає `remove_customer()` для фіксації цього випадку.

Паралельно з іншими процесами метод `SupermarketModel.manage_checkouts()` регулярно оцінює стан системи. Він аналізує середній час очікування клієнтів на основі даних `CustomerAgent` та рівень простою тимчасових `CheckoutAgent`.

Якщо середній час очікування перевищує `open_threshold`, виконується `add_checkout()` для відкриття нової тимчасової каси. Якщо середній час очікування менший за `close_threshold` і тимчасова каса довго не працює, викликається `remove_checkout()`. При закритті каси клієнти, які знаходяться в її черзі, не втрачаються. Їхні атрибути `in_queue` та `chosen_checkout` скидаються, що дозволяє на наступному кроці `step()` вибрати іншу активну касу.

На кожному кроці симуляції метод `SupermarketModel.collect_step_data()` збирає інформацію від усіх `CustomerAgent` та `CheckoutAgent`. Він отримує дані про час очікування, довжину черг, час зайнятості кас, обчислює середні значення та зберігає їх для подальшого аналізу і візуалізації.

Метод `run_cameras()` здійснює періодичний збір даних про довжину черг, імітуючи роботу камер спостереження.

Таким чином, симуляція є дискретно-подієвою системою, у якій стан змінюється на кожному кроці через узгоджені дії агентів під контролем моделі.

5.3 Роль та функціонування відеокамер у моделі супермаркету

Камери в моделі виконують функцію системи моніторингу, імітуючи періодичний збір даних про стан черг. Вони фіксують загальну кількість клієнтів у чергах до всіх активних кас через задані інтервали часу. Отримані дані зберігаються у вигляді часових рядів, що дозволяє аналізувати динаміку змін довжини черг упродовж симуляції. Такий підхід відображає реальні умови, де постійний моніторинг часто замінюють періодичними «знімками» стану системи.

Розташування відеокамер в моделі черг в супермаркеті наведено на рисунку 5.1.

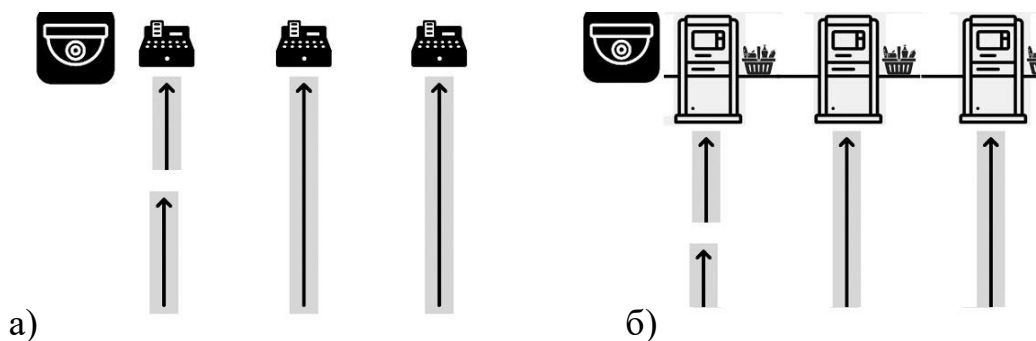


Рисунок 5.1 – Розташування відеокамер в моделі черг в супермаркеті

Зібрані відеокамерами дані стають основою для аналізу навантаження на систему. Вони допомагають виявляти пікові періоди, оцінювати ефективність роботи кас та ідентифікувати ситуації, коли кількість відкритих кас недостатня. Наприклад, стабільно високі значення довжини черг можуть свідчити про необхідність корекції стратегії управління.

Важливою особливістю камер є їхній характер роботи. Вони не взаємодіють безпосередньо з клієнтами або касами. Однак ці дані стають критичними для системи керування, а саме: інформація про довжину черг передається до методу `manage_checkouts()`, який приймає рішення щодо зміни

кількості кас. Наприклад, при перевищенні порогу `open_threshold` запускається процес відкриття нової каси, а за тривалого простою резервних кас – їх закриття.

Технічна реалізація камер відповідає принципам обмеженого збору даних. Метод `run_cameras()` класу `SupermarketModel` перевіряє, чи минув інтервал `camera_check_interval` з моменту останньої перевірки, після чого фіксує поточний стан черг. Це забезпечує баланс між точністю симуляції та ефективністю обчислень. Дані зберігаються у списку `queue_length_snapshots` разом із часовими мітками, що дозволяє відстежувати тенденції у довгостроковій перспективі.

Модель камер враховує як логіку управління, так і практичні обмеження реальних систем. Періодичність збору даних імітує обмежену пропускну здатність апаратних засобів, а також знижує навантаження на обчислювальні ресурси. У результаті система демонструє адаптивність, близьку до реальних умов, де рішення про оптимізацію черг приймаються на основі неперервного, але дискретного спостереження.

Неперервне спостереження означає, що система постійно (неперервно) відстежує стан черг. Хоча збір даних відбувається через певні інтервали, спостереження як концепція є постійним – система завжди «в курсі» того, що відбувається, хоча й з деякою затримкою та періодичністю.

Дискретне спостереження – це ключовий момент. На відміну від теоретичної моделі, де дані можуть бути доступні миттєво та безперервно, в реальності збір інформації (наприклад, через відеокамери або сенсори) відбувається з певною періодичністю. Камери роблять «знімки» стану системи через фіксовані інтервали часу (наприклад, кожні 2 хвилини, як задано `camera_check_interval`). Це дискретні точки даних, а не безперервний потік інформації.

Повний скрипт моделі приведений в Додатку В.

Висновок до розділу 5

Розроблений алгоритм динамічного керування чергами в супермаркеті ґрунтується на принципах теорії масового обслуговування та пріоритетного планування. Його основна мета – автоматичне регулювання кількості активних кас залежно від поточного навантаження, що дозволяє збалансувати витрати на персонал і якість обслуговування клієнтів.

Алгоритм реалізований за допомогою дискретно-подієвого моделювання, де кожна подія (прихід клієнта, обслуговування, зміна стану каси) обробляється окремо. Він враховує різні типи клієнтів (VIP, звичайні, літні), їхній час обслуговування, терпіння та пріоритети в чергах. Використання пріоритетних черг забезпечує справедливий розподіл клієнтів між касами з урахуванням їхнього статусу.

Програмна реалізація включає модулі генерації клієнтів, управління касами та збору статистики. Клієнти автоматично обирають найменш завантажену касу, а система аналізує середній час очікування, щоб приймати рішення про відкриття або закриття додаткових кас. Камери моніторингу імітують періодичний збір даних про довжину черг, що дозволяє алгоритму адаптуватися до змін у реальному часі.

Таким чином, алгоритм ефективно вирішує задачу оптимізації касового обслуговування, поєднуючи теоретичні основи черг з практичною реалізацією у вигляді програмної моделі. Він демонструє гнучкість у роботі з різними сценаріями навантаження та забезпечує стабільну якість обслуговування при мінімальних витратах.

РОЗДІЛ 6

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СУПЕРМАРКЕТУ З ДИНАМІЧНИМ КЕРУВАННЯМ ЧЕРГАМИ

Загальна тривалість симуляції становить 480 хвилин, що відповідає восьми годинам роботи. Початково відкрито 3 звичайні каси та 2 каси самообслуговування. Максимально система може використовувати до десяти кас одночасно. Інтенсивність прибуття клієнтів задається через параметр `lambda_param`, що обчислюється на основі середнього часу між прибуттями. Середній час очікування в черзі використовується для активації або деактивації тимчасових кас: поріг для відкриття – 8 хвилин, для закриття – 3 хвилини. Тимчасова каса розглядається на закриття, якщо вона не обслуговує клієнтів протягом 15 хвилин. Дані про довжину черг збираються кожні 2 хвилини.

Кожному клієнту призначається тип: VIP, NORMAL або ELDERLY. Цей параметр визначає пріоритет обслуговування. VIP мають найвищий пріоритет, звичайні – стандартний, літні – нижчий, що враховує їхні особливі потреби. Середній час обслуговування залежить від типу клієнта: для VIP – 3 хвилини, NORMAL – 5 хвилин, ELDERLY – 7 хвилин. Кожен клієнт має параметр `patience`, який визначає максимально допустимий час очікування перед залишенням черги. Час прибуття кожного наступного клієнта визначається випадковим чином за експоненційним розподілом з параметром `lambda_param`.

Ілюстрація результатів моделювання, виведених у консоль, приведена на рисунку 6.1.

Результати моделювання динаміки черг та управління касовими ресурсами представлені на графіках в Додатку Г1.

```

--- Результати симуляції (480 кроків / 8.0 год) ---
Час виконання: 0.05 секунд
Параметри:  $\lambda=0.33$  (сер. 3.0 хв/кл.), Початково кас: 3 рег. + 2 сам., Макс: 10, Поріг відкр: 8, Поріг закр: 3, Очік.
-----
Всього створено клієнтів: 150
Обслужено всього: 148
  - Звичайними касами: 110
  - Касами самообслуг.: 38
Клієнтів пішло (не дочекалися): 0
Клієнтів залишилось в системі (в розкладі): 2
Перевірка балансу: Створено (150) vs Обслужено(148) + Пішло(0) + Залишилось(2) = 150
  Баланс клієнтів сходиться.
Відсоток обслужених: 98.7%
Відсоток втрачених: 0.0%
-----
Максимальний середній час очікування (на кроці): 10.0 хв
Середній час очікування (для тих, хто чекав, по кроках): 2.6 хв

--- Середній час очікування по типах клієнтів ---
VIP (Звичайні каси): 2.7 хв (обслужено 45 клієнтів)
VIP (Самообслугоування): 3.2 хв (обслужено 17 клієнтів)
NORMAL (Звичайні каси): 4.4 хв (обслужено 27 клієнтів)
NORMAL (Самообслугоування): 4.3 хв (обслужено 12 клієнтів)
ELDERLY (Звичайні каси): 5.2 хв (обслужено 38 клієнтів)
ELDERLY (Самообслугоування): 9.0 хв (обслужено 9 клієнтів)
-----
Максимальна кількість відкритих кас: 8
Середня кількість відкритих кас: 6.1
Максимальна загальна довжина черг (щокроково, розмір hear): 8
Середня загальна довжина черг (щокроково, розмір hear): 3.3
Максимальна довжина черги (зафіксована камерою): 8
Середня довжина черги (зафіксована камерою): 3.2
Кінцева середня утилізація звичайних кас: 55.7%
Кінцева середня утилізація кас самообслугоування: 72.0%

```

Рисунок 6.1 – Вивід результатів моделювання в термінал

Середній час очікування.

Дані по верхньому графіку демонструють зміну середнього часу очікування клієнтів, які перебувають у чергах, впродовж 500 кроків моделювання. Значення часу коливаються в діапазоні від 0,00 до 10,00 хвилин. Середній час очікування за період становить 1,95 хвилини. Мінімальне значення зафіксовано на 0-й хвилині, максимальне – на 298-й хвилині.

Поріг відкриття нової каси встановлено на рівні 8 хвилин і був перевищений 4 рази. Поріг закриття каси – 3 хвилини, падіння нижче цього значення зафіксовано у 346 випадках. Загальна кількість вимірювань – 480.

Такий розподіл свідчить про переважно низьке завантаження системи з рідкісними піковими навантаженнями. Значна кількість випадків нижче порогу закриття вказує на потенціал для оптимізації кількості активних кас.

Кількість відкритих кас.

На другому графіку зафіксовано зміну кількості активних кас протягом усього періоду моделювання. Мінімальна кількість відкритих кас становила 5, максимальна – 8. Середнє значення – 6,10 кас. Початкова кількість кас дорівнювала 5, кінцева – 6. Найчастіше система перебувала у стабільному стані: з 480 кроків лише у 9 випадках фіксувались зміни кількості кас (5 відкриттів, 4 закриття), що відповідає частці стабільності у 98,1 %.

Система змінює кількість відкритих кас ступінчасто, із помітною затримкою у реакції. Періоди з максимальною кількістю кас зазвичай збігаються з моментами перевищення порогу часу очікування у 8 хвилин.

Кількість клієнтів у чергах змінюється в межах від 0 до 8 осіб. Середнє значення становить 3,26, медіанне – 3,0. У 7,3 % кроків кількість клієнтів перевищує 6, що вказує на наявність окремих піків навантаження. Динаміка потоку характеризується швидкими змінами протягом коротких інтервалів – високі коливання зафіксовано на 20 відрізках по 10 кроків кожен.

Такі стрибки напряму впливають на середній час очікування: сплески черг переважно збігаються з піками часу. Аналіз поведінки системи показує інерційність – у періоди зростання черг (наприклад, між 80 і 100 кроками) кількість активних кас залишається сталою. Зміни відбуваються із запізненням, після досягнення критичних значень. Аналогічно, після спаду черг кількість кас не зменшується миттєво, що також вказує на повільну реакцію керування.

Загалом система демонструє базову адаптивність до навантажень. Проте існує зона ризику: піки понад 8 хвилин часу очікування не компенсуються достатньо швидко. Поточний режим роботи системи залишається поблизу порогів відкриття й закриття кас, що створює ризик недообслуговування під час раптових зростань потоку клієнтів.

Результати моделювання динаміки черг у відеоспостереженні, завантаження кас та накопичуваного потоку клієнтів представлені на графіках в Додатку Г2.

Перший графік зображає зміну загальної довжини черг, зафіксованої системою камер кожні 2 хвилини. Дані демонструють нерівномірну динаміку з кількома чітко вираженими піками. Перший пік спостерігається приблизно між 40 та 80 хвилинами, досягаючи максимального значення 8 осіб. Другий період зростання відзначається між 160 та 240 хвилинами, з аналогічним піковим значенням. Третій підйом фіксується після 280 хвилини, проте не перевищує попередніх максимумів. Між цими хвилями довжина черги знижується до рівня 0-2 особи.

Середня довжина черги становить 3,25 особи, медіанна – 3,0. Мінімальна зафіксована довжина – 0, максимальна – 8. У 7,5 % випадків довжина черги перевищувала 6 осіб, що вказує на епізодичні перевантаження системи. Загальний тренд на основі початкових і кінцевих точок – слабе зростання: довжина черги поступово переходить від 0 до 2 осіб. Це свідчить про тенденцію до накопичення навантаження наприкінці симуляції, попри ефективне обслуговування в інші періоди.

На другому графіку показано завантаженість звичайних кас і кас самообслуговування. Звичайні каси показують мінімальне навантаження 0,00 %, максимальне – 81,82 %, середнє – 59,75 %. У перші 80 хвилин завантаженість різко зростає від 0 % до понад 80 %, після чого знижується до приблизно 60 %, а потім поступово піднімається до 75 %. Біля 300 хвилини спостерігається падіння зайнятості до 50-55 %, далі завантаженість стабілізується.

Каси самообслуговування мають мінімальну завантаженість 0,00 %, максимальну – 79,93 %, середню – 71,48 %. Вони демонструють більш рівномірний та стабільний рівень зайнятості без різких коливань, утримуючи завантаженість у діапазоні 82-85 % протягом більшої частини часу. Це свідчить про більш сталий попит на самообслуговування порівняно зі звичайними касами.

На третьому графіку наведено накопичувальний потік клієнтів. Крива обслуговування зростає лінійно з незначними варіаціями, досягаючи приблизно 148 клієнтів до завершення симуляції. Паралельна лінія, що відображає кількість

клієнтів, які пішли, залишається нульовою. Це означає, що жоден клієнт не покинув магазин без обслуговування. Такий результат свідчить про стійкість системи до навантажень.

Із кумулятивних характеристик видно, що найбільше навантаження припадає на першу чверть симуляції. Завантаженість в цей період досягає максимальних значень, черги зростають швидко. Після стабілізації завантаженості спостерігається зменшення черг, що свідчить про адаптацію системи до початкового пікового попиту. Подальші хвилі мають меншу амплітуду.

Загалом модель демонструє ефективну роботу – рівень зайнятості кас самообслуговування стабільний і високий, обслуговування не допускає втрат клієнтів, а система реагує на навантаження без затримок, що підтверджується поступовим зниженням довжини черг у другій половині симуляції.

Динаміка середнього часу очікування у звичайній касах представлена в Додатку Г3.

Середній час очікування у звичайних касах варіюється залежно від типу клієнта. Пріоритетні покупці мають найкоротший середній час очікування – 2,89 хвилини, при цьому максимальний час не перевищує 4 хвилин. Мінімальне значення 0 хвилин свідчить про випадки негайного обслуговування цієї категорії.

Звичайні покупці очікують довше: середній час становить 4,16 хвилини, що майже на 44 % більше, ніж у пріоритетних. Максимальний час очікування для цієї групи досягає 6 хвилин, що вказує на відчутно більші затримки.

Літні покупці мають найбільший середній час очікування – 5,28 хвилини, а максимальний час сягає 7,5 хвилин. Це свідчить про те, що ця категорія клієнтів очікує найдовше, що може бути пов'язано зі специфікою обслуговування або підвищеним навантаженням на каси.

Динаміка середнього часу очікування у касах самообслуговування представлена в Додатку Г4.

Для пріоритетних покупців середній час очікування становить 2,97 хвилин, максимальний – 3,19 хвилин, мінімальний – 0 хвилин. Це свідчить про швидке та пріоритетне обслуговування на касах самообслуговування.

Для звичайних покупців середній час очікування дорівнює 3,24 хвилин, що значно менше, ніж на звичайних касах. Максимальний час очікування – 4,33 хвилин, мінімальний – 0 хвилин, що демонструє покращену ефективність самообслуговування для більшості клієнтів.

Для літніх покупців середній час очікування становить 7,58 хвилин, з максимальним значенням 10 хвилин. Мінімальний час очікування 0 хвилин вказує на випадки негайного обслуговування, проте загалом ця категорія стикається з істотними затримками, ймовірно через складнощі у користуванні касами самообслуговування або інші фактори.

Таким чином, можна зробити висновок, що каси самообслуговування ефективно зменшують час очікування для пріоритетних та звичайних покупців, тоді як літні клієнти зазнають значних затримок, що потребує подальшої оптимізації процесів обслуговування.

Висновок до розділу 6

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.

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.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було досліджено ключові аспекти оптимізації обслуговування клієнтів.

Проведено аналіз існуючих методів та систем управління чергами, що застосовуються в супермаркетах для оптимізації обслуговування клієнтів. Розглянуті підходи охоплюють як традиційні моделі (багатолінійні та однолінійні черги), так і інноваційні рішення: віртуальні черги, системи самообслуговування, гібридні моделі та інтелектуальні системи на основі штучного інтелекту (ШІ).

Досліджено основні фактори, що впливають на формування черг у касових зонах супермаркетів: інтенсивність клієнтського потоку, час обслуговування, планування торговельного простору та інтеграція з POS-системами. Сучасні технології, зокрема алгоритми ШІ та аналітика даних, дозволяють прогнозувати навантаження, динамічно розподіляти ресурси й автоматизувати процеси. Ключові показники ефективності (KPI), такі як середній час очікування, довжина черги та рівень відмов, слугують інструментами для оцінки успішності систем та виявлення зон для вдосконалення.

Огляд методів і систем моделювання роботи систем керування чергами в супермаркетах свідчить про тенденцію до інтеграції класичних теоретичних підходів із сучасними людиноцентричними стратегіями, що враховують психологічне сприйняття часу очікування клієнтами. Такий підхід створює міцну теоретичну базу для розробки гібридних або інтелектуальних систем, які здатні адаптуватися до особливостей конкретного магазину, одночасно підвищуючи операційну ефективність і якість обслуговування.

Аналіз існуючих теоретичних підходів, математичних моделей систем масового обслуговування виявив, що управління процесами обслуговування клієнтів у супермаркетах є задачею, що вимагає поєднання класичних аналітичних підходів, імітаційного моделювання та сучасних інтелектуальних

алгоритмів. Для побудови сучасної системи управління обслуговуванням у супермаркетах необхідне комплексне поєднання теоретичних моделей, симуляційних технік та інтелектуальних технологій, що дозволяє створити адаптивні, масштабовані та ефективні рішення.

Ефективне моделювання систем черг у супермаркетах базується на інтегрованому підході, що об'єднує управління в реальному часі, імітаційне моделювання та аналітичні методи. Комерційні рішення (WaitWell, Qminder, Wavetec) забезпечують практичну оптимізацію потоку клієнтів та оперативну аналітику, ідеально пристосовані для впровадження в торгових мережах. Імітаційні платформи (Arena, AnyLogic, FlexSim) дають можливість тестувати різні сценарії роботи та оптимізувати ресурси, тоді як аналітичні інструменти слугують теоретичною основою для оцінки продуктивності систем.

Серед існуючих підходів Python вирізняється як найбільш ефективний інструмент 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.

Розроблено алгоритм та виконано програмну реалізацію дискретно-подієвої імітаційної моделі касового вузла супермаркету для різних конфігурацій організації черг, що дозволяє проводити порівняльний аналіз їх ефективності за визначеними критеріями.

Виявлено, що використання єдиної спільної черги (тип 3) є найбільш доцільним для кас самообслуговування завдяки найнижчому середньому часу очікування (2,03 хв) та майже повному завантаженню кас (понад 90 %). Тип 1 (самостійний вибір каси) показав помірний середній час очікування (приблизно 3,9 хв), тоді як тип 2 (випадковий вибір каси) виявився найменш ефективним.

Загалом, результати моделювання свідчать про доцільність використання єдиної черги (тип 3) у середовищах, де важлива операційна ефективність,

стабільність та автоматизація, зокрема в касах самообслуговування. Натомість моделі з розподіленими чергами (типи 1 і 2) можуть бути використані у середовищах із присутністю персоналу, де важливу роль відіграє гнучкість, візуальне сприйняття черг і суб'єктивний комфорт клієнтів.

Розроблено модель 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.

Алгоритм реалізований за допомогою дискретно-подієвого моделювання, де кожна подія (прихід клієнта, обслуговування, зміна стану каси) обробляється окремо. Він враховує різні типи клієнтів (VIP, звичайні, літні), їхній час обслуговування, терпіння та пріоритети в чергах. Використання пріоритетних черг забезпечує справедливий розподіл клієнтів між касами з урахуванням їхнього статусу.

Клієнти автоматично обирають найменш завантажену касу, а система аналізує середній час очікування, щоб приймати рішення про відкриття або закриття додаткових кас. Камери моніторингу імітують періодичний збір даних про довжину черг, що дозволяє алгоритму адаптуватися до змін у реальному часі.

Таким чином, розроблений алгоритм динамічного керування чергами ефективно адаптується до змін потоку клієнтів і запобігає їхнім втратам, автоматично регулюючи кількість активних кас. Він демонструє гнучкість у роботі з різними сценаріями навантаження та забезпечує стабільну якість обслуговування при мінімальних витратах.

Програмна реалізація, що включає модулі генерації клієнтів, управління касами та збору статистики, забезпечує справедливий розподіл клієнтів з урахуванням їхнього статусу (VIP, звичайні, літні).

Виконано аналіз результатів моделювання роботи супермаркету з динамічним керуванням чергами.

Результати моделювання показали, що середній час очікування клієнтів становить 1,95 хвилини, з можливістю відкриття додаткових кас при перевищенні порогу у 8 хвилин. 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.

Середнє завантаження звичайних кас становить 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 потребує додаткової уваги.

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

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.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Consumer survey: The state of waiting in line (2024). URL: <https://waitwhile.com/blog/consumer-survey-waiting-in-line-2024/> (дата звернення: 18.07.2025).
2. A Complete Guide to Queue Management Systems. URL: <https://facit.ai/insights/queue-management-system> (дата звернення: 18.07.2025).
3. The High Expectation for Short Wait Times in Grocery. URL: <https://www.bain.com/insights/high-expectation-short-wait-times-grocery-snap-chart/> (дата звернення: 18.07.2025).
4. The Ultimate Guide to Queue Management System. URL: <https://www.acftechnologies.com/blog/the-ultimate-guide-to-queue-management> (дата звернення: 18.07.2025).
5. 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).
6. Design Principles for Effective Digital Queue Management. URL: <https://www.nemo-q.com/blog/design-principles-digital-queue-management/> (дата звернення: 18.07.2025).
7. 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).
8. 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).
9. 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).

10. Retail Queue Management System. URL: <https://qwaiting.com/industries/retail-queue-system> (дата звернення: 18.07.2025).
11. Retail queue management system. URL: <https://virtuaq.com/retail-queue-management-system> (дата звернення: 18.07.2025).
12. 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).
13. 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).
14. How Retail Self-Checkout Systems Enhance Customer Experience and Boost Efficiency. URL: <https://blog.dumac.com/how-retail-self-checkout-systems-enhance-customer-experience-and-boost-efficiency> (дата звернення: 18.07.2025).
15. How Intelligent Video Analytics Transformed Retail Stores. URL: <https://www.iotforall.com/how-intelligent-video-analytics-transformed-retail-stores> (дата звернення: 18.07.2025).
16. Case.Video-Analytics.Queue-Management.pdf. URL: <https://webassets.linkretail.com/wp-content/uploads/2021/02/Case.Video-Analytics.Queue-Management.pdf> (дата звернення: 18.07.2025).
17. The Beginner's Guide to Queuing theory. URL: <https://www.qminder.com/blog/queue-management/queuing-theory-guide/> (дата звернення: 18.07.2025).
18. 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).
19. An Analysis of M/M/1: ∞ /FCFS Queuing Model Based on Supermarkets. URL: <https://www.advancesinmechanics.com/pdf/2023-149.pdf> (дата звернення: 18.07.2025).

20. The Impact of Queueing Theory on Modern Business and Customer Service. URL: <https://www.numberanalytics.com/blog/impact-of-queueing-theory-modern-business> (дата звернення: 18.07.2025).

21. David G. Kendall Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain. URL: <https://projecteuclid.org/journals/annals-of-mathematical-statistics/volume-24/issue-3/Stochastic-Processes-Occurring-in-the-Theory-of-Queues-and-their/10.1214/aoms/1177728975.full> (дата звернення: 18.07.2025).

22. Introduction to Queueing Modeling. URL: https://www.pm.lth.se/fileadmin/pm/Education/MIOF30/SimFoe_1-5_-_Koeteori.pdf (дата звернення: 18.07.2025).

23. Analysis of Queueing System of Two Service Desks for Customer Classification Service. URL: https://www.iaeng.org/IJCS/issues_v50/issue_1/IJCS_50_1_26.pdf (дата звернення: 18.07.2025).

24. Chapter 3 – General Principles. URL: https://www.mi.fu-berlin.de/inf/groups/ag-tech/teaching/_SS/L_19540_Modeling_and_Performance_Analysis_with_Simulation/03.pdf (дата звернення: 18.07.2025).

25. CHAPTER 5 NEXT-EVENT SIMULATION. URL: <https://www.scribd.com/document/182302280> (дата звернення: 18.07.2025).

26. Discrete-Event Simulation. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/discrete-event-simulation> (дата звернення: 18.07.2025).

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

28. Intro to Agent Based Modeling. URL: <https://towardsdatascience.com/intro-to-agent-based-modeling-3e6a6a070b72/> (дата звернення: 18.07.2025).

29. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. URL: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.082080899> (дата звернення: 18.07.2025).

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

31. Lecture 5: Genetic algorithms. Constraint Satisfaction Recall from last time: Optimization problems. URL: <https://www.cs.mcgill.ca/~dprecup/courses/AI/Lectures/ai-lecture05.pdf> (дата звернення: 18.07.2025).

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

33. 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).

34. AI Long Queue Line Management System: How to Handle Long Lines of Customers at Supermarkets. URL: <https://easyflow.tech/ai-long-queue-line-management-system/> (дата звернення: 18.07.2025).

35. Queue Management for Supermarkets. URL: <https://www.footballcam.com/Industries/Supermarkets> (дата звернення: 18.07.2025).

36. Queue Management System for Busy Service Providers. URL: <https://waitwell.ca/> (дата звернення: 20.07.2025).

37. Qminder: Queue Management, Appointments & Service Analytics. URL: <https://www.qminder.com/> (дата звернення: 20.07.2025).

38. Wavetec: Digital Transformation Solutions & Services. URL: <https://www.wavetec.com> (дата звернення: 20.07.2025).

39. Arena Simulation Software. URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html> (дата звернення: 20.07.2025).

40. AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solutions. URL: <https://www.anylogic.com/> (дата звернення: 20.07.2025).

41. FlexSim 3D Simulation Modeling Software. URL: <https://www.flexsim.com/flexsim/> (дата звернення: 20.07.2025).

42. MATLAB – MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата звернення: 20.07.2025).
43. Python. URL: <https://www.python.org/> (дата звернення: 20.07.2025).
44. SimPy. URL: <https://simpy.readthedocs.io/en/latest/> (дата звернення: 20.07.2025).
45. Mesa: Agent-based modeling in Python. URL: <https://mesa.readthedocs.io/latest/> (дата звернення: 20.07.2025).
46. AgentPy – Agent-based modeling in Python. URL: <https://agentpy.readthedocs.io/en/latest/> (дата звернення: 20.07.2025).
47. Queueing-tool: A network simulator. URL: <https://queueing-tool.readthedocs.io/en/latest/> (дата звернення: 20.07.2025).
48. Salabim. Discrete event simulation. URL: <https://www.salabim.org/> (дата звернення: 20.07.2025).
49. A Comparative Study Between Multi Queue Multi Server And Single Queue Multi Server Queuing System. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3682985 (дата звернення: 20.07.2025).
50. Basic Queueing Theory. URL: <https://yzr95924.github.io/pdf/book/Basic-Queueing-Theory.pdf> (дата звернення: 20.07.2025).
51. Олещук Т. С., Гуменюк Л. О. Модель роботи супермаркету з динамічним керуванням чергами. *Перспективні технології та прилади. Збірник статей*. Луцьк: ЛНТУ, 2025. Випуск 27. С. 42-46.