

DOI: <https://doi.org/10.37634/efp.2024.12.9>
УДК 338: 519.7

Сергій Олександрович ОСТРЯНИН

доктор філософії, доцент, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9012-9913>
e-mail: serge.ostryanyn@gmail.com

Оксана Юріївна ПРИХОДЧЕНКО

к.е.н., доцент, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5080-737X>
e-mail: oksana.prykhodchenko@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ ЧИСЛА КАС ТОРГІВЕЛЬНОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗАСОБАМИ МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ PYTHON

У статті розглянуто застосування імітаційного моделювання для оптимізації чисельності кас супермаркетів у торговельних мережах. На основі аналізу динаміки клієнтотоку, продуктивності кас та допустимого часу очікування клієнтів у черзі розроблено і випробувано модель, яка дає змогу визначати оптимальне число кас залежно від розташування магазину, типу дня та змінних параметрів системи обслуговування. Встановлено залежності між параметрами клієнтотоку, продуктивності кас та витратами, що дозволило сформулювати рекомендації для управління чисельністю кас у супермаркетах. Запропоновані методи враховують чутливість системи обслуговування до змін параметрів сценаріїв, таких як продуктивність кас, інтенсивність клієнтотоку та допустимий час очікування.

Ключові слова: імітаційне моделювання, оптимізація чисельності кас, клієнтотік, продуктивність кас, ритейл

ВСТУП

Дослідження ефективності роботи касових систем супермаркетів є актуальним завданням у контексті оптимізації витрат та покращення обслуговування клієнтів. Супермаркети в різних типах розташувань мають свої унікальні характеристики клієнтотоку та завантаженості, що потребує адаптивних підходів до управління ресурсами, такими як кількість кас. Застосування імітаційного моделювання дає змогу аналізувати вплив параметрів, таких як інтенсивність клієнтотоку, продуктивність кас та толерантність до часу очікування, на оптимальне число кас та загальні витрати [1]. Це дослідження спрямоване на визначення залежностей між ключовими параметрами та розроблення рекомендацій для управління системами обслуговування в супермаркетах.

Об'єктом дослідження є касова лінія магазину торговельної мережі. Предметом дослідження є методи оптимізації кількості кас у супермаркетах різних типів для забезпечення мінімальних витрат на утримання кас та витрат від необслугованих клієнтів за умов змінної динаміки клієнтотоку та допустимого часу очікування клієнтів у черзі. Завданнями дослідження є аналіз динаміки завантаженості супермаркетів залежно від характеру місцерозташування, розроблення і застосування імітаційної моделі роботи системи кас для різних сценаріїв розташування і значень параметрів за теорією черг, визначення оптимального числа кас для різних сценаріїв і аналіз чутливості оптимального числа кас до різних параметрів системи кас, формулювання практичних рекомендацій стосовно оптимального планування кількості кас. Дістали подальшого розвитку методи керування касовою лінією в торговельній мережі з врахуванням зміни завантаженості залежно від часу доби за критеріями мінімізації витрат.

МЕТА дослідження – визначення оптимального числа кас для різних типів супермаркетів на основі мінімізації витрат, що включають втрати через тривалий час очікування та витрати на утримання кас. Це досягається

через аналіз чутливості системи до змін ключових параметрів, таких як інтенсивність клієнтотоку, продуктивність кас та максимально допустимий час очікування в черзі.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для виконання дослідження застосовано роботи вітчизняних і зарубіжних вчених. До переліку застосованих методів дослідження входить теорія черг та імітаційне моделювання, реалізоване із застосуванням пакету simply мови програмування Python, для моделювання пропускну здатності касової лінії магазину для різних параметрів; аналіз чутливості для визначення найбільш впливових факторів для вибору числа кас, класифікаційний аналіз і аналіз основних компонент для визначення типів патернів навантаження залежно від розташування магазину.

РЕЗУЛЬТАТИ

Розглянуто роботу системи обслуговування в торговельній мережі, зокрема діяльність касової лінії. Здійснено аналіз різних сценаріїв і визначено оптимальну кількість діючих кас на основі цих сценаріїв.

Для виконання імітаційного моделювання діяльності касової лінії в різний час доби необхідно визначити такий перелік параметрів, що характеризують даний процес:

1. *Інтенсивність потоку клієнтів (λ):* середня кількість клієнтів за одиницю часу.
2. *Час обслуговування (μ):* середній час, необхідний для обслуговування одного клієнта.
3. *Час пікових і непікових навантажень:* необхідно відстежити, коли потік клієнтів змінюється.

Виконано аналіз патернів динаміки відносного завантаження супермаркету залежно від його місцерозташування. Припустимо, що параметри, котрі визначають роботу системи черг супермаркету, такі як інтенсивність потоку клієнтів λ , пропускна здатність μ , а також максимальний час очікування клієнтом в черзі, під час перевищення якого він залишає її – залежать від характеру місцерозташування магазину. Крім того, для різних типів місцерозташування очікуємо різний патерн

зміни інтенсивності потоку клієнтів протягом буднього і вихідного дня. В якості тестового набору даних із сервісу Google Maps взято дані про відносну погодинну завантаженість 31 супермаркетів міст Дніпра та Києва, розташованих в різних районах цих міст. Дані імпортовано із застосуванням пакету selenium для мови програмування Python. Визначено три типи місцерозташування: в безпосередній близькості до транспортного вузла (вокзал, автостанція) – тип 1, в центральних районах міста (згідно із загальноприйнятим розумінням мешканцями цих міст територіальних меж «центру» міста) – тип 2, в спальних районах міста – тип 3. Для супермаркетів з тестового набору вручну встановлено клас місцерозташування згідно з вищезазначеними принципами. Динаміку зміни відносної інтенсивності потоку клієнтів для трьох класів супермаркетів за місцерозташуванням для буднього і вихідного дня зображено на рис. 1.

Як видно на рис. 1, патерн динаміки завантаженості супермаркетів першого типу відрізняється від інших, є значно менш завантаженим протягом буднього дня. Патерни завантаженості для 2 і 3 типів є схожими, проте спостерігається наявність піку завантаженості у вечірній годині вихідного дня спальних районів і більш рівномірний проміжок пікового навантаження протягом другої половини вихідного дня для супермаркетів в центрі міста. Подібність цих типів можна пояснити наявністю житлової забудови в центрі міста, а отже, такий район є «спальним» для деякої частки мешканців; аналогічно в спальних районах також наявні робочі місця як і в центрі міста. Також бачимо, що для магазинів в центрі спостерігається в середньому вища завантаженість в вихідний порівняно з магазинами біля транспортних вузлів.

Виконаємо класифікаційний аналіз магазинів, застосовуючи значення їх відносної погодинної завантаженості в якості вхідних параметрів. Для цього застосували алгоритм класифікації найближчого сусіда (KNN), реалізований в пакеті sklearn. Оптимальне значення гіперпараметра – 4, за нього модель пояснює 84% варіації.

Виконаємо аналіз основних компонент. Значущість ознак параметрів погодинної завантаженості для перших чотирьох компонент, що пояснюють більше 80% варіації, зображена на тепловій карті на рис. 2.

Бачимо, що перша компонента є чутливою до завантаженості магазину в другу половину вихідного дня, друга – до вечірніх годин буднього, третя – до ранніх та пізніх годин, четверта – до ранку вихідного.

Застосуємо перші три компоненти, що пояснюють більше 70% варіації і зобразимо на графіках кольорову класифікацію за типом супермаркетів з вибірки на основі фактичних значень класів і на основі значень, розрахованих моделлю класифікації на основі даних про динаміку завантаженості на рис. 3.

Розподіл значень компонент для кожного типу магазинів демонструє їхні унікальні патерни завантаженості:

Тип 1 (магазини в транспортних вузлах):

– *Перша компонента (0 до -10):* Значення відносно низькі, що свідчить про зменшену активність у другу половину вихідного дня. Це очікувано, оскільки транспортні вузли більш завантажені у будні дні через регулярні робочі подорожі.

– *Друга компонента (0 до -2):* Активність у вечірній годині буднього дня помірно знижується, можливо, через зменшення транспортного потоку.

– *Третя компонента (-4):* Постійно низьке значення вказує на те, що магазини цього типу мало використовуються у ранні та пізні години, що може бути пов'язано з чіткими піковими періодами активності.

Тип 2 (магазини в центрі):

– *Перша компонента (-2.5 до 2.5):* Розподіл відносно симетричний, що свідчить про збалансовану активність у другу половину вихідного дня. Центральні магазини залишаються популярними незалежно від дня тижня.

– *Друга компонента (-2 до 4):* Широкий діапазон значень свідчить про те, що магазини в центрі мають різну активність у вечірній час, яка може залежати від місця розташування або цільової аудиторії.

– *Третя компонента (-4 до 2):* Активність у ранні та пізні години може значно варіюватися, вказуючи на нерівномірність завантаженості цих магазинів у цей час.

Тип 3 (магазини в спальних районах):

– *Перша компонента (-5 до 0):* Низькі значення показують, що активність у другу половину вихідного дня є помірною або низькою, що відповідає характеру спальних районів, де активність зростає переважно у вечірній час буднів.

– *Друга компонента (2 до 4):* Високі значення вказують на пікову активність у вечірній години буднього дня, що характерно для спальних районів, коли мешканці повертаються додому після роботи.

– *Третя компонента (-4 до 4):* Широкий діапазон значень свідчить про значну варіативність активності у ранні та пізні години, що може бути зумовлено різними звичками жителів.

Отже, можна зробити такі висновки про ці типи:

– *Тип 1 (транспортні вузли):* Найбільш стабільно характеризуються низькими значеннями всіх компонент, що свідчить про чітку прив'язку до робочих днів і певних пікових годин.

– *Тип 2 (центральні магазини):* Демонструють найбільшу збалансованість по всіх трьох компонентах, що відповідає їхній універсальності для різних груп клієнтів і умов.

– *Тип 3 (спальні райони):* Характеризуються високою активністю у вечірній години буднього дня, що повністю відповідає розташуванню в зонах житлової забудови, але демонструють значну варіативність в інших часових періодах.

Так, можна вважати підтвердженою гіпотезу про наявність залежності патерну динаміки завантаженості від типу розташування магазину.

Застосуємо теорію черг і виконаємо імітаційне моделювання сценаріїв роботи системи кас супермаркету [2]. Кожен сценарій визначається такими параметрами [3]:

k – тип магазину за місцерозташуванням;

λ_{max} – інтенсивність потоку клієнтів в годину за умови 100 % завантаженості магазину;

μ – пропускна здатність каси в обслуговуваних клієнтах на годину;

d – тип дня: будній або вихідний;

W_{max} – максимальний час допустимого очікування в черзі, після якого клієнт залишає чергу.

Для кожного сценарію як комбінації значень параметрів виконується симуляція для чисельності кас від 1 до 20. Для кожного сценарію розраховується оптимальне число кас за критерієм мінімізації витрат C :

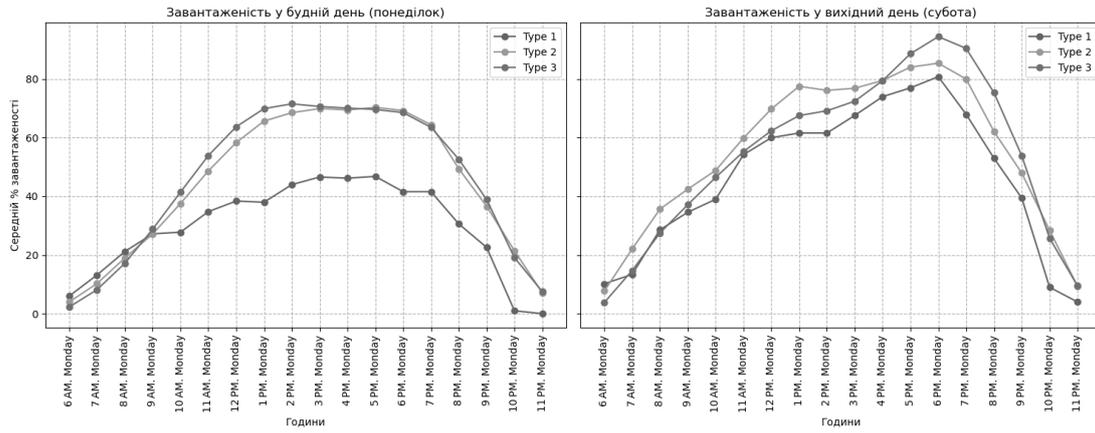


Рис. 1. Динаміка відносної завантаженості супермаркету залежно від дня тижня і типу розташування

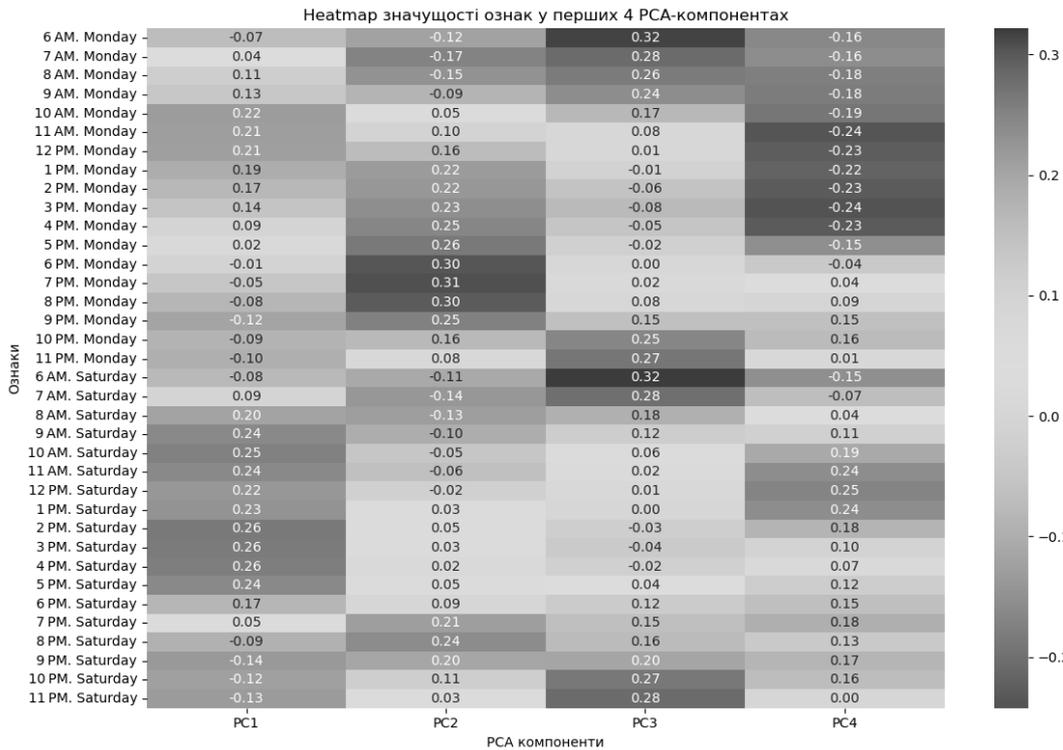


Рис. 2. Теплова карта значущості ознак для перших чотирьох основних компонент

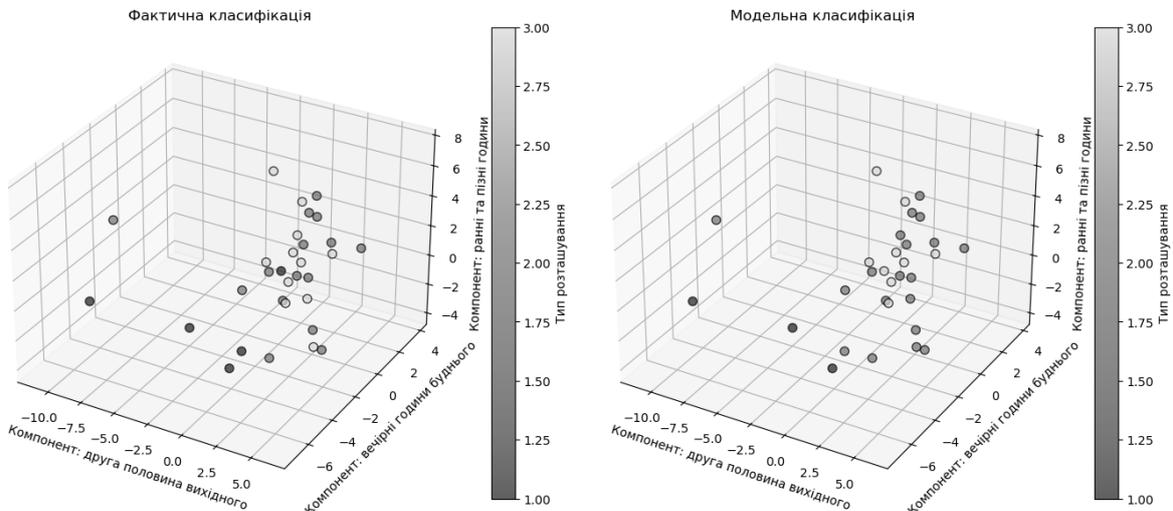


Рис. 3. Модельне та фактичне розташування магазинів різних типів розташування у просторі перших трьох основних компонент

$$C = C_r \cdot n + C_c \cdot N_l, \quad (1)$$

де C_r – витрати на утримання 1 каси, N_l – кількість клієнтів втрачених через перевищення максимального часу очікування, C_c – грошовий вимір втрати 1 клієнта.

Симуляція виконується з використанням реальної інтенсивності потоку клієнтів, що розраховується на основі динаміки відносної завантаженості b_{hkd} залежно від типу магазину k та дня тижня d :

$$\lambda_{hkd} = \lambda_{max} \cdot b_{hkd}, \quad (2)$$

де $h \in \{6:00, \dots, 23:00\}$, $k \in \{1, 2, 3\}$, $d \in \{m, s\}$

Система обслуговування моделюється як багатоканальний Марковський процес $M/M/n$ [4], де:

M – вхідний потік клієнтів (експоненційно розподілений, інтенсивність λ),

M – час обслуговування (експоненційно розподілений, інтенсивність μ),

n – кількість кас (каналів обслуговування).

Основні припущення:

Клієнти надходять у супермаркет випадково згідно з пуассонівським розподілом [5].

Обслуговування на кожній касі триває в середньому $1/\mu$.

Якщо всі каси зайняті, клієнти очікують у черзі.

Якщо клієнт знаходиться в черзі довше максимально допустимого часу очікування W_{max} , тоді він залишає чергу [6].

Оптимальне число кас:

$$n_{opt} = \arg \min_n C, \quad (3)$$

Імітаційне моделювання виконано із застосуванням пакету *simpy* для мови програмування Python.

Залежність оптимального числа кас від значень інтенсивності потоку клієнтів і пропускної здатності каси зображено на рис. 4. Оскільки продуктивність роботи касира і оснащення каси не залежить від розташування магазину, фактором зміни пропускної здатності є середнє число товарів у чеку, що під час збільшення обумовлює лінійне збільшення часу на розрахунок такого клієнта. Так, зменшення пропускної здатності каси означає збільшення середнього числа товарів в чеку.

На рис. 4 бачимо, що під час зниження пропускної здатності до умовно порогового значення нижче 30 клієнтів на годину відбувається двократне підвищення оптимального числа кас, тоді як зростання оптимального числа кас під час збільшення інтенсивності потоку клієнтів є близьким до лінійного.

Так, більше число кас важливе для магазинів, де ймовірні часті покупки з великим чеком. Водночас невелика кількість товарів у чеку навіть за великої інтенсивності потоку клієнтів дає системі кас змогу бути ефективною навіть за невеликого числа кас.

Проаналізуємо залежність оптимального числа кас від інтенсивності потоку і максимального часу очікування, зображену на рис. 5. Як бачимо на рис. 5, зниження максимально допустимого часу очікування сприяє значному підвищенню оптимального числа кас для середніх і високих значень інтенсивності потоку клієнтів. Так, допустимий час очікування є більш значимим і його значущість активізується за високої інтенсивності потоку клієнтів. Отже, збільшувати число кас доцільно за умови великої кількості товарів в чеку, що часто спостеріга-

ється для магазинів у спальних районах, а також за низької толерантності до очікування за умови інтенсивного потоку більше 100 клієнтів на годину.

Виконаємо аналіз відносної чутливості значення оптимального числа кас до зміни параметрів сценаріїв, для яких виконувалося імітаційне моделювання. Для кожного типу магазину:

$$n_{base}(k) = n_{opt}(k, P_{base}), \quad (4)$$

де P_{base} – початкове (базове) значення параметра.

Для кожного значення параметра P :

$$n_{value}(T, P) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_{opt}(k, P_i), \quad (5)$$

де N – кількість сценаріїв із заданим значенням P .

Відносна чутливість оптимального числа кас до параметра P для магазину з типом розташування k розраховується як:

$$S(k, P) = \frac{|n_{value}(k, P) - n_{base}(k)|}{n_{base}(k)}, \quad (6)$$

Гістограму чутливостей для різних параметрів наведено на рис. 6.

По-перше, виділимо широкий довірчий інтервал для чутливості оптимального числа кас до максимального часу очікування для магазинів в центрі і спальних районах – це може означати, що зміна цього параметра має нелінійний або непостійний вплив на оптимальне число кас. Також бачимо, що для магазинів з таким розташуванням чутливість до дня тижня є більшою, ніж для магазинів в транспортних вузлах, що говорить про рівномірне навантаження протягом тижня для останніх. Водночас вузький довірчий інтервал для магазинів 2 і 3 типу говорить про те, що день тижня значно визначає навантаження на каси для них. Меншою є відмінність в чутливості до інтенсивності потоку і кількості товарів в чеку. Так, саме ці параметри є важливими у визначенні числа кас для магазинів з будь-яким розташуванням. Також зазначимо, що магазини розташовані в транспортних вузлах найбільш чутливі до максимального часу очікування: якщо клієнти мають обмаль часу до відправлення, фактор часу буде для них визначним.

На рис. 7 зображено оптимальні чисельності кас для різних типів розташування та різних значень параметрів системи. Як бачимо, практично не змінюється число кас до 120 клієнтів на годину з наступним лінійним зростанням, що є стрімкішим для магазинів в центрі. Стрибок-подібним є зростання оптимального числа кас для зниження допустимого часу очікування.

Проаналізуємо динаміку значення цільової функції витрат залежно від числа кас (рис. 8). Як бачимо, оптимальність загальних витрат досягається в точці, де число кас дає змогу уникнути витрат від перевищення часу очікування, що підкреслює важливість оцінювання толерантності клієнтів до очікування для кожного типу локації під час визначення чисельності кас оптимальної для магазину в цій локації.

Так, можемо підбити підсумок і сказати, що у визначенні оптимального числа кас необхідно брати до уваги такі параметри:

1. Характер розташування.
2. Толерантність до очікування.
3. Середнє число товарів в чеку.

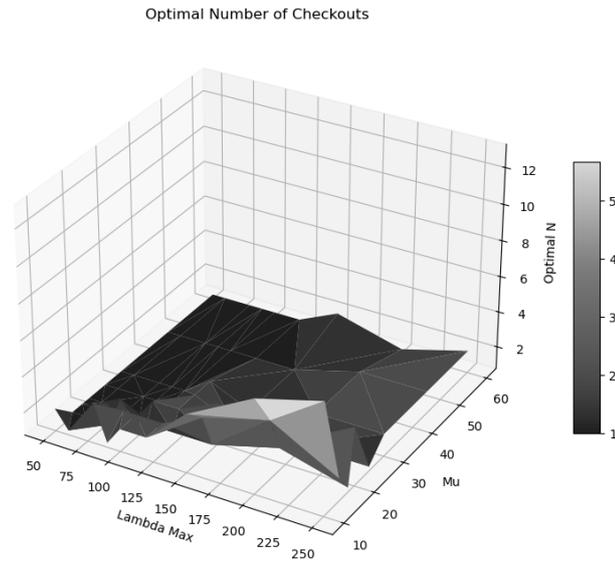


Рис. 4. Поверхнева діаграма зміни оптимального числа кас для різних значень інтенсивності і пропускної здатності

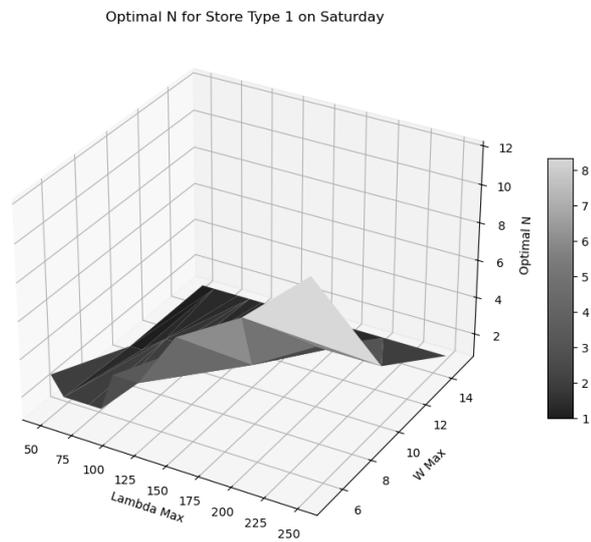


Рис. 5. Поверхнева діаграма зміни оптимального числа кас для різних значень інтенсивності і допустимого часу очікування

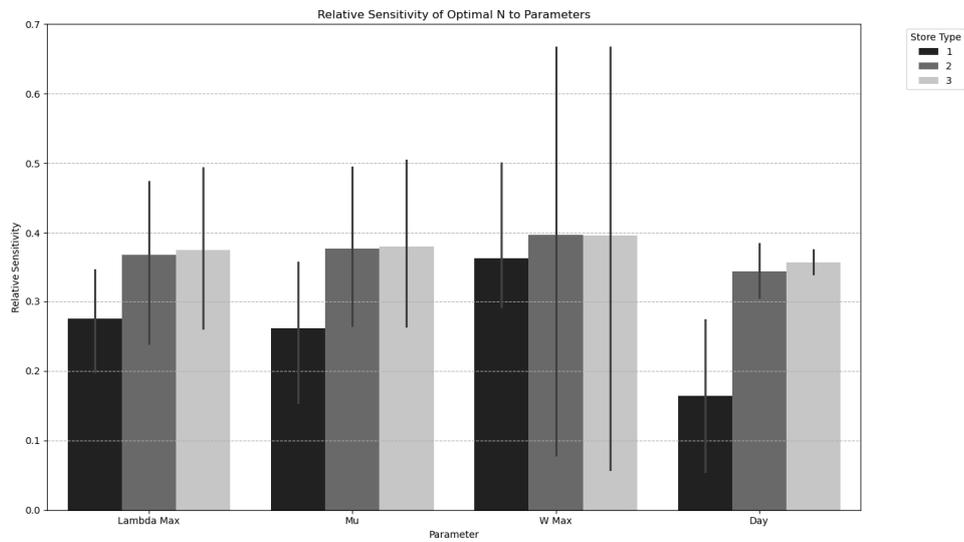


Рис. 6. Відносні чутливості оптимального числа кас до зміни значень параметрів системи кас

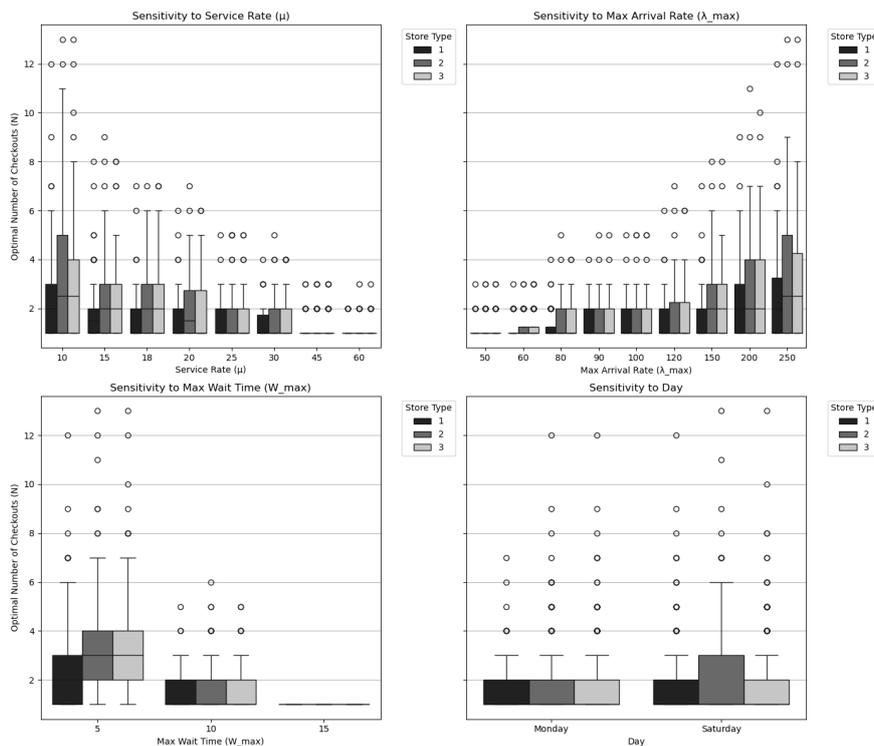


Рисунок 7. Оптимальні чисельності кас для різних значень параметрів системи

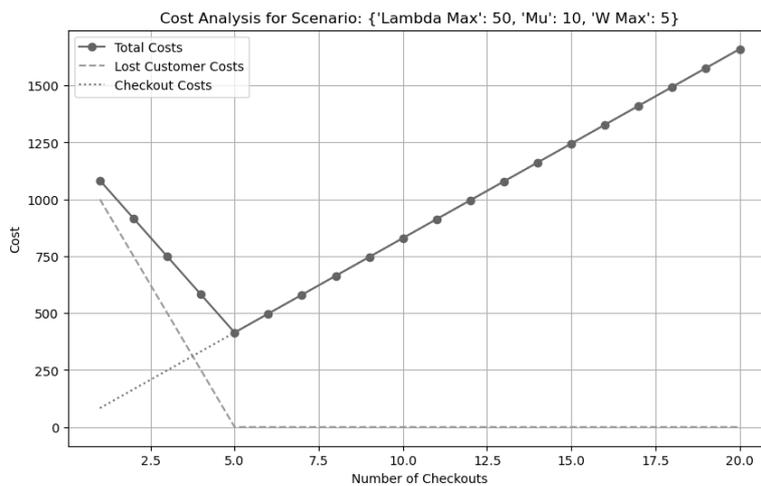


Рис. 8. Зміна витрат залежно від числа кас

Результати моделювання показали, що оптимальне число кас значно залежить від типу магазину, дня тижня, інтенсивності клієнтопоту, продуктивності кас та максимально допустимого часу очікування). Для магазинів, розташованих у транспортних вузлах, характерний нижчий піковий клієнтопотік порівняно з магазинами в центрі та спальних районах, що дозволяє ефективніше використовувати меншу кількість кас навіть у години найбільшого навантаження. Натомість магазини в центрі потребують більшого числа кас через високий середній клієнтопотік протягом усього дня.

Чутливість моделі до параметрів варіюється залежно від типу магазину. Наприклад, у транспортних вузлах значення пропускної здатності має помітний вплив на оптимальне число кас, тоді як у магазинах спальних районів критичним фактором є максимальний потік клієнтів. Для кожного типу магазинів визначені конкретні сценарії, що дають змогу мінімізувати витрати за умови забезпечення прийняттого часу очікування клієнтів.

На основі отриманих результатів запропоновано такі рекомендації:

1. Для магазинів транспортного типу рекомендується застосовувати адаптивний підхід до залучення кас залежно від часу дня, зменшуючи кількість активних кас у непікові години.
2. Магазинам у центрі варто забезпечити високий рівень продуктивності кас через застосування швидких розрахункових систем або кас самообслуговування, оскільки це дає змогу скоротити витрати на персонал без втрати якості обслуговування.
3. У спальних районах доцільно підтримувати більшу кількість кас у вечірні години, коли клієнтопотік значно зростає.

ВИСНОВКИ

Висунуто і підтверджено гіпотезу про те, що оптимальне число кас у супермаркетах залежить від типу їх розташування, максимального клієнтопоту, продуктивності кас, а також максимально допустимого часу

очікування клієнтів у черзі.

Дістали подальшого розвитку підходи до прийняття економічних рішень стосовно управління системою обслуговування супермаркетів, а саме розроблено і випробувано імітаційну модель, яка дає змогу визначати оптимальну кількість кас залежно від умов клієнтопотоків та динаміки навантаження для різних типів супермаркетів.

У результаті випробування розробленої моделі встановлено, що для супермаркетів у транспортних вузлах доцільно використовувати меншу кількість кас через нижчий клієнтопотік у пікові години. У центральних районах супермаркети потребують стабільно більшої кількості кас, а в спальних районах рекомендується збільшувати кількість кас у вечірні години через підвищену

активність клієнтів.

Запропоновано методику аналізу чутливості, яка показала, що найбільший вплив на оптимальне число кас має максимально допустимий час очікування, а також продуктивність кас, що залежить від числа позицій в чеку та інтенсивності клієнтопотоків.

Отримані результати можуть бути корисні для ритейлерів, які прагнуть оптимізувати витрати на утримання кас, мінімізувати втрати від клієнтів, що залишили чергу, та покращити якість обслуговування. Запропонований підхід може бути впроваджено як частина систем підтримки прийняття рішень у сфері управління супермаркетами.

Список використаних джерел

1. Підгурський О.І. Математичне та імітаційне моделювання процесів функціонування вузла концентрації гібридних логістичних потоків транзакцій. *Економіка. Фінанси. Менеджмент: Актуальні питання науки і практики*. 2018. № 10. С. 92-107.
2. Xin-She Yang. Discrete event simulation. 2024. pp. 187-196. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-44-314084-6.00020-6>
3. Allen T.T. Theory of Queues. 2011. pp. 79-86. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-85729-139-4_6
4. Gautam Natarajan *Analysis of Queues: Methods and Applications*. CRC Press, 2012.
5. Ravaliminoarimalalason T.B., Randimbendrainibe F. The Poisson Process. *Queues Applied to Telecoms* / ed T.B. Ravaliminoarimalalason, F. Randimbendrainibe. URL: <https://doi.org/10.1002/9781394191987.ch1>
6. Wei Xiong, Tayfur Altıok. An approximation for multi-server queues with deterministic renegeing times. *Annals of Operations Research*. 2009. Vol. 172(1). pp. 143-151. URL: <https://doi.org/10.1007/S10479-009-0534-3>

References

1. Pidhurskyi O.I. Mathematical and simulation modeling of the processes of functioning of a hybrid transaction flow concentration hub. *Economy. Finance. Management: Current Issues of Science and Practice*. 2018. № 10. pp. 92-107. (in Ukrainian).
2. Xin-She Yang. Discrete event simulation. 2024. pp. 187-196. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-44-314084-6.00020-6>
3. Allen T.T. Theory of Queues. 2011. pp. 79-86. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-85729-139-4_6
4. Gautam Natarajan *Analysis of Queues: Methods and Applications*. CRC Press, 2012.
5. Ravaliminoarimalalason T.B., Randimbendrainibe F. The Poisson Process. *Queues Applied to Telecoms* / ed T.B. Ravaliminoarimalalason, F. Randimbendrainibe. URL: <https://doi.org/10.1002/9781394191987.ch1>
6. Wei Xiong, Tayfur Altıok. An approximation for multi-server queues with deterministic renegeing times. *Annals of Operations Research*. 2009. Vol. 172(1). pp. 143-151. URL: <https://doi.org/10.1007/S10479-009-0534-3>

Serhii OSTRIANYN

PhD, Associate Professor, Dnipro University of Technology

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9012-9913>

e-mail: serge.ostrianyyn@gmail.com

Oksana PRYKHODCHENKO

PhD in Economics, Associate Professor, Dnipro University of Technology

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5080-737X>

e-mail: oksana.prykhodchenko@gmail.com

OPTIMIZATION OF NUMBER OF CHECKOUTS IN RETAIL CHAIN USING IMITATIONAL MODELING WITH MEANS OF PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE

This paper explores the optimization of checkout systems in retail supermarkets using simulation modeling. The study employs queuing theory and simulation methods implemented in Python's SimPy package to evaluate and improve the efficiency of checkout operations under various scenarios. The model incorporates customer flow intensity, checkout service rates, and permissible queue wait times, which are dynamically adjusted based on the location type (transport hubs, central districts, or residential areas), day of the week, and peak or non-peak hours. Data sourced from Google Maps on hourly supermarket occupancy levels is used to simulate real-world scenarios. The analysis identifies optimal checkout numbers for different conditions by minimizing total costs, which include operating expenses for checkouts and losses from customers abandoning queues due to excessive waiting times. The results highlight significant differences in optimal checkout numbers depending on supermarket location and customer behavior patterns. For instance, transport hubs require fewer checkouts due to lower peak loads, while central districts demand higher numbers to manage consistent customer flow. Additionally, residential area supermarkets benefit from increased evening checkouts to accommodate after-work shopping surges. Sensitivity analysis reveals that the most critical factors influencing optimal checkout numbers are the maximum allowable wait time, service rate (dependent on average basket size), and customer flow intensity. These findings provide practical recommendations for retail management, suggesting adaptive checkout allocation strategies that align with customer flow patterns and service expectations. The proposed methodologies enhance decision-making and cost-efficiency, offering valuable tools for integrating queue optimization within supermarket management systems.

Keywords: simulation modeling, checkout number optimization, customer flow, checkout productivity, retail