

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет механіко технологічний**

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО
ЗАХИСТУ**
Завідувач кафедри
транспортних технологій та
(назва кафедри)
засобів _____ **у** _____ **АПК**
_____ **Савченко Л.А.**
(підпис) (ПІБ)
« _____ » _____ 2026
р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему «Удосконалення роботи станції технічного обслуговування
методами дослідження операцій»
Спеціальність 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному
_____ **транспорті)»** (код і назва)

Гарант освітньої програми

К. Т. Н., доцент _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Опалко В.Г.
(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Д. Є. Н., професор _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Загурський О.М.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Домотенко С. А.
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет механіко технологічний**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

транспортних технологій та засобів у
АПК

_____ Савченко Л. А.
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
« _____ » _____ 2026

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Домотенко Степану Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 275.03 Транспортні технології (на автомобільному
транспорті) (код і назва)

Тема випускної бакалаврської роботи «Удосконалення роботи станції технічного обслуговування методами дослідження операцій»

затверджена наказом ректора НУБіП України від

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до випускної бакалаврської роботи:

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Розглянути теоретичні аспекти оптимізації роботи підприємства автосервісу, зокрема загальні поняття теорії масового обслуговування, класифікація систем масового обслуговування, характеристики та критерії ефективності СМО, типи моделей систем масового обслуговування, показники ефективності систем масового обслуговування, технічні показники ефективності систем масового обслуговування, методи дослідження систем масового обслуговування.
2. Проаналізувати параметри роботи підприємства, організаційні та управлінські аспекти, загальна характеристика підприємства.
3. Дослідити та розрахувати параметри роботи підприємства з одним каналом обслуговування ТОВ «TIR AVTO GROUP».
4. Проаналізувати систему роботи підприємства ТОВ «TIR AVTO GROUP», охарактеризувати процеси обслуговування автомобілів.

5. Виявити основні проблеми та недоліки в організації системи обслуговування автомобілів та розробити заходи щодо підвищення ефективності системи обслуговування.
6. Обґрунтувати та запропонувати комплекс заходів з удосконалення системи масового обслуговування станції технічного обслуговування ТОВ «TIR AVTO GROUP» та оцінити їх економічну ефективність.

Дата видачі завдання «1» вересня 2025 р.

Керівник випускної бакалаврської роботи

(підпис)

Загурський О.М.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Домотенко С. А.

(прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧ У РОЗІМКНЕНИХ СИСТЕМАХ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ.....	9
1.1. Загальні поняття теорії масового обслуговування.....	9
1.2. Типи моделей систем масового обслуговування та їх класифікація.....	15
1.3. Характеристики та критерії ефективності СМО.....	20
1.4. Методи дослідження систем масового обслуговування.....	26
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ПІДПРИЄМСТВА.....	39
2.1. Загальна характеристика підприємства.....	39
2.2. Розрахунок параметрів роботи ділянки з ремонту стартера автомобіля.....	41
РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СТАНЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТОВ «TIR AVTO GROUP».....	47
3.1. Розрахунок параметрів роботи оптимізованої ділянки з ремонту стартера автомобіля.....	47
3.2. Економічні показники запропонованого удосконалення роботи СТО ТОВ «TIR AVTO GROUP».....	49
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ НА ПІДПРИЄМСТВІ.....	52
4.1. Аналіз стану охорони праці на ТОВ «TIR AVTO GROUP».....	52
4.2. Аналіз і характеристика основних виробничих шкідливостей і небезпечностей на підприємстві технічного сервісу.....	53
4.3. Організаційні та технічні заходи по забезпеченню захисту працівників від дії вказаних вами вище шкідливих та небезпечних факторів.....	55
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64

ВСТУП

Актуальність дослідження. У теперішніх обставинах інтенсивного прогресу автомобільного транспорту та суворой конкурентної боротьби на ринку сервісних послуг продуктивність діяльності станцій технічного обслуговування (СТО) прямо пов'язана зі швидкістю, якістю та координацією виробничих фаз. СТО за своєю природою постають складними багатоканальними розімкненими системами масового обслуговування (СМО), де вхідний потік замовлень і тривалість їхнього опрацювання мають випадковий характер. Нераціональний розподіл наявних ресурсів, брак науково обґрунтованого регулювання праці та недосконалість технологічних маршрутів зумовлюють появу двох протилежних негативних факторів: тривалого перебування замовників у чергах (що спричиняє втрату доходів і зниження прихильності) або довготривалого простою устаткування й співробітників у періоди падіння навантаження. Впровадження класичних підходів до вивчення праці у поєднанні з математичним апаратом теорії масового обслуговування надає можливість знайти оптимальний комерційний та технологічний баланс. Оптимізація кількості робочих постів, зведення до мінімуму часових втрат і нарощування пропускної спроможності підприємства без залучення надмірних капіталовкладень роблять обрану тематику дипломного проєкту надзвичайно значущою для сучасної транспортної галузі.

Ступінь дослідження проблеми. Питаннями моделювання, аналізу та вдосконалення систем масового обслуговування займалися такі видатні науковці, як А. Кранц, О. Хінчин, Б. Гнеденко, Є. Лебедев та інші. Проте, попри глибоку теоретичну базу, під час практичного впровадження моделей СМО для конкретних підприємств автосервісу виникає необхідність урахування специфічних локальних чинників: нерівномірності потоку автомобілів залежно від сезону чи часу доби, багатоетапності процесів

(діагностика, ремонт) та ергономічних параметрах робочих місць. Вивчення способів поєднання теоретичних моделей ТМО з прикладним аналізом трудових процесів на рівні окремої СТО вимагає додаткового деталізування й адаптування.

Метою дипломної роботи є підвищення продуктивності функціонування станції технічного обслуговування автомобілів шляхом оптимізації її параметрів і виробничих процесів на засадах інтегрованого застосування підходів дослідження праці та теорії масового обслуговування.

Для виконання поставленої мети було окреслено та вирішено такі **задачі**:

- Вивчити теоретичні аспекти, класифікаційні ознаки та критерії результативності функціонування розімкнених систем масового обслуговування.
- Проаналізувати техніко-економічні показники діяльності досліджуваного підприємства СТО та структуру його технологічних процесів.
- Здійснити хронометражні заміри та фотографію робочого дня для з'ясування реальних параметрів вхідного потоку замовлень та інтенсивності обслуговування.
- Сформувати математичну модель СТО як багатоканальної СМО та обчислити її ключові операційні характеристики (ймовірність відхилення, середню довжину черги, час очікування).
- Скласти комплекс організаційно-технічних рішень щодо оптимізації праці й кількості обслуговуючих постів, а також оцінити їхній фінансовий, виробничий і соціальний ефект.

Об'єкт дослідження процес виробничо-господарської діяльності станції технічного обслуговування автомобілів як розімкненої системи масового обслуговування.

Предмет дослідження комплекс прийомів та методів теорії масового обслуговування, спрямованих на вдосконалення роботи станції технічного обслуговування.

Методологічну основу роботи становлять підходи системного аналізу, теорії масового обслуговування (математичне моделювання марківських процесів), інструменти дослідження та нормування праці (хронометраж, фотографія робочого часу), а також методи математичної статистики для обробки експериментальних даних і техніко-економічного аналізу.

Інформаційна база дослідження. Інформаційним та джерельним підґрунтям дипломного проєкту слугували: наукові праці фахівців у сфері транспортних технологій та теорії СМО, нормативно-технічна документація з експлуатації та обслуговування ТЗ, статистичні й фінансові звітні дані досліджуваної СТО, а також результати власних натурних спостережень, вимірювань та фотохронометражних, виконаних безпосередньо на підприємстві.

Структура бакалаврської роботи включає вступ, 5 розділів основної частини та висновки. Загальний об'єм роботи складається з 57 сторінок. У дипломній роботі міститься 11 рисунків, 34 формул та 3 таблиці. Список використаної літератури налічує 30 джерел.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ПІДПРИЄМСТВА АВТОСЕРВІСУ

1.1. Загальні поняття теорії масового обслуговування

В академічному розумінні під системою масового обслуговування (СМО) розглядають комплексну структуру, яка сформована з одного або декількох джерел вимог на реалізацію певних операцій, а також певної кількості пристроїв обслуговування (сервісних ліній, каналів обслуговування), котрі здійснюють ці операції відповідно до встановлених алгоритмів за заявками, що надійшли до структури (рис. 1.1).

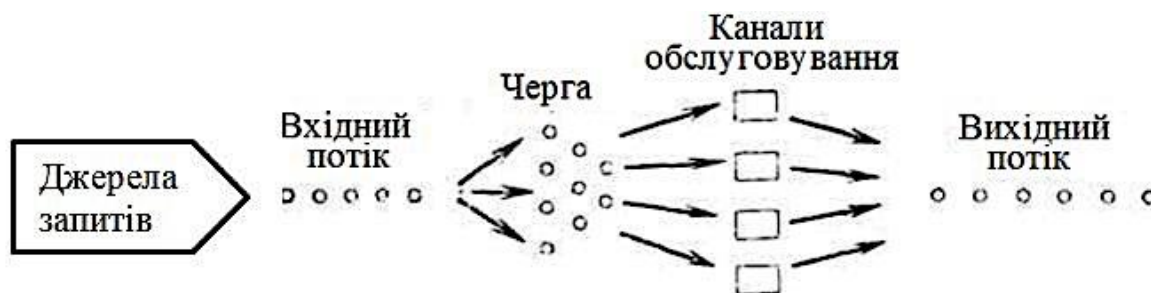


Рис. 1.1. Структура системи масового обслуговування

Специфічною рисою СМО виступає стохастичний характер процесів, які відбуваються, та ймовірність формування черги вимог на опрацювання.

Джерело запитів. Джерело вимог інтерпретується як зовнішня стосовно СМО структура, з якої заявки надходять до неї для подальшої обробки. Зазначене джерело характеризують як нескінченне або скінченне відповідно до того, нескінченна чи обмежена кількість вимог міститься всередині нього. Коли джерело акумулює обмежену, проте доволі значну кількість вимог, його зазвичай трактують як нескінченне. До прикладу, незважаючи на те, що чисельність користувачів інформаційно-пошукового сервісу Google є обмеженою, дослідники припускають, що вони формують нескінченне джерело.

Вхідний потік. Заявки, які генеруються нескінченним джерелом, прибувають до сервісного каналу в конкретні моменти часу $t_0 < t_1 < \dots < t_k < \dots$. Проміжки часу $\xi_k = t_k - t_{k-1}$ ($k > 1$) між послідовними моментами появи вимог є стохастичними величинами. Припускається, що ξ_k формують послідовність взаємонезалежних та ідентично розподілених випадкових величин із функцією розподілу $A(t) = P\{\xi_k < t\}$. У математичному апараті теорії масового обслуговування застосовують обмежений перелік законів розподілу для змалювання вхідних потоків. Базовим серед них є пуассонівський, котрий визначається математичною формулою Пуассона.

Процес обслуговування. Нехай η_k тривалість опрацювання k -го запиту. Передбачається, що η_k ($k = 1, 2, \dots$) незалежні, однаково розподілені стохастичні величини з функцією розподілу $B(t) = P\{\eta_k < t\}$. Функція $B(t)$ детермінується як розподіл тривалості сервісу. Ми припускаємо, що існує щільність імовірності $b(t) = B'(t)$. Аналогічно до опису вхідних потоків вимог, у теорії масового обслуговування застосовують лімітований набір законів розподілу для моделювання часу обробки. Найбільш уживаним є експоненціальний (показниковий) закон розподілу з функцією розподілу $B(t) = 1 - \exp(-\mu t)$. Параметр μ трактується як інтенсивність виконання операцій. Середня тривалість опрацювання дорівнює $\frac{1}{\mu}$. Окрім показникового розподілу, застосовують ерлангівський та гіперекспоненціальний розподіли, котрі виводять шляхом трансформації експоненціального закону.

Канали обслуговування. СМО може функціонувати з одним або декількома каналами (лініями, пристроями) обслуговування. СМО з єдиним каналом іменуються одноканальними або однолінійними, тоді як сервісні системи, що мають у своєму складі більше ліній опрацювання, класифікуються як багатоканальні або багатолінійні. Пристрої сервісу

можуть бути еквівалентними (однорідними) та неоднорідними. У СМО з однорідними приладами всі лінії обробляють вимоги ідентично. У СМО з неоднорідними пристроями лінії відрізняються між собою за певними параметрами, наприклад, за інтенсивністю виконання операцій.

Стратегія обслуговування. Правило, відповідно до якого вимоги відбираються з черги для опрацювання, формує стратегією у обслуговування. Умовно всі існуючі стратегії сервісу за рівнем наданих переваг при обробці поділяють на дві великі категорії: безпріоритетні та пріоритетні. Кожна з окреслених груп розгалужується на ряд підгруп.

Безпріоритетні типи стратегій обслуговування класифікуються на сервіс у порядку надходження, у зворотній послідовності, з довільним вибором із черги, а також на циклічну стратегію обслуговування. Стратегія сервісу в порядку прибуття є найбільш поширеною, переважна більшість наукових праць у галузі теорії масового обслуговування реалізується саме для цього правила. Вона активно впроваджується в операційних системах.

Стратегія сервісу в зворотній послідовності застосовується в операційних системах під час аналізу переривань та побудови стеків. Циклічні варіанти стратегій обслуговування використовуються при обробці даних у режимі розподілу часу.

За наявності пріоритетних стратегій сервісу з наявної черги для виконання передусім обираються заявки з вищим рівнем важливості. Вони розмежовуються на стратегії зі статичними (фіксованими) та стратегічними пріоритетами. За умови стратегії обслуговування з відносним пріоритетом не дозволяється переривати виконання операцій над поточним запитом на лінії.

Якщо ж у структуру з стратегією обслуговування з абсолютним пріоритетом надійде вимога з рівнем важливості вищим, ніж у тієї, що зараз опрацьовується, то система припинить виконання поточної операції, і новий запит негайно надійде на обслуговування. Системи з абсолютним

пріоритетом диференціюють за кількістю пріоритетних рівнів, а також за процедурами обробки перерваних заявок.

При використанні стратегії сервісу з динамічним пріоритетом рівень важливості конкретних вимог коригується залежно від зміни певних показників, як-от тривалість перебування в черзі.

За присутністю тієї чи іншої ознаки системи масового обслуговування можна систематизувати таким чином:

1. За чисельністю вимог, що прибувають за одиницю часу на системи з ординарним та неординарним потоками вимог. Якщо ймовірність одночасного надходження двох чи більше заявок дорівнює нулю або має настільки мізерне значення, що ним дозволено знехтувати, то ми маємо систему з ординарним потоком вимог. Наприклад, потік заявок у вигляді літаків, що прибувають на злітно-посадкову смугу летовища, можна вважати ординарним.

2. За наявністю зв'язку між вимогами на системи без післядії та з наявністю післядії. Якщо ймовірність появи вимог у структурі в певний момент часу абсолютно не залежить від того, скільки заявок уже було прийнято, тобто не пов'язана з минулим досліджуваного процесу, то ми маємо систему без післядії, у протилежному випадку з післядією. Прикладом структури з післядією може слугувати потік студентів, які складають залік екзаменатору.

3. За реакцією вимоги на завантаженість ліній на системи з відмовами та з очікуванням. Якщо заявка, яка прибула на обслуговування, застала всі наявні лінії зайнятими і змушена покинути структуру, то ми маємо систему з відмовами.

4. Системи з очікуванням поділяються на структури з обмеженим та необмеженим очікуванням. Якщо заявка покидає структуру, коли черга досягла певного критичного розміру, то ми маємо систему з обмеженим очікуванням. Прикладом може слугувати самоскид із бетонним розчином.

Якщо тривалість очікування є настільки великою, що суміш може застигнути, то вантажівку доцільно перенаправити для розвантаження в інше місце. Коли ж вимога, яка надійшла, застала всі прилади зайнятими і змушена чекати своєї черги доти, доки її не буде повністю оброблено, то ми маємо систему з очікуванням без обмежень. Приклад: повітряне судно, що перебуває в зоні аеродрому й очікує звільнення смуги для посадки.

5. За методом вибору вимог на обслуговування розподіляються таким чином: із пріоритетом вимог; у процесі прибуття вимог; із випадковим довільним вибором вимог; остання вимога опрацьовується першою.

Якщо система масового обслуговування охоплює кілька різновидів вимог і за певними ознаками встановлюється черговість їхнього вибору на обробку, то ми маємо систему з пріоритетом вимог. Приміром, під час доставки матеріалів на будівельний майданчик насамперед монтують ті елементи, що чітко зумовлені технологією будівництва.

Якщо канал, що звільнилася, приймає вимогу, яка прибула в структуру раніше за інші, то ми маємо систему обслуговування вимог у процесі їх надходження. Наприклад, покупець, котрий підійшов першим до касира, обслуговується першим.

Якщо вимоги з черги до сервісного каналу надходять стохастично, то ми маємо систему з випадковим вибором вимог на обслуговування. Приклад: вибір майстром-сантехніком однієї з декількох заявок від жильців, із часом реєстрації яких він не обізнаний.

Якщо для обробки обирається та вимога, що надійшла останньою, то ми маємо систему з принципом «останній прийшов першим обслужений». Приміром, під час складування будівельних конструкцій штабелями зручніше брати зі штабеля (черги) виріб, що був покладений останнім.

6. За тривалістю опрацювання вимоги на системи з детермінованим (фіксованим) та випадковим часом обслуговування. Якщо

проміжок часу між моментом надходження заявки в канал сервісу і моментом виходу її з каналу є константним, то ми маємо систему з детермінованим часом обслуговування, у протилежному випадку. Наприклад, автоматичне миття автомобілів представляє систему обслуговування з детермінованим часом обробки.

7. За кількістю сервісних каналів на одно- та багатоканальні структури. Приміром, під час зведення споруди може застосовуватися один підйомний кран або декілька одиниць техніки.

8. За чисельністю етапів обробки на одно- та багатофазні системи. Якщо канали сервісу розташовані послідовно і є неоднорідними, то ми маємо багатофазну систему обслуговування. Прикладом такої структури може слугувати обслуговування транспортних засобів на СТО (комплекс із миття, діагностики, заміни фільтруючих елементів тощо).

9. За однорідністю заявок на системи з однорідними та неоднорідними потоками вимог. Приміром, якщо під завантаження прибувають автофургони однакової вантажопідйомності, то ми маємо систему з однорідним потоком вимог, якщо різної з неоднорідним.

10. За рівнем завантаженості ліній на впорядковані та неупорядковані системи. У впорядкованих структурах обслуговуючі канали завантажуються нерівномірно. Заявка, що надійшла, опрацьовується чітко визначеним каналом із тих, що є вільними на даний момент, а саме лінією з найменшим порядковим номером (припускається, що всі канали пронумеровані).

У неупорядкованих структурах усі канали є абсолютно ідентичними, і вимога, що надійшла, приймається до обробки будь-яким із вільних каналів без жодних преференцій.

Для лаконічного маркування розімкнутих безпріоритетних неупорядкованих систем масового обслуговування англійський математик Д.Кендал запропонував уніфіковане позначення виду: $A/B/n/m$.

Компоненти A та B описують, відповідно, закони розподілу проміжків часу між подіями вхідного потоку вимог та безпосередньо часом обслуговування, n визначає кількість діючих каналів обслуговування, а m місткість місць очікування в черзі.

Конкретні закони розподілу маркують таким чином: M експоненціальний розподіл, E або E_k ерланговський розподіл; H або H_r гіперекспоненціальний розподіл; D регулярний потік подій; G розподіл загального вигляду. Приміром, символічний запис $D/H_2/3/10$ характеризує систему з трьома паралельними каналами обслуговування, постійним (детермінованим) інтервалом часу між запитами у вхідному потоці, де тривалість обслуговування розподілена за гіперекспоненціальним законом другого порядку, а кількість доступних місць для очікування в черзі становить 10. Якщо параметр m у даному записі відсутній, то це демонструє, що кількість місць для очікування є нескінченною.

1.2. Типи моделей систем масового обслуговування та їх класифікація

У межах наукових засад теорії систем масового обслуговування підлягають вивченню виключно такі СМО, аналітичні критерії продуктивності яких є можливість визначити розрахунковим шляхом у фінітному або чисельному форматі. Для ідентифікації подібних аналітичних моделей СМО доволі часто застосовують символічний запис, запропонований вченим Д.Кендаллом $X/Y/Z$, де через X позначають закон розподілу часових інтервалів прибуття (надходження) заявок, через Y закон розподілу тривалості їхнього безпосереднього опрацювання, а через Z кількість пристроїв обслуговування.

Найбільш вживаною та базовою моделлю, яка детально аналізується в теорії масового обслуговування, виступає модель класу $M/M/1$. Ця математична модель оснащена лише одним єдиним сервісним пристроєм, і

в ній стохастичні процеси розподілу часових проміжків надходження вимог (перший літерний індекс M) та їхнього подальшого опрацювання (другий літерний індекс M) класифікуються як марківські. Для зазначеної моделі тривалість інтервалу між двома послідовними появами замовлень у структурі та тривалість їхнього сервісного обслуговування описуються експоненціальними (показниковими) законами розподілу. Модель класу $M/M/1$ знаходить своє практичне застосування, до прикладу, під час відтворення та дослідження функціонування однопроцесорної обчислювальної системи або типового апаратного пристрою для введення чи виведення інформаційних даних (такого як магнітний накопичувач, принтер тощо).

Модель класу $D/D/1$ репрезентує детермінований (повністю визначений) тип, тоді як модель виду $D/M/1$ вважається комбінованою (змішаною). За умов, коли вихідна інформація про досліджувану структуру є суттєво обмеженою, її теоретичну модель маркують загальним індексом $G/G/m$ це модель із довільними (будь-якими) законами розподілу ймовірностей стохастичних величин та наявною кількістю m пристроїв для виконання операцій.

У теорії масового обслуговування точні аналітичні висновки й формули виведені виключно для моделей категорій $D/D/1$, $M/M/1$ та $M/G/1$. Задля розрахунку операційних характеристик моделей з іншими комбінаціями параметрів СМО виникає об'єктивна необхідність залучати сучасні методи комп'ютерного імітаційного моделювання.

У практично діючих системах далеко не завжди є можливість математично формалізувати закони розподілу вхідних потоків замовлень та тривалості їхньої безпосередньої обробки. Для їхнього точного з'ясування потрібно володіти інструментами оцінювання специфіки та профілю поточного робочого навантаження структури. Зокрема, у випадку комп'ютерного моделювання обчислювальної системи необхідно володіти

інформацією про те, у які саме часові моменти до комплексу надходять нові операційні завдання, який обсяг часу необхідний центральному процесору для завершення кожного з них, як часто працююча програма формує запити до пристроїв введення-виведення інформації. З цією метою виникає потреба сформувати детальну діаграму функціонування системи, на котрій є можливість наочно відобразити потоки вхідних завдань, що надходять у комплекс, апаратні чи людські ресурси, на які вони спрямовуються, а також тривалість обслуговування завдань на зазначених ресурсних одиницях.

Якщо графічна схема робочого навантаження має виражений періодичний характер, то під час безпосереднього моніторингу за роботою комп'ютерної техніки з'являється реальна можливість сформувати репрезентативну вибірку даних, яку згодом дозволено задіяти для ретельного аналізу критеріїв ефективності СМО. Проте комп'ютерне моделювання із залученням такого фіксованого опису робочого навантаження (сценарного підходу) дозволить лише репродукувати фактичні результати функціонування обчислювальної системи, які вже відбулися в минулому. На основі цих відомостей неможливо об'єктивно спрогнозувати, як саме працюватиме комплекс у подальших періодах.

Задля того, щоб заздалегідь передбачити поведінку структури в майбутньому, необхідно виявити приховані внутрішні закономірності та математично обґрунтувати один або декілька законів розподілу ймовірностей, відмовившись від використання первинних необроблених даних, накопичених шляхом прямих вимірювань.

Якщо для калькуляції потенційного робочого навантаження на систему залучаються імовірнісні розподіли, а для інтерпретації підсумків моделювання відповідні інструменти математичної статистики, то здобуті висновки можна успішно екстраполювати на значно ширший спектр робочих навантажень, порівняно з використанням суворо обмеженого сценарію.

За характером реакції на вимоги, що надходять на обслуговування, розрізняють такі типи СМО: системи з відмовами (втратами); системи з чергою (очікуванням).

У СМО з відмовами будь-яка заявка на обслуговування, яка прибуває в той момент, коли абсолютно всі сервісні канали є зайнятими, негайно залишає систему непереробленою і в подальшому жодним чином не враховується.

У СМО з чергою (очікуванням), за умови стовідсоткової зайнятості всіх наявних ліній, кожне нове замовлення перенаправляється в чергу для очікування. При цьому її подальше опрацювання, як правило, здійснюється на основі класичного правила черги: першим прибув першим обслуговується. У певних специфічних ситуаціях реалізується пріоритетне обслуговування заявок.

Пріоритет може бути абсолютним, коли вимога, яка щойно надійшла до структури, примусово виштовхує чи перериває обслуговування тих, що вже чекають або обробляються, а також відносним, коли більш значуща вимога просто посідає вигідніше місце всередині черги (наприклад, транспортні засоби учасників бойових дій на станціях технічного обслуговування ремонтуються позачергово або значно оперативніше, ніж автівки рядових клієнтів).

За критерієм організації місць очікування СМО поділяються на системи з обмеженою (лімітованою) довжиною черги або з необмеженою (нескінченною). До прикладу, якщо в межах однієї локації функціонує кілька автозаправних станцій, то водій, що під'їхав для заправки паливом, може покинути даний об'єкт, зважаючи на надміру довгу чергу автомобілів, та попрямувати до іншого пункту. У такому контексті розглядається обмеження черги через суб'єктивно припустимий час очікування. Діаметрально інша ситуація виникає, коли поблизу немає жодних альтернативних АЗС за таких обставин водій змушений залишатися й

чекати заправки, незважаючи на колосальну чергу. У цьому випадку ми маємо справу зі СМО з необмеженою чергою очікування.

За чисельністю паралельно функціонуючих сервісних каналів СМО бувають одноканальними або багатоканальними (наприклад, сучасні станції технічного обслуговування автомобілів можуть бути організовані як за одно-, так і за багатоканальним принципом, залежно від кількості наявних постів та робочих ліній). Зазвичай СМО не прийнято класифікувати суто за кількістю послідовних фаз обробки всередині одного каналу, проте під час детального й поглибленого аналізу кожної окремої лінії цей фактор у обов'язковому порядку береться до уваги дослідниками. Залежно від чисельності джерел, що генерують запити на обслуговування, розрізняють розімкнуті (відкриті) та замкнуті (закриті) типи СМО:

- В розімкнутих СМО сумарна кількість вимог, яка може надійти до структури для подальшого опрацювання, теоретично вважається нескінченною, тобто їхній загальний обсяг абсолютно не пов'язаний із поточним режимом функціонування СМО та її миттєвим станом.
- Для замкнутих СМО першочерговою ознакою є суворо лімітована кількість джерел генерації замовлень, які після обслуговування циклічно й багаторазово повертаються назад у систему, хоча сам інтервал цього повернення є випадковою величиною.

Залежно від часових умов формування вхідного та вихідного потоків заявок, СМО додатково диференціюють на:

- СМО з дискретним часом у таких системах момент прибуття запиту на обслуговування або момент його виходу з системи у повністю обробленому вигляді може відбуватися виключно у суворо визначені, фіксовані моменти часу, часові проміжки між якими є кратними деякій сталій базовій величині. Такий режим трансформації станів СМО притаманний здебільшого персональним комп'ютерам, які здійснюють обробку різнопланової інформації виключно за тактовими імпульсами й

командами пристрою управління, що синхронізує роботу абсолютно всіх апаратних блоків ПК та алгоритмів обчислення даних.

- СМО з безперервним часом у цих структурах поява замовлень у системі та їхній вихід здійснюються у будь-які довільні моменти часу, без накладання жодних штучних обмежень чи лімітів на тривалість інтервалу між цими подіями. Подібний режим динамічної зміни станів системи є характерним, до прикладу, для повсякденної роботи автозаправних станцій та великих станцій технічного обслуговування (СТО), коли транспортні засоби прибувають на об'єкт та залишають його межі в абсолютно будь-який момент часу.

Будь-яка СМО, що являє собою спосіб реалізації взаємодії двох випадкових у часі процесів появи запитів на обслуговування та реалізації цих запитів, характеризується: 1) вхідним потоком, тобто потоком надходження запитів на обслуговування; 2) стратегією черги, тобто правилами узгодженості виконання запитів у часі; 3) механізмом обслуговування (засобами реалізації запитів); 4) пріоритетом, тобто визначеною послідовністю між вимогами (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Класифікація систем масового обслуговування

1.3. Характеристики та критерії ефективності СМО

Процес функціонування будь-якої СМО полягає в обробці вхідного потоку заявок, котрі поодиноці або певними групами прибувають до неї в деякі, як правило, стохастичні моменти часу. Заявки, які надійшли до СМО, опрацьовуються протягом певного часового інтервалу, після чого покидають межі структури.

У кожній сервісній системі обов'язково передбачена присутність інструментів для виконання операцій (альтернативні назви: прилади для обслуговування, сервери, канали) та вимог (альтернативні назви: заявки, виклики, клієнти), які потребують виконання цих операцій. Правила або алгоритми взаємодії сервісних пристроїв і вимог ми будемо іменувати стратегіями розташування в чергу та обслуговуванням.

Для кожної окремої СМО чітко детермінується регламент роботи. Варто підкреслити, що для конкретної вимоги може знадобитися кілька послідовних циклів обробки одним або групою пристроїв. Зазвичай дефініція «пристрій для обслуговування» застосовується стосовно відносно простих моделей, у котрих кожна поодинокі вимога може оброблятися лише одним сервісним вузлом. Коли ж вимоги проходять обробку на кількох пристроях у чітко визначеній послідовності, переміщуючись за заздалегідь встановленим маршрутом, то в такому випадку має місце «мережа обслуговування» (англійською мовою «queueing network»).

Загалом за допомогою інструментарію та методів теорії масового обслуговування здійснюють вирішення завдань із проєктування, моделювання та подальшої експлуатації однотипних сервісних елементів до прикладу, здійснюють калькуляцію необхідної кількості контрольно-пропускного обладнання, локацій для виконання ремонту, бензоколонок, задіяного персоналу, ліній телекомунікаційного зв'язку, одиниць технічного обладнання обчислювальної техніки тощо.

Окремим класом завдань у межах теорії масового обслуговування виступає визначення просторових зон накопичення вимог у сервісній системі, наприклад, розрахунок обсягу місць на стелажних конструкціях на складі або в багатоярусному автогаражі, визначення чисельності пристроїв введення-виведення інформаційних даних комп'ютера, розрахунок кількості ліжко-місць у палатах медичного госпіталю та інше.

Найчастіше результативність функціонування будь-якої СМО оцінюється на основі таких аналітичних показників:

- середня чисельність вимог, які сервісна система спроможна обробити за обрану одиницю часу;
- середнє відсоткове співвідношення вимог, котрі залишили систему незадоволеними (не були обслужені);
- ймовірність того, що заявку, яка щойно надійшла до структури, буде безперешкодно прийнято для подальшого опрацювання;
- середній часовий інтервал очікування заявки всередині черги;
- математичний закон розподілу тривалості очікування;
- середня кількість наявних вимог у черзі;
- математичний закон розподілу чисельності вимог у черзі;
- коефіцієнт поточного завантаження сервісного пристрою для обслуговування;
- середня чисельність каналів, безпосередньо зайнятих виконанням операцій.

Щоб точно розрахувати зазначені параметри, виникає потреба комплексно охарактеризувати СМО, тобто детально описати та встановити такі базові характеристики:

- вхідний потік заявок (вимоги, які прибувають до структури з метою подальшого сервісного опрацювання);

- стратегії розташування вимог у чергу, а також алгоритми вибору заявок із неї;
- правила й регламенти, на основі яких здійснюється безпосередній сервіс;
- вихідний потік заявок (вимоги, які остаточно залишають межі системи);
- графіки та режими функціонування системи.

Показники ефективності систем масового обслуговування. На сьогоднішній день неможливо уявити життєдіяльність сучасної людини без її регулярної взаємодії з різноманітними сервісними системами: публічними бібліотеками, муніципальними транспортними засобами, установами медицини, телефонним зв'язком, торговельними ринками, фінансовими банками тощо. Під час математичного моделювання таких процесів взаємодії обов'язково необхідно брати до уваги присутність певних запитів і вимог щодо виконання послуг, а також технічних засобів, спроможних у необхідній мірі задовольнити ці запити. Методологія математичного моделювання процесів функціонування систем масового обслуговування (СМО) дозволяє формувати змістовні, практичні та ефективні рекомендації щодо безпосереднього проєктування, реалізації та стратегічного керування роботою цих структур у розрізі їхнього безпосереднього цільового призначення.

Фундаментальною рисою СМО виступає присутність двох взаємозалежних сторін: з одного боку, суб'єкт, що безпосередньо потребує виконання певних операцій, а з іншого боку інфраструктурна одиниця, призначена для того, щоб реалізувати необхідне обслуговування. Повністю елімінувати чи уникнути випадковостей у цих взаємовідносинах абсолютно неможливо. Їхня постійна поява зумовлена самою природою взаємодії згаданих сторін: запити на виконання послуг як у часовому вимірі, так і в певному спектрі вимог мають суто стохастичний характер; тривалість

виконання операцій теж підпорядкована випадковим закономірностям (до прикладу, момент появи замовлення на конкретний вид технічного обслуговування чи ремонту та безпосередній термін реалізації цього запиту).

У науці розроблена значна кількість математичних моделей СМО. Розглянемо детальніше моделі СМО, в рамках яких задіяні методи кількісної та якісної оцінки їхньої повсякденної роботи. СМО, що репрезентовані такими моделями, виступають певним спрощенням реально існуючих інфраструктурних систем, проте вони дозволяють із високим рівнем відповідності або адекватності охарактеризувати їхній якісний рівень та наближені кількісні параметри.

У багатьох прикладних математичних моделях (ММ) аналітичний інструментарій та математичний апарат процесів теорії масового обслуговування (ТМО) є досить складним для сприйняття. Зважаючи на колосальну практичну значущість розуміння базових засад ТМО, ми будемо оперувати готовими результатами теоретичних досліджень та обґрунтувань із наданням відповідних розлогих пояснень.

Ключову увагу буде сфокусовано на операційних характеристиках (таких як середня “довжина” наявної черги, середній термін перебування в очікуванні сервісу, ймовірність того, що абсолютно всі компоненти системи в конкретний момент часу виявляться задіяними), а також на інших аналітичних показниках кількісних оцінок результативності функціонування. На теперішній час поки що не розроблено уніфікованого чи єдиного підходу до вирішення оптимізаційних задач у ТМО. У переважній більшості випадків для успішного розв'язання конкретної задачі залучається спеціалізований метод вузького цільового призначення.

Технічні показники ефективності систем масового обслуговування.

Серед технічних показників можна відокремити такі:

1) Ймовірність того, що заявка, яка прибуває до структури, відмовиться ставати до наявної черги і буде остаточно втрачена сервісною системою P_{vidm} . Зазначений аналітичний критерій для систем масового обслуговування з відмовами є еквівалентним імовірності того, що всередині структури на даний момент перебуває саме така кількість вимог, яка відповідає загальному числу наявних сервісних каналів:

$$P_{vidm} = P_n \quad (1.1)$$

де n —кількість каналів обслуговування.

Для системи з обмеженою довжиною черги P_{vidm} дорівнює імовірності того, що в системі міститься $n + m$ вимог:

$$P_{vidm} = P_{n+m} \quad (1.2)$$

де m —допустима довжина черги.

Протилежним показником є імовірність обслуговування вимоги:

$$P_{vidm} = P_{n+m} \quad (1.3)$$

де m —допустима довжина черги.

Протилежним показником є імовірність обслуговування вимоги:

$$P_{obs1} = 1 - P_{vidm} \quad (1.4)$$

2) Середня кількість вимог, що очікують на обслуговування:

$$L_q = \sum_{i=n+1}^{n+m} (i - n) p_i \quad (1.6)$$

де p_i —імовірність того, що в системі міститься i вимог;

3) відносна й абсолютна пропускні здатності системи, які визначають за такими формулами:

– відносна пропускна здатність:

$$Q = 1 - P_{vidm} \quad (1.7)$$

– абсолютна пропускна спроможність:

$$A = \lambda \cdot Q \quad (1.8)$$

4) середня кількість зайнятих обслуговуванням каналів для систем G/G/n/m (тобто n обслуговуючі пристрої, m місця для чекання):

$$\bar{n} = \sum_{i=1}^{n-1} i p_i + n \sum_{i=n}^{n+m} p_i \quad (1.9)$$

Для систем масового обслуговування з відмовами середню кількість зайнятих обслуговуванням каналів можна знайти за формулою:

$$\bar{n} = \sum_{i=1}^n i \cdot p_i \quad (1.10)$$

5) загальна кількість вимог, що містяться в системі L_s . Цей показник визначають так:

- для систем масового обслуговування з відмовами:

$$c = \bar{n} \quad (1.11)$$

- для систем масового обслуговування з обмеженою довжиною черги:

$$L_s = \bar{n} + L_q \quad (1.12)$$

6) Середня тривалість перебування вимог в очікуванні моменту старту обслуговування. У разі, коли є відомою інтегральна функція розподілу ймовірностей часу перебування вимоги в очікуванні початку її безпосереднього опрацювання $W(t)=P(T_q < t)$, то середня тривалість очікування замовленнями моменту старту сервісу T_q обчислюється як математичне сподівання стохастичної величини T_q :

$$\tau_q = M[T_q] = \int_0^{\infty} t dW(t) \quad (1.13)$$

При показовому (експоненціальному) законі розподіли вимог у вхідному потоці τ_q можна визначити за формулою:

$$\tau_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (1.14)$$

Фінансово-економічні критерії результативності функціонування систем масового обслуговування.

Параметри, які відображають комерційні та фінансові специфічні риси систем масового обслуговування, переважно розробляються й систематизуються згідно з конкретним різновидом структури та її безпосередньою цільовою орієнтацією.

Одним із базових інтегральних критеріїв виступає загальна економічна доцільність роботи сервісної системи:

$$G = \lambda P_{obsl} C_s T - E \quad (1.15)$$

де C_s —середній економічний ефект, отриманий під час обслуговуванні однієї вимоги; T —розглянутий інтервал часу; E —величина втрат у системі. Останню величину (втрати) можна визначити так:

– для систем з відмовами

$$E = (c_e \bar{n} + \lambda c_{zb} P_{vidm} + c_{prost} \bar{n}_{viln}) T \quad (1.16)$$

де c_e —вартість експлуатації одного каналу за одиницю часу;

c_{zb} —вартість збитків унаслідок виходу вимог із системи за одиницю часу;

c_n —вартість одиниці часу простоювання каналу обслуговування;

$\bar{n}_{viln}$ —середня кількість вільних каналів (що простоюють), $\bar{n}_{viln} = n - \bar{n}$;

– для систем з очікуванням:

$$E = (c_e \bar{n} + c_q L_q \lambda + c_{zb} \bar{n}_{viln}) T \quad (1.17)$$

де c_q —вартість втрат, пов'язаних із простоюванням вимоги в черзі за одиницю часу.

1.4. Методи дослідження систем масового обслуговування

Ключовою місією вивчення СМО постає виявлення закономірностей і взаємозв'язків фундаментальних параметрів, зокрема: середня тривалість перебування в очікуванні, вірогідність відхилення в обслуговуванні від внутрішніх чинників структури інтенсивностей виконання операцій на сервісних вузлах, сумарної чисельності пристроїв обробки, обраного правила сервісу. Величезна варіативність і різноманіття СМО виключає можливість залучення для розрахункового аналізу якогось єдиного уніфікованого підходу. Водночас у практичній діяльності для конкретної

категорії СМО переважно впроваджується один спеціалізований метод, що надає змогу звести до мінімуму обчислювальні процедури й суттєво зменшити часові витрати на з'ясування головних операційних взаємозв'язків.

Диференціальний метод.

Диференціальний підхід є придатним для застосування з метою вивчення СМО з пуассонівськими (найпростішими) потоками подій, тобто коли тривалість обробки та часові проміжки між прибуттям вимог підпорядковуються показниковому (експоненціальному) закону розподілу. За таких умов процес трансформації чисельності заявок у межах структури класифікується як марківський, і його можна детально проаналізувати за відповідною науковою методикою. Черговість етапів дослідження виглядає таким чином:

- на основі аналізу функціонування сервісної системи виокремлюють усі можливі стани структури, потенційні варіанти переходів між цими станами, а також їхні параметри інтенсивності, після чого формують (будують) графову модель станів і переходів;
- з кожним окремим станом зіставляється відповідна йому ймовірність, на основі чого конструюється (складається) система диференціальних рівнянь для ймовірностей перебування системи в цих станах. Отриману систему раціонально розв'язувати та аналізувати із залученням однієї з сучасних систем комп'ютерної математики.

Коли вивчення сервісної структури в усталеному (стаціонарному) режимі планується заздалегідь, то замість диференціальних формується система лінійних алгебраїчних рівнянь для фінальних (стаціонарних) ймовірностей станів. Здебільшого підсумкове рішення вдається трансформувати у зручні фінітні розрахункові формули.

Застосування диференціального методу для аналітичного вивчення СМО дослідимо на прикладі сервісної системи з груповим (пакетним)

відбором вимог для подальшого опрацювання. Зазначена СМО сформована з накопичувального буфера, до якого прибуває пуассонівський потік заявок із показником інтенсивності λ . Через певні часові інтервали вимоги, що встигли накопичитися, вилучаються для безпосереднього виконання операцій. Гранична місткість накопичувального буфера становить k запитів. Показник інтенсивності вибору замовлень із накопичувача визначається як μ_i ($i = 0, 1, \dots, k$), тобто він безпосередньо зумовлюється поточною кількістю вимог всередині нього. Цю модель СМО можна успішно задіяти, до прикладу, як математичне відображення (модель) функціонування узгоджувального буферного пристрою для сучасної інформаційної системи.

Нехай s_i стан, коли в накопичувачі міститься i запитів, імовірність цього p_i , $i = 1, 2, \dots, k$. Ця СМО відповідно до надходження нового запиту переходить зі стану s_i у стан s_{i+1} , інтенсивність цього переходу λ . Під час вибору запитів із накопичувача відбувається перехід зі стану s_i ($i = 1, 2, \dots, k$) у стан s_0 . Інтенсивність цього переходу μ_i . Граф станів і переходів для цієї СМО при $k=4$ зображений на рисунку 1.3.

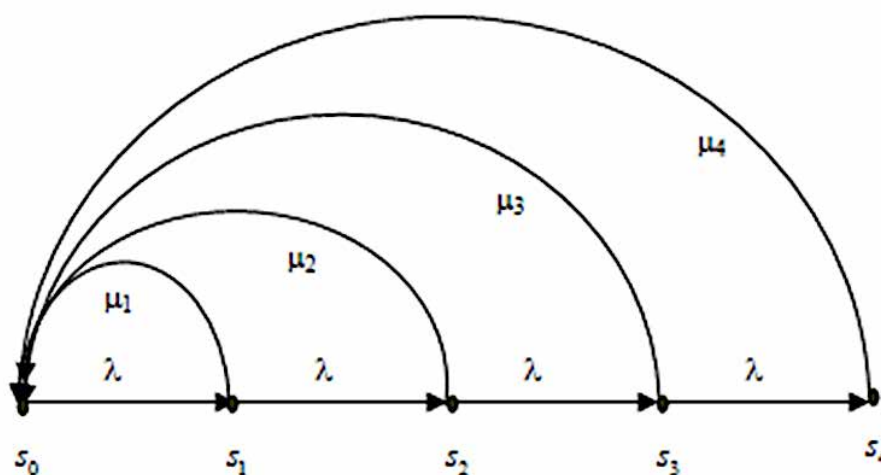


Рис. 1.3. Граф станів і переходів для системи з груповим вибором

Склавши для досліджуваної СМО систему диференціальних рівнянь, отримаємо:

$$P'_0(t) = -\lambda p_0(t) + \sum_{i=1}^k \mu_i \cdot p_i(t) \quad (1.18)$$

$$P'_0(t) = -(\lambda + \mu_i)p_i(t) + \lambda p_{i-1}(t), 1 \leq i \leq k \quad (1.19)$$

$$P'_0(t) = -\mu_k p_k(t) + \lambda p_{k-1}(t) \quad (1.20)$$

Початкові умови $p_0(0) = 1, p_i(0) = 0, i \neq 0$.

Для стаціонарного стану система перетворюється на таку:

$$-\lambda p_0 + \sum_{i=1}^k \mu_i \cdot p_i = 0 \quad (1.21)$$

$$-(\lambda + \mu_i)p_i + \lambda p_{i-1} = 0, 1 \leq i \leq k \quad (1.22)$$

$$-\mu_k p_k + \lambda p_{k-1} = 0 \quad (1.23)$$

Умова нормування $p_0 + p_1 + p_2 + \dots + p_k = 1$

З рівнянь системи, починаючи з другого, послідовно отримаємо:

$$p_1 = \frac{\lambda}{(\lambda + \mu_1)} \cdot p_0 \quad p_2 = \frac{\lambda}{(\lambda + \mu_2)} \cdot p_1 = \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu_1)(\lambda + \mu_2)} \cdot p_0 \quad (1.24)$$

$$p_i = \frac{\lambda^i}{\prod_{e=1}^i (\lambda + \mu_e)} p_0 \quad p_k = \frac{\lambda^k}{\mu_k \prod_{e=1}^{k-1} (\lambda + \mu_e)} \cdot p_0 \quad (1.25)$$

Підставивши значення p_i , виражені через p_0 , в умову нормування, отримаємо:

$$p_0 = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^{k-1} \lambda^i}{\prod_{e=1}^i (\lambda + \mu_e)} + \frac{\lambda^k}{\mu_k \prod_{e=1}^{k-1} (\lambda + \mu_e)} \right]^{-1} \quad (1.26)$$

Базові характеристики досліджуваної системи:

- імовірність відмови щодо обслуговування $P_{vidm} = p_k$;
- середня кількість запитів у накопичувачі обслуговування $L_q = \sum_{i=1}^k i p_i$;
- середній час перебування запитів у накопичувачі $\tau_q = \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i}$;

Спираючись на дані математичні вирази, з'являється можливість розраховувати та підбирати необхідну місткість (обсяг) буферного пристрою, задля того щоб вірогідність його можливого надлишкового переповнення перебувала в заздалегідь установлених межах.

Метод фаз.

Методологія фаз надає можливість аналізувати та досліджувати СМО значно загальнішої архітектури, порівняно з класичним найпростішим пуассонівським випадком, шляхом інтеграції (введення) допоміжних внутрішніх станів. Це дозволяє задіяти для такої модернізованої (розширеної) системи усталену наукову методику побудови математичних рівнянь для зазначених додаткових станів. Метод фаз переважно впроваджується в тих ситуаціях, коли стохастичні потоки подій у межах СМО описуються за допомогою ерлангівського або гіперекспоненціального законів розподілу ймовірностей. Для методології фаз є можливість виокремити чотири фундаментальні (базові) підходи здійснення переходу до модернізованої розширеної системи математичних рівнянь:

1. Тривалість безпосереднього опрацювання (час обслуговування) розподілена за ерлангівським законом k -го порядку з відповідним параметром μ . За таких обставин сервісний канал обслуговування умовно заміщується сукупністю з k окремих віртуальних (фіктивних) каналів (так званих фаз), які розташовані в системі строго послідовно один за одним. Кожне окреме замовлення (запит), яке було прийняте до опрацювання, послідовно та крок за кроком проходить крізь ці k фаз, затримуючись на кожній окремій фазі на часовий інтервал, що підпорядковується показниковому (експоненціальному) закону розподілу з константним параметром μ . Будь-який новий вхідний запит не приймається до обробки до того самого моменту часу, доки попереднє замовлення повністю не подолає всі наявні k фаз сервісного обслуговування. Функціонування СМО за таких умов математично формалізується марківським випадковим процесом із наявними станами s_{ij} , $1 \leq j \leq k$. Конкретний стан s_{ij} сигналізує про те, що всередині сервісної системи зараз перебуває всього i запитів, а поточне замовлення проходить стадію обробки безпосередньо на j -й фазі.

Зазначеному стохастичному процесу відповідають шукані ймовірності перебування в станах $p_{ij}(t)$. На рисунку 1.4 наочно відображено граф станів і можливих переходів для класичної однолінійної СМО з ерлангівським потоком сервісного обслуговування другого порядку виду $M/E_2/1$, на основі якого доволі легко формується підсумкова система рівнянь. Якщо в результаті математичних обчислень ймовірності виду $p_{ij}(t)$ будуть успішно знайдені, то загальні ймовірності станів $p_i(t)$ можна без перешкод визначити за допомогою розрахункової формули $p_i(t) = \sum_{j=1}^k p_{ij}(t)$.

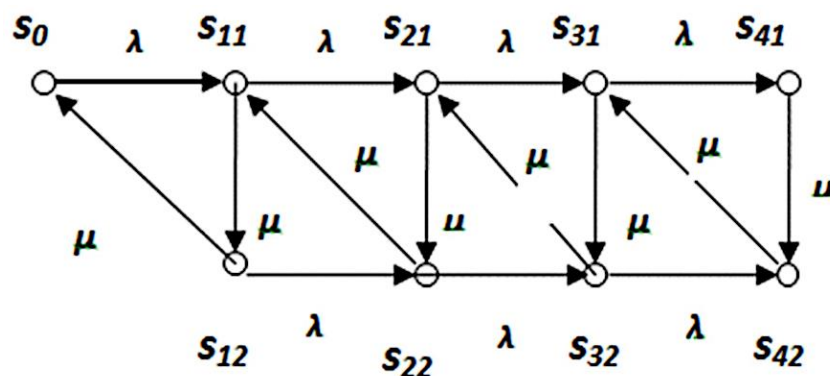


Рис. 1.4. Розширений граф станів і переходів системи $M/E_2/1$

2. Тривалість опрацювання (час обслуговування) підпорядкована гіперекспоненціальному закону розподілу k -го порядку з відповідними параметрами b_i, μ_i . За таких обставин сервісний канал обробки умовно заміщується сукупністю окремих стадій (фаз) сервісу з фіксованими параметрами μ_i , які розташовані в структурі паралельно одна одній. Зі значенням ймовірності b_i , кожне окреме замовлення (запит) проходить обробку безпосередньо на i -й фазі. Схема (граф) станів і можливих переходів для класичної однолінійної СМО з наявним гіперекспоненціальним потоком сервісного обслуговування другого порядку виду $M/H_2/1$ наочно представлена на графічному рисунку 1.5.

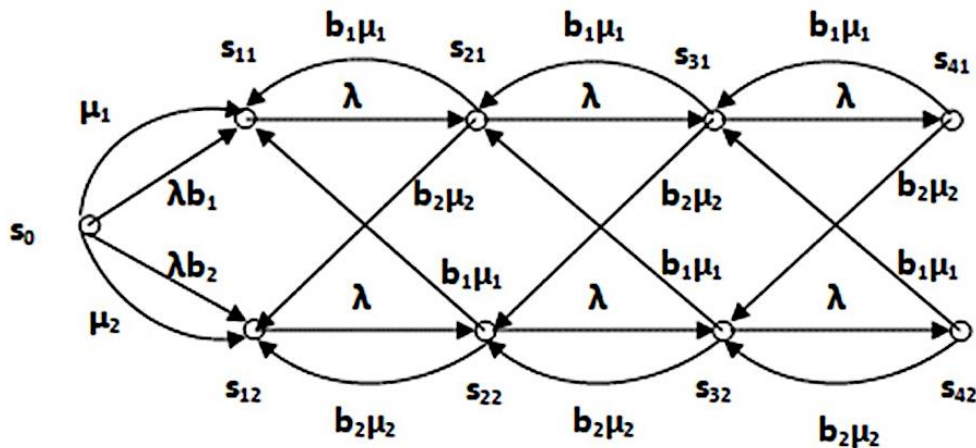


Рис. 1.5. Розширений граф станів і переходів системи $M/H_2/1$

3. Вхідний потік вимог є ерлангівським k -го порядку з відповідним константним параметром λ . У даному випадку до загальної структури СМО інтегрується (додається) віртуальний (фіктивний) приймальний вузол, котрий сформований із k послідовних фаз. Кожна вхідна вимога (запит) першочергово спрямовується до цього приймального вузла, де крок за кроком затримується на кожній окремій фазі. Тривалість цієї затримки на кожній стадії описується законом розподілу з фіксованим параметром λ . Лише після повного подолання цього віртуального приймального пристрою вимога безперешкодно надходить безпосередньо в основну систему для подальшого виконання операцій. Функціонування СМО буде описуватися випадковим марківським процесом виду s_{ij} , де індекс j відображає порядковий номер фази надходження вхідної заявки до структури. Схема (граф) станів і можливих переходів для однолінійної СМО конфігурації $E_2/M/1$ наочно представлена на графічному рисунку 1.6.

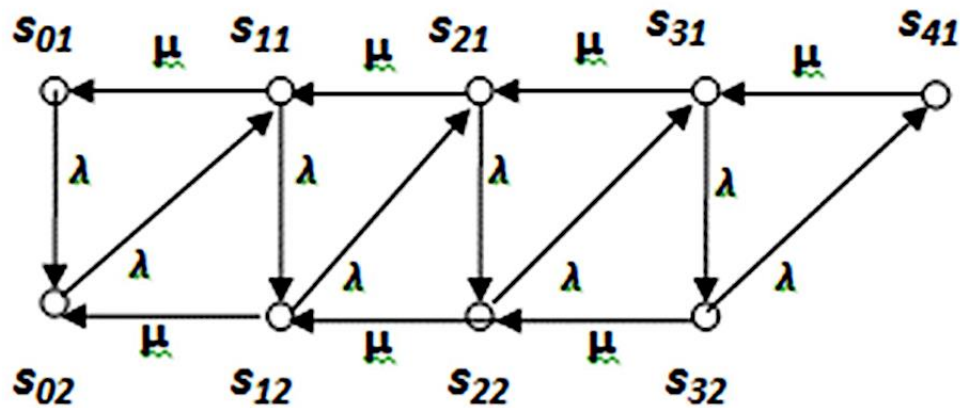


Рис. 1.6. Розширений граф станів і переходів системи $E_2/M/1$

4. Вхідний потік вимог є гіперекспоненціальним k -го порядку з відповідними параметрами a_i, λ_i . Задля здійснення переходу до марківського випадкового процесу до архітектури СМО інтегрується (додається) віртуальний (фіктивний) приймальний вузол, котрий сформований із паралельно розташованих фаз. Кожне нове замовлення на сервіс першочергово спрямовується до цього приймального вузла, де зі значенням ймовірності a_i долає i -ту фазу, а вже після цього надходить безпосередньо на обслуговування. Схема станів і можливих переходів для СМО конфігурації $H_2/M/1$ наочно представлена на графічному рисунку 1.7.

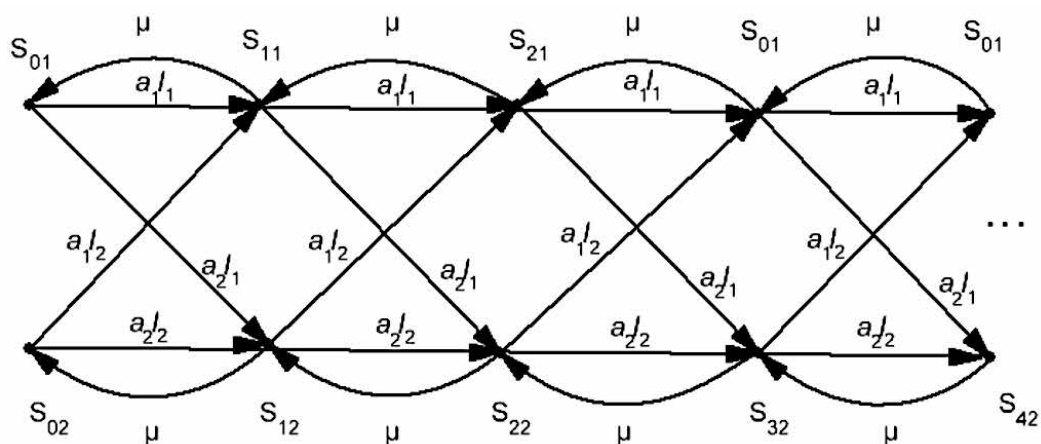


Рис. 1.7. Розширений граф станів і переходів системи $H_2/M/1$

Фундаментальним мінусом (недоліком) методології фаз виступає колосальна розмірність простору потенційних станів та результуючої

системи математичних рівнянь, здійснити точне аналітичне розв'язання якої не видається можливим у фінітному вигляді. Єдиним доступним підходом для знаходження коректного рішення є чисельний метод, що реалізується із залученням стандартних прикладних підпрограм обчислення систем рівнянь на комп'ютерній техніці.

Задля того щоб наочно продемонструвати практичне впровадження методології фаз, детально розберемо наступний приклад. Нехай ми маємо справу зі СМО конфігурації M/GE/1, де символ GE символ узагальненого розподілу Ерланга, що містить математичне перетворення Лапласа–Стілтєса від інтегральної функції розподілу $\beta(S) = \frac{\prod_{j=1}^{k-1} \mu_j}{(\mu_j + S)}$. Головна відмінність цього закону від класичного ерлангівського розподілу полягає в тому, що кожна окрема стадія (етап) характеризується власною, унікальною інтенсивністю виконання операцій μ_j . Відобразимо через символ $p_n(t)$ поточну ймовірність перебування всередині системи рівно n вимог (запитів). Впровадимо в модель віртуальні (фіктивні) фази сервісного обслуговування. За таких умов кожен наявний стан системи з'являється можливість розкласти на сукупність із k фаз, причому динамічний процес переходів між ними буде суворо марківським. Нехай символ p_{nj} відображає усталену (стаціонарну) ймовірність того, що в межах сервісної системи зараз знаходиться всього n запитів, а поточне чергове замовлення проходить стадію обробки безпосередньо на j -й фазі ($j=1,k$).

Для ймовірностей справедлива система лінійних рівнянь:

$$-\lambda p_0 + \mu_1 p_{11} = 0, \quad (1.27)$$

$$-(\lambda + \mu_j) p_{1j} + \mu_{j+1} p_{1j+1} = 0, \quad (1.28)$$

$$-(\lambda + \mu_k) p_{1k} + \mu_1 p_{21} + \lambda p_0 = 0, \quad (1.29)$$

$$-(\lambda + \mu_j) p_{nj} + \mu_{j+1} p_{nj+1} + \lambda p_{n-1j} = 0, n > 1, \quad (1.30)$$

$$-(\lambda + \mu_k) p_{nk} + \mu_1 p_{n+11} + \lambda p_{n-1k} = 0, n > 1, \quad (1.31)$$

Умова нормування $p_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^k p_{nj} = 1$.

Для розв'язання системи рівнянь використаємо метод виробляючих функцій. Помножимо кожне рівняння системи для p_{nj} ($1 \leq j \leq k$) на z^n , а для p_0 і p_{nk} на z^{n+1} і підсумуємо рівняння з однаковим індексом j при однакових членах. Уведемо виробляючі функції $Q(z) = \sum_{n=1}^{\infty} p_{nk} z^{n+1}$.

Отримаємо систему рівнянь щодо $Q(z)$:

$$\begin{aligned} &-(\lambda + \mu_i)Q_j(z) + \lambda z Q_j(z) + \mu_{j+1}Q_{j+1}(z) = \\ &= 0, 1 \leq j < k, \end{aligned} \quad (1.32)$$

$$\begin{aligned} &-(\lambda + \mu_k)zQ_j(z) + \lambda z^2 Q_k(z) + \mu_1 Q_1(z) = \\ &= \lambda z(1 - z)p_0, \end{aligned} \quad (1.33)$$

Розв'язавши її, знайдемо:

$$Q_j(z) = \frac{\lambda z(1-z)p_0 \prod_{i=1}^j (\lambda - \lambda z + \mu_i) \prod_{r=1}^k \mu_r}{[\prod_{i=1}^k \mu_i - z \prod_{i=1}^k (\lambda - \lambda z + \mu_i)](\lambda - \lambda z + \mu_i) \mu_i} \quad (1.34)$$

Завантаження системи $\rho = \frac{\lambda \sum_{n=1}^{\infty} p_{nk} z^{n+1}}{\mu_j}$ і $p_0 = 1 - \rho$. Виробляючу

функцію розподілу стаціонарних ймовірностей p_n можна визначити так:

$$Q(z) = p_0 + \sum_{j=1}^k Q_j(z). \quad (1.34)$$

Тоді $p_n = \frac{1}{n!} \left[\frac{d^n}{dz^n} Q(z) \right]_{z=0}$.

Наприклад, $p_1 = \frac{\lambda(1-\rho)}{\prod_{j=1}^k \mu_j} \sum_{j=1}^k \frac{\prod_{i=1}^k (\lambda + \mu_i) \prod_{r=j}^k \mu_r}{(\lambda + \mu_j) \mu_j}$.

У цьому прикладі, окрім усього іншого, продемонстровано можливості методу виробляючих функцій, які широко використовуються для аналізу систем різницевого рівняння.

Висновки до першого розділу

У першому розділі дипломного проєкту було здійснено всебічний теоретичний аналіз закономірностей функціонування, класифікації та критеріїв ефективності розімкнених систем масового обслуговування (СМО), що дозволило сформулювати теоретико-методологічний базис для подальшого практичного моделювання роботи станції технічного обслуговування (СТО).

За результатами проведеного теоретичного дослідження можна зробити такі висновки:

- Встановлено, що сучасні підприємства технічного сервісу автомобілів за своєю операційною структурою є класичними розімкненими системами масового обслуговування з безперервним часом. Було доведено, що випадковий характер надходження заявок та коливання часу їхнього безпосереднього обслуговування зумовлюють математичну потребу застосування апарату теорії масового обслуговування (ТМО) для запобігання утворенню надмірних черг або тривалого простою постів СТО.
- Розглянуто ключові типи моделей СМО та класифікаційні критерії, зокрема за кількістю каналів, місткістю накопичувача (системи з обмеженою чергою та з відмовами) і стратегією обслуговування. Для умов СТО найбільш адекватною визначено модель багатоканальної розімкненої системи з обмеженою довжиною черги (місткістю накопичувального майданчика) та безпріоритетним процесом обробки вимог.
- Сформовано чітку ієрархію технічних та операційних показників для оцінки якості функціонування СМО. До них віднесено: ймовірність відмови в обслуговуванні (P_{vidm}), абсолютну (A) та відносну (Q) пропускну здатність, середню кількість заявок у черзі (L_q) та в системі загалом (L_s), а також середній час очікування автомобіля в черзі (τ_q). Ці

показники є фундаментальними критеріями для оптимізації роботи підприємства.

- Досліджено аналітичний інструментарій ТМО, зокрема диференціальний метод (складання та розв'язання систем диференціальних рівнянь Колмогорова для фінітних ймовірностей станів) та метод фаз. Визначено, що для марківських процесів зі спрощеним вхідним потоком (найпростішим потоком Пуассона) диференціальний метод забезпечує високу точність розрахунків операційних характеристик у сталому (стаціонарному) режимі роботи СТО.

Таким чином, сформований у першому розділі математичний та понятійний апарат є базою для переходу до другого розділу проєкту, де на основі реальних хронометражних даних досліджуваної СТО буде побудовано розрахункову модель, визначено її вузькі місця та обґрунтовано напрями оптимізації кількості робочих постів і процесів організації праці.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ПІДПРИЄМСТВА

2.1. Загальна характеристика підприємства

В якості системи масового обслуговування взято станцію технічного обслуговування ТОВ «TIR AVTO GROUP».



Рис. 2.1. Фото території станції технічного обслуговування ТОВ «TIR AVTO GROUP»

Знаходиться за адресою місто Черкаси вулиця Енергобудівельників 4.

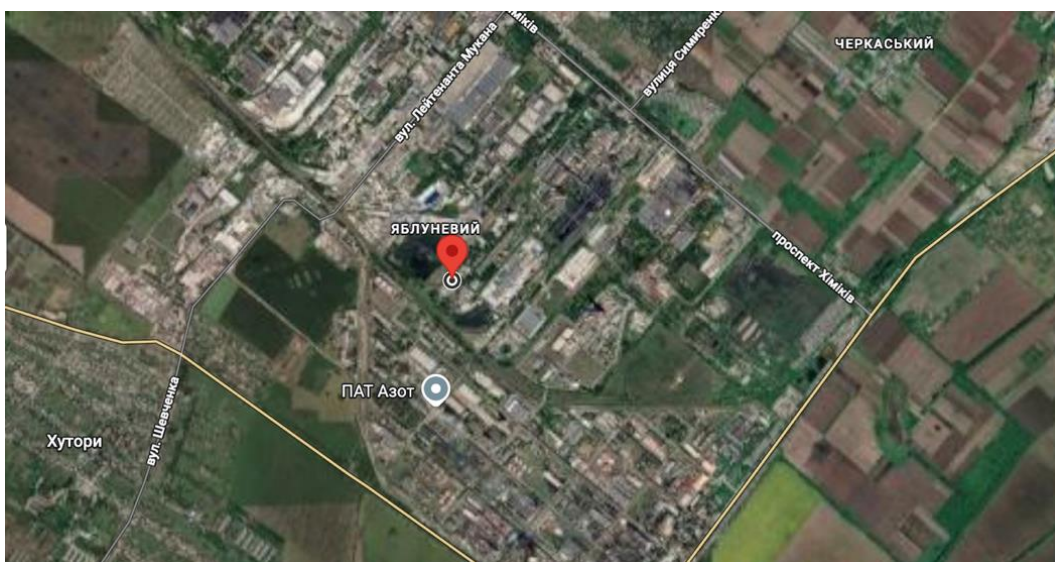


Рис. 2.2. Географічне розміщення станції технічного обслуговування ТОВ «TIR AVTO GROUP»

Юридична особа ТОВ "TIP АВТО ГРУП", код ЄДРПОУ 40498101, було зареєстровано 20.05.2016. Розмір статутного капіталу юридичної особи складає 60753000. На момент останнього оновлення даних 17.05.2026 статус юридичної особи Зареєстровано.

Уповноваженою особою юридичної особи ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "TIP АВТО ГРУП" є Кулик Володимир Васильович, Кулик Володимир Васильович, Богінський Назар Анатолійович.

Види діяльності

- 45.20 Технічне обслуговування та ремонт автотранспортних засобів
- 45.31 Оптова торгівля деталями та приладдям для автотранспортних засобів
- 45.32 Роздрібна торгівля деталями та приладдям для автотранспортних засобів
- 46.21 Оптова торгівля зерном, необробленим тютюном, насінням і кормами для тварин
- 46.71 Оптова торгівля твердим, рідким, газоподібним паливом і подібними продуктами
- 49.39 Інший пасажирський наземний транспорт, н.в.і.у.
- 49.41 Вантажний автомобільний транспорт
- 52.21 Допоміжне обслуговування наземного транспорту

Кількість працівників на станції технічного обслуговування ТОВ «TIR AVTO GROUP» складає 10 осіб.

На станції технічного обслуговування ТОВ «TIR AVTO GROUP» проводяться такі види робіт як:

- 1) Ремонт двигунів внутрішнього згорання.
- 2) Ремонт електрообладнання автомобілів.

- 3) Ремонт КПП і АКПП.
- 4) Комп'ютерна діагностика автомобіля.
- 5) Заміна масла в автомобілі.
- 6) Ремонт ходової частини автомобіля.
- 7) Відновлення автомобілів після ДТП.
- 8) Ремонт системи охолодження.
- 9) Фарбування автомобіля.

Виробничо–технічна структура підприємства. Виробничий простір СТО зонований відповідно до принципів поточності та мінімізації взаємних перетинів транспортних потоків. До складу підприємства входять такі основні підрозділи:

- Зона діагностики: Обладнана сучасними комп'ютерними стендами, засобами зчитування кодів помилок (OBD-сканерами). Тут відбувається первинний огляд автомобіля, фіксація скарг клієнта.
- Слюсарний цех: Включає в себе багатофункціональні робочі пости, комплектами пневматичного інструменту, маслозамінним обладнанням.
- Дільниця ремонту агрегатів: Спеціалізоване закрите приміщення для розбирання, дефектовки та відновлення двигунів, трансмісій, рульових рейок та елементів гальмівної системи.
- Складське господарство: Забезпечує зберігання та оперативну видачу запасних частин, витратних матеріалів та технічних рідин.

2.2. Розрахунок параметрів роботи дільниці з ремонту стартера автомобіля

Ремонт стартерів автомобілів на СТО ТОВ «TIR AVTO GROUP» проводиться на одній дільниці одним працівником (один канал обслуговування). Час на ремонт одного стартера автомобіля становить 2 год. Параметри обслуговування відображені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

**Показники ефективності функціонування системи масового
обслуговування**

День спосте- реження	Кількість обслуговуваних автомобілів за день, од.	Кількість автомобілів в черзі, од.		Час знаходження автомобіля в черзі, год.	Час знаходження автомобіля у СМО, год.
1	4	2	1	2	4
			1	1,5	3,5
2	4	1	1	1	3
3	4	3	1	0,5	2,5
			1	1	3
			1	1,5	3,5
4	3	1	1	0,5	2,5
5	4	3	1	2	4
			1	1	3
			1	0,5	2,5
6	4	2	1	0,5	2,5
			1	1	3
7	4	2	1	3	5
			1	2	4
8	4	3	1	1	3
			1	0,5	2,5
			1	2,5	4,5
9	4	1	1	2	4
10	3	1	1	1,5	3,5
11	4	2	1	2	4
			1	0,5	2,5
12	4	1	1	1,5	3,5
13	4	2	1	1	3
			1	0,5	2,5
14	4	3	1	1,5	3,5
			1	3	5
			1	4	6
15	4	2	1	1	3
			1	0,5	2,5
16	3	1	1	2	4

Продовження табл. 2.1

17	4	3	1	1	3
			1	2	4
			1	4	6
18	4	2	1	1	3
			1	0,5	2,5
19	4	3	1	0,5	2,5
			1	1	3
			1	3	5
20	4	1	1	1	3
21	4	1	1	0,5	2,5
22	3	1	1	1	3
23	4	1	1	0,5	2,5
24	4	2	1	1	3
			1	2	4
25	4	3	1	0,5	2,5
			1	1,5	3,5
			1	2	4
26	4	2	1	1	3
			1	0,5	2,5
Середнє значення	4	2	1,37		3,37

Джерело: власні розрахунки автора

Розрахунок для одного каналу обслуговування на станції технічного обслуговування ТОВ «TIR AVTO GROUP» на якому поводитья обслуговування та ремонт стартерів.

Розрахунки:

$$\lambda=0,5, t_{\text{обс}} = 2 \text{ год.}, n = 1$$

де α —параметр завантаження системи;

Розв'язок:

У даному випадку розглядається закріплення автомобілів за одним каналом $n=1$ одноканальної розімкненої СМО, до якого надходить потік вимог з інтенсивністю:

$$\hat{\lambda} = \frac{\lambda}{n} = \frac{0,5}{1} = 0,5 \text{ авт./год.},$$

де n —кількість каналів обслуговування;

λ —інтенсивність надходження вимог;

1) інтенсивність обслуговування:

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{обс}}} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ авт/год.},$$

де μ —інтенсивність обслуговування;

$t_{\text{обс}}$ —час обслуговування;

2) параметр завантаження системи:

$$\alpha = \frac{\hat{\lambda}}{\mu} = \frac{0,5}{0,5} = 1,$$

де α —параметр завантаження системи;

μ —інтенсивність обслуговування;

λ —інтенсивність надходження вимог;

3) імовірність того, що канал обслуговування вільний:

$$P_0 = 1 - \alpha = 1 - 1 = 0,$$

де α —параметр завантаження системи;

P_0 —імовірність того, що канал обслуговування вільний;

4) середня тривалість очікування автомобілем початку обслуговування:

$$\overline{t_{\text{оч}}} = 1,37 \text{ год.},$$

де α —параметр завантаження системи;

$t_{\text{обс}}$ —час обслуговування;

$t_{\text{оч}}$ —середня тривалість очікування автомобілем початку навантаження;

5) середня довжина черги автомобілів:

$$M_{\text{оч}} = 2 \text{ автомобіля},$$

де α —параметр завантаження системи;

$M_{\text{оч}}$ —середня довжина черги,

б) середня кількість автомобілів на каналі обслуговування:

$$M_c = 4 \text{ автомобілів,}$$

де α —параметр завантаження системи;

M_c —середня кількість автомобілів на на станції технічного обслуговування;

Таким чином, біля каналу буде утворюватись черга довжиною $M_{оч} = 2$ автомобілів, що загалом становить на станції технічного обслуговування чергу з $M_c = 4$ автомобілів.

Висновки до другого розділу

Було проведено розрахунки параметрів функціонування станції технічного обслуговування в умовах одноканальної системи масового обслуговування (СМО). На основі зібраних під час спостереження даних було визначено базові характеристики процесів на підприємстві, зокрема інтенсивність вхідного потоку заявок (λ) та інтенсивність їх виконання одним постом обслуговування (μ).

На основі виконаних досліджень та розрахунків можна зробити такі висновки:

- Визначено коефіцієнт завантаження каналу обслуговування, що відображає баланс між інтенсивністю надходження транспортних засобів та спроможністю одного поста оперативно реагувати на запити.
- Визначено довжину черги автомобілів, які очікують на початок обслуговування, а також середній час перебування автомобіля в черзі та в системі обслуговування. За допомогою розрахунків визначено, що автомобілі знаходяться занадто довго, що свідчить про одного каналу обслуговування не достатньо.
- Визначено час простою автомобілів в черзі, що свідчить про перезавантаження каналу та потенційну втрату клієнтів.

Отримані кількісні характеристики та розрахований операційний баланс є фундаментальною аналітичною базою для подальшого обґрунтування необхідності реорганізації СТО. Це підтверджує доцільність переходу до багатоканальної системи обслуговування та розробки комплексу організаційно-технічних заходів з оптимізації кількості робочих постів, що детально розглядається в наступному розділі проєкту.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СТАНЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТОВ «TIR AVTO GROUP»

3.1. Розрахунок параметрів роботи оптимізованої ділянки з ремонту стартера автомобіля

Враховуючи розрахунки попереднього розділу, які показали значне завантаження пункту ремонту стартерів. На одному каналі обслуговування на СТО ТОВ «TIR AVTO GROUP», на якому обслуговують та ремонтують електрообладнання автомобілів утворюється черга з 2 автомобілів. Нами пропонується збільшити кількість каналів обслуговування на даному пункті.

Розрахунки для багатоканальної СМО станції технічного обслуговування ТОВ «TIR AVTO GROUP».

Використовавши розрахункові формули для багатоканальної системи масового обслуговування, ми отримаємо:

1) параметр завантаження системи:

$$\alpha = \lambda \cdot t_{\text{обс}} = 0,5 \cdot 2 = 1,$$

де α – параметр завантаження системи;

2) для виконання подальших розрахунків заповнимо розрахункову таблицю 2,1.

Таблиця 3.1

Таблиця для виконання розрахунків багатоканальної СМО

k	k	α^k	$\frac{\alpha^k}{k}$	$P_k = \frac{\alpha^k}{k} P_0$	$(n - k)P_k$
0	1	1	1	1,6	4,8
1	1	1	1	1,6	3,2
2	2	1	0,5	0,8	0,8
Σ			2,5		8,8

Джерело: власні розрахунки автора

3) імовірність того, що всі канали обслуговування вільні:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{n-1} \frac{\alpha^k}{k!} \cdot \frac{\alpha^n}{(n-1) \cdot (n-\alpha)}} = \frac{1}{2.5 \cdot \frac{1^3}{(3-1) \cdot (3-1)}} = 1.6,$$

де n —кількість каналів обслуговування;

α —параметр завантаження системи;

P_0 —імовірність того, що канал обслуговування вільний;

4) імовірність того, що всі канали обслуговування зайняті:

$$\pi = \frac{\alpha^n \cdot P_0}{(n-1) \cdot (n-\alpha)} = \frac{1^3 \cdot 1.6}{(3-1) \cdot (3-1)} = 0.4,$$

де n —кількість каналів обслуговування;

α —параметр завантаження системи;

P_0 —імовірність того, що канал обслуговування вільний;

5) середня тривалість очікування автомобілем початку обслуговування:

$$\overline{t_{оч}} = \frac{\pi}{\mu \cdot (n-\alpha)} = \frac{0.4}{0.5 \cdot (3-1)} = 0.4 \text{ год.},$$

де n —кількість каналів обслуговування;

α —параметр завантаження системи;

μ —інтенсивність обслуговування;

6) середня довжина черги автомобілів:

$$M_{оч} = \frac{\alpha^{n+1} \cdot P_0}{n \cdot n! \cdot (1 - \frac{\alpha}{n})^2} = \frac{1^4 \cdot 1.6}{3 \cdot 6 \cdot (1 - \frac{1}{3})^2} = 0.2 \text{ автомобілі},$$

де n —кількість каналів обслуговування;

α —параметр завантаження системи;

P_0 —імовірність того, що канал обслуговування вільний;

7) середня кількість автомобілів на каналах обслуговування:

$$M_c = M_{оч} + \alpha = 0.2 + 1 = 1.2 \text{ автомобілів},$$

де α —параметр завантаження системи;

M_c — середня довжина черги автомобілів;

8) середня кількість вільних каналів обслуговування (сума значень останнього стовпчика табл. 2:

$$N_0 = \sum_{k=0}^{n-1} (n-1)P_k = 8,8;$$

Проаналізувавши результати розрахунків бачимо, що у випадку організації ще двох каналів обслуговування середня довжина черги зменшується з 2 до 0.2 автомобілів, а тривалість очікування зменшується з 1.37 год. до 0.4 год.

Для вирішення проблеми з утворенням черги ми запропонували додати ще два таких канали для ремонту стартерів. Після проведених розрахунків робимо висновок, що варіант вирішення проблеми з чергою на підприємстві який було запропоновано дав хороший результат: черга на каналі обслуговування зменшилась з 2 до 0.2 автомобілів і тривалість очікування зменшилась з 1.37 год. до 0.4 год.

3.2. Економічні показники запропонованого удосконалення роботи СТО ТОВ «TIR AVTO GROUP»

У випадку одноканальної СМО на станції технічного обслуговування ТОВ «TIR AVTO GROUP» за день в середньому обслуговується 4 автомобілі, час обслуговування кожного автомобіля 2 години. Середня ціна обслуговування одного автомобіля, враховуючи оплату за роботу майстра становить 1500 грн. За місяць на станції технічного обслуговування обслуговується 100 автомобілів.

Денний обсяг доходу СТО:

$$4 \cdot 1500 = 6000 \text{ грн/день.}$$

Щомісячний обсяг доходу (за 26 робочих днів):

$$6000 \cdot 26 = 156000 \text{ грн/місяць.}$$

Прогнозні сценарії доходу після удосконалення (3 канали).

Завдяки розширенню технічної бази до 3-х каналів та суттєвому скороченню часу очікування клієнтів у черзі з 1,37 год до 0,4 год,

підприємство ліквідує втрати потоку та отримує можливість нарощувати обсяги реалізації послуг.

Оптимальне завантаження нових потужностей.

Залучення додаткових клієнтів завдяки підвищенню швидкості сервісу дозволяє збільшити кількість обслугованих машин за зміну вдвічі – до 8 авто/день:

Денний дохід:

$$8 \cdot 1500 = 12000 \text{ грн/день.}$$

Місячний дохід (26 днів):

$$12000 \cdot 26 = 312000 \text{ грн/місяць.}$$

Максимальне завантаження (робота всіх 3 каналів на повну потужність).

За умови повної завантаженості трьох каналів на яких буде обслуговуватись 12 авто за зміну:

Максимальний денний дохід:

$$12 \cdot 1500 = 18000 \text{ грн/день.}$$

Максимальний місячний дохід (26 днів):

$$18000 \cdot 26 = 468000 \text{ грн/місяць.}$$

Висновки до третього розділу

Проведено розрахунки та оцінювання операційних параметрів функціонування СТО ТОВ «TIR AVTO GROUP» після реалізації запропонованих організаційно-технічних заходів з модернізації її структури. На противагу одноканальній системі обслуговування (розглянутій у розділі 2.2), у підрозділі було обґрунтовано та розраховано параметри реорганізованої системи, що функціонує як багатоканальна розімкнута система масового.

На основі виконаних досліджень та розрахунків можна зробити такі висновки:

- Впровадження додаткових каналів обслуговування дозволило раціонально розподілити вхідний потік заявок (λ). Коефіцієнт завантаження кожного окремого пристрою знизився, що усуває постійне перевантаження системи.
- Після переходу до багатоканальної СМО було досягнуто зменшення у кілька разів середнього часу очікування автомобіля в черзі та загального часу перебування в системі, що мінімізує ймовірність відмови клієнта від обслуговування.
- Розрахунки підтвердили значне зменшення середньої довжини черги.

Таким чином, результати моделювання в розділі 3.2 повністю довели високу виробничу та технологічну ефективність переходу СТО ТОВ «TIR AVTO GROUP» на багатоканальну схему обслуговування. Отримані з розрахунків показники підтверджують правильність та ефективність переходу на багатоканальну схему обслуговування.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ НА ПІДПРИЄМСТВІ

4.1. Аналіз стану охорони праці на ТОВ «TIR AVTO GROUP»

Безпека (охорона) праці—це комплекс нормативно-правових, соціоекономічних, організаційно—технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних дій і засобів, які орієнтовані на збереження життя, фізичного здоров'я та професійної працездатності особистості в ході здійснення нею безпосередньої трудової діяльності.

Шкідливий та небезпечний (виробничий) фактор—елемент робочого середовища, дія якого на співробітника за конкретних обставин зумовлює виникнення тілесних ушкоджень (травм), раптового токсичного отруєння чи іншого експресивного та різкого порушення нормального стану здоров'я, або призводить до летального результату (смерті).

Згідно з положеннями чинного Закону України «Про охорону праці», на керівника (роботодавця) покладається повна юридична та персональна відповідальність за створення й підтримання здорових, небезпечних і належних умов життєдіяльності на робочому місці. У зв'язку з цим він безпосередньо координує та впроваджує функціонування внутрішньої системи управління охороною праці (СУОП).

Перед офіційним оформленням і зарахуванням до штату підприємства абсолютно всі наймані працівники в обов'язковому порядку проходять попереднє медичне обстеження (огляд) та первинний вступний інструктаж із тематики безпеки життєдіяльності. Окреме кабінетне приміщення з охорони праці на даному об'єкті не передбачене. Зазначений вступний інструктаж реалізується безпосередньо в робочому кабінеті головного інженера, де розміщені спеціалізовані інформаційні плакати з безпеки праці, проте їхня загальна чисельність є незадовільною (недостатньою), а частина з наявних матеріалів є морально застарілими.

Офіційна відмітка про успішне виконання вступного інструктажу в обов'язковому порядку фіксується у відповідному журналі реєстрації вступних інструктажів із питань охорони праці, що засвідчується персональними підписами фахівця, який проводив навчання, та особи, котра його проходила.

4.2. Аналіз і характеристика основних виробничих шкідливостей і небезпечностей на підприємстві технічного сервісу

Значна частина технологічних та виробничих процесів на підприємствах технічного сервісу (ПТС) характеризується постійною присутністю різноманітних професійних (виробничих) шкідливих чинників та потенційних небезпек, які здійснюють деструктивний і несприятливий вплив на стан здоров'я, працездатність та загальне самопочуття зайнятого персоналу. Комплексний аналіз, виявлення та детальна характеристика ключових виробничих шкідливостей і факторів ризику робочого середовища.

Таблиця 4.1

Небезпечні і шкідливі виробничі фактори

№	Найменування небезпеки та виробничого фактора	Стисла характеристика	Де може виникнути	Вплив на організм (середовище)
1	2	3	4	5
1	Ураження електричним струмом	На важкість травми впливають: сила струму, що проходить через людину, частота, тривалість дії та індивідуальні особливості організму.	Шиномонтажна, вулканізаційна дільниці, РПСЖ.	Чинить термічний, електромагнітний та біологічний деструктивний вплив на людину.

Продовження табл. 4.1

2	Травмування інструментом	Пошкодження через несправність або дефекти використовуваного робочого інструменту.	Ковальсько-ресорна, столярна дільниці, РПСЖ.	Спричиняє забиття рук, ніг та інших частин тіла.
3	Виробничий шум	Небажаний для людини звук через вібрацію обладнання чи удари інструменту; визначається тиском, інтенсивністю та частотою.	Ковальсько-ресорна, арматурна, бляхарська, столярна дільниці.	Викликає порушення у серцево-судинній системі, аритмію, втому слуху, глухоту та знижує концентрацію уваги.
4	Загазованість приміщення	Накопичення СО через роботу автомобільних двигунів або у печах при гарячій обробці металів.	Ковальсько-ресорна, паливна дільниці, зона ПР.	СО блокує перенесення кисню кров'ю. Вдихання загрожує гострим отруєнням.
5	Вплив електрозварювання	Опромінення при зварюванні через порушення правил експлуатації. Дріт і покриття містять марганець, кремній, фтористий кальцій.	Зварювальна ділянка.	Світлове та ультрафіолетове випромінювання, ризик ураження струмом, вдихання зварювальної сажі.
6	Невідповідність метеорологічних умов	Зростання температури повітря в зоні дії нагрівального устаткування; оцінюється за температурою ($t, ^\circ\text{C}$) та вологістю.	Ковальсько-ресорна дільниця.	Спричиняє перерозподіл крові від внутрішніх органів до кінцівок, змінює артеріальний тиск і прискорює дихання.

Продовження табл. 4.1

7	Інфразвук	Низькочастотні коливання від роботи вентиляторів та трансформаторів.	Шиномонтажна, ковальсько-ресорна, мідницька дільниці.	Порушує функції органів травлення та чуття, може викликати непритомність.
---	-----------	--	---	---

Джерело: власні розрахунки автора

4.3. Організаційні та технічні заходи по забезпеченню захисту працівників від дії вказаних вами вище шкідливих та небезпечних факторів

Профілактичні заходи та засоби забезпечення безпеки праці.

Задля мінімізації та послаблення деструктивного впливу професійних шкідливих і небезпечних факторів виникає об'єктивна необхідність реалізувати комплекс попереджувальних (профілактичних) дій. Згідно з чинними нормативними регламентами, належний рівень електробезпеки має гарантуватися безпосередньою конструкцією використовуваних електроустановок, механічними пристосуваннями, захисними засобами, а також заходами організаційного характеру. До спектра інженерно-технічних засобів та рішень належать: захисне заземлення корпусу, занулення, примусове вирівнювання електричних потенціалів, застосування малої (безпечної) напруги, електричне розділення діючих мереж, автоматичні захисні вимикачі, компенсація струмів замикання на землю, бар'єрні огорожувальні конструкції, системи автоматичного блокування, попереджувальні знаки безпеки, а також індивідуальні й колективні засоби захисту та допоміжні пристосування.

Задля гарантування безпечних умов праці під час виконання операцій на заточувальних (шліфувальних) верстатах, використовуваний абразивний інструмент перед безпосереднім монтажем піддається ретельному візуальному огляду та обов'язковому випробуванню на механічну міцність, тривкість і відсутність структурних тріщин. Самі верстати в обов'язковому

порядку оснащуються захисними прозорими екранами та огорожувальними кожухами, конструкція яких, у свою чергу, не повинна створювати перешкод для оперативного демонтажу й заміни шліфувального інструменту.

Задіяний на виробничих ділянках ручний інструментарій має перебувати виключно у справному технічному стані та підлягає обов'язковому контролю й відбракуванню щонайменше один раз на місяць. Рукоятки молотків та кувалд мають виготовлятися із міцних твердих порід деревини і мати абсолютно гладку поверхню без задирок. Бойки зазначених інструментів повинні мати злегка випуклу геометрію, а сам робочий орган має бути надійно і щільно насаджений на дерев'яну рукоятку та розклинений за допомогою металевих клинів. Слюсарні ножівки, викрутки, напилки повинні мати міцно й надійно насажені на хвостовики дерев'яні ручки з гладкою, рівномірною поверхнею, загальна довжина яких становить не менше 150 мм. Слюсарно-монтажні гайкові ключі мають чітко відповідати фактичним лінійним розмірам гайок і болтових з'єднань. Категорично забороняється експлуатація ключів із наявністю внутрішніх тріщин, вибоїн або непаралельністю робочих губок.

Під час виконання операцій із заповнення (накачування) автомобільних шин стисненим повітрям суворо забороняється коригувати просторове положення покритишки шляхом постукування чи здійснювати механічні удари молотком по замковому кільцю. Процес заправки повітрям має реалізовуватися виключно у спеціально виділених для цього виробничих зонах із обов'язковим застосуванням захисних кліток, огорожень та спеціальних пристосувань. У ході подачі стисненого повітря всередину шини необхідно здійснювати безперервний візуальний моніторинг показників внутрішнього тиску.

Перед безпосереднім початком виконання виробничих завдань робітнику необхідно застібнути всі наявні гудзики та елементи фіксації на

спеціальному одязі, а волосся повністю прибрати під захисний головний убір, щоб цілковито унеможливити випадкове потрапляння частин спецодягу чи волосся у відкриті обертові вузли обладнання, механізмів та деталей. Механічні редуктори, розташовані на випробувальних чи ремонтних стендах, під час їхнього функціонування мають бути повністю закриті стаціонарними захисними кожухами. Фіксацію та закріплення оброблюваних деталей слід виконувати максимально надійно. Будь-які рухомі та обертові елементи обладнання за можливості мають перекриватися спеціальними захисними компонентами.

Робоча поверхня інструментів та ковадл повинна бути позбавлена будь-якої кривизни й деформацій. Спряжені поверхні деталей мають рівномірно і щільно прилягати одна до одної. Металеві клини, що використовуються для фіксації бойків, мають надійно закріплюватися та підлягають регулярному профілактичному підтягуванню. Просторовий зсув (люфт) бойків у ході виконання технологічних операцій не повинен ставати більшим за 3 мм.

Технологічні операції з використанням агресивних кислот мають здійснюватися виключно у заздалегідь закріплених (відведених) для цього ізольованих місцях. Персонал, що безпосередньо взаємодіє з кислотними розчинами, повинен бути забезпечений спеціальним захисним одягом та індивідуальними засобами захисту (герметичними окулярами, хімічно стійкими рукавичками, прогумованим фартухом). Локація проведення робіт обов'язково оснащується автономною локальною витяжною вентиляційною системою. По завершенні робочої зміни руки працівника підлягають ретельному й ретельному миттю. Стіни та вертикальні поверхні даного приміщення мають піддаватися регулярній санітарній обробці за допомогою 3%-го розчину лугу з метою повної нейтралізації залишків кислоти.

Одним із ключових та фундаментальних заходів у напрямі боротьби з промисловим пилом на автопідприємстві виступає раціональна організація самого технологічного процесу, яка повністю виключає або мінімізує пилоутворення до прикладу, активне залучення промислових пилососів під час проведення прибирання та складання внутрішніх салонів транспортних засобів. На виробничих ділянках, що характеризуються високим рівнем емісії пилу, є обов'язковим систематичне й регулярне вологе прибирання та видалення пилових відкладень зі стін, корпусів устаткування тощо.

Аеровані шкідливі гази та токсичні випари видаляються з робочого простору шляхом проектування та облаштування систем місцевих технологічних відсмоктувачів безпосередньо від сурм, термічних печей, гальванічних ванн із їхнім подальшим виведенням до загальнообмінної вентиляційної мережі. Задля надійного захисту електрозварників від деструктивного впливу інтенсивного світлового та ультрафіолетового випромінювання залучаються спеціалізовані індивідуальні захисні засоби (маски, щитки зі світлофільтрами).

Для ефективного подолання виробничого шуму впроваджують методи звукоізоляції приміщень, загальну раціоналізацію та модернізацію технологічних операцій, монтаж акустичних глушників, заміну шумоактивних робіт на більш тихі (менш гучні) альтернативні процеси, встановлення ізолюючих захисних кожухів, а також використання індивідуальних засобів захисту органів слуху (наушників, берушей).

Токсичний і шкідливий вплив нафтопродуктів та пально-мастильних матеріалів на організм працівника можна суттєво мінімізувати шляхом організації на відповідному робочому місці ефективної витяжної вентиляції. Після завершення будь-яких операцій із паливом необхідно ретельно вимити руки з милом. За наявності такої технологічної можливості слід повністю відмовитися від використання етильованих автомобільних

бензинів на користь неестильованих. Необхідно повністю виключати випадки проливання нафтопродуктів на підлогу виробничих приміщень, а також уникати їхнього безпосереднього потрапляння на відкриті ділянки шкіри людини та повсякденний одяг. У разі випадкового потрапляння пально-мастильних матеріалів на відкриті зони тіла, необхідно невідкладно й негайно промити ці ділянки проточною водою з використанням спеціального миючого (очищувального) засобу.

Висновки до четвертого розділу

У розділі було проведено комплексний аналіз охорони праці, виробничої санітарії, техніки безпеки та пожежної безпеки, а також оцінено заходи щодо попередження надзвичайних ситуацій на станції технічного обслуговування ТОВ «TIR AVTO GROUP».

На основі виконаних досліджень та розрахунків можна зробити такі висновки:

- Детально проаналізовано специфіку виробничого процесу СТО та виявлено основні шкідливі й небезпечні виробничі фактори (підвищена загазованість і запиленість повітря робочої зони, шум від роботи інструменту, небезпека ураження електричним струмом, падіння вантажів або автомобілів із підйомного обладнання, а також хімічна небезпека при роботі з технологічними рідинами).
- З метою мінімізації ризиків та створення безпечних умов праці для персоналу було запропоновано та розраховано ефективні інженерно-технічні заходи. Зокрема, обґрунтовано параметри загальнообмінної та місцевої припливно-витяжної вентиляції, визначено необхідний рівень штучного й природного освітлення робочих місць, а також вибрано відповідні засоби індивідуального (ЗІЗ) та колективного захисту.
- Запропоновано комплекс рішень для забезпечення електробезпеки, включаючи захисне заземлення та занулення

електроустановок, а також використання пристроїв захисного вимкнення. На основі категорії приміщень за вибухопожежною небезпекою визначено необхідну кількість первинних засобів пожежогасіння, розроблено план евакуації та заходи щодо швидкого локалізування можливих осередків займання.

- Оцінено стійкість функціонування підприємства в умовах можливих надзвичайних ситуацій техногенного та військового характеру. Організовано чіткий алгоритм дій персоналу при отриманні сигналів цивільного захисту та передбачено заходи щодо захисту матеріальних цінностей і життя працівників.

Впровадження всіх запропонованих у розділі заходів і технічних рішень дозволить забезпечити повну відповідність умов праці на ТОВ «TIR AVTO GROUP» чинним нормативно-правовим актам України (НПАОП), суттєво знизити рівень виробничого травматизму та професійних захворювань, а також гарантувати високу готовність підприємства до дій у критичних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

У дипломній кваліфікаційній роботі вирішено завдання щодо підвищення ефективності функціонування станції технічного обслуговування автомобілів ТОВ «TIR AVTO GROUP». Оптимізація параметрів підприємства та його виробничих процесів була досягнута завдяки застосуванню методів дослідження праці та розрахунків теорії масового обслуговування (ТМО).

На основі виконаних досліджень та розрахунків можна зробити такі висновки:

1. Встановлено, що сучасна СТО є розімкненою системою масового обслуговування. Для умов ТОВ «TIR AVTO GROUP» під час дослідження було визначено модель багатоканальної СМО з обмеженою довжиною черги та послідовним процесом обробки вимог, де потоки подій підпорядковані марківським процесам (найпростіший потік Пуассона та експоненціальний закон розподілу часу обслуговування).

2. На основі проведених досліджень, спостережень та замірів на каналі обслуговування й ремонту стартерів було зафіксовано такі вихідні операційні параметри: інтенсивність вхідного потоку вимог становить $\lambda = 0,5$ авт./год., а середній час обслуговування одного автомобіля $t_{\text{обс}} = 2$ год. Відповідно, інтенсивність обслуговування склала $\mu = 0,5$ авт./год.

Розрахунки для одноканальної моделі ($n=1$) показав канал обслуговування перенавантажений:

- Параметр завантаження системи: $\alpha = 1$.
- Ймовірність того, що канал обслуговування є вільним: $P_0 = 0$.
- Середня тривалість очікування автомобіля в черзі прямує до безкінечності $\overline{t_{\text{оч}}} = 1,37$ год.

Це свідчить про постійне перевантаження каналу обслуговування, утворення постійних черг, тривале очікування клієнтів і значні втрати потенційного прибутку.

3. З метою усунення виявлених недоліків було розроблено та обґрунтовано комплекс організаційно-технічних заходів, що передбачали перехід до триканальної системи обслуговування ($n=3$). Результатами розрахунків підтверджено покращення показників ефективності:

- Ймовірність того, що всі три канали обслуговування будуть вільними, становить $P_0 = 1,6$.
- Ймовірність одночасної зайнятості всіх каналів (потенційне утворення черги) знизилася до $p_i = 0,4$.
- Середня тривалість очікування автомобілем початку обслуговування скоротилася до нормального рівня $\overline{t_{оч}} = 0,4$ год.
- Середня довжина черги становить усього $M_{оч} = 0,2$ автомобіля, а середня кількість транспортних засобів, що одночасно перебувають на постах та в черзі, дорівнює $M_c = 1,2$ автомобіля.

Завдяки розширенню кількості постів вдалося повністю ліквідувати ризик утворення черг та оптимізувати процес робіт між часом очікування клієнта і простоем обладнання СТО.

4. Оптимізація технологічного процесу та зменшення часових втрат дозволили збільшити пропускну здатність ділянки. За умови середньої вартості послуги в 1500 грн:

- Реальний плановий ефект: Швидкість сервісу дозволяє збільшити кількість фактично обслугованих машин у два рази до 8 авто/день. Це забезпечує денний дохід у розмірі 12 000 грн та стабільний місячний дохід на рівні 312 000 грн (за 26 робочих днів).
- Максимальний потенціал: За умови 100%-го завантаження всіх трьох створених каналів, СТО здатна приймати до 12 авто за зміну, що

генеруватиме до 18 000 грн/день, забезпечуючи максимальний місячний витяг у розмірі 468 000 грн.

5. У проєкті виконано повний аналіз стану умов праці на ТОВ «TIR AVTO GROUP» та ідентифіковано основні небезпечні й шкідливі виробничі фактори (виробничий шум, загазованість, робота з хімічними речовинами/кислотами, електричний струм). Розроблено інженерно-технічні рішення для забезпечення безпеки працівників: впровадження систем місцевих відсмоктувачів та загальнообмінної витяжної вентиляції, розраховано контури захисного заземлення й занулення, а також визначено нормативну кількість первинних засобів пожежогасіння відповідно до категорії вибухопожежної безпеки приміщень СТО. Запропоновані заходи гарантують повну відповідність виробничого середовища чинним стандартам безпеки України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вотякова Л., Туржанська О., Назарчук О. Математична модель одноканальної системи масового обслуговування з двоетапним надходженням вимоги. Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Фізико-математичні науки. 2020. Вип. 21. DOI: <https://doi.org/10.32626/2308-5878.2020-21.54-61>.
2. Власова В., Технічне обслуговування і ремонт автомобілів 2007. 480 с.
3. Гросс Д., Гарріс К. М., Томпсон Дж. Л. "Основи теорії черг." Київ, Видавництво "Видавничий Дім Дмитра Бураго", 2020.
4. Говорущенко М., Варфоломєєв В.М., Волков В.П., Волошина Н.А. Проектне забезпечення формування виробничо-технічної бази підприємств автомобільного транспорту: Навчальний посібник. – Харків: ХНАДУ, 2007. 116 с.
5. ДСТУ 2293-99 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять».
6. Жерновий Ю.В. Імітаційне моделювання систем масового обслуговування: Практикум. – Львів: ЛНУ ім. І.Франка, 2007, 10-13 с.
7. Жерновий Ю.В. Марковські моделі масового обслуговування: Тексти лекцій. – Львів: ЛНУ ім. І.Франка, 2004, 55–69 с.
8. Загурський О. М. Моделі оптимізації рівня якості логістичного сервісу в ланцюгах постачань. Вісник економіки транспорту і промисловості. 2024. № 85. С. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.85.306424>
9. Загурський О.М. Підходи щодо вимірювання показників оцінки логістичного сервісу в ланцюгах постачань. Збірник «Вісник економіки транспорту і промисловості». №78-79. 2022. 70-77.

10. Інформація про Устанцію технічного обслуговування ТОВ “TIR AVTO GROUP”: URL: https://youcontrol.com.ua/ru/catalog/company_details/40498101/

11. Кирилова О. В., Павловська Л. А., Н. Г. Шпак. Дослідження операцій в транспортних системах : навч. посіб. Одеса : ОНМУ, 2025. 209 с. URL: <https://rp.onmu.org.ua/handle/123456789/4964>

12. Клейнрок, Л. "Системи черг. Том I: Теорія." Київ, Видавництво "Наукова думка", 1982 17-23 с.

13. Кунда Н. Т. Дослідження операцій у транспортних системах : навч. посіб. Київ : Слово, 2008. 400 с.

14. Литвинов А. Л. Теорія систем масового обслуговування : навч. посіб. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 141 с.

15. Лудченко О., Лудченко Я., Чередник В., Управління якістю технічного обслуговування автомобілів, навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., 2012. 327 с.

16. Марков О.Д. Станції технічного обслуговування., 2008. 536 с.

17. Мельниченко О. В. Застосування методів теорії масового обслуговування в економічному аналізі операцій з електронними грошима. Проблеми економіки. Фінанси та банківська справа. 2015. № 1. С. 274–279.

18. Пістунов І. М. Економіко-математичне моделювання : навч. посіб. Дніпро : НТУ «ДП», 2024. 202 с.

19. Прокудін Г. С., Хоботня Т. Г., Прокудіна І. І., Назарова А. П. система аналізу мережі СМО логістичних ланцюгів доставки вантажів. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/0290cd5e-1e43-4443-b248-f1d439c47e54/content>

20. Шматко Д., О. Сасов, Р. Буланий. моделювання структури автотранспортного підприємства як одноканальної системи масового обслуговування. Математичне моделювання. 2025. DOI: [https://doi.org/10.31319/2519-8106.2\(53\)2025.342055](https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(53)2025.342055)

21. Khinchin A.Y. Ueber einen Satz der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Fund. Math. 1924 6, 9-20.
22. Khinchin A.Y.; Kolmogorov A.N. Über konvergenz von Reihen deren Glieder durch den Zufall bestimmt werden. Mat. Sb. 1925, 32, 668–676.
23. Madan K.C. A single channel queue with bulk service subject to interruptions, Microelectronics Reliability, 1989, Volume 29, Issue 5, 813-818.
24. Kumar N., Pal V., Garg V. Mapping the Scientific Research on Queueing Systems: Trends and Developments, 2024 4th International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering (AECE), GHAZIABAD, India, 2024, 415-419.
25. Uryvsky L., Kryklyva A. Analysis of differences in the characteristics of queuing systems with the dynamics of input streams self-similarity. Information and Telecommunication Sciences, 2022, 13(1), 22-26.
<https://doi.org/10.20535/2411-2976.12022.22-26>
26. Sakalauskas L., Kaklauskas L., Macaitiene R. Stalling in Queuing Systems with Heterogeneous Channels. Appl. Sci. 2024, 14, 773.
<https://doi.org/10.3390/app14020773>.
27. Prokudin H.S., Prokudin O.H., Nazarova A.P. Systema analizu lohistychnykh lantsiuhiv dostavky vantazhiv. [Logistics chain analysis system for cargo delivery] Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Kyiv: NTU, 2023. Vyp. 3 (57). 99-109.
28. Zagurskiy O., Duczmal W., Savchenko L., et al., Models of Formation of Reliability of Supply Chains for the Supply of Agricultural Products. Research on World Agricultural Economy. 2024. 5(3): 14-23. DOI: <https://doi.org/10.36956/rwae.v5i3.1123>
29. Zhernovyi Yu. Creating models of queueing systems using GPSS World: Programs, detailed explanations and analysis of results. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2015.