

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 1

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Державного університету
«Житомирська політехніка»

протокол від 12 червня 2025 р. № 4

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

**до практичних занять
з навчальної дисципліни
«Моделювання транспортних потоків»**

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»
спеціальності J8 «Автомобільний транспорт»
освітньо-професійна програма «Автомобільний транспорт»
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
кафедра автомобілів і транспортних технологій

Рекомендовано на засіданні
кафедри автомобілів і
транспортних технологій
16 травня 2025 р., протокол № 6

Розробник: кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і
транспортних технологій
Дмитро БЕГЕРСЬКИЙ,

Житомир 2025

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 2

УДК 613

Розглянуто та рекомендовано до видання науково-методичною радою
Державного університету «Житомирська політехніка» протокол № 4 від 12
червня 2025 року

Методичні рекомендації до практичних занять з навчальної дисципліни
«Моделювання транспортних потоків» для студентів освітнього ступеня
«Бакалавр» денної форми навчання за спеціальністю І8 «Автомобільний
транспорт». (автор: Бегерський Д.Б.), 2025.-36 с.

Рецензенти:

Шумляківський Володимир Петрович, к.т.н., завідувач кафедри автомобілів і
транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка»

Колодницька Руслана Віталіївна, к.т.н, доц., доцент кафедри автомобілів і
транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка»

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 3

Зміст

Розділ 1. Використання методів теорії масового обслуговування для моделювання формування черг	5
1.1. Базові поняття систем масового обслуговування та методи їх дослідження	5
1.1.1 Базові поняття систем масового обслуговування	5
1.1.2. Методи теорії масового обслуговування	10
1.2. Приклади застосування теорії смо для моделювання транспортних процесів	12
1.2.1. Моделювання формування черги перед перехрестям	12
1.2.2. Моделювання транспортних процесів в системі міського пасажирського транспорту з використанням теорії масового обслуговування	16
1.3. Розрахунок параметрів транспортних процесів в системі міського пасажирського транспорту за заданими вихідними даними	20
1.3.1. Вихідні дані для розрахунків	20
1.3.2. Розрахунок вірогідності знаходження зупиночного пункту (ЗП) у наступних станах: вільному, зайнятому одним транспортним засобом (ТЗ), зайнятому одним транспортним засобом та на підході до нього є наступний ТЗ	20
1.3.3. Розрахунок теоретично можливої величину черги ТЗ перед ЗП	22
1.3.4. Розрахунок інших показників системи масового обслуговування	22
Розділ 2. Створення транспортної моделі	24
2.1. Цілі моделювання. Етапи створення моделі	24

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 4

2.2 Порядок створення транспортної моделі	24
2.2.1. Створення моделі транспортної пропозиції	24
2.2.2. Створення моделі транспортного попиту	29
2.2.3. Калібрування транспортної моделі	32
2.2.4. Особливості роботи з транспортною моделлю	34
Список літератури	36

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 5

Розділ 1. Використання методів теорії масового обслуговування для моделювання формування черг

1.1. Базові поняття систем масового обслуговування та методи їх дослідження

1.1.1 Базові поняття систем масового обслуговування

Формально під системою масового обслуговування (далі СМО) розуміють складну систему, що складається з одного або декількох джерел запитів (заявок, вимог) на виконання певних дій (обслуговування), декількох приладів обслуговування (ліній обслуговування, каналів обслуговування), що виконують ці дії відповідно до певних правил (дисципліни обслуговування) за запитами, що надійшли в систему (рис. 1.1).

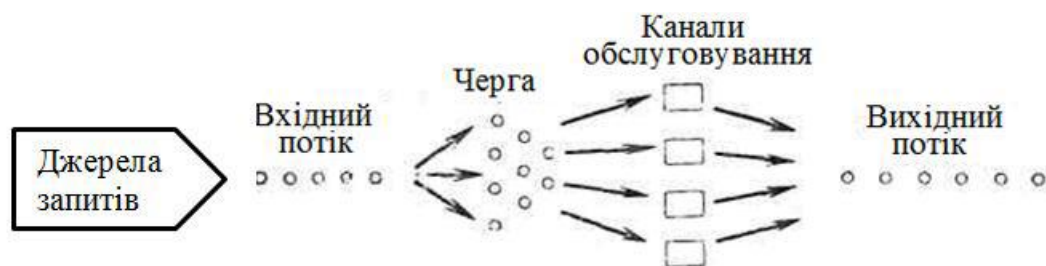


Рисунок 1.1 – Структура системи масового обслуговування

Характерною особливістю СМО є імовірнісність процесів, що відбувається, і можливість утворення черги запитів на обслуговування. Розглянемо базові поняття СМО.

Джерело запитів. Джерело запитів визначається як зовнішня щодо СМО система, із якої запити надходять в неї для обслуговування. Джерело називають нескінченним або кінцевим залежно від того, нескінченна чи кінцева кількість запитів міститься в ньому. Якщо джерело містить кінцеву, але досить велику кількість запитів, то його зазвичай вважають нескінченним. Наприклад, хоча кількість користувачів інформаційно-пошукової системи Google кінцева,

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 6

припускають, що вони утворюють нескінченне джерело.

Вхідний потік. Запити, що надходять з нескінченного джерела, прибувають в канал обслуговування в моменти часу $t_0 < t_1 < \dots < t_k < \dots$. Інтервали часу $\xi_k = t_k - t_{k-1}$ ($k > 1$) між послідовними моментами надходження запитів є випадковими величинами. Передбачається, що ξ_k утворюють послідовність незалежних і однаково розподілених випадкових величин з функцією розподілу $A(t) = P\{\xi_k < t\}$. У математичній теорії масового обслуговування використовують обмежений набір законів розподілу для опису вхідних потоків. Головними є пуассонівський (найпростіший), який задається формулою Пуассона.

Процес обслуговування. Нехай η_k – тривалість обслуговування k -го запиту. Передбачається, що η_k ($k=1, 2, \dots$) – незалежні однаково розподілені випадкові величини з функцією розподілу $B(t) = P\{\eta_k < t\}$. Функція $B(t)$ називається розподілом тривалості обслуговування. Припускаємо, що існує щільність імовірності $b(t) = B'(t)$. Як і для опису вхідних потоків запитів у теорії масового обслуговування використовують обмежений набір законів розподілу для опису часу обслуговування. Найпоширенішим є експоненціальний закон розподілу з функцією розподілу $B(t) = 1 - \exp(-\mu t)$. Параметр μ інтерпретується як інтенсивність обслуговування. Середній час обслуговування дорівнює $1/\mu$. Крім експоненціального розподілу, використовують ерлангівський і гіперекспоненціальний розподіли, які отримують шляхом перетворення експоненціального закону.

Канали обслуговування. СМО може мати один або більше каналів (ліній, приладів) обслуговування. СМО з одним каналом називаються одноканальними або однолінійними, тоді як системи обслуговування, що містять більше каналів обслуговування, називаються багатоканальними або багатолінійними. Прилади обслуговування можуть бути однорідними й неоднорідними. У СМО з однорідними приладами всі прилади обслуговують запити однаково. У СМО з неоднорідними приладами прилади відрізняються один від одного деякими

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 7

параметрами, наприклад інтенсивністю обслуговування.

Дисципліна обслуговування. Правило, згідно з яким запити вибираються для обслуговування, складають дисципліну обслуговування. Умовно всі дисципліни обслуговування по наданню переваг в обслуговуванні діляться на дві групи: безпріоритетні і пріоритетні. Кожна з цих груп ділиться на ряд підгруп. Безпріоритетні дисципліни обслуговування поділяються на дисципліну обслуговування в порядку надходження, у зворотному порядку, із випадковим вибором з черги та циклічну дисципліну обслуговування. При пріоритетних дисциплінах обслуговування з черги на обслуговування спочатку вибираються заявки з вищим пріоритетом. Вони поділяються на дисципліни з фіксованими й динамічними пріоритетами. При дисципліні обслуговування з відносним пріоритетом не дозволяється переривання обслуговування запиту на каналі. Якщо в систему з дисципліною обслуговування з абсолютним пріоритетом надійде запит з пріоритетом вищим, ніж той що обслуговується, то він припинить обслуговування цього запиту й надійде на обслуговування. Системи з абсолютним пріоритетом розрізняють за кількістю рівнів пріоритету, а також за алгоритмами для обслуговування перерваних запитів. При дисциплінах обслуговування з динамічним пріоритетом пріоритет конкретних запитів змінюється залежно від змінювання деяких величин, наприклад часу очікування в черги.

За наявністю певної ознаки системи масового обслуговування можна класифікувати так:

1. За кількістю вимог, що надходить за одиницю часу, на системи з ординарним і неординарним потоками вимог. Якщо імовірність надходження двох і більше вимог одночасно дорівнює нулю або має настільки мале значення, що ним можна знехтувати, то отримаємо систему з ординарним потоком вимог. Наприклад, потік вимог – літаки, що надходить на злітно-посадкову смугу аеродрому, можна вважати ординарним.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 8

2. За зв'язком між вимогами – на системи без післядії і з післядією. Якщо ймовірність надходження вимог у систему в деякий момент часу не залежить від того, скільки вимог уже надійшло, тобто не пов'язана з передісторією досліджуваного процесу, то отримаємо систему без післядії, в іншому разі – із післядією. Прикладом системи з післядією може слугувати потік студентів, що здають залік викладачу.

3. За реакцією вимоги на зайнятість каналів – на системи з відмовами й очікуваннями. Якщо вимога, яка надійшла на обслуговування, застала всі канали зайнятими і змушена залишити систему, то отримаємо систему з відмовами.

4. Системи з очікуванням розподіляються на системи з обмеженим і необмеженим очікуванням. Якщо вимога залишає систему, коли черга набула певного розміру, то отримаємо систему з обмеженим очікуванням. Прикладом може слугувати самоскид з розчином. Якщо час очікування настільки великий, що розчин може затвердіти, то самоскид доречно розвантажити в іншому місці. Якщо вимога, яка надійшла, застала всі канали зайнятими і змушена очікувати своєї черги доти, доки вона не буде обслужена, то отримаємо систему з очікуванням без обмежень. Приклад: літак, що перебуває на аеродромі й очікує звільнення злітної смуги.

5. За способом вибору вимог на обслуговування розподіляються так:

- із пріоритетом вимог;
- у процесі надходження вимог;
- із випадковим вибором вимог;
- остання вимога обслуговується першою.

Якщо система масового обслуговування охоплює декілька категорій вимог і за якими-сь ознаками визначається порядок їх вибору на обслуговування, то отримаємо систему з пріоритетом вимог. Приміром, під час надходження виробів на будівельний майданчик насамперед монтують ті, що обумовлені будівельною технологією. Якщо канал, що звільнився, обслуговує вимогу, яка надійшла в

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 9

систему раніше за інші, то отримаємо систему обслуговування вимог у процесі їх надходження. Наприклад, покупець, що підійшов першим до продавця, обслуговується першим. Якщо вимоги з черги в канал обслуговування надходить випадково, то отримаємо систему з випадковим вибором вимог на обслуговування. Приклад: вибір слюсарем-сантехніком однієї з декількох заявок від мешканців, із часом надходження яких він не ознайомлений. Якщо для обслуговування обирається остання вимога, що надійшла, то отримаємо систему з вибором «останній обслуговується першим». Приміром, під час укладання будівельних виробів штабелями зручніше обирати зі штабеля (черги) виріб, покладений останнім.

6. За часом обслуговування вимоги – на системи з детермінованим і випадковим часом обслуговування. Якщо інтервал часу між моментом надходження вимоги в канал обслуговування і моментом виходу вимоги з каналу постійний, то отримаємо систему з детермінованим часом обслуговування, в іншому разі – із випадковим. Наприклад, миття автомобілів становить систему обслуговування з детермінованим часом обслуговування.

7. За кількістю каналів обслуговування – на одно- й багатоканальні системи. Приміром під час монтажу будинку може використовуватися один підіймальний кран (один канал обслуговування) або декілька (багато каналів обслуговування).

8. За кількістю етапів обслуговування – на одно- й багатofазні системи. Якщо канали обслуговування розташовуються послідовно й неоднорідні, то отримаємо багатofазну систему обслуговування. Прикладом такої системи може слугувати обслуговування автомобілів на СТО (миття, діагностика, заміна фільтрів тощо).

9. За однорідністю вимог – на системи з однорідними й неоднорідними потоками вимог. Приміром, якщо під навантаження прибувають фургони однієї вантажопідйомності, то отримаємо систему з однорідним потоком вимог, якщо

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 10

різної – із неоднорідним.

10. За завантаженістю каналів – на впорядковані й неупорядковані системи. У впорядкованих системах обслуговуючі канали завантажені нерівномірно. Вимога, що надійшла, обслуговується чіткого визначеним каналом із наявних вільних, а саме каналом з найменшим номером (вважається, що всі канали пронумеровані). У неупорядкованих системах усі канали однакові й вимога, що надійшла, обслуговується одним із вільних каналів без будь-яких переваг.

1.1.2. Методи теорії масового обслуговування

Теорія масового обслуговування (queueing theory) описує процеси, що протікають в системах масового обслуговування (СМО) (рис. 1.2). До СМО відносяться ремонтні майстерні, станції технічного обслуговування, автозаправні станції тощо.

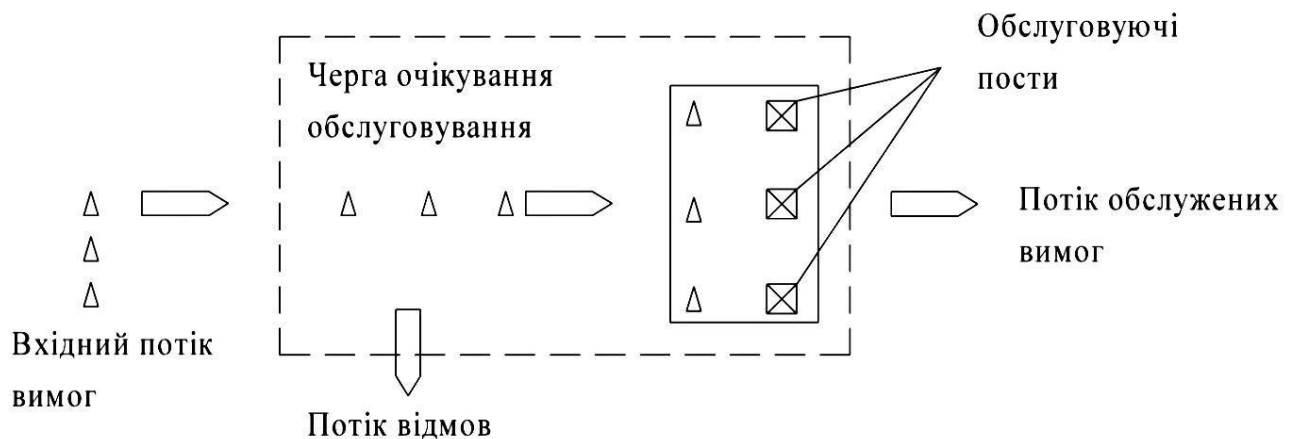


Рисунок 1.2 – Система масового обслуговування

Випадковий характер потоку заявок призводить до того, що в СМО відбувається якийсь випадковий процес. Якщо випадковий процес є марковським, то функціонування СМО можна описати системою диференціальних рівнянь, а в граничному випадку – системою лінійних

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 11

алгебраїчних рівнянь, розв'язками яких визначаються характеристики роботи СМО.

Методи теорії масового обслуговування дозволяють вирішувати такі завдання автомобільного транспорту:

- визначити кількість ліній або постів ТО і Р автомобілів;
- визначити раціональну кількість оборотних агрегатів;
- проводити розрахунок кількості постів навантаження і розвантаження автомобілів,
- задачі формування черг на перехрестях вулично-дорожньої мережі;
- задачі планування графіків руху громадського транспорту за умов мінімальних затримок у чергах на зупинках, а також багато інших завдань.

При аналізі роботи СМО необхідно знати її основні вихідні параметри:

- інтенсивність потоку заявок – λ ;
- трудомісткість обслуговування однієї заявки – T_p ;
- число каналів обслуговування – n ;
- число місць очікування – m ;
- кількість операторів на кожному каналі – d ;
- умови, що накладаються на створення черги.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 12

1.2. Приклади застосування теорії смо для моделювання транспортних процесів

1.2.1. Моделювання формування черги перед перехрестям

Однією з найважливіших характеристик перехрестя є довжина черги автомобілів, які очікують проїзду. Побудуємо просту модель утворення черги на перехресті зі світлофорним регулюванням. Розглянемо перетин двох доріг з одностороннім рухом. Нехай τ^+ – тривалість горіння зеленого світла, а τ – тривалість всього циклу світлофора. Припустимо, що коли для однієї смуги загорілося червоне світло, зелене світло для другої смуги загоряється через деякий час, щоб автомобілі що "проскочили" встигли проїхати.

Нехай потік автомобілів, що проходять через точку А (деяку точку на ділянці дороги перед перехрестям), є найпростіший потік з параметром λ , $\lambda > 0$. При накопиченні автомобілів в системі точка А зміщується вліво (рис. 2.1).

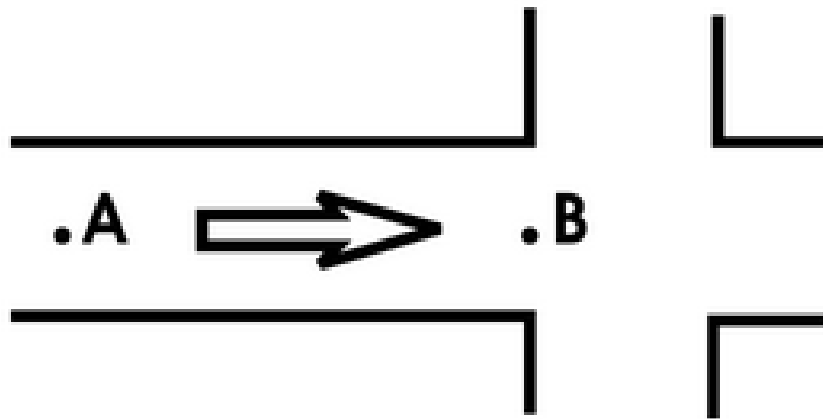


Рисунок 2.1 – Модель черги на перехресті

Автомобілі, що надходять в систему, або перетинають перехрестя (отримують обслуговування як запити), якщо проїзд вільний і горить зелене світло, або стають в чергу біля перехрестя. Припустимо, що водії не їдуть на червоне світло, навіть якщо на перетинаючій смузі порожньо.

Обслуговуванням одного автомобіля в рамках даної моделі є проїзд через точку В – початок перехрестя. Прийmemo час проїзду через точку В однаковим

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 13

для всіх автомобілів і рівним T , $T > 0$. За цей час наступний автомобіль під'їжджає до перехрестя (точки B) і чекає свого обслуговування. Таким чином, поведінка перехрестя буде описуватися за допомогою однолінійної системи масового обслуговування (СМО) з очікуванням і буфером розміру M (максимальне число автомобілів, здатних поміститися на дорозі), $M \in \mathbb{N}$.

Будемо шукати середню довжину черги. Припустимо, що перед перехрестям може стояти не більше M автомобілів, $M \geq 1$. Кожен автомобіль займає одну клітинку (однакової довжини для всіх автомобілів). Коли перший автомобіль проїжджає через перехрестя, інші, які стоять в черзі, посуваються на одну клітинку вперед.

Підрахуємо, скільки автомобілів можуть проїхати перехрестя за період горіння зеленого світла. За одиницю часу через перехрестя можуть проїхати T^{-1} автомобілів. Значить, на зелене світло через перехрестя можуть проїхати $\tau^+ T^{-1}$ автомобілів. Таким чином, величина N являє собою пропускну здатність перехрестя за час горіння зеленого світла.

Розглянемо накопичення автомобілів в системі за час одного циклу світлофора. Будемо вивчати поведінку системи в моменти часу nT , $n = 0, \dots, N$, тобто моменти початку періоду зеленого світла і моменти закінчення обслуговування запитів (автомобілів). Позначимо через $\rho_i^{(n)}$ ймовірності того, що в момент часу $nT + 0$ (безпосередньо відразу після відходу автомобіля з черги) довжина черги становить i автомобілів, $n = 0, \dots, N$, $i = 0, \dots, M$. Позначимо також через $P_i(t)$ ймовірність того, що за час t в систему приїдуть i автомобілів, $i \geq 0$. Вираз для $P_i(t)$ має вигляд:

$$P_i(t) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^i}{i!}, i \geq 0$$

Рівняння для ймовірностей $\rho_i^{(n)}$, $n = 0, \dots, N$, $i \geq 0$ мають вигляд:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 14

$$\begin{aligned}
\rho_i^{(0)} &= \sum_{k=0}^i \rho_k^{(N)} P_{i-k}(\tau), \quad i = 0, \dots, M, \\
\rho_M^{(0)} &= \sum_{k=0}^M \rho_k^{(N)} \sum_{l=M-k}^{\infty} P_l(\tau), \quad \tau = \tau - NT \\
\rho_i^{(n)} &= \sum_{k=1}^{i+1} \rho_k^{(n-1)} P_{i-k+1}(T), \quad i = 0, \dots, M-1, \\
\rho_M^{(n)} &= \sum_{k=0}^M \rho_k^{(n-1)} \sum_{l=M-k+1}^{\infty} P_l(T), \quad n = 1, \dots, N,
\end{aligned} \tag{2.1}$$

причому кожна група ймовірностей $\rho_i^{(n)}$, $i = 0, \dots, M$ задовольняє умовам нормування

$$\sum_{i=0}^M \rho_i^{(n)} = 1, \quad n = 0, \dots, N. \tag{2.2}$$

Позначимо через $A_i = P_i(\tau)$ $\dot{A}_i = \sum_{l=i}^{\infty} P_l(\tau)$, $B_i = P_i(T)$, $\dot{B}_i = \sum_{l=i}^{\infty} P_l(T)$ $i \geq 0$ і розпишемо систему (2.1) більш детально:

$$\begin{aligned}
\rho_0^{(0)} &= \rho_0^{(N)} A_0 \\
\rho_1^{(0)} &= \rho_0^{(N)} A_1 + \rho_1^{(N)} A_0 \\
\rho_M^{(0)} &= \rho_0^{(N)} A_M + \rho_1^{(N)} A_{M-1} + \dots + \rho_M^{(N)} A_0
\end{aligned} \tag{2.3}$$

де $A_i = P_i(\tau)$, $B_i = P_i(T)$.

$$\begin{aligned}
\rho_0^{(n)} &= \rho_0^{(n-1)} B_1 + \rho_1^{(n-1)} B_0 \\
\rho_1^{(n)} &= \rho_0^{(n-1)} B_2 + \rho_1^{(n-1)} B_1 + \rho_2^{(n-1)} B_0 \\
\rho_M^{(n)} &= \rho_0^{(n-1)} \dot{B}_{M+1} + \rho_1^{(n-1)} \dot{B}_M + \dots + \rho_M^{(n-1)} \dot{B}_1, \quad n = 1, \dots, N
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Запишемо системи (2.3) і (2.4) у матричному вигляді

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 15

$$\begin{aligned}
\vec{\rho}^{(0)} &= \vec{\rho}^{(N)} \hat{A}, \\
\vec{\rho}^{(1)} &= \vec{\rho}^{(0)} \hat{B}, \\
\vec{\rho}^{(2)} &= \vec{\rho}^{(1)} \hat{B}, \\
\vec{\rho}^{(N)} &= \vec{\rho}^{(N-1)} \hat{B},
\end{aligned} \tag{2.5}$$

де

$$\vec{\rho}^{(n)} = (\rho_0^{(n)}, \rho_1^{(n)}, \dots, \rho_M^{(n)}), \quad n = 0, \dots, N,$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A_0 & A_1 & A_2 & \dots & \dot{A}_{M-1} \\ 0 & A_0 & A_1 & \dots & \dot{A}_{M-2} \\ 0 & 0 & A_0 & \dots & \dot{A}_{M-3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dot{A}_0 \end{bmatrix},$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & \dots & B_M & \dot{B}_{M+1} \\ B_0 & B_1 & \dots & B_{M-1} & \dot{B}_M \\ 0 & B_0 & \dots & B_{M-2} & \dot{B}_{M-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & B_0 & \dot{B}_1 \end{bmatrix}.$$

Із системи (2.5) і умов нормування (2.2) при $n = 0$ знаходимо значення для вектора $\vec{\rho}^{(0)}$

$$\begin{cases} \vec{\rho}^{(0)} = \vec{\rho}^{(0)} B^N A, \\ \vec{\rho}^{(0)} \mathbf{1} = 1, \end{cases}$$

Інші вектори ймовірностей знаходимо за допомогою рівностей

$$\vec{\rho}^{(n)} = \vec{\rho}^{(n-1)} \hat{B}, \quad n = 1, \dots, N.$$

Тоді середня довжина черги на перехресті до моменту початку періоду зеленого світла дорівнює:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 16

$$L = \sum_{i=0}^M i \rho_i^{(0)}.$$

1.2.2. Моделювання транспортних процесів в системі міського пасажирського транспорту з використанням теорії масового обслуговування

Ймовірність затримки руху ТЗ перед зупиночним пунктом через його зайнятість попереднім ТЗ треба визначати за допомогою використання теорії масового обслуговування. Для цього треба уявити, що зупиночний пункт є замкненою системою масового обслуговування ТЗ, які прибувають до нього. У цьому випадку інтенсивність потоку замовлень на обслуговування λ , авт./год., розраховується за залежністю:

$$\lambda = \frac{60}{I}, \quad (2.6)$$

де I – середній інтервал руху транспортних засобів, які прибувають до зупиночного пункту.

Інтенсивність потоку обслуговування залежить від пропускної здатності зупиночного пункту, тобто від часу зайняття $t_{зп}$ ЗП одним ТЗ, авт./год.:

$$\mu = \frac{3600}{t_{зп}} = \frac{3600}{(t_a + t_{пз} + t_b)}, \quad (2.7)$$

де t_a – час підходу ТЗ до ЗП, с.;

$t_{пз}$ – час безпосереднього знаходження ТЗ на ЗП, с.;

t_b – час відходу ТЗ від ЗП, с.

Значення t_a та t_b розраховуються за залежностями:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 17

$$t_a = \frac{V_p}{3,6 \cdot a} \quad t_b = \frac{V_p}{3,6 \cdot b}, \quad (2.8)$$

де V_p – розрахункова швидкість руху ТЗ на маршруті, км/год;

a – середнє прискорення ТЗ, м/с²;

b – середнє вповільнення ТЗ, м/с²;

Значення $t_{пз}$ розраховується за наступною залежністю:

$$t_{пз} = t_B + \frac{t_{пас} \cdot Q \cdot k_d}{n} + t_3 \quad (2.9)$$

де t_b , t_3 – середній час, відповідно, відчинення і зачинення дверей ТЗ, с (у розрахунках прийняти t_b , $t_3 = 1,5 \dots 2$ с);

$t_{пас}$ – середній час висадження або посадки одного пасажиря, с (у розрахунках прийняти $t_{пас} = 0,9 \dots 1,5$ с/пас.);

Q – середній пасажирообіг ЗП, пас;

k_d – коефіцієнт нерівномірності висадження і посадки по дверях ТЗ (для автобуса становить близько 1,2);

n – кількість дверей у ТЗ.

З точки зору теорії масового обслуговування ЗП може перебуває у наступних станах: вільному, зайнятому одним ТЗ, зайнятому одним ТЗ і на підході до нього є наступний ТЗ і т.д. Якщо позначити ймовірність знаходження ЗП у кожному цих станів, відповідно, через $P_0, P_1, P_2 \dots P_n$, то ймовірність того, що ЗП знаходиться у будь-якому з указаних станів визначається умовою нормування:

$$P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1. \quad (2.10)$$

Виходячи з умов, що найчастіше система перебуває у перших трьох станах

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 18

P_0, P_1 та P_2 (принаймні при розгляді систем міського пасажирського транспорту) система рівнянь, що описує перехід ЗП у кожний із станів матиме наступний вигляд:

$$\begin{cases} \mu \cdot P_1 - \lambda \cdot P_0 = 0 \\ \lambda \cdot P_0 + \mu \cdot P_2 - \mu \cdot P_1 - \lambda \cdot P_1 = 0. \\ \lambda \cdot P_1 - \mu \cdot P_2 = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Вирішення системи рівнянь (2.11) дає можливість одержати залежності для розрахунку ймовірностей знаходження системи у цих станах:

$$P_0 = 1 - \gamma \quad P_1 = \gamma \cdot P_0 \quad P_2 = \gamma^2 \cdot P_0 \quad (2.12)$$

де γ – навантаженням системи або коефіцієнт завантаженості:

$$\gamma = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (2.13)$$

На практиці, як правило, розглядають тільки ті варіанти роботи системи масового обслуговування, коли $\gamma < 1$, бо в іншому випадку черга поступово зростатиме до нескінченності.

Якщо стан системи позначити через $n = 0, 1, 2, \dots$, то ймовірність знаходження системи у n -му стані розраховуються за залежністю:

$$P_n = \gamma^n \cdot (1 - \gamma). \quad (2.14)$$

Більшість практичних спостережень показує, що якщо ймовірність затримки руху на ЗП складає менше 10%, то можна вважати, що даний ЗП на буде перешкодою для забезпечення регулярності руху:

$$P_2 + P_3 + \dots + P_n = 1 - (P_0 + P_1) < 10\%. \quad (2.15)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 19

Для розробки керуючих рішень, щодо поліпшення роботи системи існують наступні показники системи масового обслуговування:

а) частка часу простою системи:

$$\varepsilon = P_0 = 1 - \gamma. \quad (2.16)$$

б) середня кількість замовлень, що знаходяться в системі:

$$n_c = \frac{\gamma}{(1-\gamma)^2}. \quad (2.17)$$

в) середня довжина черги:

$$n_r = \frac{\gamma^2}{1-\gamma}. \quad (2.18)$$

г) середній час перебування замовлень в системі:

$$\tau_c = \frac{1}{\mu - \lambda}. \quad (2.19)$$

д) середній час перебування замовлення в черзі:

$$\tau_r = \frac{\gamma}{\mu - \lambda}. \quad (2.20)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 20

1.3. Розрахунок параметрів транспортних процесів в системі міського пасажирського транспорту за заданими вихідними даними

1.3.1. Вихідні дані для розрахунків

Пасажиروобмін на зупиночному пункті – 35 пас.;

Інтервал руху ТЗ - $I = 4$ хв.;

Середня швидкість руху на перегоні - $V_p = 40$ км/год.;

Кількість дверей у ТЗ - $n = 2$;

Середнє прискорення ТЗ - $a = 1$ м/с²;

Середнє сповільнення ТЗ - $b = 1,9$ м/с².

1.3.2. Розрахунок вірогідності знаходження зупиночного пункту (ЗП) у наступних станах: вільному, зайнятому одним транспортним засобом (ТЗ), зайнятому одним транспортним засобом та на підході до нього є наступний ТЗ.

Ймовірність знаходження ЗП в одному із зазначених станів розраховується за формулами:

$$P_0 = 1 - \gamma \quad P_1 = \gamma \cdot P_0 \quad P_2 = \gamma^2 \cdot P_0$$

де γ – навантаженням системи або коефіцієнт завантаженості:

$$\gamma = \frac{\lambda}{\mu}.$$

У свою чергу інтенсивність потоку замовлень на обслуговування λ , авт./год., розраховується за залежністю:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 21

$$\lambda = \frac{60}{I} = \frac{60}{4} = 15 \text{ авт./год.}$$

Визначимо інтенсивність потоку обслуговування, авт./год.:

$$\mu = \frac{3600}{t_{\text{зп}}} = \frac{3600}{(t_a + t_{\text{пз}} + t_b)},$$

де t_a – час підходу ТЗ до ЗП, с.;

$t_{\text{пз}}$ – час безпосереднього знаходження ТЗ на ЗП, с.;

t_b – час відходу ТЗ від ЗП, с.

Розрахуємо значення t_a та t_b розраховуються за залежностями:

$$t_a = \frac{V_p}{3,6 \cdot a} = \frac{40}{3,6 \cdot 1} = 11,1 \text{ с.}, \quad t_b = \frac{V_p}{3,6 \cdot b} = \frac{40}{3,6 \cdot 1,9} = 5,85 \text{ с.}$$

Значення $t_{\text{пз}}$ розраховується за наступною залежністю:

$$t_{\text{пз}} = t_B + \frac{t_{\text{пас}} \cdot Q \cdot k_d}{n} + t_3$$

де t_B, t_3 – у розрахунках прийняти $t_B, t_3 = 1,5 \dots 2$ с (приймаємо рівними 1,8 с);

$t_{\text{пас}}$ – у розрахунках прийняти $t_{\text{пас}} = 0,9 \dots 1,5$ с/пас. (приймаємо рівним 1,5 с/пас.);

k_d – для автобуса становить близько 1,2.

З урахуванням прийнятих значень та вихідних даних отримаємо:

$$t_{\text{пз}} = t_B + \frac{t_{\text{пас}} \cdot Q \cdot k_d}{n} + t_3 = 1,8 + \frac{1,5 \cdot 35 \cdot 1,2}{2} + 1,8 = 35,1 \text{ с.}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 22

Тоді інтенсивність потоку обслуговування:

$$\mu = \frac{3600}{(t_a + t_{пз} + t_b)} = \frac{3600}{11,1 + 35,1 + 5,85} = \frac{3600}{52,05} = 69,16 \text{ авт/год.}$$

Тоді:

$$\gamma = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{15}{69,16} = 0,22.$$

І, відповідно:

$$P_0 = 1 - \gamma = 1 - 0,22 = 0,78 \quad P_1 = \gamma \cdot P_0 = 0,22 \cdot 0,78 = 0,17$$

$$P_2 = \gamma^2 \cdot P_0 = 0,22^2 \cdot 0,78 = 0,04$$

Перевіримо правильність розрахунків за умовою нормування:

$$P_0 + P_1 + P_2 = 0,78 + 0,17 + 0,04 = 0,99$$

Таким чином умова нормування виконується.

1.3.3. Розрахунок теоретично можливої величини черги ТЗ перед ЗП.

Теоретично можлива середня довжина черги визначається залежністю:

$$n_r = \frac{\gamma^2}{1 - \gamma} = \frac{0,22^2}{1 - 0,22} = \frac{0,0484}{0,78} = 0,06 \text{ авт}$$

1.3.4. Розрахунок інших показників системи масового обслуговування.

а) частка часу простою системи:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 23

$$\varepsilon = P_0 = 1 - \gamma = 0,78$$

б) середня кількість замовлень, що знаходяться в системі:

$$n_c = \frac{\gamma}{(1 - \gamma)^2} = \frac{0,22}{0,78^2} = \frac{0,22}{0,608} = 0,36$$

в) середній час перебування замовлень в системі:

$$\tau_c = \frac{1}{\mu - \lambda} = \frac{1}{69,16 - 15} = \frac{1}{54,16} = 0,018 \text{ с.}$$

г) середній час перебування замовлення в черзі:

$$\tau_r = \frac{\gamma}{\mu - \lambda} = \frac{0,22}{54,16} = 0,004 \text{ с.}$$

Таким чином, на основі проведених розрахунків, можна зробити висновки про те, що при заданих умовах дана система пасажирського транспорту функціонує нормально і затримки, що виникають на зупинках не виходять за допустимі межі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 24

Розділ 2. Створення транспортної моделі

2.1. Цілі моделювання. Етапи створення моделі

Прогнозні транспортні моделі призначені для моделювання обсягів транспортної роботи в мережах при відомому розміщенні потокоутворюючих об'єктів міста. За допомогою прогнозних моделей можна прогнозувати наслідки змін у транспортній мережі міста, що відбуваються в процесі зміни або транспортного попиту, або транспортної пропозиції.

Моделі цього типу застосовуються для підтримки прийняття рішень в області транспортного планування міста, для аналізу наслідків тих чи інших альтернативних проектів розвитку транспортної мережі та ін. [12].

Прогнозні моделі можна розділити на дві групи по основним завданням прогнозування:

- прогнозування в часі;
- прогнозування в просторі.

Основні етапи створення транспортної моделі:

- створення моделі транспортної пропозиції;
- створення моделі транспортного попиту;
- калібрування транспортної моделі.

2.2. Порядок створення транспортної моделі

2.2.1. Створення моделі транспортної пропозиції

Транспортна пропозиція включає в себе інфраструктуру систем транспорту, які включені в транспортну модель. Основними системами транспорту в транспортних моделях зазвичай виступають індивідуальний транспорт і міський пасажирський транспорт загального користування.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 25

Основні елементи транспортної пропозиції для системи індивідуального транспорту [13]:

- «Вузли» (nodes) - перехрестя, перетини;
- «Перегони» (links) - ділянки вулично-дорожньої мережі;
- «Транспортні райони» (zones) - джерела і цілі скоєння кореспонденцій;
- «Примикання» (connectors) - з'єднують центри транспортних районів з мережею індивідуального та громадського транспорту.

Для системи громадського транспорту додатково до даних елементів додаються:

- зупинки громадського транспорту (stops);
- маршрути руху громадського транспорту (lines).

Транспортна пропозиція індивідуального транспорту

Вузли

«Вузли» (nodes) визначають положення перехресть, є початковими і кінцевими точками перегонів.

Для кожного з можливих маневрів на перехресті важливо задати величини затримок при здійсненні даних маневрів. У зв'язку з цим при створенні транспортної пропозиції важливо правильно призначити типи перехресть і задати значення затримок для кожного типу можливих маневрів (поворотів). Значення затримок для різних типів вузлів і маневрів вносяться в меню «Мережа. Стандарти повороту» (Рис. 1).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.x- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 26

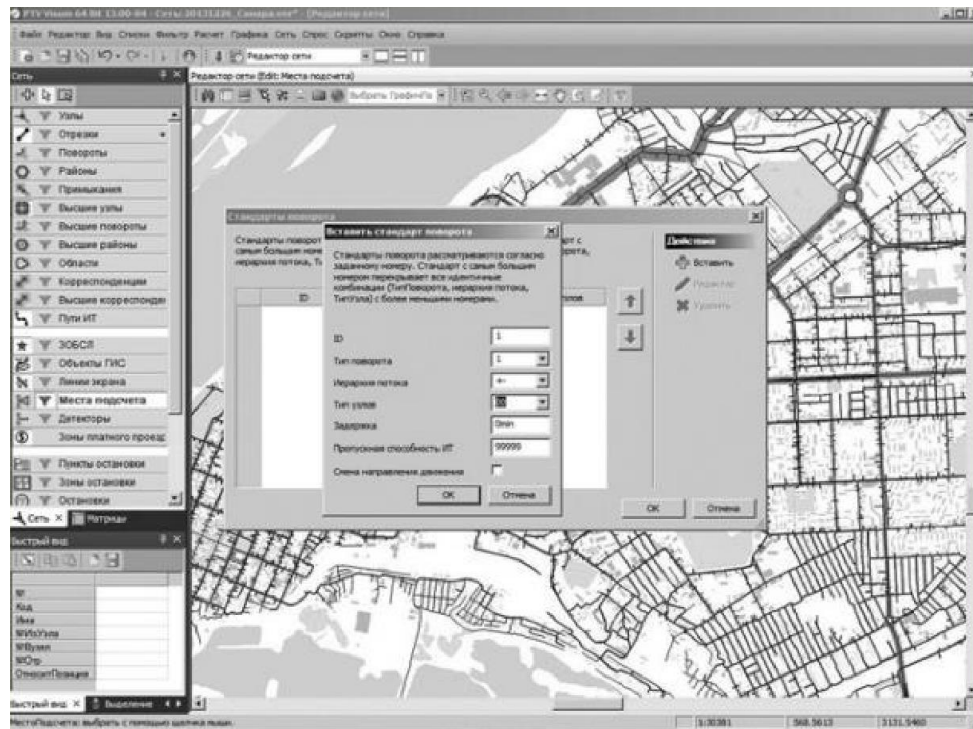


Рис. 1 Перехід в меню «Стандарти повороту»

Тут необхідно вибрати:

- тип повороту (прямо, направо, наліво);
- тип вузла (визначається користувачем, наприклад: 1 - регульовані вузли, 2 - нерегульовані вузли);
- ієрархія потоку;
- затримка в секундах;
- пропускна спроможність.

Окрім цього, в редакторі вузла є також наступні вкладки:

1) редактор геометрії вузла: задаються смуги руху і дозволені напрямки руху по цих смугах. Також є можливість задати розширення на перехресті.

2) редактор світлофорного об'єкта: тут задаються фази, сигнальні групи, для кожної сигнальної групи задаються смуги руху, для яких дозволено рух в зазначену фазу. У цьому ж вікні редактора можливо провести оптимізацію фаз світлофорного регулювання для існуючих транспортних потоків.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 27

Відрізки

«Відрізки» (links) - це об'єкти транспортної пропозиції, які описують вулично-дорожню мережу. Відрізки з'єднують вузли і мають напрямок, при цьому, прямий і зворотний напрямки є самостійними об'єктами мережі, яким присвоюється загальний номер відрізка.

Для громадського транспорту тимчасові витрати обчислюються з розкладу руху. Крім того, для громадського транспорту можливо врахувати такі витрати, як час пішохідного підходу, час очікування, час пересадки та інші параметри. Підсумкові тимчасові витрати будуть сумою всіх витрат, як на доступ до зупинки громадського транспорту, так і всередині системи громадського транспорту (рух, пересадка).

Крім того, можливо також врахувати вартість проїзду. PTV Vision® VISUM дозволяє враховувати різні тарифні системи, в тому числі разові квитки та зональну систему. В результаті для кожної поїздки громадського транспорту розраховуються сумарні витрати аналогічно витратам по індивідуальному транспорту в термінах часу або грошовому еквіваленті.

Транспортні райони

«Транспортні райони» (zones) є початковими і кінцевими пунктами транспортного руху. У транспортній моделі кожен транспортний район зведений до центру тяжіння, який через примикання пов'язаний з вулично-дорожньою мережею. Межі транспортних районів показують просторове положення транспортного району, однак вплив на розподіл транспорту надає тільки положення його центру.

Необхідно всю територію міста розбити на транспортні райони, причому їх кількість і розмір залежать від розмірів міста і кількості населення.

Примикання

«Примикання» (connectors, дослівно - «з'єднання») - це об'єкти мережі, які з'єднують центри тяжіння транспортних районів з вулично-дорожньою мережею

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 28

і містять інформацію про витрати (тимчасові або узагальнені) на доступ від центру тяжіння транспортного району до систем транспорту, допущених на примиканні. Кожен транспортний район в транспортній моделі має примикання мінімум з одним вузлом мережі.

Для пасажирів громадського транспорту примикання відповідає початковому і кінцевому пішохідному переходу, для нього зазвичай вказується час руху пішки. Примикання громадського транспорту сполучають центр району з вузлом доступу до зупинки.

Транспортна пропозиція міського пасажирського транспорту загального користування

Транспортна модель, виконана в форматі PTV Vision® VISUM, дозволяє моделювати також систему громадського транспорту. В транспортну модель вводяться системи громадського транспорту, види рухомого складу з його характеристиками. Далі створюється маршрутна мережа громадського транспорту. Маршрутна мережа громадського транспорту прокладається по вулично-дорожньої мережі, кожен маршрут проходить по відрізках через вузли та пункти зупинок.

Ієрархія зупинок

Для більш точного і детального моделювання громадського транспорту в PTV Vision® VISUM створюється система зупинок.

При створенні системи зупинок громадського транспорту PTV Vision® VISUM вимагає створення ієрархічної структури: «зупинка» (stop) - «зона зупинки» (stop area) - «пункт зупинки» (stop point).

Для кожного пункту зупинки визначені системи транспорту, для яких дозволено зупинку, посадку і висадку пасажирів.

У разі якщо для пункту зупинки заборонена посадка-висадка будь-якої системи транспорту, далі при прокладці маршрутів цієї системи транспорту такий зупинний пункт не буде включатися в маршрут.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 29

Маршрути, варіанти маршруту, розклад

Після створення системи зупинок в транспортну модель вводяться «маршрути» руху громадського транспорту (lines).

Кожен маршрут в транспортній моделі, виконаної в PTV Vision® VISUM, складається з декількох (зазвичай двох) «варіантів маршруту» (line routes), кожен з яких є одним з напрямків руху маршруту (від початкового пункту зупинки до кінцевого і назад). Один з варіантів зазвичай називається прямим напрямком маршруту, другий - зворотним.

2.2.2. Створення моделі транспортного попиту

В ході побудови моделі транспортного попиту визначаються джерела і цілі транспортного руху, вводяться параметри транспортної рухливості населення, формуються матриці кореспонденцій за видами транспорту і цілям здійснення транспортних кореспонденцій.

Транспортний попит визначається показниками транспортної рухливості населення.

Об'єкти транспортного попиту

Модель транспортного попиту в PTV Vision® VISUM має складну структуру. Для побудови стандартної чотирикрової моделі транспортного попиту спочатку необхідно ввести в транспортну модель існуючі системи транспорту.

У PTV Vision® VISUM є «системи транспорту» (transport systems), які через «сегменти попиту» (demand segments) зв'язуються з «матрицями кореспонденцій» (OD matrix). Сегмент попиту є визначальним для розрахунку попиту. Кожен сегмент попиту має рівно одну матрицю кореспонденцій і може складатися з декількох систем транспорту.

Системи транспорту, режими, сегменти попиту

Для громадського транспорту в транспортну модель введені такі системи

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 30

транспорту:

- автобус;
- тролейбус;
- трамвай;
- маршрутні таксі.

Для кожного типу одиниць транспортних засобів були введені параметри рухомого складу - загальна місткість і кількість сидячих місць

Шари попиту

Один з основних структурних елементів транспортного попиту - «шар попиту» (demand strata). Мінімально можливий набір шарів попиту містить два шари. Це попит на пересування від дому на роботу і з роботи додому.

У транспортних моделях задані шари попиту, генераторами і споживачами транспортних кореспонденцій в яких є:

- дім;
- робота;
- місце навчання;
- інші місця тяжіння.

Джерелом транспортного руху, а отже, необхідними вихідними даними для розрахунку кожного з шарів попиту, в залежності від джерела і мети поїздки, є статистична інформація:

- чисельність населення;
- чисельність працюючого населення;
- кількість робочих місць;
- кількість робочих місць в сфері послуг;
- чисельність осіб, що навчаються;
- кількість навчальних місць у закладах освіти.

Матриці витрат

Розрахунок транспортного попиту проводиться на основі витрат на

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 31

переміщення між транспортними районами. Такі витрати розраховуються і зберігаються у вигляді «матриць витрат» (skim matrix). Елементи матриці витрат характеризують будь-які витрати, пов'язані з переміщеннями між усіма транспортними районами області дослідження.

В якості витрат для громадського транспорту найчастіше використовується сума наступних витрат:

- час початкового і кінцевого пішохідних підходів;
- час очікування на зупинці;
- час руху всередині рухомого складу;
- час очікування при пересадці;
- час пішохідного переходу при пересадці;
- вартість проїзду.

Матриці кореспонденцій

Під терміном «транспортна кореспонденція» мається на увазі стійко реалізоване за допомогою транспорту переміщення людини (одиниці вантажу) з одного місця в інше.

За методикою [16] розрахунок матриці трудових кореспонденцій виконується в результаті рішення задачі математичного програмування, відомої як модель максимізації ентропії.

В основі алгоритму розрахунку матриць кореспонденцій в PTV Vision® VISUM лежить гравітаційна модель:

$$F_{ij} = k \cdot Q_i \cdot Z_j \cdot P_{ij}, \quad (1)$$

де: F_{ij} - кількість кореспонденцій з району i в район j ;

Q_i, Z_i - величини обсягів відправлень і прибуття трудових кореспонденцій для району i ;

P_{ij} - функція переваги.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 32

2.2.3. Калібрування транспортної моделі

Після створення моделі транспортної мережі в PTV Vision® VISUM необхідно перевірити достовірність результатів розрахунку, тобто чи відповідає модель реальній ситуації, що спостерігається на вулично-дорожній мережі міста. У процесі калібрування моделі потрібно домогтися максимальної близькості результатів, отриманих на основі моделювання, і даних, зібраних в результаті проведених обстежень параметрів транспортних і пасажирських потоків.

Прив'язка натурних даних про інтенсивність руху транспортних потоків

Для проведення калібрування необхідно попередньо прив'язати натурні дані до об'єктів моделі. У PTV Vision® VISUM зазвичай використовуються об'єкти «місця підрахунку» (count location).

Місця підрахунку - об'єкти мережі, які відзначають позицію на відрізку, де проводиться збір даних для конкретного напрямку відрізка. У кожне місце підрахунку можна вводити будь-яку кількість параметрів - денні, добові, погодинні інтенсивності, при необхідності з розбивкою за видами транспорту.

До кожного місця підрахунку можливо прив'язати наступні параметри:
Вхідні транспортні потоки:

- 1) денна інтенсивність легкового транспорту;
- 2) денна інтенсивність вантажного транспорту;
- 3) денна інтенсивність громадського транспорту;
- 4) інтенсивність в ранкову годину пік для легкового транспорту;
- 5) інтенсивність в ранкову годину пік для вантажного транспорту;
- 6) інтенсивність в ранкову годину пік для громадського транспорту;
- 7) інтенсивність у вечірню годину пік для легкового транспорту;
- 8) інтенсивність у вечірню годину пік для вантажного транспорту;
- 9) інтенсивність у вечірню годину пік для громадського транспорту.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 33

Зазвичай під час калібрування використовуються тільки дані про вхідні транспортні потоки.

Збір вихідних даних про транспортну систему з використанням глобальної мережі Інтернет

Одну з основних проблем при створенні та актуалізації транспортних моделей становить збір вихідних даних. Проблема полягає, перш за все, в тому, що в транспортній системі постійно відбуваються ті чи інші зміни. Оперативно відслідковувати всі зміни, що відбуваються в транспортній системі досить складно. Крім того, транспортні моделі можуть мати неточності, пов'язані з помилками при зборі вихідних даних.

Одним з перспективних джерел отримання необхідних даних є Інтернет. Сучасні технології дозволяють створювати інструменти, за допомогою яких звичайні жителі міста, учасники дорожнього руху за допомогою спеціальних інтернет-ресурсів можуть вносити в транспортну модель зміни.

Роботи з калібрування і верифікації моделі

Під калібрування транспортних моделей розуміють широкий набір способів, технологій і інструментів, метою яких є підвищення достовірності моделі, тобто відповідність розрахункових значень основних параметрів моделі спостережуванам станам функціонування транспортної системи.

Основним параметром, за яким здійснюється оцінка якості розрахунку транспортних моделей і їх калібрування, є інтенсивність руху транспортних потоків.

Калібрування транспортної моделі за значеннями інтенсивностей транспортних потоків полягає в послідовному пошуку помилок в транспортній пропозиції, попиті або визначальних співвідношеннях в місцях з найбільшим відхиленням розрахункових значень інтенсивності руху транспортних потоків від натурних.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 34

2.2.4. Особливості роботи з транспортною моделлю

Основне призначення прогнозних транспортних моделей - це, безумовно, можливість оцінити ті чи інші управлінські рішення, що стосуються транспортних систем, з точки зору якості функціонування даних транспортних систем. Для оцінки кожного управлінського рішення формується свій сценарій. Кожен сценарій включає в себе ті чи інші зміни, пов'язані з розвитком досліджуваної транспортної системи.

Види сценаріїв

Для формулювання кожного зі сценаріїв для їх подальшого моделювання необхідно визначити можливі типи, характеристики і особливості сценаріїв.

Розвиток транспортної системи в просторі

Розвиток транспортної системи в просторі - це розвиток, перш за все, територіальний. Головне питання, на яке відповідають сценарії просторового розвитку транспортної системи, - це «що буде, якщо ...», як зміниться якість функціонування транспортної системи в одному місці (території міста) при тих чи інших змінах, що відбуваються в іншій частині досліджуваної області.

Часовий період прогнозування - короткострокові і довгострокові сценарії

Часовий період моделювання, короткостроковий або довгостроковий, визначається в залежності від того, для якого транспортного попиту буде проводитися прогнозування.

Так, при короткостроковому прогнозуванні часто формуються сценарії, які включають зміни в транспортній пропозиції. При цьому при розрахунку проводиться тільки процедура перерозподілу по мережі існуючої матриці кореспонденцій. Умовно такий розрахунок можна назвати однокроковим.

Довгострокове прогнозування обов'язково містить і зміни в транспортному попиті, і зміни в транспортній пропозиції. Однак головна особливість довгострокового прогнозування - це зміна параметрів транспортної рухливості

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 35

населення. У зв'язку з тим, що в довгостроковому прогнозуванні використовується часовий період від 5 років і вище, при розробці сценарію потрібно в обов'язковому порядку враховувати зміну транспортної рухливості населення.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.06- 05.02/2/274.00.1/Б/ВК2.х- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 36

Список літератури

1. Теорія систем масового обслуговування : навч. посібник /А. Л. Литвинов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 141 с.
2. Розумний транспорт і логістика для міст : навчальний посібник / [авт. колектив: О.О. Лобашов, Ю.О. Давідіч, В.В. Воронько та ін.] – Житомир : «Житомирська політехніка», 2021. – 612 с.
3. Моделювання технологічних процесів підприємств автомобільного транспорту : навчальний посібник / В. В. Біліченко, В. П. Кужель. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 163 с.
4. Поліщук В.П., Дзюба О.П. Теорія транспортного потоку: методи та моделі організації дорожнього руху. К. : Знання України, 2008. 175 с.
5. Моделювання транспортних потоків / Є. Ю. Форнальчик, В. В. Гілевич, І. А. Могила. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. 216 с.