

# Мультимодальні пасажирські перевезення

Віктор Мироненко

*Державний університет інфраструктури та технологій  
м. Київ, Україна*

Покращення якості життя населення значною мірою залежить від розвитку сфери послуг. У контексті жорсткої конкуренції в транспортному обслуговуванні великих міст ключову роль для пасажирів відіграють мультимодальні перевезення. Вони інтегрують різні види транспорту в єдиний ланцюг, що дозволяє доставляти пасажирів «від дверей до дверей» та забезпечує новий, приємний досвід, який пасажирів будуть бажати повторити. Це робить подорожі більш ефективними, безпечними, екологічними, зменшує труднощі, оптимізує час у дорозі та знижує витрати. Мультимодальні перевезення набувають усе більшої популярності в світі завдяки їхній здатності об'єднувати різні транспортні засоби для доставки пасажирів. Це сприяє оптимізації логістичних процесів та підвищенню ефективності перевезень. Мультимодальні перевезення відкривають пасажирів нові можливості транспортних сполучень та змінюють спосіб подорожування.

Основними характеристиками мультимодальних пасажирських перевезень є:

- багатофункціональність, тобто поєднання декілька видів транспорту для перевезення пасажирів, що надає гнучкість у виборі маршрутів;
- єдиний перевізний документ, який спрощує процес оформлення подорожі та дозволяє пасажирів здійснювати подорож без додаткових формальностей при зміні транспорту;
- оптимізація часу і зручності, яка досягається завдяки поєднанню найшвидших і найбільш ефективних видів транспорту на кожному етапі маршруту;

- покращена координація між різними перевізниками, що знижує ризик затримок і полегшує логістичне планування подорожей;
- екологічність, оскільки завдяки використанню залізничного та громадського транспорту зменшується кількість шкідливих викидів у атмосферу.

Розвиток сервісу у пасажирських перевезеннях у перспективі стає ключовим чинником для залучення більшої кількості користувачів транспортними послугами та підвищення рентабельності перевезень незалежно від форми власності та характеру діяльності пасажирських компаній [1]. Для забезпечення високого рівня сервісу в перевезеннях пасажирів необхідні відповідні технічні засоби та інфраструктура.

Таким чином, високий рівень сервісу в пасажирських перевезеннях потребує не лише відповідної технічної підтримки та інфраструктури, але й орієнтації на потреби клієнтів. Наприклад, сектор пасажирських перевезень у Європейському Союзі сьогодні є дуже орієнтованим на клієнта [2]. Транспортні оператори усвідомили, що наявність задоволеного клієнта означає, що пасажир повернеться, щоб знову скористатися послугою, і збільшить загальний дохід транспортного оператора. У сфері залізничних перевезень пасажирів за останнє десятиліття були спроби поставити пасажирів в центр уваги процесу залізничних перевезень, але в цілому ці зусилля були дуже повільними. Прискорена комерціалізація європейського ринку транспортних послуг останніми роками змушує залізничні компанії, які займаються пасажирськими перевезеннями, шукати нові способи підвищення привабливості послуг для потенційних користувачів та економічної ефективності експлуатаційної діяльності. Ці цілі досягаються збільшенням швидкості руху поїздів та пасажиромісткості рухомого складу, розширенням діапазону та покращенням якості обслуговування пасажирів.

В зарубіжних країнах, як і в нашій країні, існує жорстка конкуренція між різними видами пасажирського транспорту. Характерною особливістю роботи залізничного транспорту в сучасних умовах у всіх країнах світу є його активна участь у внутрішньоміських перевезеннях. Тому в останні роки існуючі міські залізниці в багатьох

великих містах світу інтенсивно розвиваються, модернізуються, забезпечуються новим комфортабельним рухомим складом.

Наразі залізничні пасажирські перевезення стали ключовим видом транспортних послуг в більшості країн Європи. Мережа залізничних сполучень постійно розширювалася, що дозволило на забезпечення більш ефективного та зручного транспорту для мільйонів людей. У цей період залізниця стала предметом технологічних та наукових вдосконалень. Наприклад, у 1960-х роках в Європі була запроваджена електрифікація залізниць, що дозволило знизити витрати на паливо та поліпшити якість транспорту. Також, з'явилася можливість використовувати швидкісні поїзди, що забезпечили зручність та швидкість перевезень [3].

Ефективне управління пасажирськими перевезеннями залежить від використання сучасних систем керування, які відповідають вимогам транспортного ринку. Пасажирські перевезення мають великий потенціал для розвитку й можуть стати фінансово вигідним напрямком бізнесу. Вони також відіграють важливу роль у формуванні позитивного іміджу Компанії. Проте функціонування цього сегменту значною мірою залежить від державної політики, оскільки наразі тарифи на пасажирські перевезення є збитковими. Майбутні зміни до законодавства повинні передбачати компенсацію збитків від пасажирських перевезень за рахунок державного або місцевих бюджетів.

## 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НА РИНКУ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Інтеграція цифрових рішень, інноваційні підходи до управління перевезеннями, модернізація рухомого складу, а також розвиток мультимодальних систем транспортування формують основи технологічного транспортного обслуговування на ринку пасажирських перевезень. Основною метою є забезпечення зручності, швидкості та надійності для пасажирів, а також оптимізація операцій для транспортних компаній.

Розвиток технологій значно вплинув на ефективність транспортного обслуговування у сфері пасажирських перевезень. На сучасному транспортному ринку цей аспект стає критично важливим для підвищення якості обслуговування пасажирів, оптимізації витрат, підвищення безпеки та екологічності.

Оскільки попит на зручний, швидкий і надійний транспорт неухильно зростає, транспортні оператори вкладають значні ресурси у вдосконалення сервісів і адаптацію інфраструктури до сучасних умов. Впровадження автоматизованих систем контролю, цифрових платформ для відстеження маршрутів, а також мобільних додатків для координації пасажирських потоків дозволяє забезпечувати якісне та інтуїтивно зрозуміле обслуговування. Дослідження показують, що цифровізація сприяє зниженню операційних витрат, підвищує ефективність роботи транспортних засобів і скорочує час перебування пасажирів у дорозі, що підвищує їхню задоволеність послугами.

Технологічні рішення також забезпечують нові можливості для покращення екологічних показників транспорту за допомогою альтернативних видів палива, електрифікації транспортних мереж та оптимізації маршрутів. Наприклад, системи керування на основі штучного інтелекту й аналізу великих даних (Big Data) дозволяють оперативно реагувати на зміни дорожньої ситуації та оптимізувати навантаження на інфраструктуру. Це дозволяє покращити пасажирський досвід, сприяє безпеці перевезень і робить транспортні послуги доступнішими [4].

Згідно з законами ринкової рівноваги попиту і пропозиції, що визначають ціну та обсяги послуг, які реалізуються на ринку, попит (англ. demand) на залізничні транспортні та супутні послуги має бути повністю покритий їх пропозицією (англ. supply).

Попит на транспортні послуги оцінюється через інтенсивність пасажиропотоку в конкретному сегменті та в певний час, де пасажирам має бути забезпечено посадку у відповідний транспорт (вагони, поїзди) з можливістю дістатися пункту призначення.

Пропозиція транспортних послуг, яка відповідає цьому попиту, визначається кількістю транспортних засобів відповідного типу, що

повинні бути подані в заданий час і місце для здійснення перевезення пасажирів до пункту призначення.

*Інтервал (частота) відправлення поїздів – міра зручності для пасажирів.*

Актуальність теми частоти відправлення поїздів як показника зручності для пасажирів є важливим питанням оптимізації якості обслуговування в транспортній інфраструктурі, що відіграє ключову роль у вдосконаленні пасажирського досвіду та ефективності залізничного транспорту.

Частота відправлення поїздів визначає, як часто поїзди відправляються із залізничного вокзалу, що безпосередньо впливає на комфорт пасажирів. Чим частіше відправляються поїзди, тим менше часу пасажирів змушені витратити на очікування, що підвищує їхнє задоволення. Наприклад, можливість вибрати оптимальний час поїздки зменшує стрес і робить подорож більш приємною. Дослідження показують, що зручний розклад відправлень сприяє формуванню позитивного враження про залізничний транспорт і може стимулювати вибір залізничного транспорту замість автомобіля або інших видів транспорту [5].

Зменшення інтервалів між відправленнями значно знижує час очікування, що, у свою чергу, сприяє зростанню попиту на пасажирські перевезення. Дослідження свідчать, що з підвищенням частоти відправлення зростає й кількість нових пасажирів, які обирають залізницю для своїх поїздок. Наприклад, за даними [6], зменшення інтервалу відправлення на 10 хвилин може призвести до збільшення пасажиропотоку на 20% .

Інтервали відправлення поїздів можуть варіюватися в залежності від напрямку чи маршруту. Для приміського і міського сполучення короткі інтервали є критично важливими для задоволення потреб щоденних поїздок пасажирів, які часто подорожують на короткі відстані. Натомість для місцевого сполучення або ж міжміських маршрутів можуть бути допустимі більші інтервали, оскільки пасажирів можуть планувати поїздки заздалегідь. Наприклад, на міжміських маршрутах зменшення частоти відправлень може не

вплинути на попит, оскільки пасажирів мають можливість спланувати завчасно свої графіки.

Часте курсування поїздів може підвищити експлуатаційні витрати, але одночасно й поліпшує ефективність використання залізничної інфраструктури. Оптимізація інтервалів може допомогти знайти баланс між зручністю для пасажирів і витратами на обслуговування коротких інтервалів. Наприклад, у деяких випадках впровадження сучасних технологій управління графіком дозволяє знизити витрати, зберігаючи при цьому зручність для пасажирів [7].

Досвід інших країн і технологічні рішення можуть виявити різноманітні підходи до підвищення зручності для пасажирів шляхом оптимізації частоти відправлення. Наприклад, в Японії використовуються автоматизовані системи управління, які дозволяють ефективно планувати графік руху поїздів і зменшувати час очікування для пасажирів. Ці технології також допомагають адаптувати частоту відправлення до пікових навантажень, що забезпечує більш комфортні умови для подорожей [8].

У сфері пасажирських перевезень, на відміну від вантажних, спостерігається значна просторово-часова нерівномірність, яка має бути врахована при плануванні транспортного обслуговування. Наприклад, у приміських перевезеннях можна виділити два основних пікових періоди пасажиропотоку впродовж доби: ранішній та вечірній, які особливо виражені у робочі дні, але майже непомітні у вихідні. У випадку міжміських і регіональних перевезень існує кілька пікових періодів протягом року, пов'язаних із літніми відпустками, студентськими канікулами, святами та вихідними.

## II. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПАСАЖИРОПОТОКІВ ПРИМІСЬКОГО СПОЛУЧЕННЯ

Кафедрами факультету управління залізничним транспортом на замовлення Укрзалізниці проводилися як натурні дослідження, так і комп'ютерне моделювання нерівномірності пасажиропотоків приміських залізничних перевезень на напрямку Київ – Коростень.

Як і в багатьох інших подібних дослідженнях, було виявлено, що для приміських перевезень характерні два пікові періоди пасажиропотоків: ранішній, коли пасажирів їдуть у напрямку міста Києва, та вечірній, що передбачає повернення з Києва. На ці два періоди припадає близько 90% загального пасажиропотоку за напрямками. Саме в ці часи залізниця може продемонструвати свою найвагомішу технологічну перевагу – здатність забезпечувати високу провізну спроможність та надійність сполучень. Наприклад, електропоїзд може вмістити понад 1000 пасажирів і доставити їх точно за графіком, у той час як автобуси можуть вмістити лише 20–30 пасажирів, а їх час в дорозі, особливо в години «пік», часто є непередбачуваним через затори.

Для маршруту між Ірпінем і Києвом (станція Святошин) встановлені кількісні показники нерівномірності приміського пасажиропотоку. Наприклад, орієнтовна тривалість ранішнього «піку» (коли спостерігається максимальний попит на перевезення) складає 75 хвилин, причому половина пасажирів накопичується на станціях відправлення протягом перших 37 хвилин, а максимальна інтенсивність пасажиропотоку досягає 200 пасажирів на хвилину. Вечірній «пік» є більш «розтягнутим» у часі, триваючи 250 хвилин, де перша половина потоку накопичується до 35 хвилин, а друга – протягом 215 хвилин, з максимальною інтенсивністю 72 пас./хв. Інтенсивність пасажиропотоку (пас./хв.) описується розподілом Вейбула (з різними параметрами – див. Вікіпедію).

Виявлені в ході цього дослідження закономірності можуть бути застосовані не лише для теоретичного аналізу, а й для практичних розрахунків. Для цього слід створити відповідні математичні моделі, які точно відображають технологічні процеси організації пасажирських перевезень.

*Математичні моделі динаміки попиту на пасажирські перевезення*

Математичні моделі, що описують динаміку попиту на пасажирські перевезення, дозволять детальніше розглянути вплив

нерівномірності в приміських перевезеннях на ключові технологічні параметри (на прикладі моделі рис. 1).

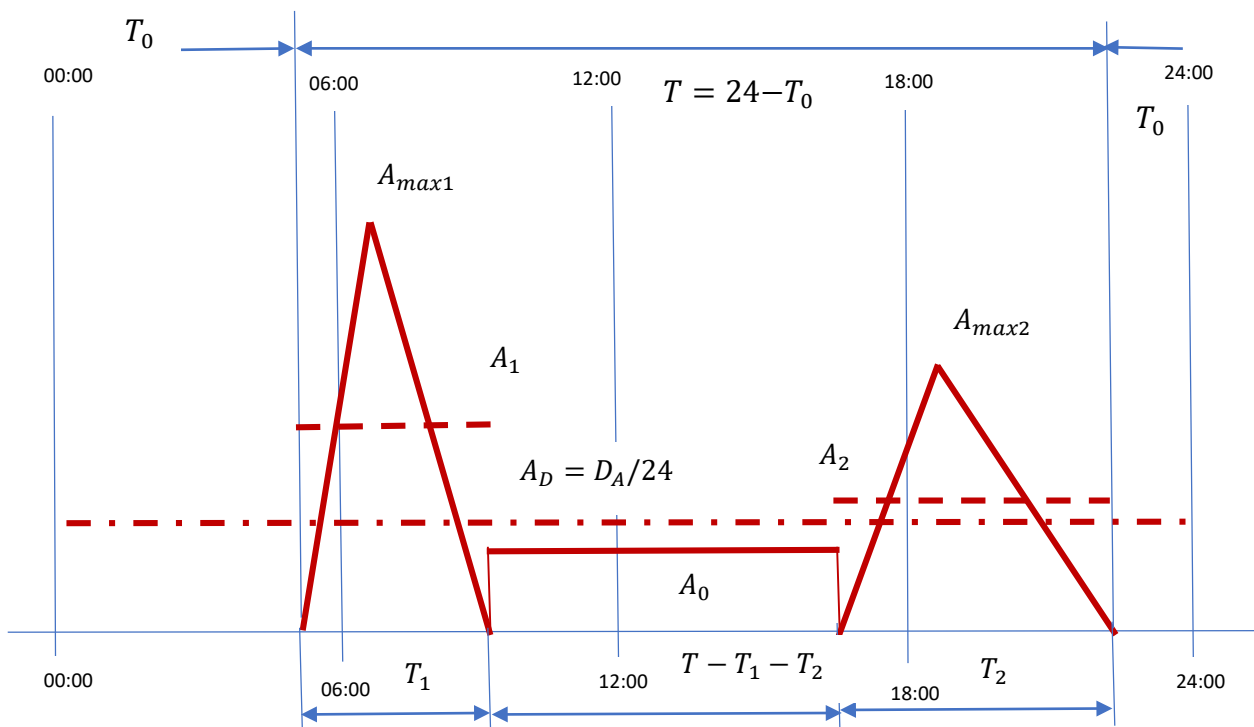


Рисунок 1 – Графічна модель нерівномірності попиту на приміські перевезення

На рис. 1 червоними суцільними лініями зображена спрощена (на основі лінійних залежностей) умовна діаграма зміни інтенсивності попиту на перевезення (пасажиропотоку, пасажирів на годину – пас./год.). Штриховими лініями наведені рівні розрахункової інтенсивності пасажиропотоку в перший період «пік»  $A_1 = A_{max1}/2$  та в другий період «пік»  $A_2 = A_{max2}/2$ , які дорівнюють половині максимальної інтенсивності пасажиропотоку у відповідні періоди «пік»  $A_{maxi}$ .

Інтенсивність пасажиропотоку (попиту на перевезення) у міжпіковий період приймається постійною ( $A_0$ ), а величина її розраховується (у пас./год.)

$$A_0 = \frac{D_A - A_1 T_1 - A_2 T_2}{24 - T_0 - T_1 - T_2}, \quad (1)$$

де  $D_A$  – середньодобові обсяги перевезень (відправлення) пасажирів, пас./доб.;

$$A_1 = \frac{A_{max1}}{2} \quad (2)$$

та

$$A_2 = \frac{A_{max2}}{2}; \quad (3)$$

$A_{maxi}$  – максимальна годинна інтенсивність пасажиропотоку у відповідні ( $i$ -ті, де  $i = 1, 2, \dots, n$ ) періоди «пік», пас./год.;

$T_0$  – тривалість періоду протягом доби, коли перевезення не здійснюються (нічний час), год.;

$T_1$  та  $T_2$  – тривалості, відповідно, першого та другого періодів «пік», год.

Максимальна годинна інтенсивність пасажиропотоку в періоди «пік» та тривалість цих періодів встановлюються в ході маркетингових досліджень, у тому числі натурних спостережень.

Середньодобова годинна інтенсивність попиту на перевезення  $A_D$  розраховується (якщо це потрібно) за формулою

$$A_D = D_A/24. \quad (4)$$

Тепер можна розрахувати рекомендовані інтервали відправлення приміських поїздів

$$I_0 = \frac{n_A}{A_0}; \quad (5)$$

$$I_1 = \frac{n_A}{A_1} k_R \quad (6)$$

та

$$I_2 = \frac{n_A}{A_2} k_R, \quad (7)$$

де  $n_A$  – пасажиромісткість поїзда (номінальна), кількість місць для сидіння;

$k_R$  – коефіцієнт, що враховує заповнення поїзда в години «пік»  
( $k_R = 1,25 - 1,5$ ).

Коефіцієнт  $k_R$  встановлюється шляхом натурних спостережень.

Розраховані за формулою (5, 6, 7) рекомендовані інтервали відправлення є орієнтовними, вони можуть корегуватися в ході розроблення графіка руху поїздів.

*Потреба в рухомому складі – пропозиція послуг перевізника для задоволення попиту.*

У контексті пасажирських перевезень, потреба в рухомому складі є критично важливим елементом, що визначає здатність перевізника пропонувати свої послуги та відповідати на зміну попиту. Рухомий склад, включаючи локомотиви, вагони та інші транспортні засоби, є основним засобом для забезпечення перевезення пасажирів. Його наявність та якість безпосередньо впливають на ефективність обслуговування і задоволеність клієнтів.

Попит на пасажирські перевезення часто коливається в залежності від сезону, часу доби та інших факторів, таких як святкові дні чи події, що впливають на кількість пасажирів. Перевізники повинні адаптувати свій рухомий склад відповідно до цих змін, щоб уникнути ситуацій з переповненістю або, навпаки, недостатньою заповнюваністю транспорту. Для цього необхідно здійснювати аналіз і прогнозування попиту, щоб вчасно планувати необхідну кількість та типи транспортних засобів.

Потреба в рухомому складі тісно пов'язана з пропозицією послуг перевізника. Для задоволення попиту важливо не лише забезпечити наявність достатньої кількості транспортних засобів, але й оптимізувати їх використання. Це вимагає постійного моніторингу, аналізу даних про пасажиропотоки та впровадження новітніх технологій управління. Перевізники, які вміють адаптуватися до змін у попиті, здатні забезпечити високу якість обслуговування та задоволеність своїх клієнтів.

Оскільки можливості варіювання парку рухомого складу (кількість складів поїздів) є обмеженими в порівнянні з оперативним регулюванням інтервалів відправлення, необхідність у рухомому

складі повинна визначатися на основі середньодобових обсягів перевезень протягом року. При цьому слід враховувати коефіцієнти нерівномірності, які відображають коливання попиту на перевезення, пов'язані з літніми відпустками, канікулами, святами та іншими подіями.

Потреба в складах поїздів  $N_{СП}$  прямо залежить від кількості пар поїздів на маршруті  $n_{пм}$ , які відправляються щодоби та часу обороту (обігу) состава на маршруті  $\theta_{пм}$  з урахуванням періодичності його заходу в основне депо приписки для технічного обслуговування та регламентних робіт.

Потрібна кількість пар поїздів на маршруті залежить від розрахункового пасажиропотоку та може бути визначена як

$$n_{пм} = \frac{D_A}{n_A}, \quad (8)$$

де  $D_A$  – середньодобові обсяги перевезень (відправлення) пасажирів, пас./доб.;

$n_A$  – пасажиромісткість поїзда відповідного класу та композиції состава, загальна кількість місць.

Результат розрахунку за формулою (8) округлюється до більшого цілого значення.

Маршрут може бути «маятниковим», коли поїзд курсує між станціями, одна з яких є станцією депо приписки, а друга є станцією обороту, або «кільцевим», коли поїзд курсує по «кільцю», відправляючись зі станції основного депо і повертаючись на цю ж станцію для наступного технічного обслуговування та регламентних робіт. Від організації маршруту та середньої (маршрутної) швидкості на ньому залежить час обороту состава поїзда на маршруті

$$\theta_{пм} = \frac{1}{24} \left[ t_{ТОР} + t_{ОБ} + 2 \sum_{i=1}^m \left( \frac{l_i}{v_i} + \frac{\tau_i}{60} \right) \right], \quad (9)$$

де  $t_{\text{ТОР}}$  – тривалість всіх видів технічного обслуговування (ТО) та регламентних робіт і ремонту, передбачених при заході в основне депо, год.;

$t_{\text{ОБ}}$  – тривалість знаходження состава поїзда на станції обороту, год.;

$m$  – кількість зупинок на маршруті;

$l_i$  – відстань  $i$ -ої ділянки на маршруті, км;

$\tau_i$  – тривалість зупинки поїзда на  $i$ -ій стоянці, хв.

Коли відомі відстань всього маршруту  $L_M$  та маршрутна швидкість на ньому  $V_M$ , тоді формула для розрахунку спрощується

$$\theta_{\text{ПМ}} = \frac{1}{24} \left( t_{\text{ТОР}} + t_{\text{ОБ}} + 2 \frac{L_M}{V_M} \right). \quad (10)$$

Результат розрахунку за формулою (10) округлюється до більшого цілого значення.

Тепер можна визначити потрібну кількість составів поїздів на маршруті

$$N_{\text{СП}} = 2n_{\text{ПМ}}\theta_{\text{ПМ}}. \quad (11)$$

Для цілей теоретичного аналізу використаємо розгорнуту формулу

$$N_{\text{СП}} = \frac{2}{n_A} \frac{D_A}{24} \left( t_{\text{ТОР}} + t_{\text{ОБ}} + 2 \frac{L_M}{V_M} \right). \quad (12)$$

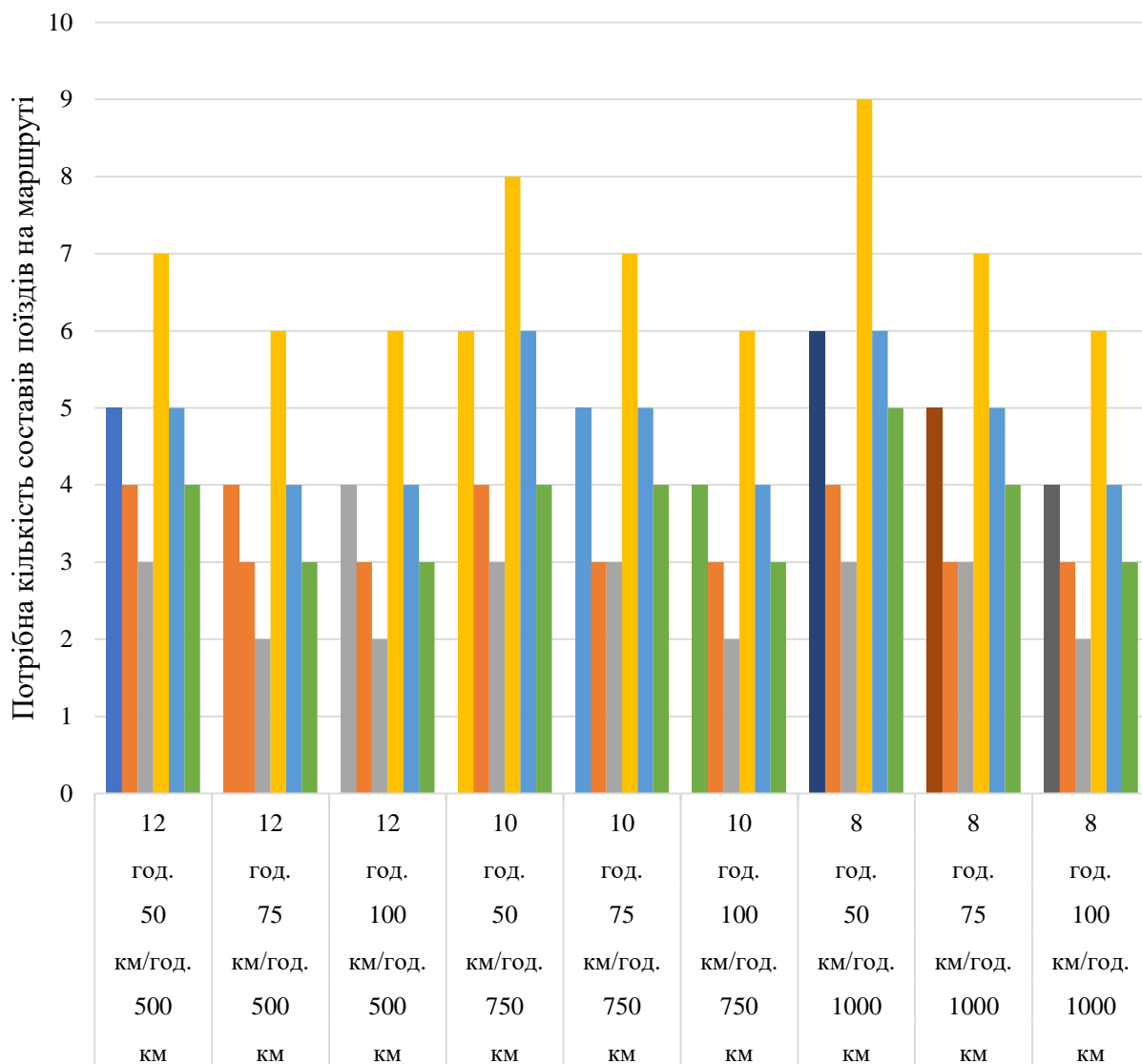
Результати розрахунку за формулою (12) округлюється до більшого цілого значення. Нижче, в табл. 1, наведено приклад розрахунку та аналіз його результатів.

Таблиця 1 – Результати розрахунку потреби в составах поїздів на маршруті залежно від умов організації перевезень

$D_A$ , пас./ доб.	$n_A$ , од.	$N_{СП}$ , од.	500	500	500	750	750	750	1000	1000	1000	$L_M$ , км
			50	75	100	50	75	100	50	75	100	$V_M$ , км/год.
			12	12	12	10	10	10	8	8	8	$t_{ТОР} +$ $t_{ОБ}$ , год.
			0,92	0,78	0,71	1,04	0,83	0,73	1,17	0,89	0,75	$\theta_{ПМ}$ , доб.
500	400	1,25	3	2	2	3	3	2	3	3	2	Потрібна кількість составів на маршруті
500	600	0,83	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
500	800	0,63	2	1	1	2	2	1	2	2	1	
1000	400	2,50	5	4	4	6	5	4	6	5	4	
1000	600	1,67	4	3	3	4	3	3	4	3	3	
1000	800	1,25	3	2	2	3	3	2	3	3	2	
1500	400	3,75	7	6	6	8	7	6	9	7	6	
1500	600	2,50	5	4	4	6	5	4	6	5	4	
1500	800	1,88	4	3	3	4	4	3	5	4	3	

Як видно з табл. 1, потреба в рухомому складі залежить від багатьох чинників, серед них основний – це попит на перевезення (інтенсивність пасажиропотоку в певному місці в певний час), пасажиромісткість рухомого складу, маршрут та час його обороту на маршруті, з урахуванням періодичності та тривалості заходу в депо для технічного обслуговування, регламентних робіт та ремонту. Нижче, на рис. 2, представлені результати розрахунків з табл. 1. З рис. 2 видно, що найбільшою потреба в составах поїздів буває тоді, коли їх пасажиромісткість та маршрутна швидкість мінімальні, а пасажиропотоки – максимальні. Для зменшення потреби у составах при великому пасажиропотоці слід використовувати рухомий склад великої пасажиромісткості та організувати їх рух з максимальними маршрутними швидкостями. Має значення також час знаходження составів в депо та пунктах обороту, він не повинен перевищувати

технологічно необхідних величин, для того щоб час у русі протягом обороту состава був максимально можливим.



Параметри умов організації перевезень

- 1000 пас./доб. 400 місць
- 1000 пас./доб. 600 місць
- 1000 пас./доб. 800 місць
- 1500 пас./доб. 400 місць
- 1500 пас./доб. 600 місць
- 1500 пас./доб. 800 місць

Рисунок 2 – Потрібна кількість составів поїздів на маршруті залежно від умов організації перевезень

При організації пасажирських перевезень важливо враховувати не лише довжину маршруту, швидкість поїзда і час простою в депо, але й інші фактори, що впливають на загальний час обороту. Найголовніше – забезпечити зручний час відправлення та прибуття для пасажирів.

## *Цифрові технології мультимодального пасажирського транспорту*

Цифровізація має вирішальне значення для мультимодального пасажирського транспорту. Частина роботи спрямована на встановлення загальних стандартів для продажу квитків і надання інформації пасажирам. Інша частина полягає в забезпеченні більш ефективного управління трафіком, автоматизації процесів і підвищенні пропускної здатності існуючої інфраструктури.

Сучасний розвиток цифрових технологій значно трансформує сектор пасажирських перевезень, зокрема в мультимодальному транспорті. Цей підхід об'єднує різні види транспорту, такі як залізничний, автомобільний, авіаційний та морський, з метою підвищення зручності та ефективності перевезень.

Впровадження цифрових платформ для мультимодальних перевезень надають можливість планування поїздок, купівлі квитків та отримання інформації в реальному часі. Системи, такі як мобільні додатки та веб-сайти, дозволяють пасажирам безперешкодно організовувати подорожі, комбінуючи різні види транспорту. Наприклад, додатки, які інтегрують інформацію про розклади, затримки і наявність місць у поїздах, автобусах та літаках, суттєво спрощують процес планування поїздок, дозволяючи пасажирам у реальному часі порівнювати різні варіанти транспорту, обирати найбільш зручні маршрути та адаптувати свої плани в залежності від умов руху. Це, в свою чергу, сприяє підвищенню ефективності подорожей, оскільки користувачі можуть уникнути незручностей, пов'язаних із затримками або переповненими транспортними засобами.

Також такі додатки часто пропонують функції резервування квитків, інтеграцію з картами для навігації та можливість отримання рекомендацій на основі уподобань користувача, що робить процес поїздки більш зручним і інтуїтивно зрозумілим. В цілому, ці цифрові рішення відіграють важливу роль у розвитку мультимодального транспорту, забезпечуючи пасажирам комфорт і контроль над їх подорожами.

Використання інтелектуальних транспортних систем (ІТС) дозволяє покращити управління транспортними потоками. Такі системи використовують дані в реальному часі для оптимізації маршрутів, зменшення заторів і підвищення безпеки. Наприклад, технології GPS та аналітики даних допомагають у моніторингу трафіку та прогнозуванні навантаження на різні види транспорту.

Відповідні телекомунікаційні стандарти, такі як 5G, матимуть значно більший вплив на мультимодальний зв'язок і є ключовою складовою системи мобільного зв'язку майбутньої залізниці (FRMCS) для європейської залізничної мережі. Як і у випадку з будь-якою іншою технологією, цифровізація несе в собі як ризики, так і можливості, зокрема в сфері кібербезпеки, що підкреслює важливість забезпечення кіберстійкості транспортних і комунікаційних мереж [9].

Висновок: у Євросоюзі розвиток мультимодальної транспортної системи та досягнення цілей Європейської зеленої угоди (Green Deal) неможливі без залізниць та впровадження цифрових технологій.

В майбутньому постануть проблеми не лише щодо скорочення викидів вуглецю, енергоефективності та екологізації транспорту – нам також доведеться просто перевозити більше за допомогою існуючої інфраструктури.

Цифрові технології також забезпечують інтеграцію різних транспортних засобів в єдину екосистему. Це дозволяє не тільки зменшити час пересадок, але й спростити процес придбання квитків. Завдяки таким платформам, як Mobility as a Service (MaaS), користувачі можуть планувати свої подорожі, використовуючи один додаток, що підтримує всі доступні види транспорту.

*Що таке «мультимодальність як послуга» (MaaS)? – Приклади*

Ця тема стає дедалі актуальнішою в усьому світі і викликає зростаючий інтерес в Україні. Наприклад, єдина транспортна карта (електронний квиток на всі види міського транспорту) у Києві та інших містах вже є успішним першим кроком до створення мультимодальних систем пасажирських перевезень. Проте у світі досягнуто ще вищих стандартів таких систем, тож варто звернути увагу на іноземний досвід, що буде розглянуто далі.

Пасажи́рський му́льтимода́льний транспорт: приклад концепції мобільності як послуги (MaaS). Як зазначає Ерїон Муратї у своїй доповіді «Passenger Multimodal Transport: the case of Mobility-as-a-Service (MaaS)», представлена на 8-й Конференції з регулювання інфраструктури (20-21 червня 2019 року) [10], MaaS – це сучасна транспортна концепція, що об'єднує існуючі та нові послуги мобільності в єдину цифрову платформу. Вона забезпечує персоналізований транспорт «від дверей до дверей» і пропонує можливості для індивідуального планування поїздок та варіанти оплати. У системі MaaS можна придбати одноразовий квиток або місячну підписку, які можуть бути використані для конкретного виду транспорту, наприклад, для поїзда, або для комбінування кількох видів транспорту.

Екосистема MaaS складається з таких компонентів: клієнти (користувачі, пасажири); провайдери платформи MaaS, які розробляють та пропонують рішення (зазвичай це мобільний додаток), створюючи пакети на основі потреб клієнтів; провайдери даних, які постачають, обмінюються та використовують дані, що є критично важливими для роботи системи MaaS; транспортні оператори (перевізники різних видів транспорту).

Європейське законодавство про права пасажирів охоплює сектора повітряного, залізничного, водного транспорту та автобусів. Однак, коли подорож передбачає мультимодальний транспорт (коли пасажир використовує різні види транспорту для завершення однієї подорожі), права пасажирів не можуть бути гарантовані, якщо інцидент на одному з сегментів впливає на наступний, якщо його обслуговує інший вид транспорту.

Наразі мультимодальні пасажирські перевезення не мають єдиної правової бази: кожен вид транспорту має свої специфічні правила, визначені на національному або європейському рівнях. Відсутність єдиних норм щодо компенсації та відшкодування збитків, а також правил, що регулюють мультимодальні туристичні ланцюги (зміна маршруту чи допомога при пересадці між видами транспорту),

ускладнює ситуацію. Права пасажирів і відповідальність перевізників відрізняються в залежності від виду транспорту.

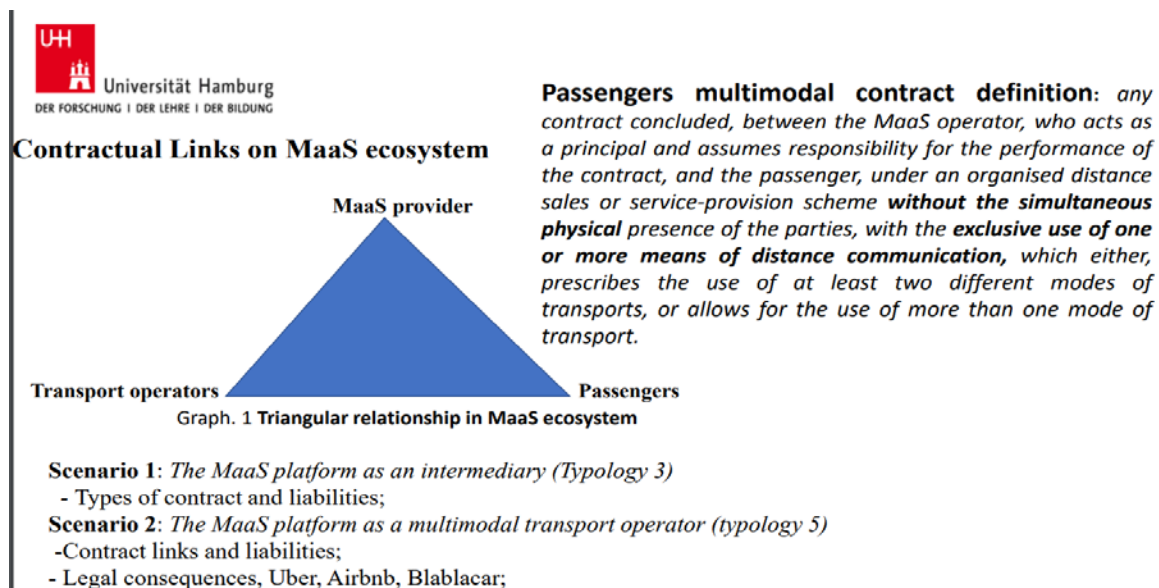


Рисунок 3 – Фрагмент презентації мультимодального пасажирського транспорту (мобільність як послуга МaaS)

Договір мультимодального пасажирського перевезення – це будь-який договір, укладений між оператором МaaS, який діє як принципал і бере на себе відповідальність за виконання договору, та пасажиром, за організованою дистанційною схемою продажу чи надання послуг без одночасної фізичної присутності сторін, з виключним використанням одного чи кількох засобів дистанційного зв’язку, який або передбачає використання принаймні двох різних видів транспорту, або дозволяє використовувати більше ніж один вид транспорту.

### Суб’єкти (учасники) системи МaaS



Рисунок 4 – Суб’єкти (учасники) системи МaaS

На сайті відомої європейської компанії **Alcatel-Lucent** [11], зазначено, що мультимодальні перевезення створюють новий досвід для пасажирів і змінюють їхній спосіб подорожування. Наприклад, з одним квитком ви можете дістатися до аеропорту на поїзді, а потім прямо до вашого готелю, де ваш багаж вже буде готовий. Незалежно від того, чи називаєте ви це «транспорт 4.0», чи «мультимодальним», у будь-якому випадку ви, як пасажир, виграєте.

Основною метою мультимодальних перевезень є інтеграція різних видів транспорту в єдиний ланцюг, що дозволяє доставити пасажирів «від дверей до дверей» і забезпечити новий досвід, який він знову використає. Це зробить подорожі більш ефективними, безпечними, екологічними і менш складними, а також оптимізує час в дорозі і зменшить витрати.

На сьогоднішній день, для подорожі, що включає пересадку з автобуса на потяг, а потім на літак, необхідно купувати квитки для кожного етапу в кожного перевізника, що не є надійним у світлі зростання кількості подорожуючих. Мультимодальна транспортна система пропонує новий підхід до оптимізації поїздок і спрощення надання послуг для операторів. Хоча технології для забезпечення безперебійного мультимодального транспорту вже існують, більшість послуг все ще надаються в «відключеному» режимі, тому виникає потреба в створенні «підключеного» досвіду для пасажирів.

Для успішної реалізації мультимодальних систем важливо, щоб вони були пов'язані як фізично, так і операційно. Операторам потрібна належна інфраструктура з високоякісними інформаційними системами в режимі реального часу для інтеграції маршрутів, розкладів і тарифів. Це дозволить забронювати весь маршрут за допомогою одного додатку, одного пошуку та одного платежу. Крім того, системи єдиного квитка нададуть перевізникам аналітичні дані для покращення їхніх послуг.

Більше інформації про інформаційні технології в мультимодальному транспорті та розробки компанії Alcatel-Lucent в напрямку «транспорт 4.0» можна знайти за посиланням [12].

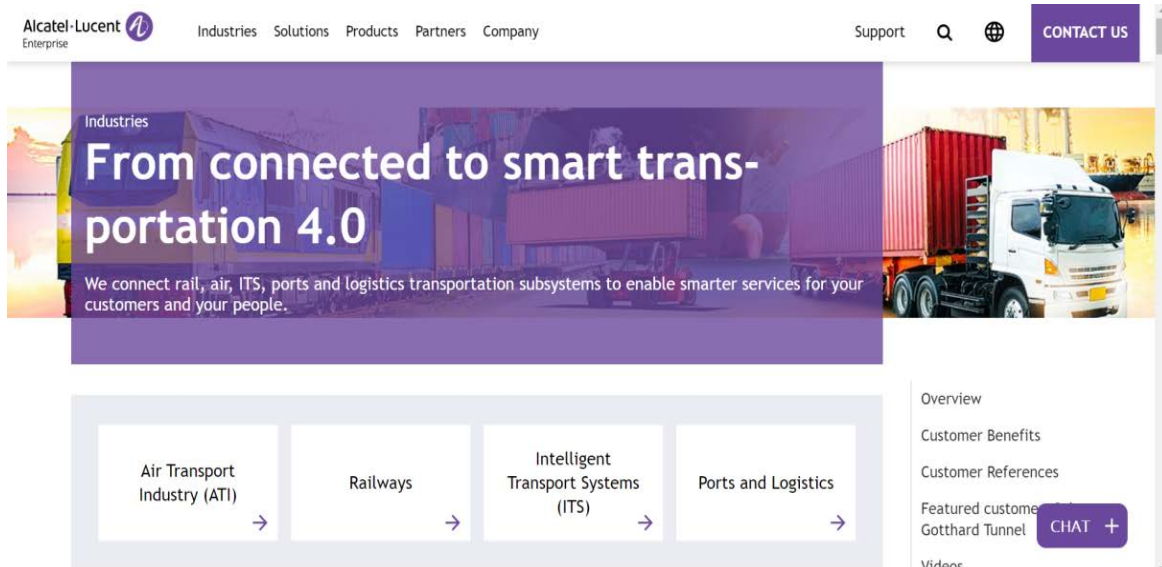


Рисунок 5 – Фрагмент розробки інформаційних технологій мультимодального транспорту

Ще один із світових лідерів у сфері техніки та технологій для транспорту, компанія SIEMENS, активно займається питаннями мобільності, зокрема інтермодальною мобільністю [13].

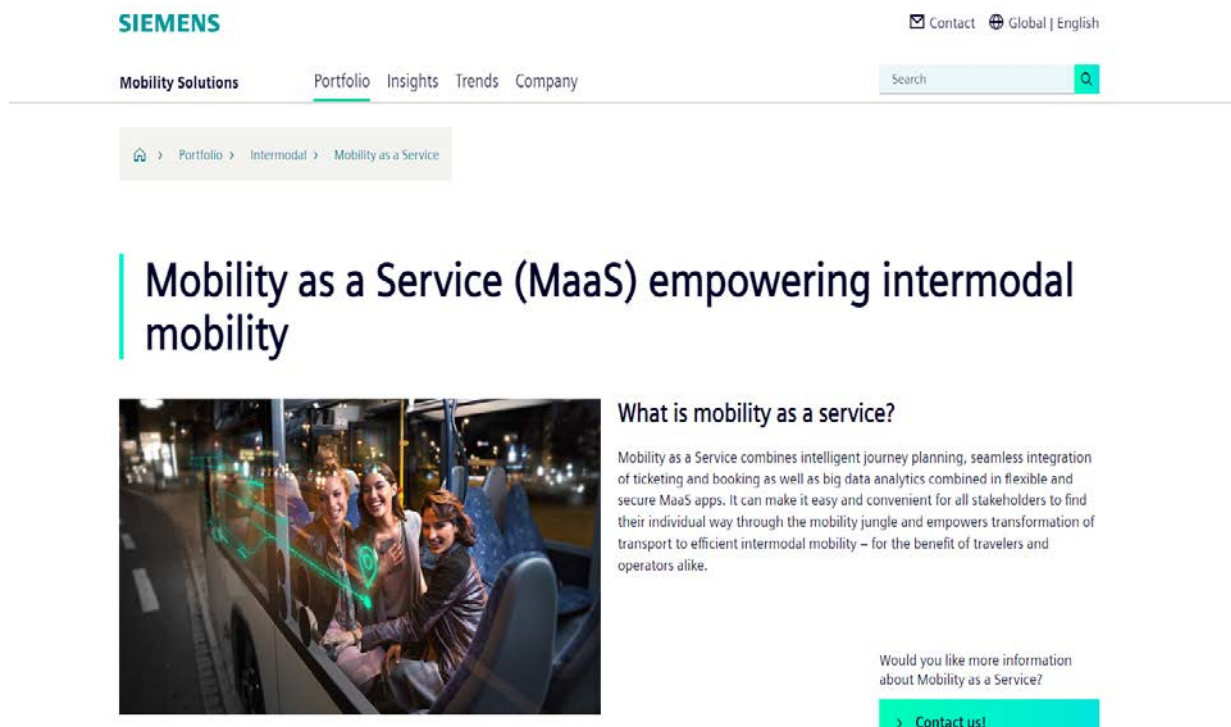


Рисунок 6 – Фрагмент мобільності як послуга (MaaS), що розширює можливості інтермодальної мобільності

Відповідь на запитання «Що таке мобільність як послуга?» виглядає наступним чином: Мобільність як послуга інтегрує інтелектуальне планування подорожей, повну систему продажу квитків та бронювання, а також аналітику великих даних у гнучких і безпечних програмах МaaS. Це спрощує і робить зручним для всіх учасників процес знаходження індивідуального маршруту в складному світі мобільності, а також сприяє перетворенню транспорту в ефективну інтермодальну систему на користь як пасажирів, так і операторів.

На основі короткого огляду світового досвіду можна стверджувати, що концепція МaaS інтегрує транспортні та інформаційні технології в єдиній мультимодальній системі, що забезпечує максимальну зручність для пасажирів і, відповідно, сприяє підвищенню пасажиропотоку для транспортної системи.

### III. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЯК СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Математична модель перевезень як системи масового обслуговування є важливим інструментом для аналізу та оптимізації транспортних процесів. У цій моделі основна увага приділяється опису взаємодії між пасажирями (клієнтами) і транспортними засобами (обслуговуючими системами).

Основні елементи моделі:

– **прибуття пасажирів:** модель зазвичай використовує розподіл Пуассона для опису випадкових інтервалів між прибуттями пасажирів, що дозволяє визначити інтенсивність попиту;

– **обслуговування:** час обслуговування, тобто час, який транспортний засіб витрачає на перевезення пасажирів, часто моделюється за допомогою експоненційного розподілу;

– **система обслуговування:** це може бути одноканальна система (один вид транспорту) або багатоканальна система (кілька видів транспорту).

Математична модель допомагає у визначенні необхідної кількості транспортних засобів для задоволення попиту. За допомогою моделювання можна передбачити години пік і відповідно скорегувати графіки роботи транспортних засобів. Також за допомогою математичної моделі можна оцінити якість обслуговування. Вона дозволяє оцінити ймовірність затримок або черг, що є важливим для покращення обслуговування пасажирів.

Використання математичних моделей систем масового обслуговування в перевезеннях забезпечує ефективне управління транспортними потоками, сприяє підвищенню комфорту для пасажирів та оптимізації витрат на експлуатацію.

В якості прикладу розглянемо метрополітен з точки зору теорії транспортних процесів та систем.

Його можна описати як систему масового обслуговування (СМО). Теорія масового обслуговування (ТМО) вивчає процеси, що виникають у системах з високою кількістю запитів на обслуговування, де головною практичною метою є мінімізація черг і скорочення часу очікування. В англійських джерелах цю теорію часто називають «теорія черг» – queuing theory, що підкреслює її зв'язок з управлінням потоками клієнтів, які очікують на обслуговування. ТМО є особливо корисною для транспортних систем із високою пропускну здатністю, таких як метрополітен, де у години пік утворюються черги на входах до станцій, скупчення і тіснява на ескалаторах та платформах.

Процес перевезення пасажирів у метрополітені можна описати вербально (словами) як надання можливості всім пасажирам, які хочуть відправитися з даної станції, сісти в поїзд, після того, як з нього вийшли всі пасажири, що прибули на дану станцію – і все це повинно відбутися протягом короткого часу зупинки поїзда на станції.

Опишемо цей процес математично, використовуючи основні параметри СМО – інтенсивність обслуговування ( $\mu$ ) та інтенсивність вхідного потоку заявок на обслуговування ( $\lambda$ ), де в якості заявок виступають пасажири. В якості обслуговуючого пристрою (каналу обслуговування) виступає поїзд, який прибув на станцію і зупинився для висадки та посадки пасажирів.

Інтенсивність обслуговування можна визначити як кількість пасажирів, які можуть сісти в поїзд після того, як з нього вийшли пасажирів, які прибули на дану станцію, протягом часу зупинки поїзда

$$\mu = m_B^{\Pi} n_D^B R_D - \frac{A_{\text{ВИХ}}^{\text{СТ}}}{t_{\text{ЗС}} N_{\Pi}^T}, \quad (13)$$

де  $m_B^{\Pi}$  – кількість вагонів в електропоїзді;

$n_D^B$  – кількість дверей у вагоні;

$t_{\text{ЗС}}$  – тривалість зупинки поїзда на станції, хв.;

$R_D$  – пропускна спроможність одних дверей вагона, пасажирів за хв. (розраховується на основі ДБН В.2.3-7:2018) [14];

$$R_D = r_D^{1M} B_D; \quad (14)$$

$r_D^{1M}$  – пропускна спроможність дверей в розрахунку на 1 м їх ширини, пасажирів за хв.;

$B_D$  – ширина дверей вагона, м;

$A_{\text{ВИХ}}^{\text{СТ}}$  – кількість пасажирів вихідного потоку, які прибули на станцію поїздами за період часу  $T$  і повинні вийти зі станції;

$N_{\Pi}^T$  – кількість пар поїздів, що зупиняються на станції протягом часу  $T$  (в метрополітені приймається 15-хвилинний період максимального пасажиропотоку).

Інтенсивність вхідного потоку заявок на обслуговування ( $\lambda$ ) визначається як

$$\lambda = \frac{A_{\text{ВХ}}^{\text{СТ}}}{t_{\text{ЗС}} N_{\Pi}^T}, \quad (15)$$

де  $A_{\text{ВХ}}^{\text{СТ}}$  – кількість пасажирів вхідного потоку на станцію, що надійшла за період часу  $T$  (у хв.) на станцію і повинна бути відправлена поїздами.

Відношення  $\lambda$  до  $\mu$  – це коефіцієнт (рівень) завантаження (зайнятості) каналу обслуговування  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ .

Цей коефіцієнт не може мати від'ємного значення, звідки визначається мінімально необхідна кількість пар поїздів протягом часу  $T$

$$N_{\Pi}^{T\text{мін}} = \frac{A_{\text{вих}}^{\text{ст}}}{m_{\text{в}}^{\Pi} n_{\text{д}}^{\text{в}} R_{\text{д}} t_{\text{зс}}} . \quad (16)$$

Коефіцієнт завантаження  $\rho = 1$  означає, що канал обслуговування постійно зайнятий, а значить, черга заявок на обслуговування зростає до безкінечності, або ж заявки покидають систему.

З умови  $0 < \rho < 1$ , опускаючи проміжні викладки, визначимо, що потрібна кількість пар поїздів за період часу  $T$

$$\frac{A_{\text{вх}}^{\text{ст}} + A_{\text{вих}}^{\text{ст}}}{m_{\text{в}}^{\Pi} n_{\text{д}}^{\text{в}} t_{\text{зс}} R_{\text{д}}} < N_{\Pi}^T < N_{\Pi}^{T\text{макс}} , \quad (17)$$

де

$$A_{\text{вх}}^{\text{ст}} = n_{\text{вх}}^{\text{ес}} r_{\text{вх}}^{\text{ес}} T; \quad (18)$$

$$A_{\text{вих}}^{\text{ст}} = n_{\text{вих}}^{\text{ес}} r_{\text{вих}}^{\text{ес}} T; \quad (19)$$

$n_{\text{вх}}^{\text{ес}}$ ,  $n_{\text{вих}}^{\text{ес}}$  – кількість ескалаторів (або сходів, якщо нема ескалаторів), що працюють протягом періоду  $T$  відповідно на вхід (спуск) або вихід (підйом);

$r_{\text{вх}}^{\text{ес}}$ ,  $r_{\text{вих}}^{\text{ес}}$  – пропускна спроможність ескалатора (або сходів, якщо нема ескалаторів), що працюють протягом періоду  $T$  відповідно на вхід (спуск) або вихід (підйом), пасажирів за хв.;

Останні дві формули відображають той факт, що на станції не може бути більше пасажирів, ніж туди дістається ескалаторами (сходами), так само зі станції не може вийти більше пасажирів, ніж можуть пропустити ескалатори (сходи), тому саме пропускна спроможність ескалаторів (сходів), а також місткість та частота руху електропоїздів, якими прибувають та відправляються пасажирів, визначають кількість пасажирів на станції.

$N_{\Pi}^{T_{\max}}$  – максимальна пропускна спроможність метрополітену у парах поїздів за період  $T$  (виходячи з визначеної ДБН величини 40 пар поїздів за годину).

Будемо розглядати максимальну пропускну здатність лінії метрополітену 40 пар поїздів на годину, а також величину максимального 15-хвилинного пасажирського потоку в годину «пік» в умовах нормальної експлуатації, а також на випадок евакуації пасажирів з урахуванням даних, наведених нижче в табл. 1 (на основі відповідної таблиці ДБН) [14]. Отже, для розрахунків приймемо  $T=15$  хв., а  $N_{\Pi}^{T_{\max}}=10$  пар поїздів за 15 хвилин.

Для максимального пасажиропотоку, що очікується в годину «пік», слід враховувати коефіцієнт нерівномірності розподілення пасажирських потоків за годину, що становить:

- для пересадочних станцій, а також станцій, що тяжіють до залізничних і автобусних вокзалів, стадіонів, транспортно-пересадочних вузлів – 1,4;
- для решти станцій – 1,2.

Таблиця 2 – Пропускна здатність ділянок руху і провізна здатність обладнання в умовах нормальної експлуатації

Ділянка руху пасажирів і обладнання на станціях і в вестибюлях	Ширина шляху, м	Пропускна (провізна) здатність, люд./год	
		за нормальної експлуатації	у разі евакуації
Дверний проріз	0,9	3200	4000
Сходи у разі:			
- одностороннього руху вгору;	1	3000	3500
- одностороннього руху вниз;	1	3500	4000
- двостороннього руху вгору та вниз	1	3200	-
Ескалатор у разі:	1	6800	8200
- номінальної швидкості стрічки не більше ніж 0,75 м/с;			
- номінальної швидкості стрічки 0,50 м/с	1	5000	6000

Для подальших розрахунків приймемо, за нормальної експлуатації, мінімальну пропускну спроможність одних сходів на вхід і одних – на вихід, що складе  $3000 + 3500$  людей за годину або разом  $1625$  пасажирів за 15-хвилинний період.

Максимальну пропускну спроможність та кількість пасажирів на станції приймемо виходячи з умови роботи двох ескалаторів на вхід і одного – на вихід (чи навпаки), що дасть  $2 \cdot 6800 + 1 \cdot 6800 = 20400$  людей за годину або разом  $5100$  пасажирів за 15-хвилинний період.

З урахуванням коефіцієнта нерівномірності пасажиропотоків  $1,4$  визначимо, що кількість пасажирів на станції протягом 15-хвилинного періоду може коливатися в межах  $A_{\text{ВХ}}^{\text{СТ}} + A_{\text{ВИХ}}^{\text{СТ}} = 2275 \div 7140$  пасажирів за 15-хвилинний період.

Виходячи з табл. 2,  $r_{\text{д}}^{1\text{М}}$  – пропускну спроможність дверей (вагона) в розрахунку на  $1$  м їх ширини, пасажирів за хв., визначається як  $3200$  людей за годину для дверного прорізу шириною  $0,9$  м, отже при ширині  $1$  м це буде,  $3200:0,9 = 3556$  пасажирів за годину. Через одні двері вагона шириною  $B_{\text{д}} = 1,2$  м за годину може вийти і зайти  $3556 \cdot 1,2 = 4267$  пасажирів, або  $R_{\text{д}} = 71$  пасажир за  $1$  хвилину чи  $24$  пасажирів за  $20$  с ( $t_{\text{зс}} = 0,33$  хв.) зупинки поїзда на станції.

Кількість вагонів в електропоїзді  $m_{\text{в}}^{\text{п}} = 5$ , кількість дверей в кожному вагоні  $n_{\text{д}}^{\text{в}} = 4$ , отже за час зупинки  $20$  с з поїзда можуть вийти та в нього зайти  $5 \cdot 4 \cdot 24 = 480$  пасажирів, і це – виходячи з умов нормальної експлуатації.

Однак треба враховувати, що в години «пік» бувають максимальні пасажиропотоки, коли висадка з поїздів і посадка пасажирів в поїзди відбуваються в прискореному темпі. Це вимагає збільшувати як інтенсивність проходу пасажирів через двері ( $R_{\text{д}}$ ), так і змушує, інколи, затримувати відправлення поїзда (збільшується  $t_{\text{зс}}$ ). Тому при розрахунку на умови максимальних пасажиропотоків з великою їх нерівномірністю в години «пік» треба виходити з максимальної інтенсивності проходу пасажирів крізь двері вагонів ( $4000$  людей за годину, як при евакуації, та незначної, на  $5$  с, затримки поїзда при висадці-посадці пасажирів). Це приводить до величин  $R_{\text{д}} = 89$  пасажирів

за 1 хвилину чи 37 пасажира за 25 с ( $t_{zc} = 0,42$  хв.) зупинки поїзда на станції. Тоді з поїзда можуть вийти та в нього зайти  $5 \cdot 4 \cdot 37 = 740$  пасажирів, і це – виходячи з умов годин «пік» та максимальної нерівномірності пасажиропотоків.

Повертаючись до вихідної формули (16) розрахуємо потрібну кількість пар поїздів для 15-хвилинного періоду годин «пік» з максимальним пасажиропотоком

$$\max N_{\Pi}^{T=15\text{хв.}} = \frac{7140}{5 \cdot 4 \cdot 0,42 \cdot 89} = 9,55 < N_{\Pi}^{T_{\max}} = 10 \text{ пар поїздів.}$$

Для мінімального пасажиропотоку (2275 пасажирів за 15-хвилинний період) в нормальних умовах експлуатації результат розрахунку буде  $4,85 = 5$  пар поїздів для 15-хвилинного періоду (20 пар поїздів за годину, або 50% максимальної пропускнуєї спроможності метрополітену).

Таким чином, дана методика розрахунку повністю відповідає як вимогам нормативного документу (ДБН В.2.3-7:2018) [14], так і реальним умовам роботи метрополітену.

Математичне моделювання систем масового обслуговування для перевезень, зокрема пасажирських перевезень у метрополітені, є ефективним інструментом для оптимізації роботи транспортної інфраструктури. Використання таких моделей дозволяє точно оцінити інтенсивність пасажиропотоку та кількість ресурсів, необхідних для забезпечення безперебійного обслуговування пасажирів, з урахуванням варіацій попиту у різні періоди.

Водночас, сфера застосування систем масового обслуговування виходить за межі звичайних пасажирських перевезень і охоплює критично важливі розрахунки для евакуації людей у надзвичайних ситуаціях. Такі розрахунки в екстремальних умовах є ключовими для забезпечення безпеки постраждалих чи тих, кому загрожує небезпека, зокрема в зонах бойових дій чи природних катастроф.

#### IV. РОЗРАХУНКИ СПРОМОЖНОСТЕЙ ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ЯК СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Особливим видом перевезень людей (тобто різновидом пасажирських перевезень, які здійснюються в екстремальних умовах) є евакуація постраждалих або тих, кому загрожує небезпека, із зон надзвичайних ситуацій, у тому числі із зон бойових дій.

При моделюванні різноманітних систем масового обслуговування широко використовується показниковий закон розподілу [18], при якому випадкова величина  $T$  – інтервал часу між двома послідовними подіями – розподілена за показниковим законом, тобто її густина розподілу має вигляд:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \end{cases}, \quad (20)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність вхідного потоку подій, тобто кількість подій в одиницю часу.

Показниковий закон розподілу має тільки один параметр  $\lambda$  (величина, обернена математичному сподіванню випадкової величини  $t$ ), що спрощує його використання для теоретичного аналізу та практичних розрахунків. Крім того, показниковий (експоненціальний, англ. exponential) розподіл має властивість «відсутності пам'яті».

Наприклад, якщо  $T$  – це час, який потрібно чекати, перш ніж відбудеться певна подія, то ймовірність того, що подія відбудеться протягом інтервалу часу довжиною  $t$ , не залежить від того, скільки часу ( $\tau$ ) уже минуло без події, а залежить тільки від довжини інтервалу  $t$ :

$$P(T \leq \tau + t \mid T > \tau) = P(T \leq t). \quad (21)$$

Такий розподіл часто використовується для надання імовірнісних відповідей на такі питання, як:

Скільки часу мине, перш ніж у певному регіоні станеться землетрус?

Як довго нам потрібно чекати, поки клієнт заїде до нашого магазину?

Скільки часу машина працюватиме без поломки?

Усі ці питання стосуються часу, який потрібно чекати, перш ніж відбудеться певна подія [19].

Ще одною властивістю показникового розподілу, важливою з практичної точки зору, є те, що більш ймовірним є більш часте настання подій (з меншим інтервалом часу між ними), ніж більш рідке (з більшим інтервалом). При такому розподілі ймовірність випадкової величини часу, що пройшов між послідовними подіями, в проміжку від 0 до 5 хвилин є завжди вищою, ніж її потрапляння в проміжок від 5 до 10 хвилин, хоча сама тривалість інтервалу (5 хв.) лишається незмінною. Тобто такий розподіл може моделювати найбільш тяжкі (екстремальні) умови функціонування системи, коли події, на які вона має реагувати, з більшою ймовірністю відбуваються частіше, ніж рідше.

Подіями вважається надходження в систему вимог, які потребують обслуговування. В сучасних реаліях України, Ізраїлю та інших країн, що живуть в умовах чи під загрозою війни, більш ніж актуальним є надання імовірнісних відповідей на інші питання, ніж сформульовані вище (а, б, с), а саме:

– Скільки часу пройде до наступної ракетної атаки і який район міста вона вразить?

– Скільки треба мати команд рятувальників і засобів для реагування на наслідки диверсійних дій чи ворожих ударів по цивільній і транспортній інфраструктурі?

– Скільки треба мати транспортних засобів, предметів гуманітарної допомоги та персоналу при евакуації населення із вражених надзвичайними ситуаціями районів в безпечні місця?

Тут наведені приклади подій, які трапляються під час війни і надзвичайних ситуацій. Очевидно, що при розрахунках сил та засобів реагування на такі події треба виходити з того, що вони можуть траплятися скоріше частіше (ніж нам хотілось би), ніж рідше, а

тривалість ліквідації наслідків цих подій буде значно відхилитися від певного розрахункового часу. В теоретичному аспекті – це є підставою до застосування математичних моделей систем масового обслуговування (СМО) типу М/М/1 для розрахунку параметрів таких систем, а в практичному – надає більшої стійкості системі сил та засобів реагування на такі події.

Проте тут цей математичний апарат буде модифікований, щоб врахувати можливі екстремальні умови функціонування СМО, коли одного каналу обслуговування (обслуговуючого пристрою, приладу, сервера) явно недостатньо, і треба визначити їх кількість  $X$ , виходячи з того, що час обслуговування одним сервером одної вимоги значно перевищує інтервал між їх надходженнями в систему.

З теорії масового обслуговування відомо, що для СМО типу М/М/1 час перебування вимоги в системі (очікування плюс обслуговування)  $W$  складає

$$W = \frac{\rho^2}{(1-\rho)\lambda} + \frac{1}{\mu}, \quad (22)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність вхідного потоку вимог на обслуговування (величина, обернена середньому значенню інтервалу часу між надходженнями вимог на обслуговування);

$\mu$  – інтенсивність обслуговування вимог (величина, обернена середньому часу обслуговування вимоги);

$0 \leq \rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$  – коефіцієнт завантаження окремого каналу обслуговування.

Введемо величину  $\alpha$ , ( $0 \leq \alpha = \frac{\lambda}{\mu}$ ), яка, в загальному випадку, може бути  $\alpha \geq 1$ , і це означає, що одного каналу обслуговування (сервера) недостатньо, тому треба збільшення їх кількості до  $X$ .

Цю кількість можна визначити як

$$X = \lambda W = \lambda \left[ \frac{\rho^2}{(1-\rho)\lambda} + \frac{1}{\mu} \right]. \quad (23)$$

Тоді, з урахуванням умови  $0 \leq \rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$ , треба визначити коефіцієнт завантаження окремого каналу як

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu X}. \quad (24)$$

Підставивши це значення в праву частину рівняння  $X = \lambda \left[ \frac{\rho^2}{(1-\rho)\lambda} + \frac{1}{\mu} \right]$  та здійснивши перетворення, отримаємо наступне кубічне рівняння відносно  $X$ :

$$X^3 - 2\frac{\lambda}{\mu}X^2 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 X - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 = 0. \quad (25)$$

Після підстановки  $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$  маємо:

$$X^3 - 2\alpha X^2 + \alpha^2 X - \alpha^2 = 0. \quad (26)$$

Це рівняння буде розв'язано пізніше відомим точним аналітичним методом (формула Кардано і ін.), але спочатку зробимо це графічним методом, результати застосування якого є більш наочними і зрозумілими для аналізу.

При застосуванні графічного методу потрібна кількість каналів обслуговування визначається з рівняння (27), похідного від (26):

$$X = \frac{\alpha^2}{\left(1 - \frac{\alpha}{X}\right)X^2} + \alpha, \quad (27)$$

права частина якого залежить від  $\alpha$  та  $X$ , а ліва – дорівнює  $X$ .

Розрахуємо значення функції двох аргументів  $Y = f(\alpha, X)$ , що знаходиться у правій частині рівняння  $Y = \frac{\alpha^2}{(1-\frac{\alpha}{X})X^2} + \alpha$ .

Результати наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Значення  $Y = \frac{\alpha^2}{(1-\frac{\alpha}{X})X^2} + \alpha$

$\alpha$ , коефіцієнт завантаження каналу	$X$ , кількість каналів як змінний параметр моделі				
	1	1,5	2	2,5	3
0,25	0,333	0,283	0,268	0,261	0,258
0,5	1,000	0,667	0,583	0,550	0,533
0,75	3,000	1,250	0,975	0,879	0,833
1	#	2,333	1,500	1,267	1,167
1,25	#	5,417	2,292	1,750	1,548
1,5	#	#	3,750	2,400	2,000

#Примітка: Результат розрахунку – поза межами області допустимих значень.

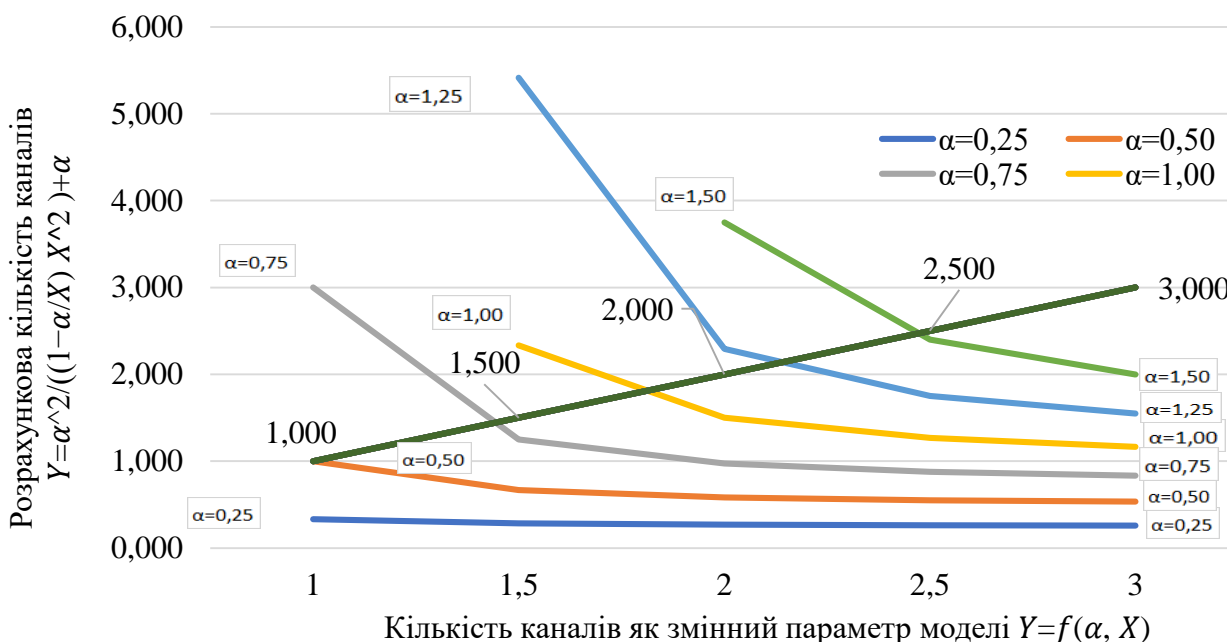


Рисунок 7 – Графічне розв'язання рівняння для визначення потрібної кількості каналів обслуговування (евакуаційних пасажирських транспортних засобів та бригад)

Низхідні шість кривих на рис. 7 відображають розрахункові значення функції  $Y = f(\alpha, X)$ , отримані за наведеною вище формулою для правої частини рівняння. Висхідна пряма відображає ліву частину рівняння (27), а саме  $Y = X$ , незалежну від  $\alpha$ . Точки перетину цієї прямої з кривими, що відповідають різним  $\alpha$  ( $\alpha=0,250, \dots, \alpha=1,500$ ), в проєкції на вісь абсцис  $X$ , дають пошукувані значення потрібної кількості каналів обслуговування.

Опрацювання результатів, отриманих графічним методом, показує цікаву та корисну закономірність. Виявлено, що графічне рішення дає теоретичні значення  $X$ , що мають задовольняти рівнянню (27), які систематично на певний відсоток більше, ніж значення, отримані традиційним методом розрахунку – шляхом визначення коефіцієнту навантаження каналу  $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$ , з округленням результату до більшого цілого. Ця закономірність відображена на рис. 8, з якого видно, що в дослідженому діапазоні значень  $\alpha$  згаданий відсоток запасу кількості каналів порівняно з величиною, отриманою традиційним розрахунковим шляхом, складає від 100% при мінімальному значенні  $\alpha = 0,5$  до 65,3% при збільшенні до  $\alpha = 1,5$ .

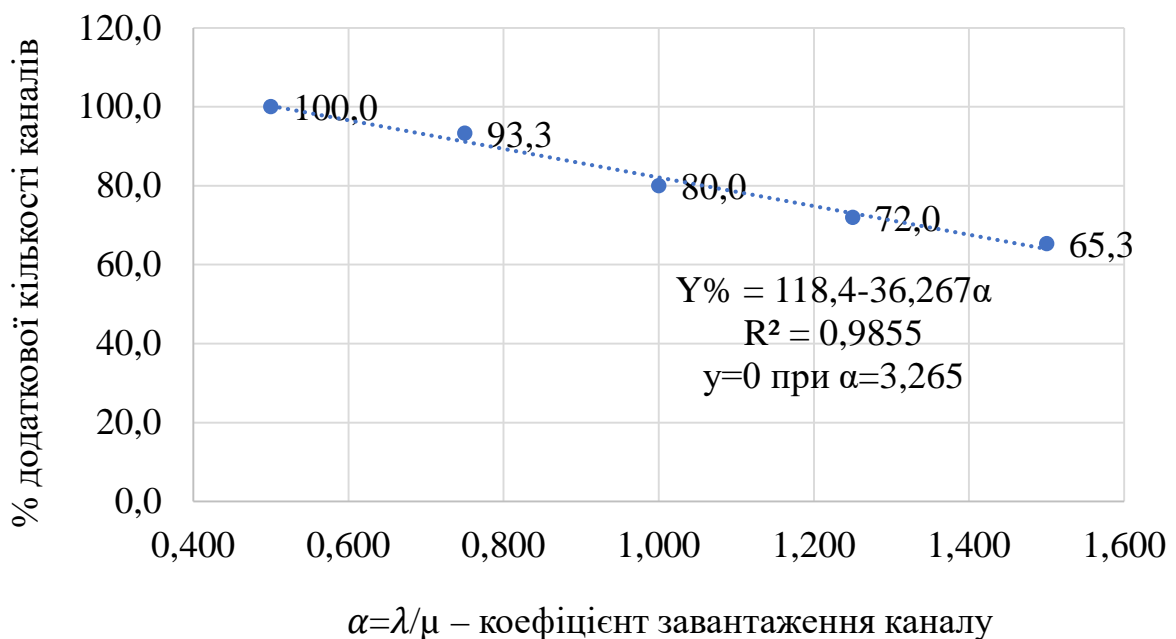


Рисунок 8 – Відсоток  $Y\%$  додаткової кількості каналів (евакуаційних пасажирських транспортних засобів) залежно від коефіцієнту завантаження каналу

Для аналітичного розв'язання рівняння  $X^3 - 2\alpha X^2 + \alpha^2 X - \alpha^2 = 0$  приведемо його до канонічного виду

$$y^3 + py + q = 0, \quad (28)$$

для чого спочатку перетворимо на рівняння виду  $aX^3 + bX^2 + cX + d = 0$  шляхом підстановок  $a = 1; b = -2\alpha; c = \alpha^2; d = -\alpha^2$ .

Алгоритм розв'язання кубічного рівняння в канонічному виді добре відомий з XVI століття як метод Кардано. Наші алгебраїчні викладки згідно з цим методом наведені нижче.

$$\text{Коефіцієнти рівняння: } q = \frac{\alpha^3}{3} \left(1 - \frac{16}{9}\right) - \alpha^2; p = -\frac{\alpha^2}{3};$$

Дискримінант рівняння  $D = \left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3$ ; якщо  $D > 0$ , то рівняння має один дійсний корінь та два комплексних (котрі до області допустимих значень не потрапляють). Єдиний дійсний корінь визначається як

$$y = \sqrt[3]{-\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \sqrt{D}} + \sqrt[3]{-\left(\frac{q}{2}\right)^2 - \sqrt{D}}. \quad (29)$$

Для того, щоб повернутися до вихідного рівняння, треба зробити зворотні підстановки, тоді отримаємо «теоретичне» значення  $X_{th}$  розрахованої аналітичним методом кількості каналів обслуговування:

$$X_{th} = y - \frac{1}{3} \left(\frac{b}{a}\right) = y + \frac{2}{3} \alpha. \quad (30)$$

$\alpha$	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25
$X_{tr}$	1	1	1	1	2	2	2	2	3
$q$	-0,067	-0,282	-0,672	-1,259	-2,069	-3,125	-4,452	-6,074	-8,016
$p$	-0,021	-0,083	-0,188	-0,333	-0,521	-0,750	-1,021	-1,333	-1,688
$D$	0,001	0,020	0,113	0,395	1,065	2,426	4,916	9,136	15,885
$y$	0,007	0,049	0,159	0,394	1,618	2,547	3,327	4,142	5,011
$X_{th}$	0,174	0,383	0,659	1,060	2,451	3,547	4,494	5,476	6,511
$X_{pr}$	1	1	1	2	3	4	5	6	7

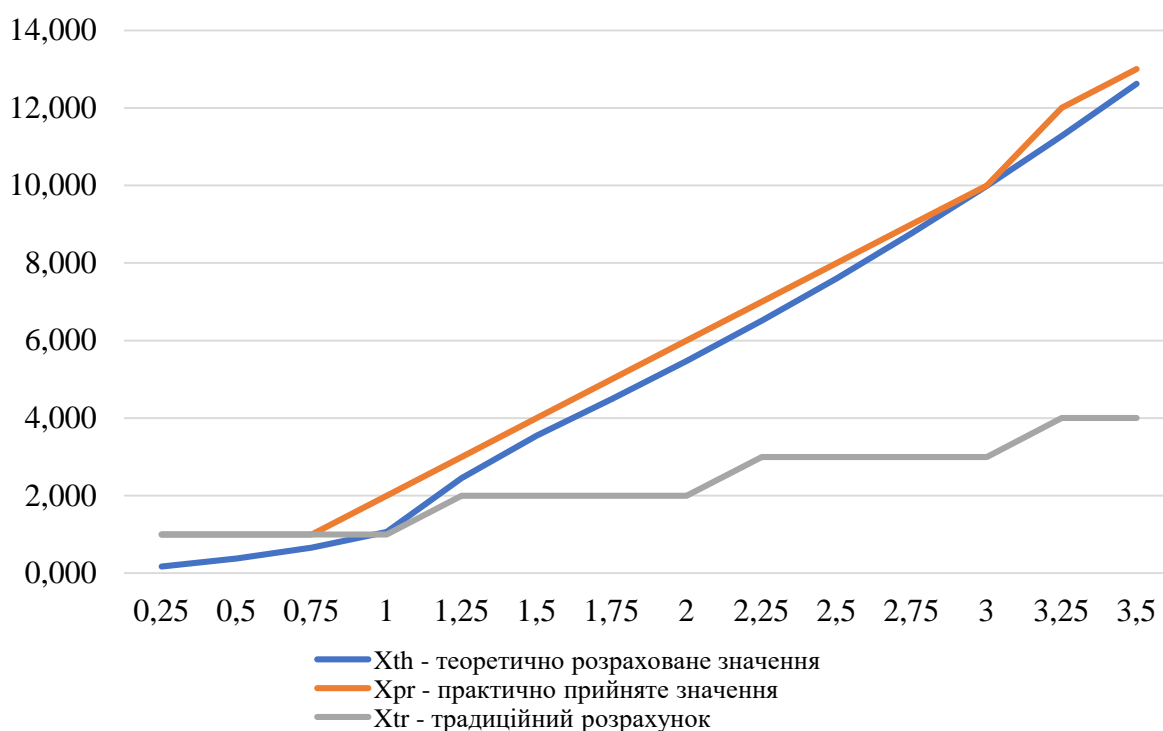


Рисунок 9 – Результати аналітичних розрахунків потрібної кількості каналів (евакуаційних пасажирських транспортних засобів) обслуговування надзвичайних ситуацій

Модель перевезень, заснована на ТМО, надає можливість аналізувати важливі параметри, такі як час обслуговування та затримок, що допомагає мінімізувати утворення черг та уникнути скупчення людей у пікові години. Це важливо як для підвищення ефективності використання рухомого складу, так і для забезпечення комфорту та безпеки пасажирів.

Загалом, системи масового обслуговування є фундаментальною складовою для проектування та управління сучасними транспортними системами, що дає змогу поліпшити якість послуг та адаптувати їх до змін у пасажирському попиті. Це підтверджує необхідність подальшого розвитку математичних моделей у транспортній сфері для досягнення оптимального функціонування транспортних систем у динамічних умовах.

- [1] Jorge Chica-Olmo, Héctor Gachs-Sánchez, Carmen Lizarraga Route effect on the perception of public transport services quality. *Transport Policy*. Volume 67. 2018. Pages 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.03.024>
- [2] Audrone Minelgaite, Renata Dagiliūtė, Genovaitė Liobikienė The Usage of Public Transport and Impact of Satisfaction in the European Union. *Sustainability* 2020, 12, 9154; doi:10.3390/su12219154. [www.mdpi.com/journal/sustainability](http://www.mdpi.com/journal/sustainability)
- [3] The development of international passenger rail transport. URL: <https://unece.org/transport/publications/development-international-passenger-rail-transport>
- [4] Research and Innovation for the Railways of Europe. URL: <https://rail-research.europa.eu/about-shift2rail/>
- [5] Logistics and multimodal transport. URL: [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/logistics-and-multimodal-transport\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/logistics-and-multimodal-transport_en)
- [6] Boosting passenger preference for rail. 2022. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/boosting-passenger-preference-for-rail>.
- [7] Shuo Zhao, Jinfei Wu, Zhenyi Li, Ge Meng Train Operational Plan Optimization for Urban Rail Transit Lines Considering Circulation Balance. *Sustainability* 2022, 14(9), 5226. <https://doi.org/10.3390/su14095226>.
- [8] Tailored Travel: Using AI to Improve Passenger Experience in Rail. URL: <https://www.hitachirail.com/blog/2024/tailored-travel-using-ai-to-improve-passenger-experience-in-rail/>
- [10] Making the multimodal dream come true. URL: <https://www.eurocontrol.int/article/making-multimodal-dream-come-true> (дата звернення: 10.10.2024).
- [11] Passenger Multimodal Transport: the case of Mobility-as-a-Service (MaaS). URL: <https://fsr.eui.eu/murati-e-passenger-multimodal->

- transport-the-case-of-mobility-as-a-service-maas/ (дата звернення: 10.10.2024).
- [12] Multimodal transportation is creating a fully connected experience for passengers, and changing the way we travel. URL: <https://www.al-enterprise.com/en/blog/seamless-multimodal-transport> (дата звернення: 10.10.2024).
- [13] From connected to smart transportation 4.0. URL: <https://www.al-enterprise.com/en/industries/transportation> (дата звернення: 10.10.2024).
- [14] Mobility as a Service (MaaS) empowering intermodal mobility. URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/intermodal/mobility-marketplace.html> (дата звернення: 10.10.2024).
- [15] ДБН В.2.3-7:2018 Метрополітени. Основні положення. [Чинний від 2019-09-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2019. 70 с. (Інформація та документація).
- [16] Liang, Y., Lan, C., Dan, T. et al. Research on supply and demand matching model of transportation modes in MaaS system of integrated passenger transport hub based on deep learning. *Soft Comput* 27, 5973–5983 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08065-4>
- [17] Rahman Mashrur, Gurumurthy Krishna Murthy, Kockelman Kara M. Impactsofflexitimeondeparturetimechoiceforhome-basedcommutingtripsinAustin, Texas // *Transportation Research Record*. 2021. №2676. p. 446-459. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/03611981211035757>
- [18] Tavassoli Ahmad, Mesbah Mahmoud, Shobeirinejad Ameneh Modelling passenger waiting time using large-scale automatic fare collection data: An Australian casestudy // *Transportation Research Part F*. 2018. №58. p. 500-510. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.06.037>
- [19] Sheldon M. Ross Introduction to Probability Models Tenth Edition. 2010. ISBN: 978-0-12-375686-2. URL: [https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/introduction-to-probability-model-s.ross-math-cs.blog\\_.ir\\_.pdf](https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/introduction-to-probability-model-s.ross-math-cs.blog_.ir_.pdf)
- [20] Exponential distribution. URL: <https://www.statlect.com/probability-distributions/exponential-distribution>