

К. В. ДОЛЯ

доктор технічних наук, доцент,  
професор кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури  
Національний аерокосмічний університет  
«Харківський авіаційний інститут»  
ORCID: 0000-0002-4693-9158

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ МАРШРУТНОЇ ШВИДКОСТІ ЇЗДКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОМОБІЛЬНИХ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ В ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ

*Визначення оптимальної маршрутної швидкості їздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в пасажирських перевезеннях. К. Доля. У статті розглянуто задачу обґрунтування оптимальної маршрутної швидкості їздки для автобусних пасажирських перевезень за умов мінливості дорожньої ситуації та стохастичного характеру затримок на перегонах, перехрестях і зупинках. Актуальність теми зумовлена тим, що завищення нормативної швидкості підвищує ризик порушення розкладу та зростання експлуатаційних втрат, тоді як заниження призводить до збільшення оборотного часу, потреби у додатковому парку та погіршення транспортної доступності.*

*Метою дослідження є розроблення підходу до встановлення нормативного часу рейсу і відповідної маршрутної швидкості, що забезпечують заданий рівень надійності виконання розкладу та узгоджуються з ресурсними й економічними обмеженнями перевізника. Запропоновано визначати оптимальну швидкість через квантіль фактичного часу поїздки:  $v_m^* = L/Q_T(p^*)$ . Для підвищення керованості параметра швидкості використано декомпозицію часу рейсу на компоненти руху між зупинками, стоянок та затримок, що дозволяє пов'язати нормативи зі специфічними причинами втрат часу та сформувати напрямки організаційно-технологічних заходів (пріоритет руху, оптимізація посадки/оплати, коригування зупиночної мережі).*

*У межах методики описано узгодження нормативного часу рейсу з інтервалом руху, цикловим часом і потребою в рухомому складі, що дає змогу оцінювати наслідки вибору  $p^*$  для ресурсів і витрат експлуатації. Виконано теоретичний експеримент для автобуса Mercedes-Benz Touristo, який демонструє покроковий розрахунок нормативного часу, резерву (buffer time) та оптимальної маршрутної швидкості за заданого рівня надійності. Отримані результати можуть бути використані під час планування розкладів, резервів часу та оцінювання компромісу між якістю обслуговування (пунктуальність, регулярність) і економічними показниками роботи маршруту.*

**Ключові слова:** маршрутна швидкість; нормативний час рейсу; надійність розкладу; квантіль; резерв часу; пасажирські перевезення; автобус.

K. V. DOLIA

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Professor at the Department of Automobiles and Transport Infrastructure  
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"  
ORCID: 0000-0002-4693-9158

## DETERMINATION OF OPTIMAL ROUTE DRIVING SPEED WHEN USING VEHICLES IN PASSENGER TRANSPORTATION

*Determination of the optimal route speed of travel when operating motor vehicles in passenger transportation. K. Dolya. The article considers the problem of substantiating the optimal route speed of travel for bus passenger transportation under conditions of variability of the traffic situation and stochastic nature of delays at races, intersections and stops. The relevance of the topic is due to the fact that overestimating the standard speed increases the risk of schedule disruption and increased operational losses, while underestimating it leads to an increase in turnaround time, the need for additional fleet and deterioration of transport accessibility.*

*The purpose of the study is to develop an approach to establishing the standard trip time and the corresponding route speed, which provide a given level of reliability of schedule execution and are consistent with the resource and economic constraints of the carrier. It is proposed to determine the optimal speed through the quantile of the actual trip time  $v_m^* = L/Q_T(p^*)$ . To increase the controllability of the speed parameter, the decomposition of the trip time into components of movement between stops, parking lots and delays was used, which allows linking the standards with specific causes of time loss and forming directions for organizational and technological measures (priority of movement, optimization of boarding/payment, adjustment of the stop network).*



© К. В. Доля, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

*The methodology describes the coordination of the standard trip time with the movement interval, cycle time and the need for rolling stock, which makes it possible to assess the consequences of choosing  $p^*$  for resources and operating costs. A theoretical experiment was performed for the Mercedes-Benz Turismo bus, which demonstrates the step-by-step calculation of the standard time, buffer time and optimal route speed for a given level of reliability. The results obtained can be used in planning schedules, time reserves and assessing the trade-off between service quality (punctuality, regularity) and economic performance of the route.*

**Key words:** route speed; standard trip time; schedule reliability; quantile; time reserve; passenger transportation; bus.

### Постановка проблеми

Маршрутна швидкість поїздки пасажирського автомобільного транспорту є одним із ключових показників, що визначає якість транспортного обслуговування та економічну ефективність роботи перевізника. Вона безпосередньо впливає на час у дорозі для пасажирів, дотримання розкладу, рівень регулярності руху, необхідну кількість рухомого складу на маршруті та, відповідно, на експлуатаційні витрати. Для міських і приміських перевезень характерні часті зупинки, перехрестя, нерівномірні умови руху та обмеження пропускної спроможності вулично-дорожньої мережі, через що фактична швидкість істотно змінюється в часі та просторі.

На практиці встановлення «планової» (нормативної) маршрутної швидкості часто здійснюється за спрощеними підходами: за середніми значеннями за минулий період, за результатами разових замірів або за укрупненими нормативами. Такі підходи недостатньо враховують мінливість транспортних умов упродовж доби (пікові/міжпікові години), тижня (будні/вихідні), сезонні коливання, дорожні роботи, погодні чинники, а також стохастичні затримки на перехрестях і на зупинках під час посадки/висадки. Унаслідок цього розкладу можуть бути або завищено напруженими (що провокує запізнення, «зриви» інтервалів, накопичення транспорту та скарги пасажирів), або надмірно «розтягнутими» (що знижує привабливість перевезень і спричиняє зайві витрати часу та ресурсів).

Потреба у визначенні оптимальної маршрутної швидкості зумовлена необхідністю узгодити суперечливі критерії учасників транспортного процесу. Для пасажирів важливими є мінімізація часу поїздки та підвищення надійності прибуття; для перевізника – зменшення собівартості, забезпечення виконання рейсів і раціональне використання рухомого складу та персоналу; для органів управління – дотримання стандартів доступності та безпеки, зменшення заторів і негативного впливу на довкілля. Занадто висока цільова швидкість підштовхує до ризикованого керування та «наздоганяння» графіка, підвищує варіативність часу руху і загалом погіршує безпеку. Занадто низька – призводить до падіння продуктивності рухомого складу, збільшення оборотного часу та потреби в додаткових транспортних засобах для підтримання заданого інтервалу.

Додатковою складністю є структурна неоднорідність компонент часу поїздки. Загальний час проходження маршруту формується з часу руху між зупинками, затримок на регульованих і нерегульованих перехрестях, часу простою на зупинках (який залежить від пасажирообміну, конструкції дверей, способу оплати, дисципліни посадки тощо), а також можливих простоїв через позаштатні ситуації. Відповідно, оптимізація маршрутної швидкості не може зводитися лише до вибору «середньої» швидкості: необхідно враховувати розподіл затримок, наявність резерву часу у розкладі та допустимий рівень ризику невиконання рейсу у заданому часовому вікні.

У сучасних умовах розвиток систем супутникового моніторингу, автоматизованих систем оплати проїзду та підрахунку пасажирів створює передумови для переходу від укрупнених нормативів до обґрунтованого вибору цільової маршрутної швидкості на основі даних. Однак наявність великих масивів спостережень сама по собі не гарантує коректного рішення: потрібні методи агрегування та фільтрації даних, відокремлення типових режимів руху від аномалій, а також постановка критерію оптимальності, який одночасно враховує якість обслуговування та витрату складову.

Таким чином, актуальною науково-практичною проблемою є розроблення підходу до визначення оптимальної маршрутної швидкості поїздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в пасажирських перевезеннях, який враховує мінливі умови руху та стохастичний характер затримок, забезпечує заданий рівень надійності виконання розкладу і дозволяє мінімізувати сумарні втрати часу та експлуатаційні витрати. Розв'язання цієї проблеми є передумовою підвищення ефективності планування роботи маршруту, стабілізації інтервалів руху та покращення якості транспортного обслуговування населення.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика визначення та обґрунтування оптимальної маршрутної швидкості поїздки в пасажирських автомобільних перевезеннях перебуває на перетині досліджень з моделювання часу руху (run time), часу простою на зупинках (dwell time), надійності (reliability), керування регулярністю руху (headway control) та оптимізації розкладів і резервів часу (slack, recovery time). У сучасних роботах переважає даноорієнтований підхід із використанням даних AVL/GPS, APC, смарткарт, а також стандартизованих потоків GTFS/GTFS-RT, що дозволяє переходити від укрупнених нормативів до статистично обґрунтованих рішень [1–4].

Значний пласт публікацій присвячено прогнозуванню часу поїздки та часу прибуття як бази для підвищення якості сервісу й стабілізації виконання розкладу. Розвиваються як класичні часові моделі, так і глибоке навчання: від підходів із використанням авторегресійної структури та врахуванням логнормальних розподілів тривалості

поїздки [5] до нейромережових моделей (ConvLSTM із self-attention) для прогнозування часу руху по сегментах та очікування на зупинках [1]. У прикладних дослідженнях демонструється вигреш гібридних моделей (наприклад, LSTM-SVR) для прогнозування «розкладного часу»/тривалості рейсу [6], а також використання додаткових пояснювальних змінних (зокрема погоди) для покращення точності прогнозів [7]. Зростає увага до масштабованих рішень на рівні міста та переносимості моделей між мережами: показано перспективність використання відкритих і стандартизованих даних GTFS/GTFSRT для узагальнення моделей на різні міста [3], а також запропоновано «city-scale» конвеєри прогнозування затримок із багатороздільною ознаковою інженерією [8].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із моделюванням складових часу поїздки, насамперед часу простою на зупинках. Показано, що за певних умов навіть за відсутності прямого підрахунку пасажирів можна оцінювати профіль попиту та пасажиронавантаження на маршруті за даними dwell time, використовуючи байєсівські підходи [2]. Практичні результати також підтверджують суттєвий вплив технологій оплати на тривалість стоянки: зокрема, перехід на безготівкові/смарткарт платежі зменшує часові витрати на посадку порівняно з готівкою [9]. Водночас багато робіт підкреслюють, що dwell time є високоваріативною величиною, чутливою до конструкції транспортного засобу, організації посадки, ширини дверей, наявності валідаторів, потоків у салоні та випадкових затримок.

Суттєва частина літератури концентрується на показниках надійності та регулярності руху, оскільки «оптимальна» маршрутна швидкість в розкладі має забезпечувати не лише середній час поїздки, а й прийнятний ризик запізнення. У практиці планування дедалі частіше використовують підходи, що оперують не середніми, а квантильними/ймовірнісними характеристиками часу руху, резервом часу та рівнем сервісу. Наявність стандартизованих реального часу даних (GTFS-RT) та метрик точності прогнозів/пунктуальності сприяє відтворюваності аналізу та можливості порівнювати рішення між мережами [10, 11]. Зокрема, розвиток методів оцінювання доступності та надійності під невизначеністю часу в дорозі свідчить про зближення задач «операційної надійності» та «планувальної доступності» [11].

У роботах з оперативного керування рухом (зокрема запобігання «збиранню» автобусів у пачки) маршрутна швидкість розглядається як похідна від керуючих дій (утримання на зупинках, пропуск зупинок, обгін/регулювання інтервалів), що змінюють розподіл затримок і, як наслідок, фактичний час проходження маршруту. У цьому контексті оптимальна швидкість у розкладі має узгоджуватися зі стратегіями керування регулярністю та допуском до зміни тривалості стоянок.

Підсумовуючи аналіз сучасних джерел, можна виділити такі аспекти, що розкриті недостатньо й залишаються актуальними для подальших досліджень:

Переносимість результатів між маршрутами/містами: більшість моделей добре працює на «своїх» даних, але потребує адаптації при зміні мережі; перспективним є використання стандартизованих потоків GTFS/GTFS-RT та методів доменної адаптації [3, 8].

Окремо слід підкреслити, що маршрутна швидкість є не лише «часовим» показником сервісу, а й інтегральним чинником, який впливає на параметри експлуатації транспортних засобів і економіку роботи підприємства. Зі збільшенням фактичної швидкості (за незмінних умов руху) зменшується оборотний час і зростає продуктивність одиниці рухомого складу, що може знижувати потребу в кількості автобусів для забезпечення заданого інтервалу. Водночас прагнення до високих швидкостей у змішаному потоці часто супроводжується більш агресивним режимом розгонів/гальмувань і підвищенням нерівномірності руху, що збільшує енергетичні витрати та прискорює знос окремих вузлів (насамперед гальмівної системи, шин, елементів підвіски), а також впливає на витрати на технічне обслуговування та ремонт.

У роботах, присвячених оцінюванню паливно-енергетичних та вартісних показників міських автобусів, показано, що режим руху та середні швидкості/інтенсивності розгонів суттєво впливають на споживання енергії, викиди та сукупну вартість експлуатації (TCO/LCOD) [12]. Такі результати особливо важливі для міських маршрутів із частими зупинками, де зниження швидкості через затори або нераціональні режими керування призводить до непропорційного збільшення витрат палива/енергії «на кілометр» та «на пасажиро-кілометр», а також до збільшення часу роботи двигуна/силової установки в неефективних режимах.

З точки зору планування ТО та ремонтів, вплив швидкісного режиму проявляється як через зміну навантажень на агрегати, так і через зміну річного пробігу (за однакової кількості змін/рейсів) та загального напрацювання в мотогодинах. Вищі швидкості (і, відповідно, менший оборотний час) можуть збільшувати кількість виконаних рейсів за зміну і, як наслідок, річний пробіг, що наближує настання регламентних ТО за пробігом, тоді як затримки і «повільний» режим підвищують частку мотогодин простою/руху на малих швидкостях і можуть посилювати теплові/режимні навантаження. У підсумку оптимальна маршрутна швидкість має узгоджуватися з політикою ТОiP, доступністю резервного рухомого складу та допустимими витратами на підтримання працездатності.

З економічної точки зору оптимальна швидкість також пов'язана з окупністю витрат на експлуатацію: при надмірно низьких швидкостях зростає потреба у додаткових транспортних засобах і водіях для підтримання заданого інтервалу, що збільшує фонд оплати праці та капітальні/амортизаційні витрати; при завищених швидкостях збільшуються ризики нестабільного виконання розкладу, витрати на позапланові ремонти та погіршуються умови

безпеки. Таким чином, у сучасній літературі формується розуміння необхідності багатокритеріального визначення маршрутної швидкості як керованого параметра, що впливає одночасно на рівень сервісу, витрати ресурсів і експлуатаційну надійність.

Наведені прогалини підтверджують доцільність розроблення підходу до визначення оптимальної маршрутної швидкості, що базується на даних, враховує невизначеність і надійність, та формує практичні правила для планування розкладу, резервів часу та витрат на експлуатацію.

#### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є обґрунтування підходу до визначення оптимальної маршрутної швидкості поїздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в системі пасажирських перевезень з урахуванням мінливих умов руху, стохастичного характеру затримок і вимог до надійності виконання розкладу.

Об'єкт дослідження – процес організації та виконання пасажирських автомобільних перевезень на маршрутній мережі (міській/приміській), що характеризується змінними дорожніми умовами, пасажиропотоками та режимами зупинок.

Предмет дослідження – методи та моделі визначення (нормування) маршрутної швидкості поїздки і пов'язаних із нею параметрів планування роботи маршруту (часу рейсу, резервів часу, інтервалів руху) на основі статистичного опису складових часу руху та критерію оптимальності, який поєднує показники якості обслуговування й експлуатаційні витрати.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати складові часу поїздки на маршруті та визначити показники, що характеризують маршрутну швидкість і надійність виконання розкладу.
2. Обґрунтувати критерій і методику визначення оптимальної маршрутної швидкості з урахуванням мінливих умов руху, стохастичних затримок та експлуатаційних витрат.
3. Апробувати запропонований підхід на даних реального маршруту (або групи маршрутів) та сформулювати практичні рекомендації для планування розкладу й резервів часу.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Огляд методів сучасної науки й практики для розв'язання поставлених завдань

Для визначення оптимальної маршрутної швидкості як планового параметра (що забезпечує компроміс між часом поїздки, надійністю виконання розкладу та витратами експлуатації) у сучасній науці й практиці застосовують низку взаємодоповнюючих підходів. Нижче розглянуто шість методів, їх формалізацію, сильні/слабкі сторони та придатність до розв'язання задач дослідження.

Метод 1. Детерміноване нормування швидкості/часу рейсу за середніми значеннями. Найпоширеніший у практиці підхід полягає у встановленні планового часу рейсу як суми середніх часів руху між зупинками та середніх стоянок. Для маршруту довжиною  $L$  планова маршрутна швидкість визначається як (1):

$$v_m = L/T_m T_m = \sum_{(i=1)}^n t_{i,run} + \sum_{(j=1)}^{(n_s)} t_j^{d,well}, \quad (1)$$

де  $t_{i,run}$  – середній час проходження  $i$ -го перегону,  $t_j^{d,well}$  – середній час стоянки на  $j$ -й зупинці.

Графічно це відповідає «плоскому» профілю планового часу за добу з невеликим коригуванням для пікових годин (рис. 1).

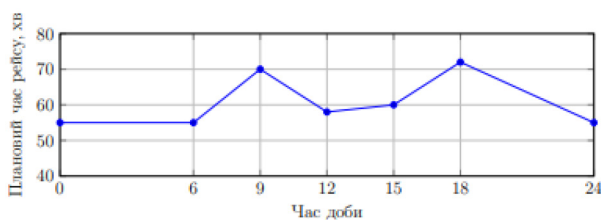


Рис. 1. Приклад детермінованого нормування планового часу рейсу за середніми значеннями

Перевагами є простота, прозорість, мінімальні вимоги до даних, а недоліками – ігнорування варіативності й хвостів розподілу часу; високий ризик запізнь у піки або надлишкового «розтягування» у міжпікові години, що погіршує якість сервісу.

Метод 2. Стохастичне нормування на основі квантилей і «резерву часу» (reliability-based slack). Сучасна практика планування орієнтується на ймовірнісні характеристики тривалості поїздки. Якщо  $T$  – випадкова величина часу рейсу, то плановий час задають через квантиль рівня  $p$  (2)

$$T_m = Q_T(p) \quad Pr(T \leq T_m) = p. \quad (2)$$

А резерв визначають як (3):

$$s = T_m - E[T]. \quad (3)$$

Такий підхід природно пов'язує планову швидкість з цільовою надійністю (часткою рейсів без запізнення). Подібні підходи активно використовуються в задачах оптимізації резервів часу у розкладах і підвищення робастності (на прикладі рейкових систем) [6].

Метод має такі переваги, як: керована надійність; придатність до сегментації за періодами доби; узгодженість з «ризик-орієнтованим» управлінням. Недоліками є те що він потребує достатнього обсягу даних; чутливий до якості очищення/антианомального фільтру; не дає прямого пояснення причин затримок без додаткової декомпозиції.

Метод 3. Декомпозиційні моделі складових часу рейсу (run time + dwell time + delays)

Для підвищення керованості параметра  $v_m$  доцільно розкласти час рейсу (4):

$$T = \sum (i=1)^n t_i^r un + \sum (j=1)^{n_s} t_j^d well + \sum (k=1)^{n_d} t_k^i nt, \quad (4)$$

де  $t_k^{int}$  – затримки на перехрестях/вузьких місцях. Для моделювання  $t^{dwell}$  застосовують стохастичні підходи до часу посадки/висадки [3], а також інверсні задачі оцінювання попиту за dwell time у разі дефіциту прямих спостережень [2]. Метод забезпечує можливість адресно впливати на компоненти (наприклад, виділення смуг/пріоритет на перехрестях, оптимізація посадки).

Сильні сторони – причинна інтерпретованість; підтримка заходів управління інфраструктурою та технологією перевезень. Слабкі сторони: вища складність; потрібні узгоджені дані (AVL, зупинки, перехрестя, пасажирообмін).

Метод 4. Прогнозування часу поїздки (ML/DL) для адаптивного нормування швидкості. Для адаптивного планування використовують моделі прогнозування  $T$  на основі ознак  $x$  (час доби, день тижня, погодні умови, стан мережі тощо) (5):

$$T = \sum (i=1)^n t_i^r un + \sum (j=1)^{n_s} t_j^d well + \sum (k=1)^{n_d} t_k^i nt, \quad (5)$$

де  $f_0$  – параметризована модель (наприклад, ConvLSTM із механізмом уваги [1] або інші глибокі моделі прогнозування). Перевага – можливість оперативно актуалізувати планові значення та визначати динамічні «коридори» планового часу.

Сильні сторони методу є висока точність за наявності даних; адаптивність; можливість прогнозувати не лише середнє, а й квантілі (через квантільну регресію). Слабкі сторони – складність валідації та пояснюваності; ризик «переобучення»; потреба в стабільному потоці даних і процедурі моніторингу якості.

Метод 5. Оптимізація розкладів і ресурсів (надійність–вартість) у плануванні. Маршрутна швидкість у розкладі пов'язана з оборотним часом і потребою у парку. Для заданого інтервалу  $h$  та циклового часу  $C$  (включно з відстійно-резервним часом) потреба в ТЗ (6):

$$N = C/h, \quad C = 2T_m + t^i un + s^r ec, \quad (6)$$

де  $t^{turn}$  – час розвороту/відстою,  $s^{rec}$  – резерв відновлення розкладу. У сучасних постановках планування підкреслюють компроміс «вартість–надійність» у задачах розкладу/випуску, включно з багатодеповим плануванням за стохастичного часу руху [7]. Це дозволяє прямо пов'язати вибір  $v_m$  з витратами на парк, водіїв і штрафами за запізнення.

Сильні сторони: забезпечує економічне обґрунтування; дає прямий зв'язок між швидкістю, інтервалом і потребою в ресурсах. Слабкі сторони: потребує формалізації витрат і обмежень; складність розв'язання для великих мереж без спеціальних алгоритмів.

Метод 6. Оперативне керування регулярністю (headway control, holding, RL). Оскільки фактична швидкість й інтервали є взаємопов'язаними, застосовують керування «утриманням» на зупинках та інші стратегії для зменшення bunching. У сучасних роботах активно розвиваються RL-підходи до holding-контролю [12]. Формально це задача вибору керуючої дії  $a_t$  (час утримання) в стані  $s_t$  (головні інтервали/навантаження) для максимізації очікуваної сумарної винагороди (7):

$$\max_{\pi \in \Pi} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r(s_t, a_t) \right]. \quad (7)$$

Сильні сторони: здатність працювати зі стохастикою та складною динамікою; покращення регулярності й часу очікування. Слабкі сторони: вимоги до симулятора/даних; складність впровадження й пояснюваності; ризики нестабільності при переносі в реальні умови.

Запропоновано методу для розв'язання поставлених завдань й рекомендації визначення оптимальної маршрутної швидкості їздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в пасажирських перевезеннях. Для розв'язання поставлених у роботі завдань доцільно застосувати комбінований, даноорієнтований підхід, у якому оптимальна маршрутна швидкість розглядається як керований параметр розкладу (нормативний час рейсу  $T_m$ ), що

має забезпечувати заданий рівень надійності та мінімізувати сукупні витрати. Сутність підходу полягає у поєднанні: (1) квантильного нормування часу рейсу (ризик-орієнтований резерв часу), (2) декомпозиції часу рейсу на керовані компоненти (рух/зупинки/вузли затримок) та (3) економічного узгодження вибраного  $T_m$  з потребою у ресурсах ( $N$ ) і допустимими експлуатаційними витратами.

Суть методу.

Припустимо  $T$  – випадкова величина фактичного часу проходження маршруту довжиною  $L$ . Плановий час рейсу задається як квантиль (8):

$$T_m = Q_T(p), \quad Pr(T \leq T_m) = p, \quad (8)$$

де  $p \in (0, 1)$  – цільова надійність (наприклад,  $p = 0.85 \div 0.95$  залежно від вимог до пунктуальності). Тоді планова маршрутна швидкість розраховується згідно (8). Відповідно, оптимальна маршрутна швидкість їздки визначається як значення, що відповідає обраному рівню надійності  $p^*$  та є узгодженим з ресурсними/економічними обмеженнями (9):

$$v_m^* = L/T_m^* = L/Q_T(p^*), \quad (9)$$

де  $v_m$  – планова (нормативна) маршрутна швидкість, км/год;  $v_m^*$  – оптимальна маршрутна швидкість, км/год;  $L$  – довжина маршруту (у напрямку), км;  $T_m$  – плановий (нормативний) час рейсу, год;  $T_m^*$  – оптимальний нормативний час рейсу, год;  $T$  – фактичний час рейсу як випадкова величина;  $Q_T(p)$  – квантиль розподілу  $T$  рівня  $p$ ;  $p$  – заданий рівень надійності виконання (ймовірність виконати рейс не довше  $T_m$ );  $p^*$  – оптимальний рівень надійності, що мінімізує сумарні втрати. Якщо необхідно явно врахувати витрати, то  $p^*$  можна вибрати з задачі мінімізації сумарних втрат (вартість запізень + вартість резерву часу):

$$p^* = \arg \min_{(p \in [p_{min}, p_{max}])} (C_{late} \cdot Pr(T > Q_T(p)) + C_{slack} \cdot (Q_T(p) - E[T])), \quad (10)$$

де  $p_{min}, p_{max}$  – допустимий діапазон рівня надійності;  $C_{late}$  – питомі втрати/штрафи за запізнення (еквівалент вартості невиконання вимог пунктуальності);  $C_{slack}$  – «ціна» резерву часу (додаткові витрати через збільшення оборотного часу, потребу в ресурсах тощо);  $Pr(T > Q_T(p))$  – імовірність запізнення (перевищення нормативу);  $E[T]$  – математичне сподівання фактичного часу рейсу. Після визначення  $p^*$  обчислюють за (11):

$$T_m^* = Q_T(p^*) \quad \text{та} \quad v_m^* = L/T_m^*. \quad (11)$$

Для керованості та пояснюваності вводиться декомпозиція (12):

$$T = T_{run} + T_{dwell} + T_{del}, \quad (12)$$

де  $T_{run}$  – сумарний час руху між зупинками,  $T_{dwell}$  – сумарний час стоянок,  $T_{del}$  – затримки (перехрестя, затори, позаштатні події). Така структура дозволяє не лише «поставити»  $T_m$ , а й сформувані практичні заходи впливу: зменшення  $T_{dwell}$  (оплата/посадка), зниження  $T_{del}$  (пріоритет на перехрестях), стабілізація  $T_{run}$  (виділені смуги тощо).

Практична реалізація методу може бути подана як послідовність кроків.

Збір даних: для кожного рейсу отримати часові мітки проходження зупинок/контрольних точок (AVL/GPS), фактичні тривалості стоянок (за наявності), а також календарні ознаки (година, день тижня, сезон) і зовнішні чинники (погода, дорожні роботи – за можливості).

Очищення та сегментація: вилучити/помітити аномальні рейси (ДТП, перекриття), сформувати однорідні групи умов (наприклад, «будній-пік», «будній-міжпік», «вихідний»).

Оцінювання розподілу  $T$ : для кожної групи оцінити емпіричний розподіл часу рейсу та його квантілі  $Q_T(p)$ . За потреби окремо оцінити розподіли компонент  $T_{run}$ ,  $T_{dwell}$ ,  $T_{del}$  та їх внесок у варіативність.

Вибір рівня надійності  $p$ : визначити  $p$  як компроміс між якістю сервісу та витратами. Практично  $p$  може задаватися нормативом пунктуальності або підбиратися за критерієм мінімуму сумарних втрат (штрафи за запізнення + вартість резерву часу).

Розрахунок  $T_m$  та  $v_m$ : прийняти  $T_m = Q_T(p)$  і визначити  $v_m = L/T_m$  окремо для кожної часової групи; сформувати резерв  $s = T_m - E[T]$  як контрольований параметр розкладу.

Узгодження з ресурсами: для заданого інтервалу  $h$  оцінити потребу в ТЗ Res (13):

$$N = \frac{C}{h}, \quad C = 2T_m + t^{turn} + s^{rec}, \quad (13)$$

та перевірити відповідність наявному парку/кадрам; у разі конфлікту – переглянути  $p$ ,  $h$  або заходи зі зменшення складових  $T$ .

Переваги підходу полягають у тому, що він безпосередньо пов’язує нормативний час/швидкість із вимірюваною надійністю через квантілі; дає можливість адаптації за періодами доби та типами днів; забезпечує інтерпретованість через декомпозицію  $T_{run} + T_{dwell} + T_{del}$ ; дозволяє економічно обґрунтувати рішення через залежність потреби у ресурсах  $N$  від  $T_m$ .

Водночас підхід має обмеження:

- квантільне нормування є «даними керованим»: при зміні умов (масштабні ремонти доріг, зміна схем руху, впровадження нової оплати) попередні розподіли  $T$  можуть швидко застарівати, тому потрібні регламенти регулярного оновлення норм.
- емпіричні квантілі чутливі до обсягу вибірки: для рідкісних режимів (нічні рейси, святкові дні) оцінка  $Q_T(p)$  може бути нестійкою.
- сам по собі вибір  $p$  не вирішує причин затримок: без паралельних організаційних/інфраструктурних заходів резерв часу може перетворитися на «приховане» збільшення тривалості поїздки.
- економічне узгодження потребує коректної оцінки вартості запізнення й вартості додаткового резерву (у т.ч. через парк/водіїв/ТОiP), що не завжди доступно в первинних даних підприємства.

Незважаючи на зазначені обмеження, запропонований комбінований підхід є практично реалізовним і достатньо гнучким для умов міських/приміських маршрутів: він дозволяє обґрунтовано встановлювати нормативну швидкість, управляти надійністю через параметр  $p$  та пов'язувати отримане рішення з ресурсами і витратами експлуатації.

Теоретичний експеримент з визначення оптимальної маршрутної швидкості проведено для Mercedes-Benz Tourismo. Наведемо приклад теоретичного експерименту для визначення  $v_m^*$  за обраною методикою квантільного нормування з урахуванням надійності. Розглядається автобус *MercedesBenz Tourismo*, що виконує регулярний рейс довжиною  $L = 42$  км (в одному напрямку) з  $n_s = 10$  зупинками. Мета – визначити нормативний час рейсу  $T_m^*$  і відповідну оптимальну маршрутну швидкість  $v_m^*$  для забезпечення цільової надійності виконання  $p^* = 0.90$ .

Припустимо, що за результатами спостережень (або моделювання) фактичний час рейсу  $T$  в умовах «будній день, денний період» може бути наближено нормальною випадковою величиною (14):

$$T \sim N(\mu, \sigma^2), \quad (14)$$

де  $\mu = 60$  хв – середній час рейсу,  $\sigma = 6$  хв – середньоквадратичне відхилення (варіативність через затори, перехрестя, пасажирообмін). Для такого наближення квантіль (15):

$$Q_T(p) = \mu + z_p \sigma, \quad (15)$$

де  $z_p$  – квантіль стандартного нормального розподілу. Для  $p^* = 0.90$  маємо:  $z_{0.90} \approx 1.2816$ , отже: розрахунок оптимальної маршрутної швидкості. Переведемо час у години: год:

$$T_m^* = Q_T(0.90) = 60 + 1.2816 \cdot 6 \approx 67.7 \text{ хв.}$$

Тоді –

$$v_m^* = \frac{L}{T_m^*} = \frac{42}{1.128} \approx 37.2 \text{ км/год.}$$

Отримане значення  $v_m^*$  є оптимальним у сенсі забезпечення  $Pr(T \leq T_m^*) = 0.90$  за прийнятих статистичних характеристик.

Резерв часу та інтерпретація. Резерв (slack) становить:

$$T_m^* - Q_T(0.90) = 60 + 1.2816 \cdot 6 \approx 67.7 \text{ хв.,}$$

тобто в розкладі доцільно передбачити близько 8 хв на компенсацію стохастичних затримок. Графічно ідея квантільного нормування наведена на рис. 2.

Перевірка узгодженості з ресурсами (коротко). Нехай інтервал руху  $h = 20$  хв, час розвороту/відстою  $t^{turn} = 10$  хв, резерв відновлення на кінцевій  $s^{rec} = 5$  хв. Тоді цикловий час:

$$T_m^* = Q_T(0.90) = 60 + 1.2816 \cdot 6 \approx 67.7 \text{ хв.,}$$

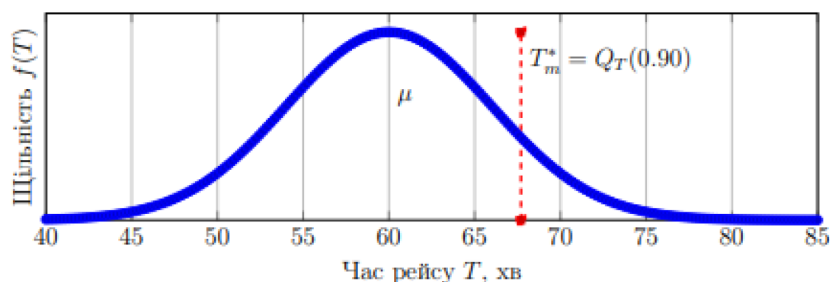


Рис. 2. Ілюстрація вибору нормативного часу рейсу за квантілем  $p^* = 0.90$  (теоретичний експеримент)

а потреба в автобусах:

$$T_m^* = Q_T(0.90) = 60 + 1.2816 \cdot 6 \approx 67.7 \text{ хв.}$$

Якщо фактичний парк менший, можливі варіанти коригування: збільшити  $h$ , зменшити  $p^*$  (і відповідно резерв), або реалізувати заходи зменшення  $\sigma$  (пріоритет руху, оптимізація посадки) без погіршення сервісу.

Для заданих умов прикладу та цільової надійності  $p^* = 0.90$  отримано нормативний час рейсу  $T_m^* \approx 67.7$  хв. та оптимальну маршрутну швидкість  $v_m^* = 37,2$  км/год для автобуса *Mercedes-Benz Tourismo*. Зміна умов руху (зростання  $\sigma$ ) або вимог до надійності (зростання  $p^*$ ) призведе до збільшення  $T_m^*$  та зменшення  $v_m^*$ , що повинно враховуватись при плануванні розкладу.

У роботі узагальнено та систематизовано сучасні підходи до визначення оптимальної маршрутної швидкості їздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в пасажирських перевезеннях, а також обґрунтовано вибір методики розрахунку нормативного часу рейсу та відповідної швидкості на основі ризик-орієнтованого (квантільного) нормування.

Показано, що практики детермінованого нормування швидкості за середніми значеннями є простими у застосуванні, однак методично недостатніми для умов високої варіативності міського/приміського руху: вони не враховують «хвости» розподілу часу рейсу, що призводить або до систематичних запізнь, або до надмірного резерву часу й зниження привабливості перевезень.

Обґрунтовано доцільність переходу до стохастичного опису часу рейсу та використання квантільного підходу як інструменту керування надійністю виконання розкладу. Критично важливим є те, що квантільне нормування саме по собі не усуває причини затримок і потребує паралельної декомпозиції складових часу поїздки та організаційних/інфраструктурних заходів.

Показано зв'язок між нормативним часом рейсу, оборотним часом, потребою у парку та експлуатаційними витратами, що дозволяє економічно інтерпретувати рішення щодо оптимальної швидкості як компроміс «надійність–ресурси–час пасажирів».

Наукова новизна отриманих результатів полягає у формалізації визначення оптимальної маршрутної швидкості через квантіль фактичного часу рейсу та вибір рівня надійності  $p^*$  із урахуванням сумарних втрат (запізнення + резерв часу), а також у поєднанні цього підходу з декомпозицією часу поїздки на компоненти  $T_{run}$ ,  $T_{dwell}$ ,  $T_{del}$  для підвищення інтерпретованості та керованості параметрів розкладу.

Практична цінність полягає у можливості впровадження методики на основі типових даних експлуатації (AVL/GPS, розклад, за наявності – дані пасажирообміну) з отриманням нормативів  $T_m^*$  і  $v_m^*$  для різних часових періодів. Запропонований підхід забезпечує прозоре налаштування «рівня сервісу» через параметр  $p^*$ , дозволяє обґрунтовано встановлювати резерв часу та оцінювати наслідки для потреби в парку й витрат.

Перспективними для досліджень у подальшому є: уточнення функції витрат для вибору  $p^*$  з урахуванням реальних штрафів/втрат та ефектів для ТОiP; перехід від припущень про форму розподілу  $T$  до робастних/непараметричних оцінок квантилей; інтеграція моделювання зупинок і перехресть у єдину схему причинного аналізу затримок; розширення методики на мережевий рівень із урахуванням міжмаршрутних взаємодій і стратегій оперативного керування регулярністю.

### Висновки

У роботі розглянуто задачу визначення оптимальної маршрутної швидкості їздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в пасажирських перевезеннях за умов мінливості дорожньої ситуації та стохастичного характеру затримок. Показано, що використання лише середніх значень часу руху для нормування швидкості не забезпечує належного рівня пунктуальності та призводить до неефективного використання ресурсів у різні періоди доби.

Запропоновано даноорієнтований підхід, у якому оптимальна маршрутна швидкість визначається через нормативний час рейсу, обраний за квантилем фактичного часу поїздки з цільовою надійністю  $p^*$ , та узгоджується з ресурсними й економічними обмеженнями. Формалізовано вираз  $v_m^* = L/T_m^* = L/Q_T(p^*)$ , наведено інтерпретацію параметрів і можливість вибору  $p^*$  за критерієм мінімуму сумарних втрат (запізнення та резерв часу). Декомпозиція часу рейсу на складові руху, стоянок і затримок підвищує керованість нормативів і створює основу для практичних заходів з підвищення швидкості та надійності (пріоритет руху, оптимізація зупинок, поліпшення технології посадки).

Отримані результати мають практичну цінність для планування розкладів і резервів часу, підвищення регулярності руху та зниження експлуатаційних витрат; перспективи подальших досліджень пов'язані з робастними оцінками квантилей, уточненням функцій витрат і масштабуванням методики на рівень маршрутної мережі.

### Список використаної літератури

1. Muweis J., Łamasz B. The development of the aviation fuel market in Poland and changes in civil passenger traffic. *Polityka Energetyczna*. 2019. Vol. 22, no. 1. P. 153–168. DOI: 10.33223/epj/105527
2. Li Y., Yang B., Cui Q. The effects of high-speed rail on air passenger transport in China. *Applied Economics Letters*. 2019. Vol. 26, no. 9. P. 745–749. DOI: 10.1080/13504851.2018.1494798

3. Zhang F., Ning Y., Lou X. The evolutionary mechanism of China's urban network from 1997 to 2015: An analysis of air passenger flows. *Cities*. 2021. Vol. 109. DOI: 10.1016/j.cities.2020.103005
4. Korkmaz E., Akgüngör A. P. The forecasting of air transport passenger demands in Turkey by using novel meta-heuristic algorithms. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2021. Vol. 33, no. 16. DOI: 10.1002/cpe.6263
5. Danchev S., Paratsiokas N., Vettas N. The impact of the concession of 14 regional Greek airports on passenger traffic. *Journal of Industry, Competition and Trade*. 2022. Vol. 22, no. 1. P. 51–67. DOI: 10.1007/s10842-021-00378-0
6. Al-Saad S., Ababneh A., Alazaizeh M. M. The influence of airport security procedures on the intention to re-travel. *European Journal of Tourism Research*. 2019. Vol. 23. P. 127–141.
7. Lee H.-S. The networkability of cities in the international air passenger flows 1992-2004. *Journal of Transport Geography*. 2009. Vol. 17, no. 3. P. 166–175. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2008.07.011
8. Ida Y. The pattern of air passenger flows in Japan. *Geographical Review of Japan, Series B*. 1993. Vol. 66, no. 1. P. 18–34. DOI: 10.4157/grj1984b.66.18
9. Correnti V., Capri S., Ignaccolo M., Inturri G. The potential of rotorcraft for intercity passenger transport. *Journal of Air Transport Management*. 2007. Vol. 13, no. 2. P. 53–60. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2006.11.009
10. Burns M. C., Roca Cladera J., Moix Bergadà M. The spatial implications of the functional proximity deriving from air passenger flows between European metropolitan urban regions. *GeoJournal*. 2008. Vol. 71, no. 1. P. 37–52. DOI: 10.1007/s10708-008-9144-x
11. Li H., Wang H., Bai M., Duan B. The structure and periodicity of the Chinese air passenger network. *Sustainability (Switzerland)*. 2019. Vol. 11, no. 1. DOI: 10.3390/su11010054
12. Elwakil O. S., Windle R. J., Dresner M. E. Transborder demand leakage and the US-Canadian air passenger market. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2013. Vol. 57. P. 45–57. DOI: 10.1016/j.tre.2013.01.005

#### References

1. Muweis, J., & Łamasz, B. (2019). The development of the aviation fuel market in Poland and changes in civil passenger traffic. *Polityka Energetyczna*, 22(1), 153-168. doi:10.33223/epj/105527
2. Li, Y., Yang, B., & Cui, Q. (2019). The effects of high-speed rail on air passenger transport in China. *Applied Economics Letters*, 26(9), 745-749. doi:10.1080/13504851.2018.1494798
3. Zhang, F., Ning, Y., & Lou, X. (2021). The evolutionary mechanism of China's urban network from 1997 to 2015: An analysis of air passenger flows. *Cities*, 109. doi:10.1016/j.cities.2020.103005
4. Korkmaz, E., & Akgüngör, A. P. (2021). The forecasting of air transport passenger demands in Turkey by using novel meta-heuristic algorithms. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 33(16). doi:10.1002/cpe.6263
5. Danchev, S., Paratsiokas, N., & Vettas, N. (2022). The impact of the concession of 14 regional Greek airports on passenger traffic. *Journal of Industry, Competition and Trade*, 22(1), 51-67. doi:10.1007/s10842-021-00378-0
6. Al-Saad, S., Ababneh, A., & Alazaizeh, M. M. (2019). The influence of airport security procedures on the intention to re-travel. *European Journal of Tourism Research*, 23, 127–141.
7. Lee, H.-S. (2009). The networkability of cities in the international air passenger flows 1992–2004. *Journal of Transport Geography*, 17(3), 166-175. doi:10.1016/j.jtrangeo.2008.07.011
8. Ida, Y. (1993). The pattern of air passenger flows in Japan. *Geographical Review of Japan, Series B*, 66(1), 18–34. doi:10.4157/grj1984b.66.18
9. Correnti, V., Capri, S., Ignaccolo, M., & Inturri, G. (2007). The potential of rotorcraft for intercity passenger transport. *Journal of Air Transport Management*, 13(2), 53–60. doi:10.1016/j.jairtraman.2006.11.009
10. Burns, M. C., Roca Cladera, J., & Moix Bergadà, M. (2008). The spatial implications of the functional proximity deriving from air passenger flows between European metropolitan urban regions. *GeoJournal*, 71(1), 37–52. doi:10.1007/s10708-008-9144-x
11. Li, H., Wang, H., Bai, M., & Duan, B. (2019). The structure and periodicity of the Chinese air passenger network. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1). doi:10.3390/su11010054
12. Elwakil, O. S., Windle, R. J., & Dresner, M. E. (2013). Transborder demand leakage and the US-Canadian air passenger market. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 57, 45-57. doi:10.1016/j.tre.2013.01.005

Дата першого надходження статті до видання: 18.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026