

ЩЕНКО Гліб

Вінницький національний технічний університет
e-mail: glebishshenko1000@gmail.com

ШЕВЧУК Олександр

Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-8600-0700>
e-mail: shevchuk@vntu.edu.ua

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ДОРОЖНЬОГО ТРАФІКУ ДЛЯ АДАПТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У роботі запропоновано метод апроксимації добових профілів дорожнього трафіку для застосування в автоматизованих системах адаптивного планування перевезень. Підхід базується на параметричному представленні часової компоненти як комбінації щільностей нормальних розподілів, параметри яких оцінюються автоматично на основі класифікації маршруту, контекстних множників (урбанізація, відстань, напрямок руху), стохастичних корекцій і локальних зсувів. Запропонований алгоритм забезпечує побудову інтерпретованих добових профілів для різних класів маршрутів та дозволяє генерувати різноманітні шаблони трафіку в умовах обмеженості даних. Експериментальна перевірка показала, що автоматично згенеровані профілі відтворюють характерні відмінності в динаміці трафіку для різних типів маршрутів і напрямків руху; водночас для досягнення відповідності статистичним даним метод вимагає локального калібрування контекстних множників і врахування додаткових факторів (сезонність, погодні умови, дорожні події).

Ключові слова: моделювання трафіку, добовий профіль, нормальний розподіл, адаптивне планування перевезень, автоматична апроксимація, класифікація маршрутів.

ISHCHENKO Hlib, SHEVCHUK Oleksandr
Vinnytsia National Technical University

CHARACTERISTICS OF ROAD TRAFFIC MODELING FOR ADAPTIVE TRANSPORTATION PLANNING

This paper addresses the problem of accounting for diurnal variability of road traffic in adaptive transportation planning systems. Traditional transportation models with fixed cost coefficients often fail to reflect real operational conditions, leading to suboptimal routing decisions, increased delivery times, higher costs, and additional environmental impacts. To overcome these limitations, the study proposes a compact and computationally efficient method for approximating daily traffic profiles that can be directly integrated into modified transportation problems while preserving their linear structure.

The proposed approach represents the temporal component of traffic congestion as a parametric combination of normal (Gaussian) density functions. Model parameters are estimated automatically based on route classification and a set of contextual factors, including the degree of urbanization, route length, and travel direction (inbound or outbound). Additional stochastic corrections and local temporal shifts are introduced to increase variability and realism under data-scarce conditions. Such a formulation enables the generation of interpretable and reproducible daily traffic profiles for different classes of routes, including urban, suburban, and intercity connections.

An algorithm for automatic profile construction is presented, encompassing route classification, detection of significant traffic peaks, estimation of distribution parameters, and calculation of congestion multipliers discretized on an hourly basis. The resulting profiles are used to model time-dependent transportation costs within an adaptive planning framework. The method has been implemented in the client-server information system "ChronoLogix," which integrates geospatial data, interactive visualization, and tools for editing transport matrices and daily profiles.

Experimental results demonstrate that the automatically generated profiles adequately reproduce characteristic differences in traffic dynamics between route types and travel directions. Urban routes exhibit higher baseline congestion and pronounced peak periods, while suburban and intercity routes show lower overall intensity with narrower, direction-dependent peaks. At the same time, the study confirms that achieving closer agreement with observed traffic statistics requires local calibration of contextual multipliers and consideration of additional factors such as seasonality, weather conditions, and planned road events.

Overall, the proposed method provides an interpretable, data-efficient, and practically oriented solution for incorporating temporal traffic variability into adaptive transportation planning systems, making it suitable for research, educational applications, and small- and medium-scale logistics operations.

Keywords: traffic modelling, daily profile, normal distribution, adaptive transportation planning, automatic approximation, route classification.

Стаття надійшла до редакції / Received 30.09.2025

Прийнята до друку / Accepted 29.10.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасне планування перевезень ускладнюється значними добовими коливаннями інтенсивності дорожнього трафіку, що особливо помітно у міських та приміських маршрутах. У результаті, застосування традиційних моделей лінійного програмування, зокрема класичної транспортної задачі з фіксованими

коефіцієнтами витрат, часто призводить до субоптимальних рішень, які збільшують реальні операційні витрати, спричиняють затримки та підвищують екологічне навантаження. Попри те, що більшість сучасних комерційних рішень враховує динаміку трафіку, вони зазвичай вимагають значних обчислювальних ресурсів, складної інтеграції та суттєвих фінансових витрат на впровадження, що обмежує їхнє практичне застосування у навчальних і дослідницьких цілях, а також у малому та середньому бізнесі [1–4].

Таким чином особливої актуальності набувають підходи до моделювання дорожнього трафіку, що здатні відображати його часову мінливість та інтегруватися у системи адаптивного планування перевезень. Як свідчать емпіричні дані, добові профілі транспортного навантаження часто мають бімодальну або багатомодальну структуру, яку можна досить ефективно апроксимувати комбінаціями щільностей нормальних розподілів [5, 6]. А тому використання таких моделей у поєднанні з класичними задачами лінійного програмування дасть змогу коригувати транспортні плани з урахуванням як поточних так і прогнозованих умов руху, що сприятиме підвищенню ефективності використання ресурсів, скороченню часу доставки та зменшенню негативного впливу на довкілля. Отже, метою роботи є розширення функціональних можливостей системи планування транспортних перевезень шляхом інтеграції динамічної моделі розрахунку витрат, побудованої на основі моделювання дорожнього трафіку.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасній літературі проблеми моделювання й прогнозування дорожнього трафіку вирішуються двома основними класами підходів: на основі методів машинного навчання, та з використанням статистичних або агент-орієнтованих моделей [7, 8].

Дослідження, що застосовують LSTM- і гібридні GCN-LSTM-архітектури, демонструють високу точність прогнозування часових рядів трафіку та хорошу здатність урахувувати просторово-часові залежності; у деяких роботах повідомляються зниження похибок до ~30 % і суттєве скорочення затримок у пікові години [7]. Проте такі рішення потребують великого обсягу якісних даних, обчислювальних ресурсів і складної інженерії даних, що ускладнює їхнє застосування в реальних умовах.

Агент-орієнтовані підходи з використанням biLSTM та інформативних станцій спостереження дозволяють побудувати моделі, які працюють в умовах дефіциту даних і ресурсів, знижуючи вимоги мережі датчиків [8]. Вони корисні для локальних застосувань, але вимагають ретельного налаштування агентів і додаткової логіки відбору ознак, що ускладнює швидке розгортання у загальному контексті систем керування транспортом.

Прикладні дослідження з керування трафіком у міських та житлових районах підкреслюють необхідність поєднання кількісних моделей із інженерними заходами, що свідчить про мультидисциплінарний характер задачі і необхідність простих, прозорих інструментів для інтеграції таких рішень у локальну практику [9].

Класичні статистичні підходи і методи класифікації добових профілів часто не відтворюють асиметрій, скошеності та інших особливостей реальних розподілів трафіку. У цьому контексті робота з комбінаціями розподілів демонструє перевагу: компоненти моделі можуть відтворювати різні ступені скошеності й крутизни піків, що робить їх придатними для опису асиметричних ранкових та вечірніх хвиль [6]. Такі моделі є більш інтерпретованими, ніж штучні нейронні мережі, і вимагають значно менше даних для калібрування.

Отже, для практично орієнтованої системи адаптивного планування перевезень необхідна інтегрована архітектура, яка поєднує: інтерпретовану й параметричну модель часозалежних витрат, кількісну дискретизацію для збереження лінійної структури транспортної задачі та її ефективного розв'язання, механізми калібрування при обмежених даних і зрозумілий інтерфейс для аналізу й інтерактивної корекції.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

В основі запропонованого методу адаптивного планування перевезень лежить модифікована транспортна задача, що враховує часову варіацію транспортних витрат. Модель зберігає лінійну структуру завдяки дискретизації за часом і формулюється у вигляді:

$$\min_{\{x_{ij}^{(k)}\}} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}^{(k)} \cdot x_{ij}^{(k)} \quad (1)$$

за умов балансу постачання та попиту: $\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n x_{ij}^{(k)} = a_i$, $\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m x_{ij}^{(k)} = b_j$, $x_{ij}^{(k)} \geq 0$,

де $c_{ij}^{(k)} = c_{ij}^{(0)} + f_{ij}(t_k)$, $f_{ij}(t) = \sum_{p=1}^g A_{ij}^{(p)} \phi(t; \mu_{ij}^{(p)}, \sigma_{ij}^{(p)})$, $k = 1, \dots, K$, $\phi(t; \mu_{ij}^{(p)}, \sigma_{ij}^{(p)})$ – щільність нормального розподілу, g – число піків, а $A_{ij}^{(p)}$ – їх ненормовані амплітуди, $x_{ij}^{(k)}$ – обсяг перевезення.

Таким чином, для практичної реалізації необхідно оцінювати математичне сподівання $\mu_{ij}^{(p)}$, стандартне відхилення $\sigma_{ij}^{(p)}$ та амплітуди $A_{ij}^{(p)}$ для кожного маршруту. Вхідними даними для процедури апроксимації є географічні координати початкової та кінцевої точок, довжина маршруту, орієнтовна середня швидкість руху, а також інформація про відношення маршруту до населених пунктів (виїзд з міста, в'їзд до міста, в межах міста, загальний міжміський, між великими містами, сільський). На основі цих даних маршрути поділяються на класи.

Для коригування амплітуд та зсувів використовуються контекстні множники:

- $cityFactor \in \{1,2, 1,0, 0,8\}$ для міст типу велике, середнє, мале відповідно;
- $distanceFactor = 1 + \beta_{dist} \cdot \left(\frac{L}{L_{ref}}\right)$, де L_{ref} та β_{dist} – налаштовуються у власній реалізації;
- напрямки: $dirFactor_{morning}$, $dirFactor_{evening}$ (виїзд з міста та в'їзд до міста впливають на амплітуду);
- випадкова корекція $\rho \sim \mathcal{U}(1 - \delta, 1 + \delta)$, де зазвичай $\delta \in [0,05, 0,15]$;
- унікальність через відбиток на основі координату та довжини – часовий зсув піків $\Delta t_{fp} \in [-1,5, 1,5]$.

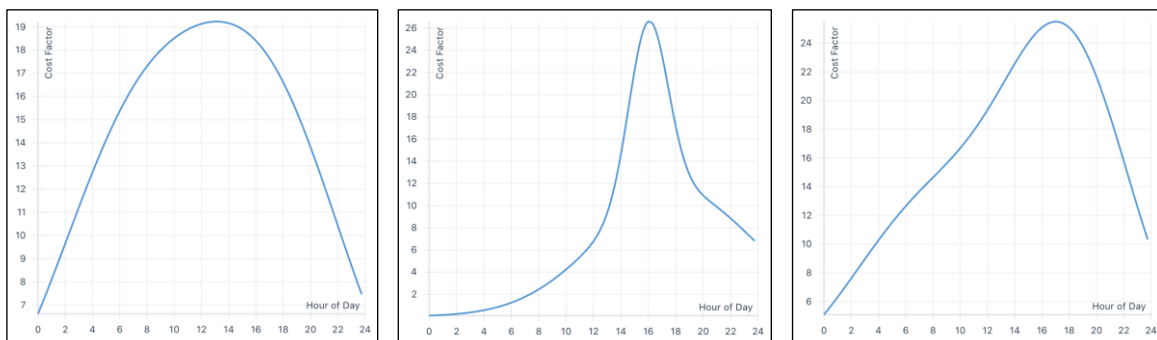
На основі класифікації генерується початковий добовий профіль (множник трафіку) “congestionFactor” (CF_h) – функція, що відображає відносну величину заторів для кожної години доби. Базовий профіль дискретизується з кроком 1 година, утворюючи масив $[t_h, CF_h]$. Після цього виконується:

- обчислення базового рівня $CF_{base} = percentile_{10}(CF_h)$;
- пошук локальних максимумів – значень, більших за сусідів і вищих за поріг значущості $1,3 \cdot CF_{base}$;
- вибір основних піків – два найвищі (за наявності), якщо вони перевищують $1,2 \cdot CF_{base}$;
- оцінка параметрів нормальних розподілів: $\mu_p = t_{peak}$, $\sigma_p = \frac{FWHM_p}{2,355}$ ($FWHM$ – ширина піку на рівні половини максимуму);
- обчислення амплітуди: $A_p = (CF_{peak,p} - CF_{base}) \cdot \alpha \cdot cityFactor \cdot distanceFactor \cdot dirFactor_p \cdot \rho$, де $CF_{peak,p}$ – пікове значення CF_h та $\alpha = 6$ – масштабний коефіцієнт.

Запропонований метод дозволяє автоматично будувати параметризовані добові профілі трафіку для кожного маршруту з урахуванням його типу, напрямку та індивідуальних особливостей. Це забезпечує коректну оцінку часової компоненти транспортних витрат у модифікованій транспортній задачі, зберігаючи обчислювальну ефективність та адаптивність системи планування перевезень.

Для практичної реалізації описаного підходу було розроблено інформаційну систему “ChronoLogix” – клієнт-серверний програмний комплекс, виконаний на сучасному стеку технологій з акцентом на продуктивність і інтерактивність. Система підтримує формування транспортної матриці на основі реальних геопросторових даних (інтеграція з картографічними та маршрутизуючими сервісами), інструменти для візуального редагування комірок і добових профілів та детальний аналіз рішення. В інформаційній системі адаптивного планування перевезень “ChronoLogix” реалізовано описаний вище метод класифікації маршрутів за трьома базовими категоріями: міські, приміські та шосейні (міжміські), при цьому додатково враховується напрямки руху – у місто (inbound) чи з міста (outbound).

На рис. 1 подано приклади згенерованих профілів трафіку для попередньо визначених базових категорій на основі автоматично побудованої по мапі (на території України) транспортної матриці. Зокрема, для міського маршруту (рис. 1а), є характерними найбільші значення множника трафіку, а криві мають більшу інтенсивність дорожніх заторів. Для приміського маршруту (рис. 1б) загальна інтенсивність нижча, присутні помірні колювання у денний час. Для шосейного (міжміського) маршруту (рис. 1в) відзначається низький базовий рівень заторів із вузьким помітним колюванням у ранковий або вечірній інтервал (позиція та інтенсивність цього піку корелюють з значенням inbound або outbound).



а) профілі трафіку для міських маршрутів

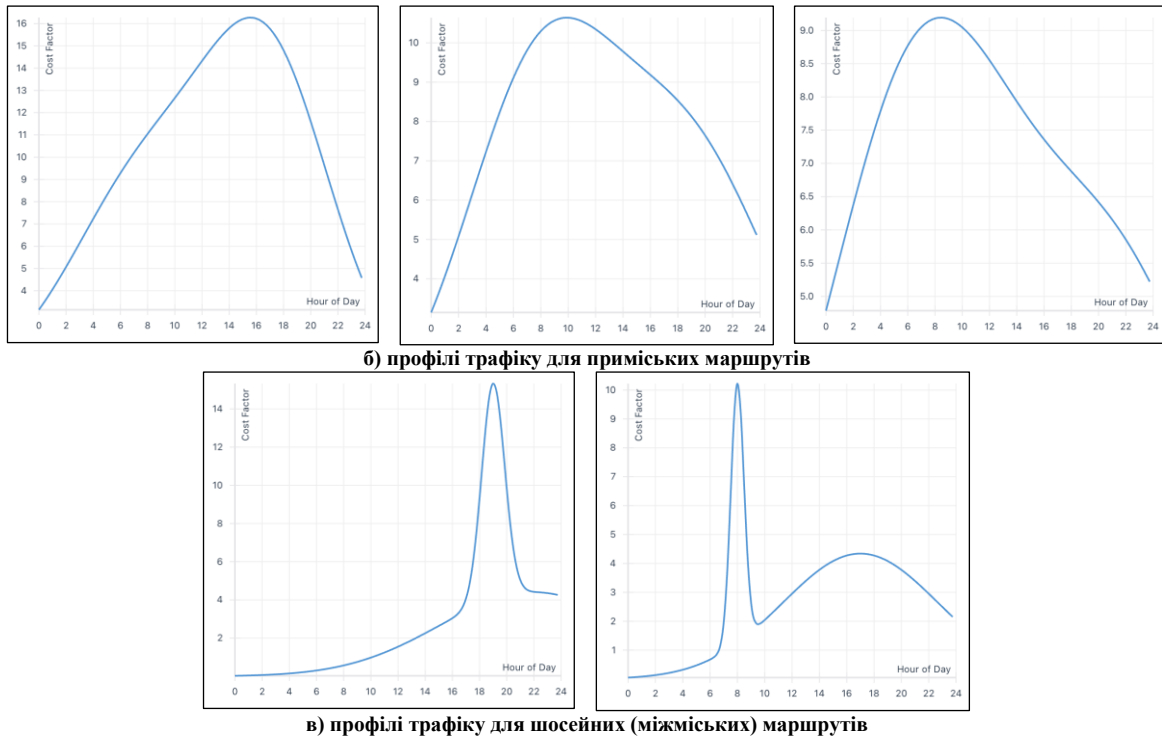


Рис. 1. Автоматично згенеровані профілі трафіку для трьох базових категорій маршрутів: міські, приміські та шосейні (міжміські)

На рис. 2 наведено скріншот інтерфейсу інформаційної системи з транспортною матрицею, що була використана для демонстрації наведених вище профілів.



Рис. 2. Інтерфейс інформаційної системи та автоматично побудована транспортна матриця

Обраний підхід до моделювання трафіку маршрутів дозволяє доволі точно моделювати криву зміни вартості $(c_{ij}^{(k)})$ перевезення протягом доби. На рис. 3 подано приклад такої побудованої кривої для міжміського та міського сценарію.

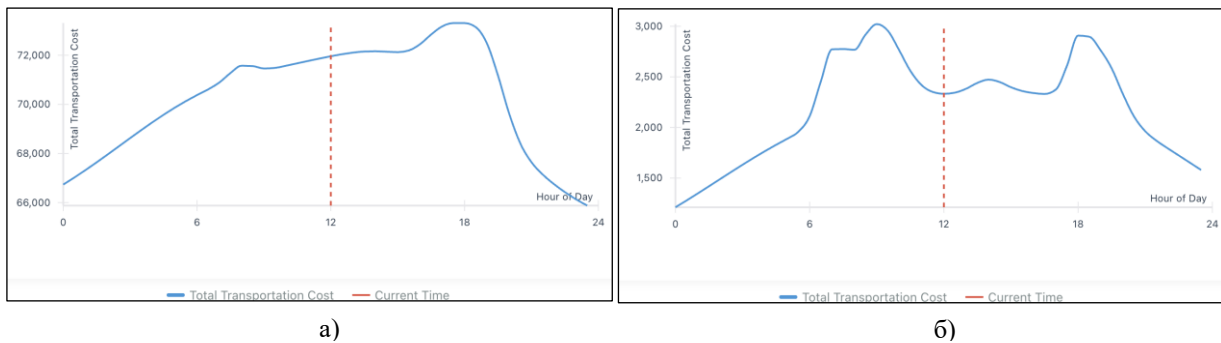


Рис. 3. Криві зміни вартості транспортування протягом дня в міжміському (а) та міському (б) варіантах

Автоматична генерація профілів у “ChronoLogix” дозволяє формувати інтерпретовані й відтворювані добові профілі для різних типів маршрутів та ілюструє практичну дію часової компоненти на результати оптимізації.

Таким чином контекстно-залежне формування функції множника трафіку (CF_h) є ключовим для коректного відтворення часової компоненти витрат $f_{ij}(t_k)$. Сукупність механізмів класифікації маршрутів, визначення контекстних множників, а також застосування зсувів і стохастичних корекцій формує добові профілі навантаження, які безпосередньо впливають на якість прийнятих рішень у процесі адаптивного планування. Відтак розроблення та калібрування генератора множника трафіку становить центральну інженерну задачу при створенні практично орієнтованої системи.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У роботі представлено компактний та обчислювально ефективний метод автоматичної апроксимації добових профілів трафіку, інтегрований із модифікованою транспортною задачею, що враховує часову варіацію транспортних витрат. Запропонований підхід базується на параметричному поданні функції множника трафіку у вигляді комбінації щільностей нормальних розподілів, параметри яких визначаються автоматично з урахуванням класифікації маршруту, контекстних множників, випадкових корекцій та зсувів. Використання базової класифікації (міські, приміські та шосейні маршрути) у поєднанні з набором контекстних факторів дало змогу отримати інтерпретовані добові профілі, придатні для інтеграції у системи адаптивного планування перевезень.

Експериментальні результати показали, що автоматично згенеровані профілі адекватно відображають відмінності у динаміці трафіку між різними класами маршрутів та напрямками руху. Разом з тим, отримані дані підкреслюють необхідність локального калібрування моделі для досягнення більшої відповідності реальним умовам, зокрема шляхом уточнення контекстних множників, адаптації шаблонів профілів під конкретні регіони та врахування додаткових факторів, таких як сезонність, погодні умови й планові обмеження руху

Подальший розвиток методу доцільно спрямувати на підвищення точності моделювання за рахунок розширення класифікації маршрутів, автоматизованого підбору параметрів на основі даних лічильників та телеметрії, а також розробки гібридних схем, що поєднують параметричну апроксимацію з алгоритмами машинного навчання. Перспективним є впровадження механізмів динамічного оновлення профілів у режимі близькому до реального часу, що дозволить системі оперативно реагувати на зміни транспортної ситуації та зберігати актуальність планувальних рішень.

References

1. Oracle Transportation Management. Oracle. URL: <https://www.oracle.com/scm/logistics/transportation-management/> (дата звернення: 28.07.2025).
2. SAP Transportation Management. SAP. URL: <https://www.sap.com/products/scm/transportation-logistics/product-tour.html> (дата звернення: 28.07.2025).
3. Blue Yonder Transportation Management. Blue Yonder. URL: <https://blueyonder.com/solutions/transportation-management> (дата звернення: 28.07.2025).
4. Kuebix TMS. Kuebix. URL: <https://www.kuebix.com/kuebix-tms/> (дата звернення: 28.07.2025).
5. Regehr, J. D., Montufar, J., & Hernandez-Vega, H. (2015). Traffic Pattern Groups Based on Hourly Traffic Variations in Urban Areas. *Journal of Transportation of the Institute of Transportation Engineers*, 7(1), 1–16.
6. Nagasaki, K., Kato, S., Nakanishi, W., & Jones, M. C. (2022). Traffic Count Data Analysis Using Mixtures of Kato–Jones Distributions. *arXiv preprint arXiv:2206.01355*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.01355>
7. Yevsieieva, I., Hrytsenko, O., & Balaban, V. (2025). LSTM networks in traffic forecasting and optimization: capabilities, challenges and future prospects. *Herald of Khmelnytskyi national university. Series «Technical sciences»*, 353, 24–34. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-24>
8. Plyuta, D., Hrebenuk, S., & Kosenko, V. (2023). Method for agent-oriented traffic prediction under data and resource constraints. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 4, 105–116. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-4-10>
9. Abou El-Magd, A. (2020). Traffic management in residential areas: Case study the south district of Luxor City, Egypt. *ARChive: IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development*, 3(2), 277–294. <https://doi.org/10.21625/archive.v3i2.513>