

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656:338

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.313-320](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.313-320)

Д. В. Голуб, доц., канд. техн. наук, В. В. Аулін, проф., д-р техн. наук,

Р. П. Кічура, О. Ю. Ювженко

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: Dimchik529@gmail.com, AulinVV@gmail.com, romnik83@ukr.net, 40101001@gmail.com*

Визначення сукупності факторів ефективності функціонування автомобільних транспортних систем математичними методами аналізу

Проведено аналіз факторів визначення ефективності автомобільних транспортних систем за допомогою математичних методів. Виявлені найбільш впливові показники, що відображають кількісну характеристику властивостей цієї складної системи і дають можливість оцінити ступінь відповідності фактичного результату транспортних операцій бажаному. Показано, що ефективність таких операцій може бути оцінена різними математичними методами. Використовуючи дані методи можна визначити ймовірність безвідмовної роботи транспортної системи в конкретний період часу, якщо метою транспортних операцій є підвищення їх якості і надійності.

З'ясовано фактори, які враховуються при дослідженні ефективності автомобільних транспортних систем. Показано, що велика частка факторів не контролюється особою, яка приймає рішення. Здійснено їх розподіл та наведено детальну класифікацію.

Виявлено, що при дослідженні автомобільних транспортних систем з факторами, що мають випадкову природу значень, широко використовуються ймовірнісно-статистичні математичні методи. Вони дозволяють встановити розподіли випадкових змінних факторів. В той же час дослідження ефективності функціонування досліджуваних транспортних систем з урахуванням факторів нестохастичної природи, що є невизначеними, значно ускладнюється відсутністю загальної математичної теорії, що формує методологічні основи вивчення явищ з невизначеними факторами. Проте, застосування методів прикладної математики, як теорій ігор, прийняття рішень, а також нечітких множин, дозволяє знайти необхідні шляхи розв'язання поставлених завдань при наявності невизначеності, що має нестохастичний характер.

Розглянуто поняття функцій приналежності з позицій елементів теорії чітких і нечітких множин. Наведено різні варіанти таких функцій в аналітичній та графічній формах. Зазначено, що такі функції задають деяку підмножину або підобласть загальної допустимої області зміни факторів. Визначено, що підобласть, яка визначається функцією приналежності, в деякому розумінні відображає міру невизначеності досліджених факторів. Показано, що чим менша підобласть, що визначається функцією приналежності, тим менша міра невизначеності факторів. Визначено, що нечітка множина повністю описується своєю функцією приналежності і використовується як позначення нечіткої великої множини факторів. Виявлено, що нечітка множина є порожньою, якщо її функція приналежності дорівнює нулю для усіх елементів транспортної системи.

Розглянуто перетворення невизначених випадкових факторів ефективності автомобільних транспортних систем за допомогою методу рандомізації, який може бути досліджено поєднанням методів теорії ймовірності і математичної статистики.

автомобільна транспортна система, фактор, ефективність, операція, функція приналежності, рандомізація, ймовірність, експертне оцінювання, множина факторів

Постановка проблеми. Ефективність функціонування автомобільної транспортної системи полягає у здатності забезпечувати результат її роботи, враховуючи умови експлуатації та методи застосування активних засобів управління [1-3]. Головною метою управління автомобільною транспортною системою є максимізація ефективності використання активних засобів під час виконання поставлених завдань.

Показники ефективності відображають кількісну характеристику властивостей системи та дають можливість визначити ступінь відповідності фактичного результату транспортних операцій бажаному [4-6]. Ці показники можуть мати ті ж одиниці вимірювання, що і показники якості, або бути безрозмірними. Розподіл показників ефективності, які описують роботу автомобільної транспортної системи, на показники якості і ефективності є відносним та залежить від характеру розв'язуваних завдань [7, 8]. На основі цих показників розробляється правило вибору оптимального способу використання активних засобів у стратегічних транспортних операціях, яке ґрунтується на критеріях ефективності функціонування транспортної системи.

У процесі дослідження ефективності роботи автомобільних транспортних систем використовуються методологічні підходи, що базуються на експериментальних дослідженнях та моделюванні, передусім математичному. Після цього відбувається вибір пріоритетної мети та організовується виконання операцій для її досягнення. Ефективність таких операцій може бути оцінена різними способами. Це можливо здійснити через імовірність безвідмовної роботи транспортної системи в конкретний період часу. При цьому метою реалізації транспортних операцій є підвищення їх якості та надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед факторів, які враховуються при дослідженні ефективності автомобільних транспортних систем, велика їхня частка не контролюється особою, яка приймає рішення [1, 2, 4, 9, 14]. Це стосується передусім об'єктивних законів природи і громадського розвитку, які необхідно враховувати у будь-якому випадку [6, 14]. Неконтрольованими є й такі фактори: погодні умови, дії конкурентів та ін. [10, 15]. Останні фактори характеризують умови функціонування автомобільних транспортних систем.

До керованих факторів належать ті, на які особа, що приймає рішення, здатна впливати на свій розсуд. Це означає, що такими факторами можна управляти під час планування та реалізації транспортних операцій [11]. До цієї категорії належать фактори, які визначають особливості функціонування автомобільних транспортних систем [16]. При цьому зазначимо, що стратегії розвитку таких транспортних систем формуються з безлічі керованих факторів, а умови застосування можуть формуватися як з множини керованих, так і некерованих факторів.

Зовнішні фактори як корисні, так і шкідливі, визначають вплив навколишнього середовища, який може як сприяти ефективному виконанню транспортних операцій, так і перешкоджати їхньому успіху. Внутрішні фактори описують взаємодію рушійних сил у межах транспортних систем, що впливає на хід та підсумок виконання операцій [1, 6, 7, 14, 16].

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка методологічного підходу щодо з'ясування факторів визначення ефективності функціонування автомобільних транспортних систем за допомогою математичних методів аналізу.

Виклад основного матеріалу. При дослідженні ефективності функціонування автомобільних транспортних систем використовуються фактори, класифікація яких наведена на рис. 1.

З інформативної точки зору про змінні фактори в автомобільних транспортних системах їх можливо поділити на визначені Λ_F і невизначені Λ_Ω . До визначених факторів належать змінні, значення яких точно відомі. Це можуть бути задані параметри, регулярні функції конкретних аргументів тощо. До цієї категорії також відносяться контрольовані вхідні впливи, включаючи керовані величини.

До невизначених факторів належать ті значення, які у реальних процесах автомобільних транспортних систем відомі лише частково. Джерела невизначеності цих факторів (змінних) можуть мати різну природу. Здебільшого їх поділяють на дві категорії: випадкові змінні Λ_E та змінні з нестохастичною природою невизначеності Λ_J .

Коли відомий розподіл випадкової змінної, її вважають статистично визначеною. Випадкові змінні з невідомим розподілом поділяються на два типи:

- що мають відомі параметри (статистичні характеристики) розподілу;
- що мають невідомі параметри (статистичні характеристики).

При дослідженні автомобільних транспортних систем з випадковими факторами широкого застосування набувають ймовірностно-статистичні методи. Це методи параметрично-статистичного аналізу, які дозволяють визначати параметри розподілення випадкових змінних, спираючись на результати статистичних випробувань, коли це можливо. Методи непараметричного оцінювання застосовуються для встановлення розподілів випадкових змінних.



Рисунок 1 – Схема класифікації факторів визначення ефективності автомобільних транспортних систем

Джерело: розроблено авторами

Нестохастична невизначеність зазвичай виникає внаслідок таких обставин:

- існує цілеспрямована протидія з боку конкуруючої транспортної системи, дії якої залишаються невідомими – поведінкова невизначеність Λ_J^B ;
- недостатній рівень дослідження окремих явищ, які супроводжують робочий процес транспортної системи – природна невизначеність Λ_J^N ;
- нечітке уявлення мети транспортних операцій у відповідності до реального її результату, який створює можливість різного тлумачення, тобто викликає цільову невизначеність $\Lambda_J^{A_0}$.

Невизначені фактори нестохастичного характеру Λ_J можна умовно класифікувати на дві категорії:

- для яких відомі функції приналежності та діапазони значень змінних;
- для яких функції приналежності залишаються невідомими.

Найбільша невизначеність виникає у випадку факторів, для яких не визначені функції приналежності. Як правило, до таких факторів застосовують метод експертного оцінювання для встановлення діапазону їх можливих значень.

Аналіз ефективності автомобільних транспортних систем, який враховує невизначені фактори нестохастичного характеру, значно ускладнюється через відсутність достатньо універсальної математичної теорії, що формує методологічні основи вивчення явищ з невизначеними факторами. Проте, застосування теорій нечітких множин, ігор та прийняття рішень створює можливість знаходження певних підходів до аналізу ефективності транспортних систем в умовах значної нестохастичної невизначеності.

Функції приналежності відображають певні судження в кількісній мірі. Вони задають деяку підмножину або підобласть загальної допустимої області зміни фактора. Підобласть, що визначається функцією приналежності, в деякому розумінні відображає міру невизначеності фактора. Зрозуміло, чим менша підобласть, що визначається функцією приналежності, тим менша міра невизначеності фактора [12, 13]. У межі функції приналежності, якщо виділяється одне значення фактора, то переводять його в розряд певних факторів.

Розглянемо поняття функції приналежності з позицій елементів теорії чітких і нечітких множин. Поняття функції приналежності нечіткої множини є досить широке узагальнення функції приналежності звичайної множини.

Нехай A є підмножина універсальної множини D . Елементами цієї множини є $d_i (d_i \in D)$. Нехай функція приналежності $\mu_A(d)$, що характеризує міру приналежності елемента d_i підмножині A , відображається на відрізок $[0, 1]$.

Для звичайної множини функція приналежності є релейною, тобто набуває значень:

$$\mu_A(d) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } d \in A; \\ 0, \text{ якщо } d \notin A. \end{cases} \quad (1)$$

Звичайні множини можна розглядати, як окремі випадки великих нечітких множин. Нечітка підмножина A , що є складовою універсальної множини D визначається за допомогою функції приналежності $\mu_A(d): D \rightarrow [0, 1]$, яка кожному елементу $d_i \in D$ ставить у відповідність число $\mu_A(d)$ з заданого відрізка $[0, 1]$, що характеризує міру приналежності елемента d_i підмножині A .

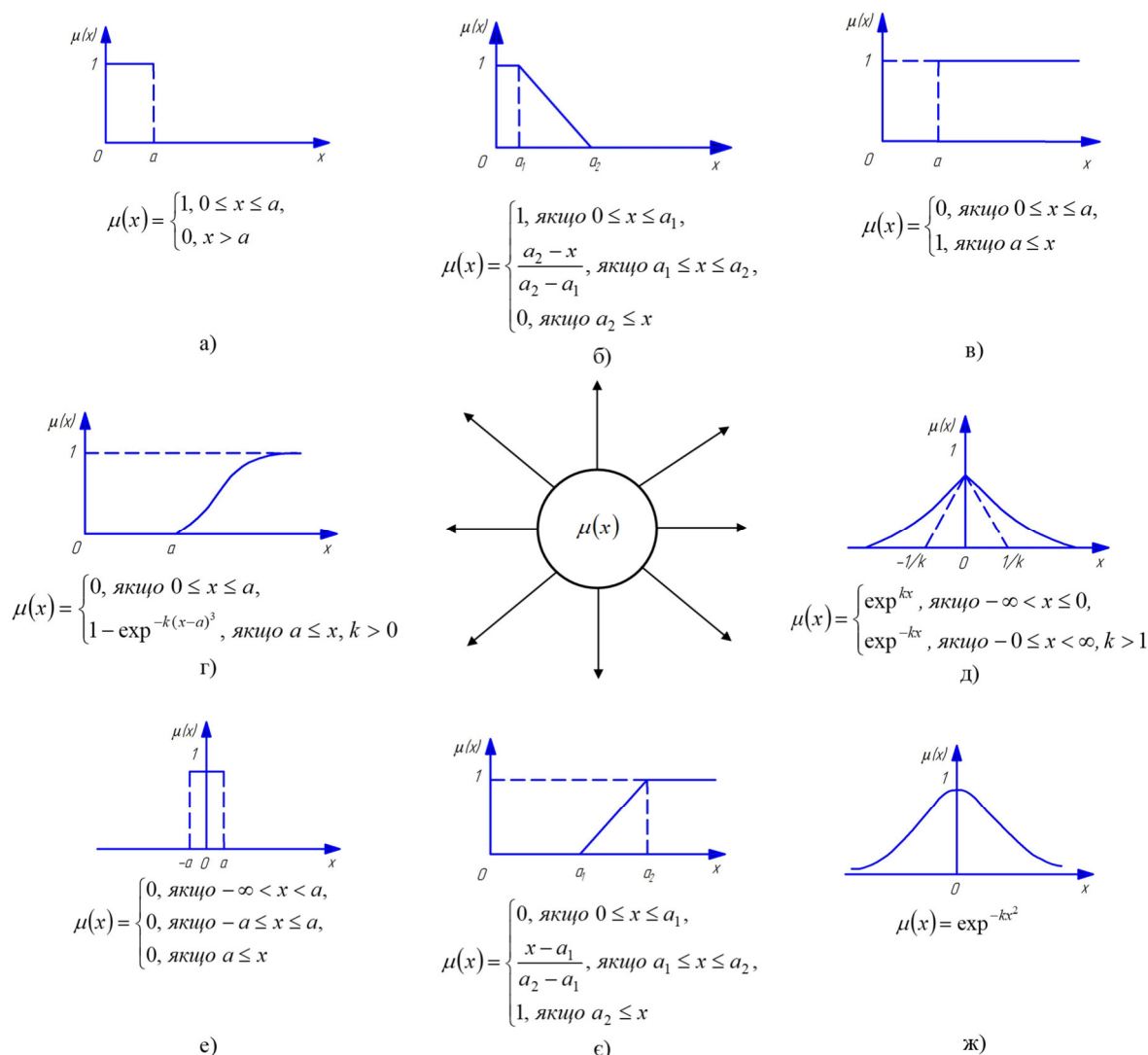
Нечітка множина повністю описується своєю функцією приналежності і тому її зазвичай використовують як позначення нечіткої великої множини. Вона вважається порожньою, якщо функція її приналежності для всіх елементів має значення нуль:

$$\mu_o(d) = 0, \text{ для будь-яких } \forall d_i \in A. \quad (2)$$

Звичайна множина, функція приналежності якої відмінна від нуля, є носієм нечіткої множини $\mu_A(d)$. З цими даними можна поступати як із звичайним статистичним матеріалом й отримати певну усереднену функцію приналежності. Типові види функцій приналежності наведені на рис. 2.

Розглянемо як здійснюється перетворення невизначених факторів в розряд випадкових. Деякі невизначеності, які мають нестохастичний характер, іноді можливо перетворити на випадкові фактори за рахунок використання методу рандомізації. Рандомізація полягає у штучному додаванні елемента випадковості в умови, де вона спочатку відсутня. При аналізі ефективності функціонування автомобільних транспортних систем для пошуку об'єктів може бути відома лише приблизна область

розташування певного об'єкта. Розташування об'єкта є визначеним, але можна припустити, що в межах заданої області воно підпорядковується рівномірному ймовірнісному розподілу. Таким чином, штучно створюється випадковість у визначенні положення об'єкта. Подальший аналіз цієї рандомізації можливий за допомогою методів теорії ймовірностей і математичної статистики.



а-ж) графічно-аналітичні відображення функцій приналежності
Рисунок 2 – Типові види функцій приналежності

Джерело: розроблено з використанням джерел [12, 13]

Функцію приналежності також подають у формі лінгвістичної змінної, тобто змінної, значення якої описуються словесними виразами. Наприклад, категорія «складність» у контексті автомобільної транспортної системи є лінгвістичною змінною, а її можливі значення можуть формулюватися як: не складною, не дуже складною, складною, досить складною, дуже складною.

У певному класі автомобільних транспортних систем лінгвістична змінна визначає нечітку множину (рис. 3). Для значення «складна система» функція приналежності $\mu_{\Omega}(x)$ формує відповідну нечітку підмножину всередині загальної множини систем, які відрізняються кількістю зв'язків між їхніми елементами.

На практиці для визначення функції приналежності часто використовують експертне опитування, щоб встановити частку експертів, які при заданому значенні x класифікують транспортну систему як складну. Ця частка експертів приймається як значення функції приналежності $\mu_Q(x)$. Наприклад, якщо з десяти експертів четверо класифікували транспортну систему з 20 зв'язками як складну, тоді значення функції приналежності становить $\mu_Q(x) = 0,4$.

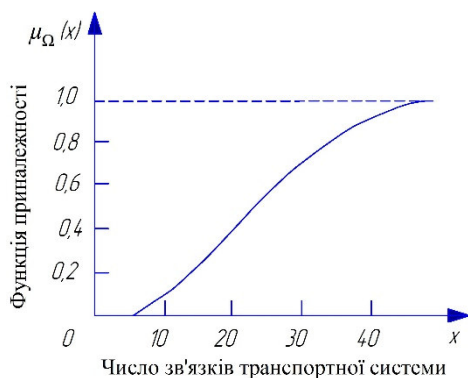


Рисунок 3 - Функція приналежності нечіткої множини складних автомобільних транспортних систем

Джерело: розроблено авторами

Слід також зазначити, що для характеристики невизначених факторів, які не є стохастичними, застосовують суб'єктивну ймовірність і аналіз автомобільних транспортних систем базується на методах теорії ймовірностей. Однак використання суб'єктивної ймовірності може призвести до того, що закон великих чисел не діятиме. Зазвичай така ймовірність визначається шляхом експертного оцінювання.

Висновки. 1. З'ясовано фактори, які враховуються при дослідженні ефективності функціонування автомобільних транспортних систем, наведена їх класифікація. Визначено, що більша частка яких не контролюється особою, яка приймає рішення.

2. Виявлено, що при дослідженні автомобільних транспортних систем з випадковими факторами широко використовуються ймовірнісно-статистичні математичні методи, що дозволяють встановити їхні розподіли як випадкових змінних.

3. Встановлено обставини введення функції приналежності, її трактування з позицій елементів теорії чітких і нечітких множин. Наведено різні варіанти таких функцій в аналітичній та графічній формах.

4. Розглянуто перетворення невизначених факторів ефективності функціонування автомобільних транспортних систем в розряд випадкових та застосування суб'єктивної ймовірності й визначення її методом експертного оцінювання.

Список літератури

1. Ачкасова Л.М. Обґрунтування факторів ефективності перевезення вантажів. *Економіка транспортного комплексу*. Вип. 25, 2015. С. 145-153.
2. Аулін В.В., Біліченко В.В., Голуб Д.В. та ін. Методологія підходів до дослідження шляхів і сукупності факторів забезпечення належного рівня ефективності і надійності транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту*, №2, 2017. С. 4-14.
3. Аулін В.В., Голуб Д.В. Реалізація фізико-інформаційного підходу дослідження проблеми підвищення надійності та ефективності функціонування транспортних систем. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Харків: ХНАДУ, Вип. 81, 2018. С. 3-10.

4. Аулін В.В., Біліченко В.В., Голуб Д.В. та ін. Формування показників оцінки ефективності транспортного процесу перевезень. *Вісник машинобудування та транспорту*, №1(11), 2020. С.5-10.
5. Аулін В.В., Голуб Д.В., Лисенко С.В. та ін. Оцінка працездатності автомобільних транспортних систем на основі математичних методів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*, №22, 2020. С. 262-271.
6. Аулін В.В., Біліченко В.В., Голуб Д.В. та ін. Особливості дослідження ефективності транспортних систем на етапах життєвого циклу. *Вісник машинобудування та транспорту*, №13(1), 2021. с. 4-12.
7. Волобуєва Т. В., Сирота В. М., Мастепан С. М. та ін. Формування умов ефективного функціонування транспортної системи автотранспортного підприємства. *Вісник машинобудування та транспорту*, №1(19), 2024. С. 21-28.
8. Голуб Д.В. Методи та підходи до моделювання ефективності цілей операцій в транспортних системах. *Вісник ЦНТУ. Технічні науки*. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 5(36). Ч.1 С. 317-327.
9. Голуб Д.В., Аулін В.В., Біліченко В.В. та ін. Реалізація системного підходу при визначенні ефективності функціонування складних регіональних транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту*, №15(1), 2022. С. 6-14.
10. Голуб Д.В. Підвищення ефективності управління технологічним процесом доставки на основі аналізу статичних та динамічних резервів транспортної системи. *Вісник ЦНТУ. Технічні науки*. Кропивницький: ЦНТУ, Вип. 7(38). Ч.1, 2023. С. 214-221.
11. Голуб Д.В., Біліченко В.В., Аулін В.В. та ін. Забезпечення та підвищення надійності й ефективності процесу автомобільних вантажних перевезень побудовою дерева відмов структурних елементів транспортної системи. *Вісник машинобудування та транспорту*, №18(2), 2023. С. 46-55.
12. Желдак Т.А., Коряшкіна Л.С., Ус С.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень: навч. посіб. М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП», 2020. 387 с.
13. Ус С.А., Коряшкіна Л.С. Моделі й методи прийняття рішень: навч. посіб. М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». 2-ге вид. випр. Дніпро: НТУ «ДП», 2018. 300 с.
14. Gu, Y., Fu, X., Liu, Z., Xu, X., & Chen, A. Performance of transportation network under perturbations: reliability, vulnerability and resilience. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 133 (1), 2020. pp. 204-211.
15. Miller-Hooks E., Zhang X., Faturechi R. Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks. *Comput Operations Res*, Vol.39, 2012. pp. 1633-1643.
16. Shofiq A., Kakan D. Resilience modeling concepts in transportation systems: a comprehensive review based on mode, and modeling techniques. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, Vol. 1, № 8, 2020. pp. 1-20.

References

1. Achkasova, L. M. (2015). Justification of efficiency factors of freight transportation. *Ekonomika transportnoho kompleksu*, 25, 145–153 [in Ukrainian].
2. Aulin, V. V., Bilichenko, V. V., Holub, D. V., et al. (2017). Methodology of approaches to researching ways and factors ensuring transport efficiency and reliability. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 2, 4–14 [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., & Holub, D. V. (2018). Implementation of the physical-information approach to improving transport reliability and efficiency. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, 81, 3–10 [in Ukrainian].
4. Aulin, V. V., Bilichenko, V. V., Holub, D. V., et al. (2020). Formation of indicators to evaluate transportation process efficiency. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 1(11), 5–10 [in Ukrainian].
5. Aulin, V. V., Holub, D. V., Lysenko, S. V., et al. (2020). Performance assessment of automotive transport systems using mathematical methods. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*, 22, 262–271 [in Ukrainian].
6. Aulin, V. V., Bilichenko, V. V., Holub, D. V., et al. (2021). Features of transport efficiency evaluation at life-cycle stages. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 13(1), 4–12 [in Ukrainian].
7. Volobuieva, T. V., Syrota, V. M., Mastepan, S. M., et al. (2024). Formation of conditions for efficient operation of enterprise transport systems. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 1(19), 21–28 [in Ukrainian].
8. Holub, D. V. (2022). Methods and modeling approaches to efficiency of transport systems operations. *Visnyk TsNTU. Tekhnichni nauky*, 5(36)(1), 317–327 [in Ukrainian].
9. Holub, D. V., Aulin, V. V., Bilichenko, V. V., et al. (2022). System approach for evaluating regional transport system efficiency. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 15(1), 6–14 [in Ukrainian].

10. Holub, D. V. (2023). Improving technological delivery process efficiency based on dynamic/static reserve analysis. *Visnyk TsNTU. Tekhnichni nauky*, 7(38)(1), 214–221 [in Ukrainian].
11. Holub, D. V., Bilichenko, V. V., Aulin, V. V., et al. (2023). Reliability and effectiveness of freight operations using structural failure tree analysis. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 18(2), 46–55 [in Ukrainian].
12. Zheldak, T. A., Koriashkina, L. S., & Us, S. A. (2020). Fuzzy sets in decision-making systems: Textbook. Dnipro: NTU "DP" [in Ukrainian].
13. Us, S. A., & Koriashkina, L. S. (2018). Models and methods of decision-making: Textbook (2nd ed.). Dnipro: NTU "DP" [in Ukrainian].
14. Gu, Y., Fu, X., Liu, Z., Xu, X., & Chen, A. (2020). Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability and resilience. *Transportation Research Part E*, 133, 204–211.
15. Miller-Hooks, E., Zhang, X., & Faturechi, R. (2012). Measuring and maximizing resilience of freight networks. *Computers & Operations Research*, 39, 1633–1643.
16. Shofiq, A., & Kakan, D. (2020). Resilience modeling concepts in transport systems: A comprehensive review. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 1(8), 1–20.

Dmytro Holub, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Viktor Aulin**, Prof., DSc., **Ruslan Kichura**, **Oleksandr Yuvzenko**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Determination of the Set of Factors of Efficiency of Functioning of Automobile Transport Systems by Mathematical Methods of Analysis

An analysis of the factors determining the efficiency of automobile transport systems using mathematical methods has been conducted. The most influential indicators reflecting the quantitative characteristics of this complex system have been identified, allowing for an assessment of the degree of correspondence between the actual results of transport operations and the desired outcomes. It has been shown that the efficiency of such operations can be evaluated using various mathematical methods. By applying these methods, it is possible to determine the probability of the transport system's reliable operation over a specific period if the goal of transport operations is to enhance their quality and reliability.

The factors considered in the study of the efficiency of automobile transport systems have been identified. It has been demonstrated that a significant portion of these factors is beyond the control of the decision-maker. These factors have been categorized, and a detailed classification has been provided.

It has been revealed that in the study of automobile transport systems involving factors with stochastic variability, probability-statistical mathematical methods are widely used. These methods allow for determining the distributions of random variable factors. At the same time, assessing the efficiency of transport system operations while considering factors of a non-stochastic nature, which are uncertain, is significantly complicated by the lack of a general mathematical theory that forms a methodological basis for studying phenomena with uncertain factors. However, the application of applied mathematics methods, such as game theory, decision-making theory, and fuzzy set theory, enables the development of solutions to problems under conditions of uncertainty of a non-stochastic nature.

The concept of membership functions has been examined from the perspective of elements of crisp and fuzzy set theories. Various forms of such functions in both analytical and graphical representations have been presented. It has been noted that these functions define a certain subset or subregion of the overall permissible range of factor variations. It has been determined that the subregion defined by the membership function, in a certain sense, reflects the degree of uncertainty of the studied factors. It has been shown that the smaller the subregion determined by the membership function, the lower the degree of uncertainty of the factors. It has been established that a fuzzy set is fully described by its membership function and is used to represent a large and imprecisely defined set of factors. It has also been found that a fuzzy set is empty if its membership function equals zero for all elements of the transport system.

The transformation of uncertain random factors affecting the efficiency of automobile transport systems has been examined using the method of randomization. This method can be analyzed through a combination of probability theory and mathematical statistics methods.

automobile transport system, factor, efficiency, operation, membership function, randomization, probability, expert assessment, set of factors

Одержано (Received) 11.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 14.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 25.11.2025