

К. М. Березька, доц., канд. техн. наук, **О. С. Шевчук**, доц., канд. техн. наук,

П. В. Панасюк, проф., д-р техн. наук

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

І. С. Мурований, доц., канд. техн. наук

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

e-mail: k.berezka@wupn.edu.ua, oksana_shevchuk84@ukr.net, tina.panasjuk@gmail.com,

igor_lntu@ukr.net

Математичне моделювання транспортної конфліктності для оцінювання небезпеки для проектних рішень на вулично-дорожній мережі міст

Метою статті є розроблення підходу до оцінювання безпеки дорожнього руху на основі математичного моделювання транспортної конфліктності на міських перехрестях. Дослідження спрямоване на встановлення залежності між показником конфліктності та інтенсивністю транспортних потоків, а також обґрунтування можливості його використання для виявлення небезпечних транспортних вузлів.

У роботі використано методи аналізу інтенсивності транспортних потоків та розрахунків показника конфліктності m , який враховує кількість і тип конфліктних точок на перехрестях. Дослідження проведено для ключових транспортних вузлів м. Тернопіль у ранковий та вечірній пікові періоди. Виконано кореляційний аналіз, за результатами якого встановлено помірний прямий зв'язок між показником конфліктності та інтенсивністю руху (коефіцієнти кореляції $r=0,611$ та $r=0,600$). Побудовано лінійну регресійну модель, яка описує залежність інтенсивності руху від показника конфліктності та показує, що зі зростанням складності транспортного вузла збільшується його завантаження. Отримані результати узгоджуються з сучасними підходами до оцінювання безпеки дорожнього руху на основі аналізу конфліктних ситуацій. Також встановлено вплив просторової структури міста та розподілу транспортних потоків на формування зон підвищеного ризику.

Результати дослідження підтверджують, що математичне моделювання транспортної конфліктності є ефективним інструментом оцінювання складності локальних перехресть та подальших проектних рішень на вулично-дорожній мережі. Показник конфліктності може використовуватися для раннього виявлення потенційно небезпечних транспортних вузлів. Розроблена модель дозволяє оцінювати рівень транспортного навантаження залежно від складності перехрестя та може бути використана при прийнятті управлінських та проектних рішень у сфері організації дорожнього руху. Запропонований підхід доцільно застосовувати при розробці схем організації дорожнього руху та плануванні розвитку міської транспортної інфраструктури. Отримані результати сприяють підвищенню рівня безпеки дорожнього руху та ефективності функціонування міських транспортних систем.

безпека дорожнього руху, транспортна конфліктність, математичне моделювання, інтенсивність руху, транспортні вузли

Постановка проблеми. Сучасний стан вулично-дорожньої мережі міст України характеризується суттєвим дисбалансом між рівнем автомобілізації та пропускнуою здатністю інфраструктури. У містах середнього розміру, зокрема в м. Тернопіль, спостерігається концентрація транспортних потоків у центральній частині міст, що призводить до зростання аварійності та транспортних заторів.

Аналіз статистичних даних свідчить про зростання кількості дорожньо-транспортних пригод із потерпілими, що пов'язано не лише з інтенсивністю руху, а й зі складністю транспортних вузлів. У таких умовах традиційні підходи до організації дорожнього руху виявляються недостатньо ефективними.

Одним із перспективних напрямів підвищення безпеки є використання методів математичного моделювання, які дозволяють здійснювати превентивний аналіз небезпечних ситуацій на основі оцінки конфліктності транспортних потоків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних закордонних дослідженнях безпеки дорожнього руху домінують два підходи: аналіз впливу швидкості на ймовірність і тяжкість наслідків ДТП та оцінювання небезпеки на основі конфліктних ситуацій. У межах моделі потужності доведено нелінійний зв'язок між зміною середньої швидкості та наслідками ДТП: зростання швидкості значно сильніше впливає на тяжкі та смертельні пригоди, ніж на загальну аварійність [1 – 2]. Водночас у роботі [4] експериментально доведено, що контроль середньої швидкості є ефективним інструментом зниження як швидкості транспортного потоку, так і кількості ДТП. Паралельно активно розвиваються методи непрямого оцінювання безпеки дорожнього руху та метод аналізу транспортних конфліктів, які дозволяють оцінювати небезпеку транспортних вузлів за такими непрямими показниками, як час до зіткнення та час після звільнення конфліктної зони та параметри зближення транспортних засобів [5, 6]. Сучасні оглядові дослідження підтверджують, що такі методи є ефективним інструментом проактивного виявлення небезпечних ділянок, особливо на перехрестях і в умовах складної міської мережі [5, 6].

У вітчизняних дослідженнях значна увага приділяється оцінюванню безпеки дорожнього руху та аналізу причин ДТП. Зокрема, у роботі [7] показано, що оцінювання безпеки дорожнього руху має базуватися на комплексному аналізі показників аварійності та характеристик транспортних потоків, що є важливим підґрунтям для дослідження конфліктності транспортних вузлів, тоді як у дослідженні [8] встановлено, що порушення правил використання засобів регулювання дорожнього руху є однією з вагомих причин аварійності. У роботі [9] показано, що аналіз інтенсивності транспортних потоків є ефективним інструментом виявлення проблемних транспортних вузлів та обґрунтування заходів щодо підвищення безпеки дорожнього руху. У роботі [10] досліджено конфліктні точки на складних міських перехрестях та запропоновано заходи щодо підвищення їхньої ефективності. Доцільність застосування математичних і аналітичних підходів у транспортній галузі розглянуто у роботах [11–12], зокрема в [11] розглянуто питання модернізації транспортних систем середніх міст в роботі [12] – використання математичних методів у транспортній логістиці.

Разом із тим недостатньо дослідженим залишається питання узгодження показників конфліктності транспортних вузлів з інтенсивністю руху в пікові періоди, що й визначає актуальність цього дослідження.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка підходу до оцінювання безпеки транспортних вузлів на основі математичного моделювання конфліктності транспортних потоків.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- проаналізувати інтенсивність транспортних потоків;
- визначити показник конфліктності транспортних вузлів;
- встановити залежність між інтенсивністю руху та показником конфліктності;
- обґрунтувати напрями підвищення безпеки дорожнього руху.

Виклад основного матеріалу. Вплив інтенсивності транспортних потоків на безпеку дорожнього руху в Тернополі є визначальним чинником, оскільки радіальна структура міста змушує основні маси автомобілів концентруватися в центральній частині та на кількох ключових розв'язках. Аналіз наявної картограми дозволяє простежити чітку залежність між рівнем завантаженості доріг та рівнем небезпеки окремого перехрестя. На ділянках із максимальною інтенсивністю, таких як Дамба або вулиця Руська, висока щільність потоку призводить до зниження середньої швидкості,

що мінімізує кількість фатальних випадків, проте провокує масові дрібні зіткнення через недотримання безпечної дистанції.

Водночас зони середньої інтенсивності, зокрема Об'їзна дорога та вулиця Микулинецька, виявляються найбільш небезпечними з точки зору тяжкості наслідків. Наявність вільного простору при достатньо щільному потоці спонукає водіїв до перевищення швидкісного режиму, що стає причиною кожної другої аварії в регіоні та часто призводить до перекидань або лобових зіткнень. Особливу загрозу становлять перевантажені вузли, а саме район Ватри або розв'язка на проспекті Злуки, де надмірне скупчення транспорту змушує водіїв здійснювати ризиковані маневри обгону та перестроювання, намагаючись подолати затори.

Висока інтенсивність руху на магістральних вулицях також створює критичні ризики для вразливих учасників дорожнього руху, формуючи так званий ефект бар'єра. Коли щільність потоку перевищує пропускну здатність смуг, безпечний перехід дороги стає майже неможливим, що штовхає пішоходів на порушення правил і перехід у невстановлених місцях. Це безпосередньо корелює з піковими годинами травматизму, коли різке зростання кількості авто в поєднанні з нервозністю водіїв призводить до сплеску аварійності. Для виправлення ситуації необхідно впроваджувати адаптивне світлофорне регулювання та фізичне розділення потоків у найбільш завантажених точках міста.

Результати визначення інтенсивності руху транспортних потоків для представлено на Рисунку 1, 2 у вигляді картограми.

Слід звернути увагу на розподіл значень інтенсивності транспортних потоків на південній ділянці об'їзної дороги. Збільшення значень інтенсивності відбувається в місцях, де наявна придорожня забудова, а не в точках примикання транзитних потоків. Це дозволяє з'ясувати принцип розподілу транзиту в місті.



Рисунок 1 – Інтенсивність дорожнього руху на ВДМ (м. Тернопіль, ранковий пік)

Джерело: розроблено авторами

Картограми для ранкового та вечірнього пікового періодів розроблено на основі натурних досліджень та створено для візуалізації інтенсивності руху транспортних потоків.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що найвища інтенсивність руху транспортних потоків спостерігається на вулицях Руська в межах гідропарку Топільче,

Живова в напрямку від центру, Збаразька, Злуки, між перехрестями з вулицями Текстильною та Тарнавською і на автошляху Е85.

Найбільш завантаженим також є перехрестя вулиць Микулинецька, Степана Будного, дороги Е85. За годину його перетинає 5432 одиниці транспортних засобів, значення інтенсивності приведені до легкового автомобіля.



Рисунок 2 – Інтенсивність дорожнього руху на ВДМ (м. Тернопіль, вечірній пік)

Джерело: розроблено авторами

За ключовими перехрестями в м. Тернопіль у різних мікрорайонах міста визначимо небезпеку пересічення транспортних потоків і складність заданого перехрестя за показником конфліктності m . Результати досліджень зводимо в Таблицю 1. Даний показник базується на кількості та типі конфліктних точок відхилення, злиття та перетину, що виникають при взаємодії транспортних потоків.

Обчислення показника конфліктності проведемо за формулою:

$$m = N_d + 3N_m + 5N_c,$$

де N_d – кількість точок відхилення; N_m – кількість точок злиття; N_c – кількість точок перетину.

Відповідно до класифікації, вузли поділяються за складністю на: прості ($m < 40$), середні ($40 \leq m < 80$) та складні ($m > 80$).

Методика оцінки складності транспортних вузлів Тернополя через розрахунок показника конфліктності m дає можливість визначити складність перехрестя, для подальших інженерно-технічних заходів покращення дорожнього руху.

У Таблиці 1 наведено результати оцінювання конфліктності ключових транспортних вузлів м. Тернопіль на основі схеми утворення конфліктних точок. Для кожного перехрестя подано розрахунок показника конфліктності m , назву перетину вулиць та відповідну категорію складності. Значення показника m визначено з урахуванням кількості конфліктних точок різних типів, що дає змогу кількісно оцінити потенційну небезпеку транспортного вузла. На основі одержаних результатів перехрестя класифіковано на прості, середньої складності та складні. Такий підхід дозволяє виявити найбільш проблемні вузли вулично-дорожньої мережі міста та обґрунтувати доцільність подальших інженерно-організаційних заходів та проектних рішень, щодо підвищення безпеки дорожнього руху та покращення дорожньої ситуації.

Таблиця 1 – Розрахунок показника конфліктності та визначення категорій складності транспортних вузлів м. Тернопіль

Схема конфліктних точок	Розрахунок показника конфліктності	Транспортний вузол	Категорія складності
	$m = 5 + 3 \square 6 + 5 \square$ $24 = 143$	вул.15 Квітня – вул. Купчинського	Складний
	$m = 5 + 3 \square 6 + 5 \square$ $10 = 73$	вул. Торговиця – вул. Шашкевича	Середньої складності
	$m = 6 + 3 \square 6 + 5 \square$ $4 = 44$	вул. С. Будного – В. Винниченка	Середньої складності
	$m = 4 + 3 \square 2 + 5 \square$ $3 = 25$	В. Чорновола – Б.Хмельницького	Простий

	$m = 4 + 3 \square 6 + 5 \square$ $20 = 122$	вул.С. Бандери – вул. Є. Коновальця	Складний
	$m = 5 + 3 \square 6 + 5 \square$ $24 = 143$	вул. М. Кривоноса – вул. Львівська	Складний
	$m = 5 + 3 \square 4 + 5 \square$ $8 = 57$	вул. О. Теліги – вул. За Рудкою	Середньої складності
	$m = 0 + 3 \square 4 + 5 \square$ $4 = 32$	вул. Шопена – вул. С. Бандери	Простий

Джерело: розроблено авторами

У таблиці 2 подано значення показника конфліктності m та інтенсивності транспортних потоків на ключових перехрестях м. Тернопіль у пікові періоди. Це дозволяє оцінити залежність між складністю транспортного вузла та рівнем його завантаження.

Таблиця 2 – Показники конфліктності та інтенсивності транспортних потоків на ключових перехрестях м. Тернопіль у пікові періоди

Транспортний вузол	Показник m	Інтенсивність ранковий пік	Інтенсивність вечірній пік
вул. 15 Квітня – вул. Купчинського	143	4001	3821
вул. Торговиця – вул. Шашкевича	73	3583	3548
вул. С. Будного – вул. В. Винниченка	44	2996	2896
вул. В. Чорновола – вул. Б.Хмельницького	25	935	770
вул. С. Бандери – вул. Є. Коновальця	122	3344	3093
вул. М. Кривоноса – вул. Львівська	143	2244	2155
вул. О. Теліги – вул. За Рудкою	57	1543	1657
вул. Шопена – вул. С. Бандери	32	1863	1693

Для встановлення взаємозв'язку між показником конфліктності транспортних вузлів та інтенсивністю руху проведено кореляційний аналіз. За результатами розрахунків отримано коефіцієнти кореляції:

$$r = 0,611 \text{ (ранковий пік)}, r = 0,600 \text{ (вечірній пік)}.$$

Отримані результати кореляційного аналізу підтверджують гіпотезу про існування статистично значущого зв'язку між показником конфліктності та інтенсивністю транспортних потоків. Значення коефіцієнтів кореляції вказують на помірну залежність, що свідчить про вплив конфігурації транспортного вузла на рівень його завантаження.

Для кількісного опису залежності між показником конфліктності та інтенсивністю транспортних потоків побудовано лінійні регресійні моделі для ранкового та вечірнього пікових періодів.

Для ранкового піку отримано рівняння:

$$I_{\text{ранок}} = 1491 + 13,4 m$$

Для вечірнього піку:

$$I_{\text{вечір}} = 1400 + 12,5 m$$

Отримані моделі свідчать, що зі збільшенням показника конфліктності на одиницю інтенсивність транспортного потоку зростає в середньому на 12–13 авт/год. Це підтверджує, що складні транспортні вузли характеризуються вищим рівнем завантаження.

Коефіцієнти кореляції $r = 0,611$ (ранковий пік), $r = 0,600$ (вечірній пік), які свідчать про помірний прямий зв'язок між змінними, підтверджують адекватність побудованих моделей.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що між показником конфліктності транспортних вузлів та інтенсивністю руху існує помірний прямий зв'язок: коефіцієнт кореляції становить $r=0,611$ для ранкового піку та $r=0,600$ для вечірнього піку. Побудовані регресійні моделі підтвердили, що зі зростанням показника

конфліктності m підвищується інтенсивність транспортних потоків, що свідчить про більший рівень завантаження складних транспортних вузлів. Отримані результати доводять доцільність використання математичного моделювання транспортної конфліктності для раннього виявлення потенційно небезпечних перехресть та обґрунтування заходів з удосконалення організації дорожнього руху. Практичне значення дослідження полягає в можливості застосування запропонованого підходу при розробці схем організації дорожнього руху та проектних рішень щодо стратегій розвитку міської транспортної інфраструктури.

Список літератури

1. World Health Organization. (2023). Speed management: A road safety manual for decision-makers and practitioners (2nd ed.). WHO.
2. Elvik, R., Christensen, P., & Amundsen, A. H. (2004). Speed and road accidents: An evaluation of the power model. Transportøkonomisk Institutt.
3. Elvik, R. (2009). Speed and road accidents: An evaluation of the power model. Institute of Transport Economics.
4. Lahrman, H., Brasso, B., Johansen, J. V., & Madsen, J. C. O. (2016). Safety impact of average speed control in the UK. Journal of Transportation Technologies, 6(5). <https://doi.org/10.4236/jtts.2016.65028>
5. Zheng, L., Ismail, K., & Meng, X. (2014). Traffic conflict techniques for road safety analysis: Open questions and some insights. Canadian Journal of Civil Engineering, 41(7). <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-055>
6. Arun, A., Haque, M. M., Bhaskar, A., Washington, S., & Sayed, T. (2021). A systematic mapping review of surrogate safety assessment using traffic conflict techniques. Accident Analysis & Prevention, 153, Article 106016. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106016>
7. Абрамова, Л. С., Наглюк, І. С., & Левченко, Є. С. (2016). Аналіз методів проведення камеральних та польових досліджень аудиту безпеки дорожнього руху. Вісник ХНАДУ, 75, 182–187.
8. Ільченко, А., & Шумляківський, В. (2021). Порухення правил використання засобів регулювання дорожнього руху як можлива причина дорожньо-транспортної пригоди. Вісник машинобудування та транспорту, 2(14), 26–32. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-26-32>
9. Линник, І. Є., Завальний, О. В., Вакуленко, К. Є., & Бурко, Д. Л. (2023). Дослідження інтенсивності транспортних потоків на вулицях міста Харкова. Вісник ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. <https://doi.org/10.31713/vt2202330>
10. Вознюк, К. А., & Бауман, К. В. (2020). Аналіз складних перехресть вулиць біля Кумбар та пропозиції щодо підвищення їх ефективності. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/28913>
11. Шевчук, О. С., Захарчук, О. П., Фалович, Н. М., Березька, К. М., & Сіран, Р. В. (2024). Концептуальні основи модернізації транспортної інфраструктури середніх міст в Україні. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 1(22), 369–377. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1380>
12. Березька, К. М., Шевчук, О. С., Фалович, Н. М., & Бубняк, Ю. Р. (2024). Аналіз проблем і математичних методів для їх вирішення в транспортній логістиці. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 9(40), Part 2, 174–181. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.174-181](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.174-181)

References

1. World Health Organization. (2023). Speed management: A road safety manual for decision-makers and practitioners (2nd ed.). WHO.
2. Elvik, R., Christensen, P., & Amundsen, A. H. (2004). Speed and road accidents: An evaluation of the power model. Transportøkonomisk Institutt.
3. Elvik, R. (2009). Speed and road accidents: An evaluation of the power model. Institute of Transport Economics.
4. Lahrman, H., Brasso, B., Johansen, J. V., & Madsen, J. C. O. (2016). Safety impact of average speed control in the UK. Journal of Transportation Technologies, 6(5). <https://doi.org/10.4236/jtts.2016.65028>
5. Zheng, L., Ismail, K., & Meng, X. (2014). Traffic conflict techniques for road safety analysis: Open questions and some insights. Canadian Journal of Civil Engineering, 41(7). <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-055>
6. Arun, A., Haque, M. M., Bhaskar, A., Washington, S., & Sayed, T. (2021). A systematic mapping review of surrogate safety assessment using traffic conflict techniques. Accident Analysis & Prevention, 153, Article 106016. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106016>

7. Abramova, L. S., Nahliuk, I. S., & Levchenko, Ye. S. (2016). Analiz metodiv provedennia kameralnykh ta polovnykh doslidzhen audytu bezpeky dorozhnogo rukhu. *Visnyk KhNADU*, 75, 182–187 [in Ukrainian].
8. Ilchenko, A., & Shumliakivskyi, V. (2021). Porushennia pravyl vykorystannia zasobiv rehuliuвання dorozhnogo rukhu yak mozhlyva prychna dorozhno-transportnoi pryhody. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 2(14), 26–32 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-26-32>
9. Lynnyk, I. Ye., Zavalnyi, O. V., Vakulenko, K. Ye., & Burko, D. L. (2023). Doslidzhennia intensyvnosti transportnykh potokiv na vulytsiakh mista Kharkova. *Visnyk KhNUMH im. O. M. Beketova* [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31713/vt2202330>
10. Vozniuk, K. A., & Bauman, K. V. (2020). Analiz skladnykh perekhreshchen vulyts bilia Kumbar ta propozytsii shchodo pidvyshchennia yikh efektyvnosti [in Ukrainian]. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/28913>
11. Shevchuk O., Zakharchuk O., Falovych N., Berezka K., Siran R. (2024). Conceptual basis of modernization of transport infrastructure of medium cities in Ukraine. *Advances in mechanical engineering and transport*, 1(22), 369–377. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1380>
12. Berezka K., Shevchuk O., Falovych N., Bubnyak Y. (2024). Analysis of problems and mathematical methods for their solution in transport logistics, 9(40), Part 2, 174–181. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.174-181](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.174-181).

Kateryna Berezka, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oksana Shevchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Valentyna Panasyuk**, Prof., DSc., **Igor Murovanyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Mathematical Modeling of Traffic Conflicts for Assessing the Risk of Design Decisions on the Street and Road Network of Cities

The purpose of this study is to develop a mathematical approach to assessing road safety based on the modeling of traffic conflicts at urban intersections. The research aims to identify the relationship between the traffic conflict index and traffic flow intensity and to justify its use for detecting hazardous transport nodes.

The study is based on the analysis of traffic flow intensity and the calculation of a traffic conflict index mmm, which reflects the number and type of conflict points at intersections. Data for key transport nodes of Ternopil were collected for morning and evening peak periods. A correlation analysis was conducted to determine the relationship between traffic conflict and traffic intensity, resulting in correlation coefficients of $r=0.611$ and $r=0.600$, respectively. A linear regression model was developed to describe this relationship, demonstrating that an increase in the conflict index leads to a corresponding growth in traffic intensity. The results confirm that complex intersections with higher conflict levels tend to experience greater traffic load. The obtained findings are consistent with modern approaches to proactive road safety assessment based on indirect indicators such as traffic conflicts. The study also highlights the influence of urban structure and traffic distribution on the formation of hazardous zones.

The results of the study confirm that mathematical modeling of traffic conflicts is an effective tool for road safety assessment. The traffic conflict index can be used as an indicator for early detection of potentially dangerous transport nodes. The developed model allows for estimating traffic load depending on intersection complexity and supports decision-making in traffic management. The proposed approach can be applied in urban transport planning and in the development of traffic organization schemes. The findings contribute to improving road safety and optimizing the functioning of urban transport systems.

road safety, traffic conflicts, mathematical modeling, traffic flow intensity, transport nodes

Одержано (Received) 26.03.2026

Прорецензовано (Reviewed) 03.04.2026

Прийнято до друку (Approved) 07.04.2026