**DOI https://doi.org/10.32689/maup.it.2026.2.9**
**УДК 656.11:004.94:519.83**
**JEL Classification: C7, R4, C61, C63**

# МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ПІШОХОДІВ І ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ В УМОВАХ НЕКОНТРОЛЬОВАНОГО РУХУ НА ОСНОВІ ГРИ СТАКЕЛБЕРГА

***В. Б. Сахневич***

# *MODELING THE INTERACTION OF PEDESTRIANS AND VEHICLES IN UNCONTROLLED TRAFFIC CONDITIONS BASED ON THE STACKELBERG GAME*

***Valerii Sakhnevych***

**Анотація**

*Об'єктом дослідження є процес взаємодії пішохода і транспортного засобу в умовах нерегульованого дорожнього руху за наявності потенційного конфлікту їхніх траєкторій. Проблема дослідження полягає у визначенні раціональної поведінки учасників дорожнього руху в ситуаціях, коли прийняття рішення одним учасником безпосередньо впливає на вибір дій іншого та змінює рівень небезпеки. Для її вирішення розроблено ігрову модель конфліктної взаємодії на основі послідовної гри Стакелберга, у якій пішохід першим формує поведінковий сигнал, а транспортний засіб визначає відповідну стратегію руху. Отримані результати полягають у визначенні рівноважних стратегій учасників з урахуванням часу до потенційного зіткнення, часу після виходу із зони конфлікту, мінімальної відстані між учасниками та їхньої відносної швидкості. Відмінною особливістю запропонованого підходу є врахування взаємного впливу рішень учасників, що дає змогу оцінювати не окремі дії пішохода або водія, а їх узгоджену поведінку в межах однієї конфліктної ситуації та визначати наслідки зміни обраної стратегії для іншого учасника. На прикладі нерегульованого пішохідного переходу встановлено, що за прийнятих параметрів рівноважною є стратегія, за якої пішохід продовжує рух, а транспортний засіб зменшує швидкість. Виявлено залежність рівноважного рішення від початкової швидкості автомобіля, відстані до пішохода, часу до потенційного конфлікту та вагових коефіцієнтів, що характеризують значущість безпеки, швидкості й відхилення від траєкторії. Отримані результати пояснюються послідовним характером прийняття рішень та застосуванням зворотної індукції для визначення оптимальної відповіді кожного учасника з урахуванням очікуваних дій іншого. Запропонована модель може бути використана на практиці за наявності інформації про положення, швидкість і напрямок руху учасників для оцінювання дорожніх конфліктів, підтримки прийняття рішень та розроблення алгоритмів інтелектуального керування транспортними засобами, зокрема в системах попередження небезпечних зближень та автоматизованого вибору режиму руху.*

***Ключові слова:*** *пішохід, транспортний засіб, дорожній конфлікт, нерегульований пішохідний перехід, гра Стакелберга, теорія ігор, оцінювання ризику, рівноважна стратегія, моделювання взаємодії.*

**Abstract**

*The object of the study is the process of interaction between a pedestrian and a vehicle in unregulated traffic conditions in the presence of a potential conflict of their trajectories. The research problem is to determine the rational behavior of road users in situations when the decision-making of one participant directly affects the choice of actions of the other and changes the level of danger. To solve it, a game model of conflict interaction was developed based on the sequential Stackelberg game, in which the pedestrian is the first to form a behavioral signal, and the vehicle determines the appropriate movement strategy. The results obtained consist in determining the equilibrium strategies of the participants taking into account the time before a potential collision, the time after leaving the conflict zone, the minimum distance between the participants and their relative speed. A distinctive feature of the proposed approach is the consideration of the mutual influence of the participants' decisions, which makes it possible to evaluate not individual actions of a pedestrian or driver, but their coordinated behavior within the same conflict situation and to determine the consequences of changing the chosen strategy for the other participant. Using the example of an unregulated pedestrian crossing, it was found that, under the adopted parameters, the equilibrium strategy is one in which the pedestrian continues to move, and the vehicle reduces speed. The dependence of the equilibrium solution on the initial speed of the car, the distance to the pedestrian, the time to the potential conflict, and the weight coefficients characterizing the significance of safety, speed, and deviation from the trajectory were revealed. The results obtained are explained by the sequential nature of decision-making and the use of backward induction to determine the optimal response of each participant, taking into account the expected actions of the other. The proposed model can be used in practice if information is available about the position, speed, and direction of movement of the participants to assess road conflicts, support decision-making, and develop algorithms for intelligent vehicle control, in particular in systems for warning of dangerous approaches and automated selection of the driving mode.*

***Key words:*** *pedestrian, vehicle, traffic conflict, unregulated pedestrian crossing, Stackelberg game, game theory, risk assessment, equilibrium strategy, interaction modeling.*

**© Сахневич В. Б., 2026**
**Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0**

**1. Вступ.** Зростання інтенсивності дорожнього руху, поширення систем допомоги водієві та розвиток автономних транспортних засобів зумовлюють необхідність більш точного опису поведінки учасників дорожнього руху в потенційно конфліктних ситуаціях. Особливого значення набувають нерегульовані пішохідні переходи та перехрестя, де відсутність світлофорного регулювання переносить значну частину відповідальності за вибір моменту переходу, швидкості та траєкторії безпосередньо на пішохода і водія. У таких умовах безпечність руху визначається поточними просторово-часовими параметрами та тим, як кожен учасник оцінює наміри іншого та прогнозує його подальші дії.

Проблема ускладнюється тим, що поведінка пішохода і водія не є повністю детермінованою. За однакових дорожніх умов різні учасники можуть по-різному реагувати на наближення транспортного засобу, змінювати швидкість, зупинятися або продовжувати рух. Рішення одного учасника безпосередньо впливає на вибір іншого. Пішохід, який починає перехід, фактично формує нову ситуацію для водія, а зміна швидкості автомобіля, у свою чергу, може змінити рішення пішохода. Такий характер взаємодії не зводиться до незалежного прогнозування траєкторій і потребує врахування взаємного впливу рішень.

Традиційні методи оцінювання безпеки дорожнього руху переважно ґрунтуються на статистичному аналізі аварійності, часових і просторових показниках конфлікту, а також на моделях прогнозування траєкторій. До найбільш поширених показників належать час до зіткнення, час після звільнення конфліктної зони, відносна швидкість та мінімальна відстань між учасниками руху.

Такі показники дають змогу кількісно оцінити рівень небезпеки, однак самі по собі не пояснюють механізм вибору конкретної стратегії учасником у ситуації взаємного впливу.

Застосування теорії ігор дає можливість розглядати пішохода і водія як взаємодіючих суб'єктів, рішення яких залежать від очікуваної поведінки іншої сторони. У цьому контексті моделі Неша та Стакелберга дають змогу формалізувати вибір стратегій і визначати умови стійкості відповідних рішень. Проте використання класичної гри Стакелберга для моделювання дорожніх конфліктів має суттєве обмеження: воно передбачає достатньо чітке визначення ролей лідера та послідовника і, як правило, не враховує невизначеність щодо поведінкового типу іншого учасника. У реальній дорожній ситуації водій не має повної інформації про наміри пішохода, так само як пішохід не може достовірно визначити подальшу реакцію водія.

Наявні дослідження значною мірою зосереджені на окремих складових цієї проблеми: оцінюванні ризику конфлікту за просторово-часовими показниками, прогнозуванні траєкторій пішоходів і транспортних засобів, застосуванні теоретико-ігрових моделей для вибору маневру, врахуванні соціальних норм і пріоритету під час взаємодії, використанні методів машинного навчання для прогнозування поведінки учасників руху.

Водночас недостатньо опрацьованим залишається питання побудови єдиної моделі, у якій оцінювання поточного рівня ризику поєднується з прогнозуванням поведінкової стратегії іншого учасника та послідовним вибором власної дії. Особливої уваги потребує врахування неповної інформації. Невизначеність щодо намірів пішохода або водія безпосередньо впливає на вибір безпечної стратегії. Використання фіксованих функцій корисності та наперед заданих ролей учасників може призводити до некоректного опису поведінки в ситуаціях, коли фактична реакція відрізняється від очікуваної.

Отже, наукова проблема полягає у відсутності достатньо обґрунтованого підходу до моделювання взаємодії пішохода і транспортного засобу, який одночасно враховував би просторово-часові характеристики конфлікту, невизначеність щодо поведінкових намірів учасників та послідовний характер прийняття рішень. Розв'язання цієї проблеми потребує розвитку ігрової моделі, здатної адаптувати вибір стратегії до зміни дорожньої ситуації та рівня інформаційної невизначеності.

Саме тому виникає потреба у розробці адаптивної моделі взаємодії пішохода і транспортного засобу на основі гри Стакелберга, доповненої механізмом оцінювання невизначеності щодо поведінкового типу учасників та кількісною оцінкою ризику конфлікту. Такий підхід має створити основу для визначення оптимальних стратегій руху в умовах нерегульованих переходів і може бути використаний під час розроблення систем підтримки прийняття рішень та алгоритмів автономного керування транспортними засобами. Саме вирішення зазначеного наукового завдання становить предмет цього дослідження.

У роботі [1] досліджено взаємодію пішоходів і транспортних засобів на нерегульованих переходах із використанням теоретико-ігрового підходу. Автори розглянули різні варіанти формулювання функцій виграшу та способи пошуку рівноважних стратегій. Показано, що традиційна рівновага Неша не завжди адекватно описує фактичну поведінку пішоходів і водіїв. Проте залишилися невирішеними питання вибору моделі, яка враховувала б обмежену раціональність учасників та зміну їхніх оцінок ситуації в процесі взаємодії. Причиною цього є використання фіксованих правил формування виграшів і припущення щодо достатньо раціонального вибору стратегій.


ISSN 2786-5460 (Print), ISSN 2786-5479 (Online)

У дослідженні [2] запропоновано підхід до прогнозування результату взаємодії пішохода і транспортного засобу на нерегульованих переходах із використанням методів машинного навчання. Розглянуто вплив часу до прибуття транспортного засобу, тривалості очікування пішохода, наявності пішохідного переходу, а також характеристик і поведінкових особливостей учасників руху. Показано, що сукупність цих чинників може використовуватися для прогнозування рішення пішохода щодо початку переходу. Разом із тим залишилися невирішеними питання формального опису взаємного впливу рішень пішохода і водія. Причиною цього є переважна орієнтація підходу на прогнозування результату взаємодії без явного моделювання послідовності стратегічних рішень.

Робота [3] присвячена розробці моделі прогнозування траєкторії пішохода на нерегульованих перехрестях із використанням теорії ігор. Авторами сформовано матрицю виграшів для взаємодії пішохода і транспортного засобу, параметри якої визначаються на основі фактичних даних про ймовірність переходу. Отриману ігрову модель інтегровано з моделлю прогнозування траєкторій пішоходів. Показано, що врахування інформації про взаємодію з транспортним засобом дає змогу точніше описувати поведінку пішохода. Проте залишилися невирішеними питання врахування неповної інформації про поведінковий тип учасників. Причиною цього є використання статичної гри з повною інформацією та фіксованою структурою стратегій.

Дослідження [4] розглядає ігровий підхід до прийняття рішень автономними транспортними засобами на нерегульованих перехрестях. Запропоновано враховувати індивідуальні переваги водіїв та співвідношення між безпекою і ефективністю руху. Показано, що ігрова модель дає змогу формувати стратегії, які забезпечують компроміс між ризиком зіткнення та швидкістю проходження перехрестя. Разом із тим залишилися невирішеними питання перенесення такого підходу на взаємодію транспортного засобу з пішоходом. Причиною цього є суттєві відмінності між автомобільно-автомобільною взаємодією та взаємодією автомобіля з уразливим учасником дорожнього руху, зокрема за характером стратегій і допустимим рівнем ризику.

У роботі [5] систематизовано сучасні підходи до прогнозування траєкторій пішоходів у змішаному середовищі, де одночасно присутні пішоходи та транспортні засоби. Показано, що поведінка пішохода залежить не лише від його власного руху, а й від траєкторії, швидкості та очікуваної поведінки транспортного засобу. Окремо наголошено на необхідності врахування невизначеності прогнозування та поведінкової неоднорідності учасників. Проте залишилися невирішеними питання формування єдиного механізму прийняття рішень, який поєднував би прогноз траєкторії з вибором стратегії іншого учасника. Причиною цього є переважна орієнтація розглянутих методів на прогнозування руху, а не на стратегічне моделювання взаємодії.

Модель взаємодії пішохода і транспортного засобу, що враховує сприйняття ризику під час переходу нерегульованої ділянки дороги запропонована у дослідженні [6]. Показано, що оцінка ризику змінюється залежно від поточного стану взаємодії та поведінкових реакцій учасників. Такий підхід дає змогу пов'язати об'єктивні характеристики дорожньої ситуації з рішеннями пішохода і водія. Водночас залишилися невирішеними питання використання оцінки ризику безпосередньо в процедурі вибору оптимальної стратегії. Причиною цього є розгляд ризику переважно як пояснювальної характеристики поведінки, а не як динамічного компонента ігрової функції корисності.

Автори роботи [7] проводять аналіз конфліктних взаємодій пішоходів і транспортних засобів на нерегульованому пішохідному переході за допомогою показника Post-Encroachment Time. На основі значної кількості відеозаписів встановлено залежність частоти конфліктних ситуацій від напрямку наближення пішохода і транспортного засобу та їхнього взаємного положення. Показано, що просторово-часові характеристики взаємодії можуть використовуватися для кількісного оцінювання небезпеки. Проте залишилися невирішеними питання прогнозування подальших дій учасників до моменту виникнення критичної ситуації. Причиною цього є орієнтація на ретроспективне оцінювання конфлікту за вже сформованими траєкторіями.

У дослідженні [8] розроблено модель прогнозування ступеня тяжкості взаємодії пішоходів і транспортних засобів на нерегульованих перехрестях із використанням моделей глибокого навчання. Для побудови моделі використано траєкторні характеристики пішоходів і транспортних засобів, а результати взаємодії класифіковано за рівнем небезпеки. Показано можливість автоматизованого прогнозування критичних ситуацій за даними відеоспостереження. Разом із тим залишилися невирішеними питання пояснення причин вибору конкретної стратегії учасником руху. Причиною цього є переважна орієнтація моделі на прогнозування класу небезпеки без формалізації стратегічної взаємодії між учасниками.

У роботі [9] досліджено взаємодію автономного транспортного засобу та пішохода з урахуванням обмеженої раціональності людини. Запропоновано динамічну ігрову модель, у якій поведінкові характеристики учасника оцінюються в процесі спостереження за його діями, а отримана інформація використовується для оновлення подальшої стратегії транспортного засобу. Показано, що врахування

обмеженої раціональності та динамічного оновлення інформації дає змогу наблизити модель до реальної поведінки учасників. Проте залишилися невирішеними питання поєднання такого механізму з ієрархічною структурою гри Стакелберга та кількісною оцінкою ризику конфлікту. Причиною цього є використання іншого типу ігрової постановки, заснованої на моделі частково спостережуваного середовища та ієрархії когнітивних рівнів.

Дослідження [10] присвячено розробці еволюційної моделі взаємодії пішоходів та автономних транспортних засобів на нерегульованих ділянках дороги. Враховано довіру пішоходів до безпілотних транспортних засобів, механізми комунікації між людиною і транспортним засобом та вплив регуляторних заходів. Показано, що зміна рівня довіри, ефективності комунікації та контролю може впливати на стійкість певних стратегій взаємодії. Водночас залишилися невирішеними питання оперативного вибору стратегії для конкретної дорожньої ситуації з урахуванням поточних траєкторних параметрів. Причиною цього є еволюційний характер моделі, орієнтованої на аналіз зміни стратегій у сукупності учасників, а не на покрокове прийняття рішення в окремій конфліктній ситуації.

У роботі [11] досліджено взаємодію пішохода і транспортного засобу з позицій прогнозування майбутніх конфліктів на нерегульованих перехрестях. Автори звертають увагу на те, що майбутня траєкторія характеризується невизначеністю, яка виникає через варіативність поведінки людини та похибки спостереження. Запропоновано використовувати ймовірнісне прогнозування траєкторій для оцінювання майбутніх конфліктів. Разом із тим залишилися невирішеними питання використання отриманого розподілу ризику безпосередньо в механізмі стратегічного вибору. Причиною цього є розмежування процедур прогнозування траєкторії та прийняття рішення.

Автори дослідження [12] запропонували підхід до навчання взаємодії між пішоходами та транспортними засобами для прогнозування майбутньої траєкторії пішохода. Показано, що спеціальне виділення ознак взаємодії між транспортним засобом і пішоходом підвищує точність прогнозування порівняно з моделями, які розглядають рух пішохода без урахування транспортного середовища. Проте залишилися невирішеними питання інтерпретації отриманих прогнозів з позицій теорії прийняття рішень. Причиною цього є використання переважно статистичного зв'язку між характеристиками взаємодії та майбутньою траєкторією без явного представлення стратегій учасників.

У роботі [13] досліджено можливість використання ігрових моделей для розв'язання конфліктів автономних транспортних засобів на нерегульованих перехрестях. Запропоновано враховувати індивідуальні переваги учасників під час формування функцій виграшу. Показано, що ігровий підхід може забезпечувати компроміс між безпекою та ефективністю руху в умовах відсутності світлофорного регулювання. Разом із тим залишилися невирішеними питання адаптації параметрів функції корисності до невизначених характеристик іншого учасника. Причиною цього є використання переважно наперед заданих моделей переваг, які не змінюються відповідно до спостережуваної поведінки.

У дослідженні [14] розглянуто підходи до моделювання взаємодії людини та автономного транспортного засобу з урахуванням соціальної складової поведінки. Показано, що рішення автономного транспортного засобу повинні враховувати не лише безпосередній ризик зіткнення, а й очікування людини щодо поведінки автомобіля. Врахування соціального впливу дає змогу підвищити узгодженість дій автономного транспортного засобу з поведінкою інших учасників руху. Проте залишилися невирішеними питання формального визначення моменту переходу від одного рівня ризику до іншого та відповідної зміни стратегії. Причиною цього є переважно концептуальний характер соціальної складової та недостатня формалізація її зв'язку з ігровою рівновагою.

Робота [15] присвячена розробці методу моделювання взаємодії людини і транспортного засобу на основі гри та глибокого зворотного навчання з підкріпленням. Підхід дає змогу визначати параметри поведінки учасників за даними реальних або змодельованих траєкторій та використовувати отриману інформацію для відтворення процесу прийняття рішень. Показано перспективність поєднання ігрових моделей із методами навчання на основі поведінкових даних. Разом із тим залишилися невирішеними питання забезпечення прозорого механізму адаптації стратегії до зміни типу учасника без повторного навчання всієї моделі. Причиною цього є залежність параметрів моделі від навчальної вибірки та складність оперативного оновлення поведінкових характеристик.

Проведений аналіз досліджень [1–15] свідчить, що сучасні підходи до моделювання взаємодії пішоходів і транспортних засобів розвиваються за кількома основними напрямами: прогнозування траєкторій на основі даних відеоспостереження та методів машинного навчання, оцінювання ризику конфлікту за просторово-часовими показниками, застосування статичних і динамічних ігрових моделей, урахування індивідуальних особливостей та обмеженої раціональності учасників, моделювання соціальних чинників і довіри до автономних транспортних засобів, поєднання теорії ігор із методами машинного навчання та зворотного навчання з підкріпленням.


ISSN 2786-5460 (Print), ISSN 2786-5479 (Online)

Водночас аналіз наукових праць показує, що окремі компоненти проблеми вже отримали достатньо ґрунтовне опрацювання, тоді як їх інтеграція в єдину модель залишається недостатньо розвиненою. Зокрема, прогнозування траєкторій, оцінювання ризику та ігрове прийняття рішень часто розглядаються як окремі етапи, між якими відсутній адаптивний механізм взаємного зв'язку. Недостатньо дослідженим залишається також питання врахування невизначеності щодо поведінкового типу учасника безпосередньо під час формування оптимальної стратегії.

Таким чином, існує наукова потреба у розвитку моделі, яка поєднувала б просторово-часову оцінку ризику, прогнозування поведінкової стратегії іншого учасника та послідовне прийняття рішення в межах гри Стакелберга. Принциповою відмінністю такого підходу має бути не просте використання ігрової моделі для нерегульованого переходу, а формування адаптивного механізму, у якому параметри стратегічної взаємодії змінюються відповідно до спостережуваної поведінки, поточного рівня ризику та ступеня невизначеності. Саме ця наукова прогалина визначає напрям подальшого дослідження.

Проведений аналіз наукових праць показує, що взаємодія пішоходів і транспортних засобів на нерегульованих ділянках дороги досліджується з різних позицій. Значна частина робіт присвячена прогнозуванню траєкторій, визначенню моменту початку переходу, оцінюванню небезпеки дорожньої ситуації та вибору маневру транспортного засобу. Окремий напрям становлять дослідження, у яких для опису поведінки учасників застосовуються теоретико-ігрові моделі.

Застосування показників TTC (час до зіткнення), PET (час після виходу із конфліктної зони), мінімальної відстані та відносної швидкості дає змогу оцінити ступінь небезпеки конкретної ситуації. Проте самі по собі ці показники не дають відповіді на питання, чому водій або пішохід обирає певну дію. Наприклад, однакове значення TTC за різних умов може призвести до різної поведінки: один водій почне гальмування, інший зменшить швидкість лише незначно, а пішохід може або продовжити рух, або зачекати. Тому оцінювання ризику доцільно пов'язувати не лише з характеристикою ситуації, а й із процесом прийняття рішення.

Певні можливості для цього надають ігрові моделі. Вони дозволяють розглядати дії пішохода і водія як взаємопов'язані рішення, коли вибір однієї сторони впливає на подальшу поведінку іншої. Проте у багатьох запропонованих моделях набір стратегій і параметри функцій виграшу визначаються заздалегідь. При цьому фактична поведінка учасника протягом конфліктної ситуації не завжди враховується. Це особливо помітно у випадках, коли початкове припущення про наміри пішохода або водія не відповідає його подальшим діям.

Ще одне питання пов'язане з невизначеністю поведінки. Учасник дорожнього руху не має безпосереднього доступу до намірів іншої сторони. За зовнішніми ознаками руху можна лише оцінити, наскільки ймовірним є продовження руху, уповільнення або зупинка. Отже, під час прийняття рішення фактично використовується неповна інформація. У класичних моделях Стакелберга ця обставина часто спрощується припущенням про відомі функції корисності та визначені ролі учасників. Для реальних дорожніх ситуацій таке припущення не завжди є обґрунтованим.

Потребує уточнення і питання вибору лідера та послідовника. У дорожній ситуації пішохід не обов'язково є стороною, яка першою формує визначальний сигнал для іншого учасника. Таким сигналом може бути початок переходу, зміна швидкості пішохода, початок гальмування автомобіля або зміна його траєкторії. Тому механічне закріплення ролі лідера за пішоходом не дає змоги однаково коректно описувати всі варіанти розвитку конфлікту. Необхідно враховувати фактичну послідовність дій та інформацію, яку кожен учасник отримує перед прийняттям рішення.

Недостатньо розглянутим є також взаємозв'язок між безпекою та ефективністю руху. Зменшення ризику за рахунок повної зупинки транспортного засобу не завжди є найкращим рішенням, якщо небезпечна ситуація може бути усунена незначним коригуванням швидкості. Аналогічна ситуація виникає для пішохода, коли короткочасна зміна темпу руху дозволяє уникнути конфлікту без тривалого очікування. Тому функція корисності має враховувати не один критерій, а декілька характеристик, пов'язаних із безпекою, зміною параметрів руху та наслідками обраної дії.

Окремою проблемою є перевірка того, наскільки отримана ігрова рівновага відповідає фактичній поведінці учасників. В окремих роботах числові приклади використовуються переважно для ілюстрації роботи моделі. Проте цього недостатньо для підтвердження її практичної придатності. Потрібне зіставлення прогнозованих стратегій із реальними траєкторіями та рішеннями пішоходів і водіїв, а також оцінювання точності такого прогнозування.

Отже, на сьогодні недостатньо опрацьованою залишається задача побудови моделі, у якій оцінка ризику, невизначеність щодо намірів іншого учасника та взаємозалежність рішень розглядаються в межах єдиного математичного підходу. Важливим є також визначення умов, за яких зміна спостережуваної поведінки призводить до зміни оптимальної стратегії.

У межах цього дослідження пропонується зосередити увагу на розвитку моделі Стакелберга для взаємодії пішохода і транспортного засобу, доповнивши її оцінюванням поточного рівня конфліктного ризику та параметрами, що характеризують поведінку учасників. Це дає змогу перейти від фіксованого вибору стратегій до їх визначення залежно від конкретної дорожньої ситуації. Практична цінність такого підходу полягає у можливості його подальшого використання для оцінювання безпеки руху та формування рішень системами допомоги водієві й автономними транспортними засобами.

*Метою дослідження* є розроблення математичної моделі взаємодії пішохода і транспортного засобу в умовах нерегульованого руху, яка на основі гри Стакелберга дає змогу враховувати послідовність прийняття рішень, рівень конфліктного ризику та зміну параметрів руху учасників під час вибору оптимальної стратегії.

Для досягнення поставленої мети визначено такі *завдання*:

1. Удосконалити модель взаємодії пішохода і транспортного засобу шляхом формалізації множини можливих стратегій учасників та включення до функції корисності показників ризику, зміни швидкості й траєкторії руху.

2. Дослідити умови формування рівноваги Стакелберга для різних параметрів дорожньої ситуації та визначити залежність вибору оптимальних стратегій пішохода і транспортного засобу від рівня конфліктного ризику та співвідношення критеріїв безпеки й ефективності руху.

**2. Матеріали і методи.** Об'єктом дослідження є процес взаємодії пішохода і транспортного засобу в умовах нерегульованого пішохідного переходу за наявності потенційної конфліктної ситуації. Основна гіпотеза полягає в тому, що вибір безпечної стратегії учасниками руху може бути формалізований як послідовна взаємодія, у якій рішення одного учасника враховує очікувану реакцію іншого.

У дослідженні прийнято, що пішохід і транспортний засіб рухаються в межах однієї конфліктної ситуації, їхні поточні координати, швидкості та напрямки руху відомі, а кожен учасник має обмежену кількість доступних стратегій. Для пішохода розглядаються продовження руху, зменшення швидкості та зміна траєкторії. Для транспортного засобу прийнято продовження руху, зменшення швидкості та гальмування.

Під час моделювання не враховуються складні маневри, зміна смуги руху, взаємодія з іншими транспортними засобами та пішоходами, погодні умови, технічний стан транспортного засобу та інші чинники, які безпосередньо не визначають характер розглянутої конфліктної ситуації. Таке спрощення дає змогу зосередити дослідження на взаємному впливі рішень пішохода і водія.

Для опису початкового стану використовуються координати учасників, їхні швидкості та напрямки руху, а також положення потенційної конфліктної точки. На основі цих даних визначаються просторово-часові характеристики взаємодії. Для оцінювання небезпеки використовуються час до потенційного зіткнення (TTC), час після виходу із конфліктної зони (PET), мінімальна відстань між учасниками та відносна швидкість.

Рівень конфліктного ризику визначається шляхом спільного врахування зазначених показників після їх нормування. Нормування здійснюється для приведення параметрів, що мають різні одиниці вимірювання, до зіставного вигляду. Отримана оцінка ризику використовується як одна зі складових оцінювання можливих стратегій учасників.

Для порівняння стратегій формується функція корисності, яка враховує три основні складові: рівень безпеки, збереження швидкості та відхилення від початкової траєкторії. Значущість кожної складової задається відповідним ваговим коефіцієнтом. Втрати швидкості та зміна траєкторії розглядаються як додаткові витрати, пов'язані з реалізацією відповідної дії.

Дослідження взаємодії здійснюється на основі послідовної гри Стакелберга. Пішохід розглядається як учасник, який першим обирає поведінкову стратегію, після чого транспортний засіб формує відповідь з урахуванням сформованої ситуації. Для кожної можливої дії пішохода визначається найкраща відповідь транспортного засобу, після чого оцінюється доцільність початкової стратегії пішохода з урахуванням очікуваної реакції водія.

Розрахункова перевірка проводиться для типової ситуації наближення легкового автомобіля до нерегульованого пішохідного переходу за умови початку переходу пішоходом. Для всіх комбінацій доступних стратегій визначаються показники ризику, втрати швидкості та зміни траєкторії, після чого формується матриця взаємодії. Визначення рівноважної пари стратегій здійснюється методом зворотної індукції відповідно до послідовності прийняття рішень у грі.

Таким чином, методика дослідження передбачає послідовне формування початкового стану дорожньої ситуації, оцінювання просторово-часових характеристик конфлікту, визначення наслідків можливих дій та їх порівняння в межах послідовної ігрової моделі. Це забезпечує єдиний порядок проведення розрахунків для різних параметрів дорожньої ситуації та дає змогу досліджувати зміну поведінкових стратегій залежно від умов взаємодії.


ISSN 2786-5460 (Print), ISSN 2786-5479 (Online)

**3. Результати і обговорення**

**3.1. Удосконалення моделі взаємодії пішохода і транспортного засобу.**

Для побудови моделі розглянемо типову ситуацію на нерегульованому пішохідному переході, коли траєкторії пішохода і транспортного засобу перетинаються або проходять на небезпечній відстані. У такій ситуації кожен учасник має обмежений набір можливих дій. Пішохід може продовжувати рух із поточною швидкістю, зменшити швидкість або змінити напрямок руху. Для транспортного засобу основними варіантами є продовження руху, зменшення швидкості або повна зупинка.

На відміну від моделей, у яких небезпека оцінюється незалежно від процесу прийняття рішення, у запропонованому підході показник ризику безпосередньо входить до функції корисності. Це дає змогу пов'язати зміну параметрів дорожньої ситуації з вибором конкретної стратегії.

Позначимо множину стратегій пішохода через $S_P = \{s_V^1, s_V^2, s_V^3\}$, де $s_V^1$ відповідає продовженню руху, $s_V^2$ – зменшенню швидкості, $s_V^3$ – гальмуванню до зупинки.

Такий набір стратегій не претендує на вичерпний опис усіх можливих маневрів. Його призначення полягає у виділенні основних рішень, які безпосередньо впливають на результат конфліктної ситуації. За необхідності множини можуть бути розширені з урахуванням зміни смуги руху, прискорення, повної зупинки пішохода та інших дій.

Початковий стан взаємодії задається координатами учасників, їх швидкостями, напрямками руху та положенням потенційної конфліктної точки. Для пішохода використовуємо позначення $x_P$, $y_P$, $v_P$, а для транспортного засобу – $x_V$, $y_V$, $v_V$. На основі цих параметрів визначається прогнозована відстань між учасниками та час до їх можливого зближення.

Принцип побудови моделі наведено на рис. 1.

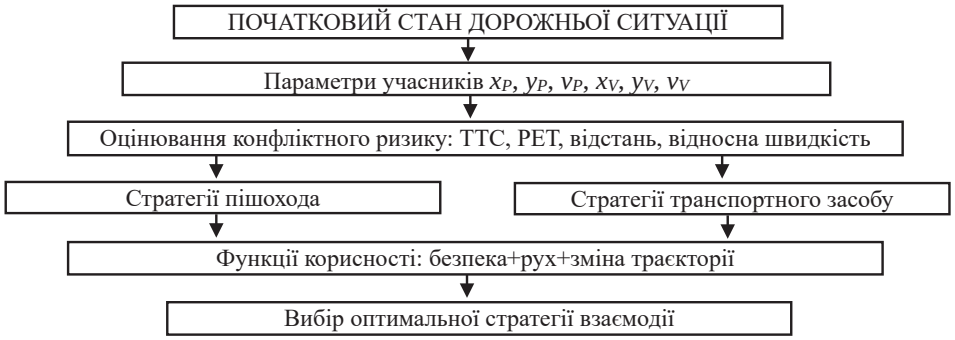



**Рис. 1. Структурна схема формування рішення під час взаємодії пішохода та транспортного засобу**

Важливою складовою моделі є оцінка ризику. Для цього можуть використовуватися декілька характеристик конфлікту, зокрема час до потенційного зіткнення, час після виходу з конфліктної зони, мінімальна відстань та відносна швидкість. Сукупне значення ризику визначається на основі нормованих значень відповідних показників. У загальному випадку його можна подати як (1):

$$R_{ij} = \sigma\left(\beta_0 + \beta_1 z_{TTC,ij} + \beta_2 z_{\mathrm{PET},ij} + \beta_3 z_{\mathrm{D},ij} + \beta_4 z_{\Delta v,ij}\right), \quad (1)$$

де $R_{ij}$ – оцінений рівень ризику для пари стратегій $s_P^i, s_V^j$; $\sigma(\cdot)$ — логістична функція; $\beta_0 \div \beta_4$ – параметри моделі; $z_{TTC}$, $z_{PET}$, $z_D$ та $z_{\Delta v}$ – нормовані характеристики конфліктної ситуації.

Використання нормованих параметрів дає можливість об'єднати показники, що мають різні одиниці вимірювання. При цьому значення $R_{ij}$ належить інтервалу від 0 до 1 і може бути безпосередньо використане у функції корисності.

Наступним етапом є визначення наслідків вибору кожної пари стратегій. Для цього доцільно розглядати не тільки безпеку, а й зміни умов руху. Якщо транспортний засіб різко зменшує швидкість або змінює траєкторію, це створює додаткові витрати часу та комфорту. Подібні зміни виникають і в поведінці пішохода.

Для кожного учасника формується узагальнена функція корисності, яка враховує безпеку, збереження параметрів руху та відхилення від початкової траєкторії (2):

$$U_k\left(s_P^i, s_V^j\right) = -\omega_{kR} R_{ij} - \omega_{kV} C_{V,ij} - \omega_{kD} C_{\mathrm{D},ij}, \quad k \in \{P, V\}, \quad (2)$$

де Uk – корисність учасника k; ωkR, ωkV, ωkD – вагові коефіцієнти; Rij – рівень конфліктного ризику; CV,ij – втрата швидкості; $C_{D,ij}$ – витрати, пов'язані зі зміною траєкторії.

Значення вагових коефіцієнтів визначають співвідношення між окремими складовими рішення. Для транспортного засобу, що рухається в умовах потенційного конфлікту з пішоходом, найбільшу вагу доцільно надавати безпеці. Для пішохода співвідношення може змінюватися залежно від відстані до транспортного засобу, швидкості автомобіля та можливості безпечно завершити перехід.

Для практичного використання моделі складові функції корисності нормуються до єдиного діапазону. Це дозволяє порівнювати наслідки різних дій навіть у випадку, коли вихідні параметри мають різні фізичні одиниці.

Окреме значення має кількісна оцінка відхилення фактичного руху від початкового. Для цього для кожної стратегії визначається відносна втрата швидкості та величина зміни траєкторії. Узагальнений показник витрат руху можна визначити як (3):

$$C_{ij} = \alpha\left(1 - \frac{\upsilon_{ij}}{\upsilon_0}\right) + (1-\alpha)\frac{d_{ij}}{d_{\max}},\ 0 \le \alpha \le 1, \tag{3}$$

де $\upsilon_0$ – бажана швидкість учасника до виникнення конфлікту; $\upsilon_{ij}$ – швидкість після вибору відповідної пари стратегій; $d_{ij}$ – величина відхилення траєкторії; $d_{\max}$ – максимальне допустиме відхилення; $\alpha$ – коефіцієнт, що визначає співвідношення між втратою швидкості та зміною траєкторії.

Таким чином, збільшення втрати швидкості або відхилення від початкової траєкторії призводить до зростання витрат $C_{ij}$ і, відповідно, зменшення корисності стратегії. Це дозволяє уникнути спрощення, за якого будь-яке гальмування або відхилення траєкторії автоматично вважається оптимальним лише через зменшення ризику.

Основні параметри, які використовуються під час формування моделі, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Параметри моделі взаємодії пішохода і транспортного засобу**

| Параметр | Позначення | Характеристика | Вплив на вибір стратегії |
|---|---|---|---|
| Час до потенційного зіткнення | TTC | Час до зближення учасників за поточних параметрів руху | Зменшення підвищує ризик |
| Час після виходу із зони конфлікту | PET | Часовий інтервал між виходом одного учасника та входом іншого в конфліктну зону | Зменшення підвищує ризик |
| Мінімальна відстань | D | Найменша прогнозована відстань між учасниками | Зменшення підвищує ризик |
| Відносна швидкість | $\Delta\upsilon$ | Різниця швидкостей учасників | Впливає на динаміку конфлікту |
| Поточна швидкість | $\upsilon$ | Швидкість учасника до та після прийняття рішення | Визначає втрати швидкості |
| Відхилення траєкторії | $d$ | Відстань між початковою та зміненою траєкторіями | Формує додаткові витрати руху |
| Рівень ризику | $R$ | Узагальнена оцінка небезпеки ситуації | Безпосередньо впливає на корисність |
| Ваговий коефіцієнт безпеки | $\omega_R$ | Значущість безпеки для учасника | Визначає пріоритет уникнення конфлікту |
| Ваговий коефіцієнт швидкості | $\omega_V$ | Значущість збереження швидкості | Визначає схильність до гальмування |
| Ваговий коефіцієнт траєкторії | $\omega_D$ | Значущість збереження початкового напряму | Визначає схильність до маневрування |

Запропонована структура дозволяє перейти від простого порівняння окремих маневрів до оцінювання наслідків кожної пари стратегій. Для кожної комбінації $s_P^i, s_V^j$ спочатку визначається очікуваний рівень ризику, після чого оцінюються зміни швидкості та траєкторії. Отримані значення використовуються для розрахунку корисності обох учасників.

У результаті формується матриця взаємодії, елементами якої є значення $U_P\left(s_P^i, s_V^j\right)$ та $U_V\left(s_P^i, s_V^j\right)$. Саме ця матриця надалі використовується для визначення оптимальних відповідей учасників і знаходження рівноважного стану гри.

Отже, запропонована постановка дозволяє формалізувати взаємодію пішохода і транспортного засобу через три взаємопов'язані групи параметрів: рівень конфліктного ризику, зміну швидкості та зміну траєкторії. На відміну від підходу, у якому ризик розглядається лише як кінцевий показник безпеки, у запропонованій моделі він безпосередньо впливає на вибір стратегії. Це створює необхідну основу для наступного етапу дослідження – визначення рівноважних стратегій учасників залежно від параметрів конкретної дорожньої ситуації.

**3.2. Дослідження умов рівноваги Стакелберга та вибору оптимальних стратегій.**

Другим завданням дослідження є визначення умов, за яких пішохід і транспортний засіб обирають оптимальні стратегії залежно від параметрів дорожньої ситуації. На відміну від простого вибору дії за мінімальним значенням ризику, у запропонованому підході враховується взаємний вплив рішень учасників. Зміна стратегії пішохода змінює умови, за яких транспортний засіб приймає своє рішення, і навпаки.


ISSN 2786-5460 (Print), ISSN 2786-5479 (Online)

Для цього використовується послідовна гра Стакелберга. Пішохід розглядається як учасник, який першим формує поведінковий сигнал, після чого транспортний засіб визначає свою відповідь. Така постановка відповідає ситуаціям, коли пішохід уже почав рух до проїжджої частини або вийшов у межі потенційної конфліктної зони, а водій отримує можливість оцінити його подальший рух.

Нехай $s_P^i \in S_P$ стратегія пішохода, а $s_V^i \in S_V$ – стратегія транспортного засобу. Для кожної стратегії пішохода визначається найкраща відповідь водія (4):

$$BR_V\left(s_P^i\right) = \arg\max_{s_V^i \in S_V} U_V\left(s_P^i, s_V^i\right). \quad (4)$$

Тобто транспортний засіб обирає ту дію, яка забезпечує найбільше значення його функції корисності за вже визначеної поведінки пішохода. При цьому доцільність певної дії визначається не тільки зменшенням ризику, а й втратами швидкості та зміною траєкторії.

Після визначення найкращої відповіді транспортного засобу пішохід оцінює власний виграш з урахуванням очікуваної реакції автомобіля. Оптимальна стратегія пішохода визначається за виразом (5):

$$s_P^* = \arg\max_{s_P^i \in S_P} U_P\left(s_P^i, BR_V\left(s_P^i\right)\right). \quad (5)$$

Таким чином, рішення пішохода формується не ізольовано. Він враховує можливу реакцію транспортного засобу на кожну доступну для нього дію. Саме ця особливість відрізняє запропоновану постановку від моделі, у якій учасники приймають рішення незалежно один від одного.

Для перевірки запропонованого підходу розглянемо ситуацію, за якої легковий автомобіль наближається до нерегульованого пішохідного переходу зі швидкістю 40 км/год, а пішохід починає перетинати проїжджу частину. Видимість між учасниками є достатньою, а інтенсивність руху не створює додаткових обмежень.

Для пішохода розглядаються три стратегії:

1) $s_P^1$ – продовжити рух;
2) $s_P^2$ – зменшити швидкість;
3) $s_P^3$ – змінити траєкторію.

Для транспортного засобу приймаються три можливі дії:

1) $s_V^1$ – продовжити рух;
2) $s_V^2$ – зменшити швидкість;
3) $s_V^3$ – загальмувати.

За кожної комбінації стратегій визначаються ризик конфлікту, втрата швидкості та відхилення траєкторії. На цій основі розраховуються функції корисності учасників.

Таблиця 2

**Параметри моделі взаємодії пішохода і транспортного засобу**

| Стратегія пішохода | Продовження руху автомобіля | Зменшення швидкості автомобіля | Гальмування автомобіля |
|---|---|---|---|
| Продовження руху | R=0,64 | R=0,27 | R=0,11 |
| Зменшення швидкості | R=0,34 | R=0,18 | R=0,09 |
| Зміна траєкторії | R=0,26 | R=0,15 | R=0,07 |

Наведені значення показують, що найбільший рівень ризику виникає за одночасного продовження руху обома учасниками. Зменшення швидкості хоча б одним із них істотно змінює характер конфлікту. Найменше значення ризику спостерігається у випадку зміни траєкторії пішоходом та гальмування транспортного засобу.

Однак мінімальний ризик не означає автоматично найкращу стратегію. Така комбінація передбачає найбільші зміни початкових параметрів руху. Тому остаточний вибір визначається значеннями функцій корисності.

Для прийнятого сценарію коефіцієнти функції корисності транспортного засобу встановлено таким чином: $\omega_R$ = 0,60, $\omega_V$ = 0,25, $\omega_D$ = 0,15. Для пішохода прийнято $\omega_R$ = 0,70, $\omega_V$ = 0,20, $\omega_D$ = 0,10. Такий розподіл відображає більшу значущість безпеки порівняно з втратами швидкості та зміною траєкторії.

Для кожної стратегії пішохода порівнюються значення корисності транспортного засобу. Якщо пішохід продовжує рух, автомобіль має вибір між продовженням руху, зменшенням швидкості та гальмуванням. Високий ризик у першому випадку суттєво зменшує корисність цієї стратегії. Зменшення швидкості забезпечує нижчий ризик при відносно невеликих втратах рухової ефективності. Гальмування дає ще менший ризик, але супроводжується більшими втратами швидкості.

Аналогічне порівняння проводиться для $s_P^2$ та $s_P^3$. У результаті для кожної стратегії пішохода формується відповідна найкраща відповідь транспортного засобу.

Для розглянутого сценарію отримано: $BR_V\left(s_P^1\right)=s_V^2$, $BR_V\left(s_P^2\right)=s_V^1$, $BR_V\left(s_P^3\right)=s_V^1$.

Отже, при продовженні руху пішохода оптимальною реакцією автомобіля є зменшення швидкості. Якщо ж пішохід сам зменшує швидкість або змінює напрямок, потреба в активному гальмуванні автомобіля зменшується, і продовження руху може забезпечувати більшу корисність.

Такий результат має важливе значення для інтерпретації моделі. Він показує, що оптимальна дія транспортного засобу визначається не абсолютним значенням його швидкості, а сукупністю параметрів конфлікту та поведінкою іншого учасника.

На наступному етапі пішохід порівнює власні значення корисності з урахуванням найкращої відповіді транспортного засобу. Для цього використовується співвідношення (5).

У розглянутому сценарії продовження руху пішохода супроводжується очікуваним зменшенням швидкості автомобіля. З одного боку, це забезпечує необхідний рівень безпеки, а з іншого – дозволяє пішоходу завершити перехід без додаткового маневрування. Тому за відповідного співвідношення вагових коефіцієнтів така стратегія може мати більшу корисність, ніж самостійне сповільнення або зміна траєкторії.

Отримана пара стратегій визначається як (6):

$$\left(s_P^*, s_V^*\right)=\left(s_P^1, BR_V\left(s_P^1\right)\right). \tag{6}$$

Для наведеного розрахункового випадку це відповідає ситуації «пішохід продовжує рух – транспортний засіб зменшує швидкість».

Важливо, що така рівновага не є незмінною для всіх дорожніх ситуацій. Її положення залежить від рівня ризику та співвідношення вагових коефіцієнтів. Якщо початкова швидкість автомобіля збільшується, відстань до пішохода скорочується або зменшується прогнозований час до конфлікту, корисність продовження руху автомобіля швидко знижується. За певного критичного рівня ризику найкращою відповіддю стає гальмування.

Інший характер має зміна вагового коефіцієнта безпеки. Зі збільшенням $\omega_R$ учасник стає більш чутливим до зростання ризику. Тому навіть незначне погіршення просторово-часових умов може спричинити перехід до більш обережної стратегії. Зменшення $\omega_R$, навпаки, підвищує значущість збереження швидкості та початкової траєкторії.

Таким чином, рівновага в запропонованій моделі визначається не одним параметром, а їх сукупністю. Це дозволяє описувати перехід між різними моделями поведінки без введення окремих правил для кожного випадку. Наприклад, за низького ризику модель допускає продовження руху обома учасниками; зі зростанням ризику оптимальною реакцією може стати зменшення швидкості; за високого ризику – гальмування.

Отриманий результат підтверджує доцільність використання послідовної ігрової постановки для аналізу дорожніх конфліктів. Вона дозволяє врахувати не тільки поточний стан системи, а й очікувану реакцію іншого учасника. При цьому зміна параметрів дорожньої ситуації безпосередньо впливає на набір оптимальних стратегій та положення рівноваги. Це створює основу для подальшої перевірки моделі на різних сценаріях руху та визначення меж її практичного застосування.

**4. Висновки.** Удосконалено модель взаємодії пішохода і транспортного засобу в умовах нерегульованого дорожнього руху на основі послідовної гри Стакелберга. Формалізовано множини можливих стратегій учасників та сформовано підхід до їх оцінювання з урахуванням трьох основних складових: конфліктного ризику, зміни швидкості та відхилення траєкторії руху. Для комплексної оцінки небезпеки використано просторово-часові характеристики взаємодії, зокрема час до потенційного зіткнення, час після виходу із конфліктної зони, мінімальну відстань та відносну швидкість. Включення цих показників до функції корисності дозволило враховувати не лише безпеку, а й втрати, пов'язані зі зміною режиму руху та траєкторії. Запропонована модель може бути використана як основа для оцінювання конфліктних ситуацій на нерегульованих пішохідних переходах.

Досліджено умови формування рівноваги Стакелберга та вибору оптимальних стратегій учасників. Встановлено, що вибір дії пішохода і транспортного засобу залежить від рівня конфліктного ризику, просторово-часових параметрів ситуації та співвідношення вагових коефіцієнтів безпеки й ефективності руху. Для розглянутого сценарію рівноважною є комбінація, за якої пішохід продовжує рух, а транспортний засіб зменшує швидкість. Показано, що збільшення швидкості автомобіля, скорочення відстані до пішохода або зменшення часу до потенційного конфлікту створює передумови для переходу до більш обережної стратегії транспортного засобу. Отримані положення можуть бути використані під час розроблення систем оцінювання дорожніх конфліктів, підтримки прийняття рішень та алгоритмів інтелектуального керування транспортними засобами.

**Конфлікт інтересів.** Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

**Фінансування.** Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

**Доступність даних.** Дані будуть надані за обґрунтованим запитом.

**Використання засобів штучного інтелекту.** Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

**Внесок авторів.** Сахневич Валерій: аналіз існуючих рішень і підходів, розроблення архітектури моделі та її реалізація, проведення тестування, аналіз отриманих результатів, підготовка основного тексту статті; оцінювання результатів огляду літератури, формування пропозицій щодо архітектури моделі та можливих варіантів її конфігурації, оцінювання результатів тестування, внесення змін і редакційних правок до тексту статті.

**References:**


1. Hrytsun, O., & Velhan, A. (2022). Doslidzhennia tryvalosti zatrymok transportnykh zasobiv pry proizdi nerehulovanoho pishokhidnoho perekhodu. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 2(19), 72–80. https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.905
2. Stepanchuk, O., Timkina, S., & Chernyshova, O. (2025). Vplyv pishokhidnykh i pasazhyrskykh potokiv na inzhenerno-planuvalni rishennia zupynok marshrutnoho transportu. *Teoriia ta praktyka dyzainu*, (35), 65–74. https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.35.7
3. Amini, R. E., Abouelela, M., Dhamaniya, A., Friedrich, B., & Antoniou, C. (2024). A game-theoretic approach for modelling pedestrian–vehicle conflict resolutions in uncontrolled traffic environments. *Accident Analysis & Prevention*, 203, 107604. https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107604
4. Kholodova, O., Buhaiova, M., & Kholodov, O. (2026). Krytychnyi analiz metodyk otsinky bezpeky rehulovanykh i nerehulovanykh perekhrest z urakhuvanniam skladnosti transportnykh vzaiemodii. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti,* 1(26). https://doi.org/10.36910/39eh8d59
5. Golchoubian, M., Ghafurian, M., Dautenhahn, K., & Azad, N. L. (2023). Pedestrian trajectory prediction in pedestrian-vehicle mixed environments: A systematic review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(11), 11544–11567. https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3291196
6. Liu, M., Zeng, W., Chen, P., & Wu, X. (2017). A microscopic simulation model for pedestrian-pedestrian and pedestrian-vehicle interactions at crosswalks. PLoS ONE, 12(7), e0180992. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180992
7. Muduli, K., & Ghosh, I. (2025). Predicting pedestrian-vehicle interaction severity at unsignalized intersections. *Traffic Injury Prevention*, 26(2), 252–261. https://doi.org/10.1080/15389588.2024.2404713
8. Govinda, L., Raju, M. S. K., & Shankar, K. R. (2022). Pedestrian-vehicle interaction severity level assessment at uncontrolled intersections using machine learning algorithms. *Safety Science,* 153, 105806. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105806
9. Hafeez, F., Ullah Sheikh, U., Mas'ud, A. A., Al-Shammari, S., Hamid, M., & Azhar, A. (2022). Application of the theory of planned behavior in autonomous vehicle-pedestrian interaction. *Applied Sciences*, 12(5), 2574. https://doi.org/10.3390/app12052574
10. Rui, R., Yao, X., Ye, S., & Ma, S. (2023). Evolutionary game analysis of pedestrian-autonomous vehicle interactions at unsignalized road sections: A policy intervention perspective. *Transportation Letters*, 15(10), 1300–1316. https://doi.org/10.1080/19427867.2022.2148068
11. Li, P., Guo, H., Bao, S., & Kusari, A. (2023). A probabilistic framework for estimating the risk of pedestrian-vehicle conflicts at intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* 24(12), 14111–14120. https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3296567
12. Alghodhaifi, H., & Lakshmanan, S. (2023). Holistic spatio-temporal graph attention for trajectory prediction in vehicle–pedestrian interactions. *Sensors*, 23(17), 7361. https://doi.org/10.3390/s23177361
13. Binko, I., & Shevel, V. (2024). Kompleksnyi pidkhid do upravlinnia formuvanniam hrupy robotiv. *Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti,* 2(28), 17–32. https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.017
14. Chornyi, V. (2025). Analiz metodiv ta zasobiv system upravlinnia transportnym zasobom v zadachi optymalnoho keruvannia. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu.* Seriia: Tekhnichni nauky, 353(3.2), 393–399. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-55
15. Zhou, Y., Huang, C., & Hang, P. (2024). Game theory-based interactive control for human–machine cooperative driving. *Applied Sciences*, 14(6), 2441. https://doi.org/10.3390/app14062441


**Відомості про авторів**


| Англ. | Укр. |
|---|---|
| Valerii Sakhnevych<br>Postgraduate Student at the Department of economical cybernetics, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine<br>valerij25144@ukr.net<br>ORCID: 0009-0007-5950-5627 | Сахневич Валерій Борисович<br>аспірант кафедри економічної кібернетики, Національний університет біоресурсів і природокористування України<br>valerij25144@ukr.net<br>ORCID: 0009-0007-5950-5627 |



*Дата надходження статті: 25.05.2026*
*Дата надходження виправленої версії статті: 06.07.2026*
*Дата прийняття статті: 09.07.2026*
*Дата публікації статті: 26.10.2026*