

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.025

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.268-277](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.268-277)**І. Б. Гевко**, проф., д-р техн. наук, **В. О. Тесля**, доц., канд. техн. наук,**М. Д. Сіправська**, **Б. Р. Гевко**, канд. екон. наук, **Р. В. Хорошун***Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: volodymyr_teslya@ukr.net*

Нові технології для підвищення безпеки дорожнього руху на пішохідних переходах та регульованих перехрестях

У статті розглянуто питання підвищення ефективності та безпеки дорожнього руху за допомогою впровадження нових технологій у сфері пішохідних переходів та регулювання транспортних потоків. Досліджено ефективність сенсорних нерегульованих пішохідних переходів, сенсорних регульованих переходів із розумними світлофорами та регульованих перехрестях з адаптивними світлофорними системами. Проаналізовано їх вплив на зниження аварійності та покращення організації дорожнього руху. Запропоновано практичні рекомендації щодо їх впровадження у міську інфраструктуру.

Зростання кількості транспортних засобів та інтенсифікація руху в містах спричиняють підвищення рівня аварійності, особливо на пішохідних переходах та регульованих перехрестях. Традиційні методи регулювання дорожнього руху не завжди є ефективними, оскільки не враховують динамічні зміни транспортного потоку та поведінкові особливості учасників дорожнього руху. Впровадження інтелектуальних транспортних систем здатне суттєво покращити ситуацію, забезпечуючи автоматизоване управління рухом за допомогою сучасних технологій.

транспортні системи, безпека дорожнього руху, розумні світлофори, сенсорні пішохідні переходи, адаптивне регулювання трафіку

Постановка проблеми. Незважаючи на впровадження різних заходів щодо покращення безпеки дорожнього руху, рівень аварійності на пішохідних переходах та регульованих перехрестях залишається високим. Основними причинами є людський фактор, неефективне регулювання дорожнього руху і недостатнє використання сучасних технологій контролю та управління транспортними потоками.

Нерегульовані пішохідні переходи часто стають місцем підвищеного ризику через непередбачувану поведінку пішоходів і водіїв, а також через низьку видимість у складних погодних умовах. Регульовані переходи та світлофорні об'єкти також мають свої недоліки, зокрема недостатню адаптивність до змін у трафіку, що може призводити до неефективного використання часу очікування для пішоходів та транспортних засобів.

У зв'язку з цим виникає потреба в дослідженні та впровадженні нових транспортних систем, які здатні в реальному часі аналізувати ситуацію на дорозі, адаптувати режими роботи світлофорів та покращувати безпеку всіх учасників дорожнього руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Безпека дорожнього руху є однією з ключових проблем сучасних міст. Зростання кількості транспортних засобів, підвищення інтенсивності руху та урбанізація призводять до збільшення випадків дорожньо-транспортних пригод, особливо за участю пішоходів, що підтверджується дослідженням авторів [1, 2]. Одним із важливих аспектів покращення безпеки є впровадження нових технологій у сфері регулювання руху та пішохідних переходів.

Дослідження функціонування перехресть [3-6] із нерегульованими та регульованими переходами мають низку обмежень, які не завжди дозволяють ефективно забезпечити безпеку учасників дорожнього руху. Впровадження сенсорних систем та розумних світлофорів дає змогу значно підвищити ефективність регулювання руху та зменшити рівень аварійності.

Наукові дослідження [7, 8] в сфері безпеки дорожнього руху та нових транспортних систем показують, що застосування адаптивних світлофорних технологій та сенсорних систем значно покращує ситуацію на дорогах. У ряді досліджень розглянуто ефективність використання датчиків руху, відеоаналізу та штучного інтелекту для автоматизації управління транспортними потоками. Науковці підкреслюють, що сенсорні пішохідні переходи дозволяють суттєво скоротити час реакції водіїв та знизити ризик наїздів на пішоходів. Крім того, аналіз існуючих систем адаптивного управління світлофорами вказує на те, що вони здатні суттєво зменшити затримки на перехрестях та підвищити загальну пропускну здатність дорожньої мережі. Разом із тим, існує потреба у подальших дослідженнях щодо оптимізації алгоритмів управління світлофорами, їхньої інтеграції з іншими транспортними системами та оцінки економічної доцільності масштабного впровадження таких технологій у міських умовах.

У сучасних наукових дослідженнях [7, 9] розглядаються різні підходи до оптимізації руху транспорту та підвищення безпеки пішоходів. Зокрема, активно використовуються спеціалізовані програмні комплекси, такі як VISSIM, PARAMICS, AIMSUN, SISTM, SIDRA, FLEXYST, DRACULA та інші, які дозволяють моделювати транспортні потоки, оцінювати ефективність адаптивних алгоритмів керування світлофорами та прогнозувати потенційні конфліктні ситуації. Впровадження таких технологій сприяє розробці оптимальних рішень для зниження аварійності та покращення умов для всіх учасників дорожнього руху.

Одним із перспективних методів аналізу та оптимізації роботи регульованих перехресть є використання імітаційного моделювання. Як зазначено в науковому дослідженні [7], цей підхід дозволяє оцінювати різні сценарії руху транспорту, використовуючи адаптивні алгоритми керування, побудовані на основі нечіткої логіки. Така методика сприяє підвищенню ефективності роботи транспортних потоків завдяки врахуванню особливостей руху пішоходів та громадського транспорту. Застосування імітаційного моделювання також дає змогу визначати оптимальні стратегії організації руху, що сприяє зниженню аварійності та підвищенню безпеки для всіх учасників дорожнього руху. У роботах [10, 11] розглядається досвід аналізу дорожніх умов та характеристик транспортних і пішохідних потоків у міському середовищі, що є важливим етапом розробки комплексних заходів для підвищення безпеки на перехрестях. Таким чином, інтеграція сучасних технологій у сферу дорожнього руху, зокрема імітаційного моделювання та інтелектуальних алгоритмів керування, дозволяє створювати більш ефективні та безпечні транспортні системи.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є аналіз та оцінка ефективності сенсорних нерегульованих пішохідних переходів, сенсорних регульованих переходів із розумними світлофорами та регульованих перехресть з адаптивними світлофорними системами.

Виклад основного матеріалу. Сучасні транспортні технології розвиваються в напрямку підвищення безпеки руху як для водіїв, так і для пішоходів. Впровадження нових транспортних систем базується на використанні сучасних технологій, таких як датчики руху, відеоаналіз, штучний інтелект і зв'язок транспортної інфраструктури з хмарними обчисленнями. Сенсорні нерегульовані пішохідні переходи оснащені

детекторами, що дозволяють вчасно попереджати водіїв про наявність пішоходів на переході. Це суттєво знижує ризик аварійних ситуацій, особливо в умовах недостатньої видимості.

Розумні світлофори, що використовуються на регульованих переходах і перехрестях, здатні аналізувати інтенсивність руху та адаптувати режими сигналізації відповідно до поточної ситуації. Використання алгоритмів штучного інтелекту дозволяє мінімізувати затримки та покращувати пропускну здатність транспортних вузлів. Адаптивні світлофорні системи на регульованих перехрестях можуть інтегруватися з іншими транспортними технологіями, зокрема системами управління рухом громадського транспорту, що сприяє підвищенню ефективності міських перевезень. Це дозволяє досягти оптимального балансу між безпекою та швидкістю переміщення транспорту і пішоходів.

Одним із актуальних завдань є покращення умов видимості на нерегульованих пішохідних переходах, особливо в темний час доби. Відсутність належного освітлення та своєчасного інформування водіїв про появу пішоходів значно підвищує ризик аварійних ситуацій. Одним із рішень цієї проблеми є впровадження сенсорного нерегульованого пішохідного переходу, що забезпечує автоматичне освітлення та інформування водіїв про потенційну небезпеку.

Відомим технічним рішенням є сенсорний нерегульований пішохідний перехід, що складається із дорожніх знаків на стійках із вмонтованими сенсорними датчиками, які завчасно попереджають про рух на нерегульованому пішохідному переході [12]. Проте недоліком цього рішення є обмежена зона інформування водіїв, що може бути недостатньою у випадку несприятливих погодних умов або недостатньої видимості в темний час доби.

Розроблений нами проєкт удосконаленого сенсорного нерегульованого пішохідного переходу (пат. України № 152286) [13] забезпечує своєчасне інформування водіїв про появу пішоходів за допомогою додаткових сенсорних датчиків, встановлених за 60-70 м до переходу, та автоматичне включення освітлення для покращення видимості (рис. 1).

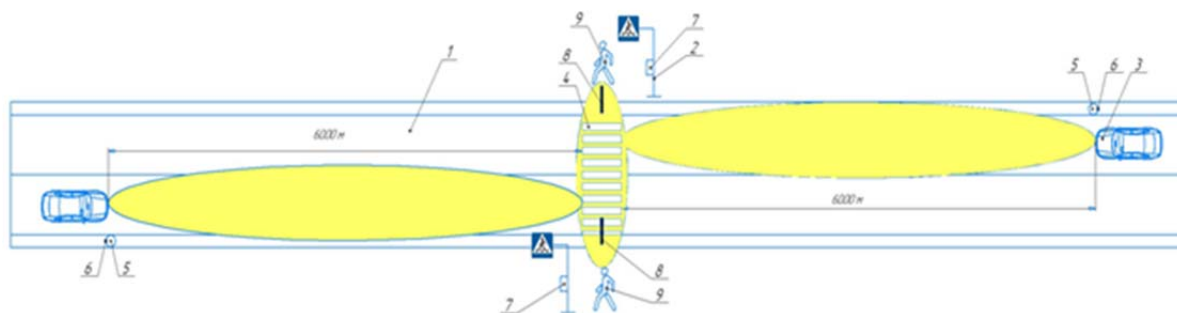


Рисунок 1 – Сенсорний нерегульований пішохідний перехід:

- 1 – дорожнє полотно; 2 – стійка дорожніх знаків; 3 – автомобіль; 4 – пішохідний перехід; 5 – стовбець;
6, 7 – сенсорні датчики; 8 – світильник; 9 – пішохід

Джерело: розроблено авторами з використанням [13]

Запропонований сенсорний нерегульований пішохідний перехід складається з:

- дорожніх знаків на стійках, у яких вмонтовані сенсорні датчики на рівні 0,3-0,5 м для фіксації появи пішоходів;
- стовпців, нерухомо встановлених за 60-70 м до пішохідного переходу паралельно повздовжній осі дороги;

- додаткових сенсорних датчиків, що вмонтовані в стовпці на рівні 0,3-0,5 м для фіксації наближення транспортних засобів;
- світильників, розташованих над пішохідним переходом і пов'язаних із сенсорними датчиками.

Принцип роботи: коли пішохід наближається до переходу, сенсорні датчики в дорожніх знаках фіксують його появу і подають сигнал на світильники, які вмикають освітлення переходу. Аналогічно, при наближенні автомобіля до пішохідного переходу додаткові сенсорні датчики в стовпцях фіксують його рух і активують освітлення, забезпечуючи водію завчасне інформування.

Запропонована система дозволяє підвищити рівень безпеки на нерегульованих пішохідних переходах шляхом автоматичного освітлення та попередження водіїв про появу пішоходів. Це сприятиме зменшенню кількості дорожньо-транспортних пригод, особливо у темний час доби та в умовах поганої видимості.

Попереднє рішення щодо сенсорного нерегульованого пішохідного переходу з автоматичним освітленням забезпечує безпеку в умовах недостатньої видимості. Проте, для покращення транспортного потоку та зменшення непродуктивного простою транспортних засобів необхідно впроваджувати інтелектуальну систему регулювання світлофорів.

Такими відомим технічним рішенням є безпечний регульований пішохідний перехід, що складається із світлофора з кнопками перемикавання режиму руху [14]. Основним недоліком цього рішення є надлишковий простій транспортних засобів через фіксовану тривалість дозволяючого та забороняючого сигналів світлофора, незалежно від фактичної наявності пішоходів на переході.

Тому, було розроблено сенсорний регульований пішохідний перехід з розумним світлофором (пат. України № 155001) [15], що динамічно змінює сигнали залежно від наявності пішоходів, тим самим скорочуючи час простою транспортних засобів та зменшуючи рівень забруднення довкілля (рис. 2).

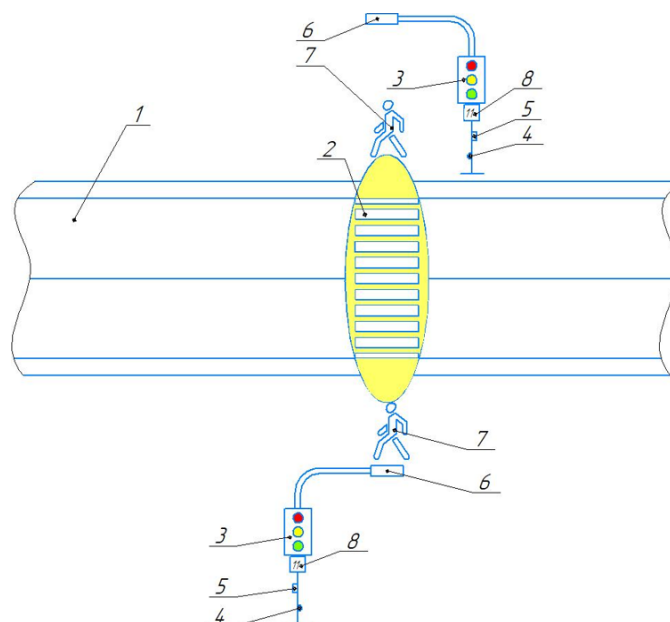


Рисунок 2 – Сенсорний регульований пішохідний перехід з розумним світлофором:
1 – дорожнє полотно; 2 – пішохідний перехід; 3 – світлофорна тумба; 4 – опора світлофора;
5 – кнопка перемикавання світлофора; 6 – сенсорні датчики фіксації; 7 – пішохід

Джерело: розроблено авторами з використанням [15]

Запропонований сенсорний регульований пішохідний перехід з розумним світлофором складається з:

- опори світлофора, розташованих на пішохідному переході з обох сторін дорожнього полотна;
- світлофорних тумб із кнопками перемикання режиму руху;
- сенсорних датчиків, вмонтованих в опори світлофора для фіксації появи пішоходів;
- інформуючих цифрових табло, які відображають час, відведений на перехід.

Принцип роботи: пішохід натискає кнопку перемикання світлофора, що активує забороняючий сигнал для транспорту та відображення часу на цифрових табло. Сенсорні датчики фіксують рух пішохода, а після його виходу з переходу світлофор автоматично перемикається на дозволяючий сигнал для транспорту, навіть якщо відведений час ще не завершився.

Запропоноване рішення дозволяє оптимізувати рух транспорту, зменшити простой, витрати пального та рівень забруднення повітря. Інтелектуальне керування світлофором підвищує загальний рівень безпеки та комфорту всіх учасників дорожнього руху.

Новим підходом до управління рухом на регульованих перехрестях, зокрема для пішоходів та транспортних засобів, є регульоване перехрестя з розумним світлофором, оснащеним сенсорами руху, що дозволяє оптимізувати час очікування та зменшити надлишкові витрати палива і забруднення навколишнього середовища. Система автоматично реагує на наближення транспортних засобів та пішоходів до перехрестя, що дозволяє підвищити ефективність та безпеку дорожнього руху.

Відомим рішенням є використання безпечного регульованого пішохідного переходу, в якому світлофори автоматично регулюють рух пішоходів і транспортних засобів. Однак ці системи можуть призводити до надмірних затримок, оскільки сигнал світлофора не завжди синхронізується з потоком транспорту чи пішоходів, що в свою чергу збільшує час простою і витрати палива. Запропоноване нами рішення (пат. України № 157321) полягає в створенні розумного світлофора [16], який оснащений сенсорами руху, що дозволяють виявляти наближення транспортних засобів або пішоходів до перехрестя. Сенсори фіксують рух і передають дані до центрального приладу, який автоматично розраховує найбільш оптимальний момент для вмикання зеленого сигналу, враховуючи швидкість і напрямок руху. Це дозволяє значно зменшити час очікування, знизити витрати палива та зменшити забруднення.

Складові компоненти системи:

- опори світлофора – розташовані з обох сторін дорожнього полотна на перехресті, містять світлофорні тумби, що регулюють потік транспорту та пішоходів.
- сенсорні датчики руху – вмонтовані в світлофорні тумби для фіксації наближення транспортних засобів та пішоходів.
- центральний прилад – розраховує, коли саме подавати дозвіл на рух, з урахуванням відстані, швидкості та інтенсивності руху.

При наближенні транспортного засобу чи пішохода до перехрестя сенсорні датчики виявляють це заздалегідь. Дані з сенсорів передаються до центрального приладу, який вираховує, коли найбільш доцільно включити дозволяючий сигнал на світлофорі. Враховуючи, яка одиниця рухається швидше, прилад оптимізує час для кожного потоку руху. Це дозволяє зменшити зайвий час простою, уникнути зайвих витрат палива та знизити рівень забруднення (рис. 3).

Переваги запропонованої системи:

- зменшення часу простою – оптимізація світлофорних сигналів відповідно до інтенсивності руху;
- економія палива – за рахунок зменшення часу, що витрачається на очікування;
- зниження забруднення – зменшення викидів через ефективніше використання часу на перехрестях;
- покращення безпеки – за допомогою інтелектуального підходу до регулювання руху з урахуванням реальної ситуації на дорозі.

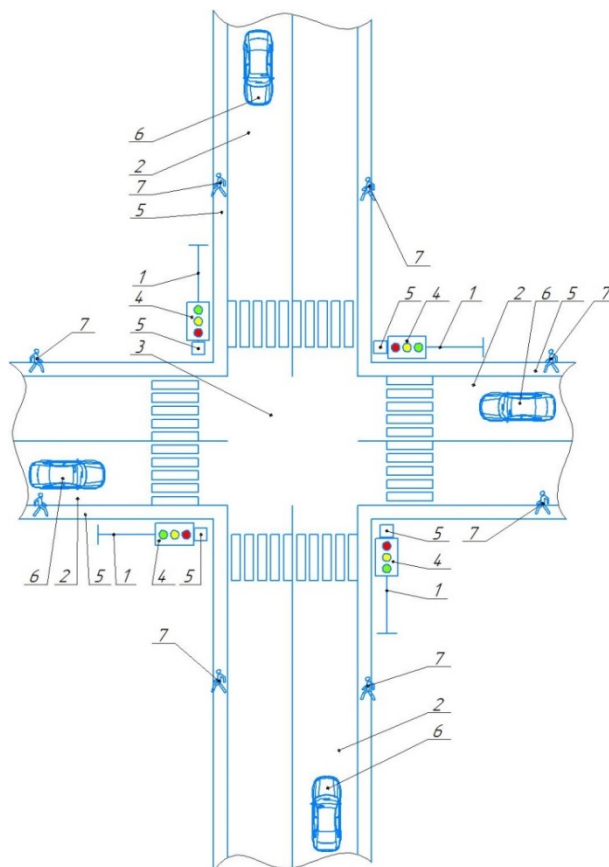


Рисунок 3 – Регульоване перехрестя з розумним світлофором:

1 – опора світлофора; 2 – дорожнє полотно; 3 – перехрестя; 4 – світлофорна тумба;
5 – сенсорні датчики руху; 6 – транспортний засіб; 7 – пішохід

Джерело: розроблено авторами з використанням [16]

Запропонована система розумного світлофора є важливим кроком до покращення безпеки дорожнього руху та підвищення ефективності транспортних потоків. Вона дозволяє значно знизити надлишкові затримки та зробити рух більш передбачуваним і комфортним для всіх учасників. Ця технологія має великий потенціал для впровадження в умовах сучасних міських агломерацій з інтенсивним рухом.

Загалом запропоновані проекти є важливим кроком до майбутнього розумних міст, де технології не лише оптимізують час, але й забезпечують безпечний і зручний рух для всіх.

Наведемо коротке техніко-економічне обґрунтування ефективності розроблених інженерних рішень з розумними пішохідними переходами і перехрестями. Для цього визначимось із додатковими вкладеннями та ефектами [17].

Додаткові вкладення, у порівнянні з існуючими інженерними рішеннями, є дещо більшими і складатимуться із наступних категорій витрат:

- витрати (з врахуванням транспортно-заготівельних витрат) на закупівлю додаткового оснащення світлофорів (сенсорних датчиків, кріпильних елементів, системи обробки інформації тощо) – Z_1 ;
- витрати на монтаж і підключення додаткового оснащення світлофорів (сенсорних датчиків, кріпильних елементів, системи обробки інформації тощо) – Z_2 ;
- витрати на ремонт і обслуговування додаткового оснащення світлофорів (сенсорних датчиків, системи обробки інформації тощо) – Z_3 ;
- витрати на функціонування додаткового оснащення системи обробки інформації світлофорів – Z_4 .

Додатковий ефект поділятиметься на соціальний, екологічний та економічний [17]:

1. Соціальний ефект відображатиметься у скороченні смертності, отриманій кількості травм внаслідок зменшення кількості аварій і покращанні якості життя людей, а також у відсутності потреби у лікуванні та реабілітації внаслідок зменшення кількості аварій. Оцінка цього виду ефекту матиме якісну форму, позаяк не етично проводити її кількісну оцінку.

2. Екологічний ефект визначатиметься зменшенням шкідливих впливів у довкілля при скороченні простою транспортних засобів в режимі очікування на розумних пішохідних переходах і перехрестях. Оцінка даного виду ефекту матиме якісну форму, позаяк не можливо чи вкрай складно здійснити її кількісну оцінку.

3. Економічний ефект визначатиметься наступними складовими:

- економія палива, за рахунок скорочення простою транспортних засобів в режимі очікування на розумних пішохідних переходах і перехрестях – E_1 ;
- збільшення продуктивної праці водіїв, що опосередковано можна відобразити в економії їх заробітної плати за рахунок скорочення простою транспортних засобів в режимі очікування на розумних пішохідних переходах і перехрестях – E_2 ;
- підвищення ефективності використання транспортних засобів, що опосередковано можна відобразити в амортизаційних відрахуваннях за рахунок скорочення простою транспортних засобів в режимі очікування на розумних пішохідних переходах і перехрестях – E_3 ;
- додатковий ефект, що полягає у зменшенні тривалості простою пасажирів і вантажів – E_4 .

Визначення даних складових можливе лише з врахуванням особливостей та інтенсивності руху на кожній конкретній ділянці.

Отже, економічна доцільність оснащення пішохідних переходів і перехресть додатковими розумними засобами, які були викладені в [13, 15, 16], визначатиметься по кожній конкретній ділянці, виходячи із порівняння очікуваних економічних позитивів і додаткових вкладень, як:

$$E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \geq Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4. \quad (1)$$

Для більш детальних підрахунків необхідно проводити фіксацію кількості транспортних засобів і неефективний час їх простою на розумних пішохідних переходах і перехрестях, що дозволить визначити орієнтовний індекс прибутковості інвестицій у проекти, пов'язані із створенням розумних пішохідних переходів і перехресть:

$$P_i = \left(\sum_{t=0}^n \left(\left(\frac{Z_{np}}{T_p} \cdot k_{ne} + \frac{A_p + B_{ny}}{T_{eo}} \right) \cdot \Delta t \cdot n_1 \cdot n_2 \right) / (1+i)^t \right) / (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4), \quad (2)$$

де P_i – індекс прибутковості проєкту створення розумного пішохідного переходу чи перехрестя;

Z_{np} – усереднена річна заробітна плата шофера, грн.;

T_p – річний робочий час шофера, год.;

k_{ne} – коефіцієнт, що враховує додатковий ефект від зменшення тривалості простою пасажирів і вантажів, $k_{ne} = 1 \dots 3$;

A_p – усереднені річні відрахування по транспортному засобу, грн.;

B_{ny} – усереднена вартість палива, що витрачається транспортним засобом за рік, грн.;

T_p – усереднений річний час експлуатації транспортного засобу, год.;

Δt – усереднений на основі експериментальної фіксації час зменшення простою окремого транспортного засобу на розумному пішохідному переході чи перехресті, год.;

n_1 – кількість спрацювань (переключень) світлофорів на розумному пішохідному переході чи перехресті протягом року, шт.;

n_2 – кількість транспортних засобів, що одночасно зупиняються на розумному пішохідному переході чи перехресті, шт.;

i – ставка дисконтування;

t – номер року;

n – кількість років функціонування розумного пішохідного переходу чи перехрестя.

З врахуванням економічного обґрунтування, впровадження розумних пішохідних переходів і перехресть є перспективним рішенням, яке має потенціал підвищення рівня безпеки дорожнього руху, покращення екологічної ситуації та економічної ефективності транспортної інфраструктури. Таким чином, прийняття рішення щодо реалізації таких проєктів має базуватися на детальному техніко-економічному аналізі, що дозволить оптимізувати витрати, максимізувати отримані вигоди і сприятиме підвищенню ефективності міських перевезень.

Висновки. Результати дослідження підтверджують, що провадження розумних пішохідних переходів і перехресть сприяє зниженню рівня аварійності, а також безпосередньо впливає на зменшення смертності та травматизму серед учасників дорожнього руху. Відтак розроблені та обґрунтовані в роботі проєктні рішення сприяють зниженню рівня аварійності, дозволяють забезпечити скорочення часу простою транспортних засобів на розумних пішохідних переходах і перехрестях, що призводить до зменшення кількості викидів шкідливих речовин, витрат палива, підвищення продуктивності праці водіїв та покращення ефективності експлуатації транспортних засобів.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку економічно ефективних систем, їх інтеграцію в існуючу транспортну інфраструктуру та оцінку довгострокових наслідків використання таких технологій у великих містах. Для досягнення максимального ефекту необхідно проводити детальний аналіз інтенсивності руху, місцевих умов та перевірки ефективності очікуваних результатів перед впровадженням розумних пішохідних переходів і перехресть у міську інфраструктуру з врахуванням розроблених рекомендацій.

Список літератури

1. Ляшук О.Л., Міронов Д.В., Лисенко С.В., Гупка А.Б., Бодоряк Ю.Д., Статистичний аналіз дорожньо-транспортних пригод у Тернопільській області та заходи щодо зниження аварійності / Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2024. Вип. 9(40), ч. II. С. 88-106.
2. Статистика ДТП в Україні. Патрульна поліція: веб-сайт. URL: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka>
3. Ляшук О.Л., Сташків М.Я., Цьонь О.П., Рожко Н.Я., Плекан У.М., Гевко Б.Р., Підвищення ефективності функціонування нерегульованого перехрестя з круговим рухом / Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 8(39), ч. I. С. 219-229.
4. Gruden, C.; Ištoka Otković, I.; Šraml, M. Pedestrian safety at roundabouts: Their crossing and glance behavior in the interaction with vehicular traffic. *Accid. Anal. Prev.* 2021, 159, 106290.
5. Ренкас А.А., Руденко Д.В., Товарянський В.І., Підвищення ефективності функціонування перехресть з високоінтенсивними транспортними та пішохідними потоками / Вісник ЛДУБЖД. 2021. Вип. №23. С. 61-67.
6. Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосування та вимоги безпеки: ДСТУ 4092-2002. – [Чинний від 2003-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2002. – 27 с. – (Державний стандарт України).
7. Форнальчик Є. Ю. Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах: монографія / Є. Ю. Форнальчик, І. А. Могила, В. Е. Трушевський, В. В. Гілевич; за заг. ред Є. Ю. Форнальчика. – Львів :Видавництво Львівської політехніки, 2018. 236 с.
8. Організація та регулювання дорожнього руху: підручник / Бакуліч О.О. та ін.; за ред. В.П. Поліщука. Київ. 2014. 467 с.
9. Пономаренко Л.А. Управління нестационарними транспортними потоками на регульованих перехрестях : дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.01 «Транспортні системи» / Любов Анатоліївна Пономаренко. – К., 2006. – 145 с.
10. Dorokhin, S.V., Zelikov, V.A., Denisov, G.A.: Improvement of road traffic safety in the zone of unsignalled pedestrian crossings. *Transp. Res. Procedia* 36, 122–128 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.053>
11. Бугайов І.С., Холодова О.О., Бугайова М.О. Оцінка ефективності впровадження засобів заспокоєння дорожнього руху на перехресті. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2023, №1 (20). С. 79-86.
12. Сенсорний нерегульований пішохідний перехід : пат. 139005 Україна ; опубл. 2019 р. Бюл. № 23.
13. Сенсорний нерегульований пішохідний перехід : пат. 152286 Україна, МПК G08G 1/09. № u 202202157 ; опубл. 12.01.2023. Бюл. № 2.
14. Безпечний регульований пішохідний перехід : пат. 1389125, Україна ; опубл. 2019 р. Бюл. № 23.
15. Сенсорний регульований пішохідний перехід з розумним світлофором : пат. 155001 Україна, МПК E01F13/04. № u 202302464 ; опубл. 10.01.2024. Бюл. № 2/2024.
16. Регульоване перехрестя з розумним світлофором : пат. 157321 Україна, МПК: E01F9/00, E01F9/658, G08G1/095, G06V20/58. № u202400166 ; опубл. 02.10.2024. Бюл. № 40/2024.
17. Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень на СТО та АТП : Навчальний посібник / укладачі : Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Луциків І.В., Плекан У.М., Клендій В.М. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. – 276 с.

References

1. Liashuk, O.L., Mironov, D.V., Lysenko, S.V., Hupka, A.B., Bodoriak, Yu.D. (2024). Statystychnyi analiz dorozhn'o-transportnykh pryhod u Ternopils'kii oblasti ta zakhody shchodo znyzhennia avariinosti. *Tsentral'noukrains'kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 9(40), Pt. II, 88–106 [in Ukrainian].
2. Patrol'na politsiia. (n.d.). Statystyka DTP v Ukraini. <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka> [in Ukrainian].
3. Liashuk, O.L., Stashkiv, M.Ya., Ts'on', O.P., Rozhko, N.Ya., Plekan, U.M., Hevko, B.R. (2023). Pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia neregul'ovanoho perekhrestia z kruhovym rukhom. *Tsentral'noukrains'kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 8(39), Pt. I, 219–229 [in Ukrainian].
4. Gruden, C., Ištoka Otković, I., & Šraml, M. (2021). Pedestrian safety at roundabouts: Their crossing and glance behavior in the interaction with vehicular traffic. *Accident Analysis and Prevention*, 159, 106290. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106290>
5. Renkas, A.A., Rudenko, D.V., Tovarians'kyi, V.I. (2021). Pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia perekhrest' z vysokointensyvnymy transportnymy ta pishokhidnymy potokamy. *Visnyk LDUBZhd*, (23), 61–67 [in Ukrainian].
6. Derzhstandart Ukrainy. (2002). *Bezpeka dorozhnoho rukhu. Svitlofory dorozhni. Zahal'ni tekhnichni vymohy, pravyla zastosuvannia ta vymohy bezpeky (DSTU 4092–2002)*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
7. Fornal'chyk, Ye.Yu., Mohyla, I.A., Trushevskiy, V.E., Hilevych, V.V. (2018). *Upravlinnia dorozhnym rukhom na rekul'ovanykh perekhrestiaakh u mistakh: monohrafiia*. Ye.Yu. Fornal'chyk (Ed.). Lviv: Vydavnytstvo Lvivs'koï politekhniki [in Ukrainian].
8. Polishchuk, V.P. (Ed.). (2014). *Orhanizatsiia ta rekul'uvannia dorozhnoho rukhu: pidruchnyk*. Kyiv [in Ukrainian].

9. Ponomarenko, L.A. (2006). *Upravlinnia nestatsionarnymy transportnymy potokamy na rehul'ovanykh perekhrestiakh: dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.22.01 "Transportni systemy"*. Kyiv [in Ukrainian].
10. Dorokhin, S.V., Zelikov, V.A., Denisov, G.A. (2018). Improvement of road traffic safety in the zone of unsignalized pedestrian crossings. *Transportation Research Procedia*, 36, 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.053>
11. Buhaiov, I.S., Kholodova, O.O., Buhaiova, M.O. (2023). Otsinka efektyvnosti vprovadzhennia zasobiv zaspokoiennia dorozhnogo rukhu na perekhresti. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 1(20), 79–86 [in Ukrainian].
12. *Sensornyi neregul'ovanyi pishokhidnyi perekhid*. Patent No. 139005, Ukraine. Bulletin No. 23, 2019 [in Ukrainian].
13. *Sensornyi neregul'ovanyi pishokhidnyi perekhid*. Patent No. 152286, Ukraine. MPK G08G 1/09. No. u202202157; Published 12.01.2023. Bulletin No. 2 [in Ukrainian].
14. *Bezpechnyi rehul'ovanyi pishokhidnyi perekhid*. Patent No. 1389125, Ukraine. Bulletin No. 23, 2019 [in Ukrainian].
15. *Sensornyi rehul'ovanyi pishokhidnyi perekhid z rozumnym svitloforom*. Patent No. 155001, Ukraine. MPK E01F13/04. No. u202302464; Published 10.01.2024. Bulletin No. 2/2024 [in Ukrainian].
16. *Rehul'ovane perekhrestia z rozumnym svitloforom*. Patent No. 157321, Ukraine. MPK: E01F9/00, E01F9/658, G08G1/095, G06V20/58. No. u202400166; Published 02.10.2024. Bulletin No. 40/2024 [in Ukrainian].
17. Hevko, I.B., Liashuk, O.L., Lutsykyv, I.V., Plekan, U.M., Klendii, V.M. (2021). *Tekhniko-ekonomichne obhruntuvannia inshenernykh rishen' na STO ta ATP: navchal'nyi posibnyk*. Ternopil: Vyd-vo TNTU imeni Ivana Puliuia [in Ukrainian].

Ivan Hevko, Prof., DSc., **Volodymyr Teslya**, PhD tech. sci., **Maria Sipravska**,
Bogdan Hevko, PhD econ. sci., **Roman Khoroshun**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

New Technologies for Enhancing Road Traffic Safety at Pedestrian Crossings and Signalized Intersections

Despite the implementation of various measures to improve road traffic safety, the accident rate at pedestrian crossings and signalized intersections remains high. The main causes include the human factor, ineffective traffic control, and insufficient use of modern technologies for monitoring and managing traffic flows.

Unsignalized pedestrian crossings often pose a high-risk area due to unpredictable pedestrian and driver behavior, as well as poor visibility in adverse weather conditions. Signalized crossings and intersections also have drawbacks, particularly a lack of adaptability to traffic flow changes, which can lead to inefficient waiting times for both pedestrians and vehicles.

Therefore, there is a need for research and implementation of new intelligent transport systems capable of analyzing real-time road conditions, adjusting traffic light operations, and improving safety for all road users.

This study examines ways to enhance the efficiency and safety of road traffic through the introduction of new technologies in pedestrian crossing management and traffic flow regulation. The research focuses on the effectiveness of sensor-based unsignalized pedestrian crossings, sensor-controlled crossings with intelligent traffic lights, and signalized intersections equipped with adaptive traffic light systems. Their impact on accident reduction and improved traffic organization is analyzed. Practical recommendations for integrating these technologies into urban infrastructure are provided.

The increasing number of vehicles and traffic intensity in urban areas contribute to a rise in accident rates, particularly at pedestrian crossings and regulated intersections. Traditional traffic control methods are not always effective as they fail to account for dynamic traffic flow changes and behavioral patterns of road users. Implementing intelligent transport systems can significantly improve the situation by enabling automated traffic management using advanced technologies.

The objective of this study is to analyze and assess the efficiency of sensor-based unsignalized pedestrian crossings, sensor-controlled regulated crossings with intelligent traffic lights, and signalized intersections with adaptive traffic light systems.

The research confirms that the implementation of smart pedestrian crossings and intersections contributes to a reduction in accident rates and directly impacts the decrease in mortality and injuries among road users. The proposed project solutions developed in this study help lower accident rates, reduce vehicle idle time at smart pedestrian crossings and intersections, decrease harmful emissions and fuel consumption, enhance driver productivity, and improve the overall efficiency of vehicle operations.

Further studies should focus on developing cost-effective systems, integrating them into existing transport infrastructure, and evaluating the long-term effects of such technologies in large cities. To maximize effectiveness, detailed traffic flow analyses, local conditions assessments, and pre-implementation evaluations of expected outcomes should be conducted to ensure optimal deployment of smart pedestrian crossings and intersections in urban infrastructure.

transport systems, road traffic safety, intelligent traffic lights, sensor-controlled pedestrian crossings, adaptive traffic regulation

Одержано (Received) 07.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 23.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 06.05.2025