

О. О. Холодова<sup>1</sup>, доц., канд. техн. наук, О. С. Левченко<sup>1</sup>, М. О. Бугайова<sup>1</sup>, А. О. Боцман<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

<sup>2</sup>Харківський університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна

e-mail: [olgakholodova280781@gmail.com](mailto:olgakholodova280781@gmail.com)

## Оптимізація руху міського трамвайного транспорту для підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі

Досліджено вплив міського трамвайного транспорту на дорожній рух у м. Харків. Доведено, що за кордоном активно впроваджуються інтелектуальні системи управління та технології V2V і V2I, тоді як в Україні обмежуються збором статистики, системні зміни майже не впроваджуються, а демонтаж трамвайних колій суперечить міжнародному досвіду. Моделювання показало, що перенесення трамвайної колії на окреме полотно з регулюванням світлофорів знижує конфліктні точки, скорочує затримки, підвищує швидкість руху та мінімізує зупинки. Вирішальним фактором стало правильне місце перенесення колій. Результати можуть сприяти оптимізації трамвайної інфраструктури, підвищенню доступності та ефективності громадського транспорту.

**трамвайний рух, транспортний засіб, вулично-дорожня мережа, організація дорожнього руху, ефективність, аварійність, безпека, транспортний потік, дорожньо-транспортна пригода**

**Постановка проблеми.** Небезпека дорожнього руху не обмежується лише аваріями. На дорогах часто виникають конфліктні ситуації між учасниками руху, що можуть бути спричинені різними поведінковими реакціями: стресом, агресією, провокаціями та, як результат, втратою контролю. Найбільша кількість транспортних конфліктів спостерігається у великих містах, де є висока інтенсивність руху.

Одним з головних критеріїв ефективної роботи дорожньої мережі є забезпечення безпечного і безконфліктного співіснування всіх учасників руху в обмеженому просторі. Питання безпеки дорожнього руху особливо актуальні в Україні, де офіційна статистика патрульної поліції свідчить про тенденцію до щорічного погіршення ситуації на дорогах. Найбільшу загрозу безпеці та пропускну спроможності (ПС) дорожнього руху створюють перехрестя, зокрема місця злиття та перетину транспортних потоків (ТП), де змінюється напрямок руху. Традиційне світлофорне регулювання вже не здатне забезпечити належний рівень безпеки та ПС. Тому виникає потреба в перегляді підходів до планування дорожньої мережі, впровадженні інтелектуальних транспортних систем (ITS) та інших сучасних методів організації дорожнього руху (ОДР) [1].

В Україні значна кількість наукових досліджень та практичних заходів спрямована на удосконалення вулично-дорожньої мережі (ВДМ), зокрема на покращення транспортних розв'язок, організацію світлофорного регулювання та впровадження координованого руху. Активно розробляються концепції адаптивного управління дорожнім рухом, оптимізації роботи світлофорних об'єктів та інтеграції ITS у міську інфраструктуру. Проте питання взаємодії трамвайного транспорту з іншими учасниками дорожнього руху залишається малодослідженим і фактично не регулюється на системному рівні.

На відміну від країн із розвинутою трамвайною інфраструктурою, в Україні майже не застосовуються заходи з підвищення безпеки, спрямовані на зниження конфліктних ситуацій між трамваями та автомобілями. Аналіз зарубіжного досвіду показує,

що ефективними рішеннями є закриття прорізів у роздільних смугах, розділення потоків транспорту у просторі (наприклад, шляхом будівництва мостових розв'язок) або у часі (повне сигналізоване регулювання руху та фізичні бар'єри). Також важливим є контроль швидкості трамваїв у критичних зонах для зменшення кінетичної енергії при можливому зіткненні.

Таким чином, для покращення безпеки руху в Україні необхідне комплексне вивчення впливу трамвайного транспорту на ефективність функціонування елементів ВДМ, зокрема, аварійність і розробка ефективних заходів його інтеграції у транспортну систему міст. Вивчення світового досвіду та впровадження сучасних підходів дозволить не лише зменшити кількість ДТП, але й підвищити ефективність функціонування громадського транспорту загалом.

Проблеми руху трамваїв у м. Харків є актуальними через складну дорожню мережу, високу інтенсивність руху та застарілу інфраструктуру. Однією з головних проблем є конфліктні ситуації між трамваями та автомобілями, особливо на перехрестях та в місцях розворотів через трамвайні колії. Часто водії не враховують особливості руху трамваїв, що призводить до аварійних ситуацій. Водночас у м. Харків вже реалізуються певні заходи для покращення дорожнього руху та підвищення безпеки трамвайного транспорту. Наприклад, модернізація трамвайних колій, впровадження світлофорного регулювання на проблемних ділянках та оновлення рухомого складу дозволяють зменшити кількість аварій та підвищити ефективність роботи трамваїв. Досвід міста може бути корисним для інших міст України, оскільки демонструє можливості інтеграції трамвайного транспорту в сучасну систему міського руху з урахуванням безпеки та комфорту пасажирів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** По-перше, слід згадати, що рух транспортних засобів (ТЗ) на ВДМ створюється траєкторіями, які перетинаються через потребу учасників дорожнього руху виконувати обгони, перестроювання, повороти та розвороти. За наявності трамвайної колії посередині проїжджої частини водії повинні дотримуватись вимог правил дорожнього руху (ПДР) щодо пропуску рейкових ТЗ [2]. Недотримання вищеперелічених вимог безпеки руху утворює загрозу виникнення певних транспортних конфліктів міського електричного транспорту (трамвая) з іншими учасниками під час руху перегонами, серед яких в роботах [3,4] виділено такі основні типи конфліктів: конфлікти під час руху (попутне зіткнення з ТЗ через раптове гальмування, поперечні зіткнення при спробах в'їзду на колію перед трамваєм, небезпека обгону трамвая та зіткнення із зустрічним рухом); конфлікти під час зміни напрямку руху трамвая; конфлікти в зонах зупинок (затримки через скупчення транспорту на світлофорі, що перешкоджає безпечній посадці-висадці пасажирів, блокування посадкової зони іншими ТЗ, небезпека для пасажирів через невиконання водіями ПДР щодо зупинки біля трамвая); конфлікти на відокремлених трамвайних коліях (затримки через автобуси, що блокують рух трамвая, перехрещення посадкових зон трамвая та автобусів, що створює незручності для пасажирів). В роботах автором зазначається, що оптимальним рішенням для зменшення конфліктів є відокремлення трамвайних колій, вдосконалення світлофорного регулювання та впровадження інтелектуальних транспортних систем. Правила влаштування трамвайних колій передбачено в ДБН В.2.3-5:2018 та ДБН Б.2.2-12:2019.

Важливим при вивченні питань впливу громадського електротранспорту є його зупинки, які відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки дорожнього руху, ПС транспортної мережі та комфорту пасажирів. Їх розташування повинно враховувати баланс між зручністю пересадки та мінімізацією затримок у русі громадського транспорту, що є особливо важливим у вузлах інтенсивного транспортного та пішохідного руху, таких як перехрестя магістральних вулиць. Основними критеріями

вибору місць для облаштування зупинок є: безпека пасажирів на всіх етапах пересування, включаючи посадку та висадку; мінімальний вплив на основні ТП з урахуванням конфліктних зон; зручний доступ до ключових об'єктів міської інфраструктури. Оптимальне розташування зупинок визначається на основі комплексного аналізу пішохідних потоків, маршрутів громадського транспорту та розташування об'єктів тяжіння пасажирів. Дослідження свідчать, що надмірно короткі інтервали між зупинками трамваїв (100–200 м) [5] спричиняють значні затримки руху, тому рекомендується їх об'єднання або збільшення відстані між ними. Для забезпечення пріоритетного руху громадського транспорту необхідно впроваджувати наступні заходи: дотримання ПДР та державних стандартів щодо ОДР; оптимізація світлофорного регулювання для мінімізації затримок; обмеження руху іншого транспорту на маршрутах МПТ; створення виділених смуг. Збалансоване планування та розташування зупинок сприятиме підвищенню безпеки, ефективності та комфорту пересування пасажирів у міському середовищі. При цьому потрібно розуміти, що пріоритетний рух трамваїв можна забезпечити без світлофорного регулювання – керованими знаками та табло, а із світлофорним регулюванням – автоматичною активацією сигналів через детектори, що ідентифікують трамвай (для цього застосовують індуктивні контури, радарні та відеодетектори, транспондери) [3].

Отже, аналіз вітчизняної літератури дозволяє виділити ключові проблеми організації руху громадського електротранспорту, зокрема трамваїв, та визначити основні напрями для їх оптимізації. Водночас вітчизняний досвід має певні обмеження, пов'язані з технічними можливостями та рівнем розвитку транспортної інфраструктури. Для отримання комплекснішого бачення та впровадження передових практик доцільним є звернення до закордонних джерел. Аналіз світового досвіду дозволить ознайомитися з інноваційними підходами до організації міського електротранспорту, методами мінімізації конфліктів у ТП і забезпечення пріоритетного руху трамваїв. Це сприятиме формуванню ефективних рішень, адаптованих до умов українських міст.

Дослідження найбільшої у світі компанії-оператора трамвайної системи Yarra Trams [6] показують, що ДТП між трамваями та автомобілями, особливо під час виконання розворотів через колії, хоч і не є частими, проте спричиняють значні травми та негативно впливають на ефективність роботи трамвайного транспорту. Основні причини таких ДТП включають: невірну оцінку безпечного інтервалу між автомобілем та трамваем; обмежену видимість трамваїв; водійську неухважність та порушення ПДР. Щоб зменшити кількість таких ДТП, необхідно впроваджувати комплексні заходи, які поєднують: закриття прорізів у роздільних смугах або створення безпечних альтернативних маршрутів; розділення потоків транспорту у просторі або часі; зниження швидкості трамваїв та контрольовані розвороти. Важливо зазначити, що в контексті концепції "Безпечна система" (Safe System) фокус має зміщуватися з покладання провини на створення умов, що мінімізують ймовірність серйозних травм. Оскільки чим нижча швидкість підходу трамвая, тим коротший його гальмівний шлях і менша енергія удару, перегляд швидкісного режиму є одним із ключових інструментів підвищення безпеки. Матеріал даної статті може бути нам в нагоді для порівняння міжнародного та вітчизняного досвіду, а також формування обґрунтованих пропозицій щодо підвищення ефективності міського електротранспорту.

В більш свіжих дослідженнях Yarra Trams [7] для зменшення кількості ДТП випробувала систему V2V-комунікації (vehicle-to-vehicle), яка передбачає оповіщення водіїв про наближення трамваїв та пасажирів. Результати показали значні переваги для безпеки дорожнього руху та урбаністичного середовища. Як зазначено в статті у майбутньому планується масштабування системи з використанням штучного інтелекту та сенсорних технологій. Для нас ці дослідження можуть бути корисними в плані:

підвищення безпеки, оскільки використання V2V та V2I-технологій для оповіщення водіїв про трамваї дозволить знизити кількість ДТП у містах; зменшення затримок через ДТП, що сприятиме підвищенню доступності наземного електротранспорту; запозичення прикладу розвитку транспортних інфраструктур та впровадження інтелектуальних систем у міському русі.

Надзвичайно цінним є для нас дослідження [8], в якому пропонується використання системи пріоритету сигналів для громадського транспорту (Transit Signal Priority, TSP) та колаборативної структури керування для оптимізації руху трамваїв та підключених ТЗ (Connected Vehicles, CV) на перехрестях. Використання генетичного алгоритму дозволяє налаштовувати тривалість фаз сигналів, зменшувати затримки, покращувати комфорт пасажирів, скорочувати час подорожі та знижувати енергоспоживання. У контексті нашого дослідження запропоновані системи дозволяють мінімізувати затримки для трамваїв на перехрестях та створювати більш передбачуваний графік руху, технології V2V забезпечують ефективну координацію трамваїв та автомобілів, що може знизити конфлікти та підвищити ПС міських доріг, зменшення енергоспоживання та заторів сприяє сталому розвитку міської транспортної мережі, а оптимізація сигналів та маршруту позитивно впливає на комфорт пересування громадським транспортом. Ці підходи можуть бути адаптовані для українських міст, що стикаються з аналогічними проблемами щодо руху наземного електротранспорту та автомобілів на спільних ділянках доріг.

Дослідження [9] аналізує вплив управління трамваями на ПС руху та поведінку водіїв автомобілів на перехрестях. Методологія включає математичне моделювання та опитування водіїв. У роботі виділено три ключові етапи: визначення оптимальної кількості трамваїв для задоволення реального попиту; оцінка того, як надмірна кількість трамваїв блокує інші ТЗ та знижує ПС на перехрестях; вивчення думок автомобілістів щодо причин заторів і впливу цих факторів на їхню поведінку. У висновках авторами зазначено, що управління трамвайним рухом є неефективним через розрив між фактичною потребою у трамваях і реальною кількістю на маршрутах. Велика кількість трамваїв на маршрутах спричиняє затори та ускладнює роботу світлофорів на перехрестях. Більше 75% водіїв постійно відчують стрес через ці проблеми, що погіршує їхню поведінку на дорогах. Для нас з цієї статті корисним може бути визначення раціональної кількості трамваїв для уникнення заторів; розробка рішень для покращення управління перехрестями, де рухаються трамваї; врахування психологічного аспекту дорожніх заторів при плануванні транспортної інфраструктури; запозичення ідей щодо удосконалення трамвайного менеджменту та зниження негативного впливу на дорожній рух у містах України.

В дослідженні [10] авторами запропонований новий підхід до оптимізації міського електротранспорту, здійснений аналіз його вплив на ТП та надана методика оцінки критичних ділянок трамвайної мережі. Стохастичний підхід до моделювання може бути застосований для аналізу ефективності дорожнього руху з урахуванням міського електротранспорту.

Стаття [11] пропонує мікроскопічну модель трамвайної системи, інтегровану з моделюванням дорожнього руху. Вона враховує взаємодію між сигналами трамваїв і світлофорами загального дорожнього руху. Модель складається з шести модулів: пасажирського, транспортного, обладнання трамвая, дорожнього руху, взаємодії та продуктивності. Для перевірки її достовірності проводиться порівняння реальних та змодельованих даних, включаючи час подорожі та середній час очікування пасажирів. Результати досліджень в статті можуть допомогти оцінити, як міський електротранспорт впливає на загальну ефективність дорожнього руху, оскільки містять методику аналізу взаємодії трамвайних маршрутів і світлофорних циклів, що може

бути корисним для оптимізації ТП у містах. Також запропонований підхід до координації сигналів дозволяє розробляти стратегії "зеленої хвилі" для трамваїв, що може підвищити швидкість та регулярність їхнього руху.

В роботі [12] запропонована мікромодель трамвайного руху, яка враховує унікальні параметри трамваїв (форму, місткість) для точного транспортного моделювання. Наявні моделі більше орієнтовані на перехрестя та автомобільні смуги, що ускладнює аналіз трамвайного руху. Запропонована модель поєднує теорію ПС автомобілів із підходами польських залізниць, що забезпечує сумісність із моделями вуличного та залізничного транспорту. Це також дозволяє застосовувати її для проміжних систем, таких як виділені смуги для автобусів або трамвайно-залізничні гібриди. Результати цього дослідження можуть бути корисними при розробці моделей трамвайного руху, які точніше відображають його особливості, а також для аналізу взаємодії трамваїв із загальним трафіком, оптимізації ПС та адаптації моделювання до специфіки конкретного міста.

Цікавою є робота [13], в якій представлені математичні моделі та результати дослідження перехрестя на багатосмуговій магістралі у великому місті Польщі. Автори виявили взаємозв'язок між швидкістю автомобілів і наявністю трамвайних колій, що важливо для визначення реальної ПС міських перехресть. Також розглянуто вплив трамвайних колій на зміну швидкості автомобілів та рівень шуму. Отримані результати можуть бути використані для оновлення методів оцінки ПС перехресть у Польщі. Ця стаття може бути корисною при оцінці впливу трамвайних колій на швидкість руху автомобілів і ПС доріг. Вона також містить дані про шумове забруднення, що може бути корисним при аналізі екологічного впливу трамвайної інфраструктури. Дослідження може бути застосоване при плануванні та організації руху на міських перехрестях.

Авторами роботи [14] аналізується безпека пасажирів під час посадки та висадки з трамваїв на зупинках, які відділені від колій проїжджою частиною. Це створює ризики для всіх пасажирів, особливо для людей з обмеженими можливостями. Дослідження включає класифікацію трамвайних зупинок за кількістю смуг руху, які пасажирам доводиться переходити, а також огляд літератури та пілотне дослідження на трамвайній мережі Метрополії GZM у Польщі для виявлення конфліктних взаємодій між пасажирами та водіями. Стаття містить конкретні приклади таких ситуацій, методику аналізу ризиків на трамвайних зупинках та пропозиції щодо їх зниження, що може бути корисним для оцінки впливу трамвайного транспорту на безпеку дорожнього руху та взаємодію між пасажирами і автомобілістами.

Аналіз літератури демонструє, що за кордоном дослідження трамвайного руху давно вийшли за межі простої фіксації ДТП чи конфліктних ситуацій. Там активно впроваджують інтелектуальні системи управління трафіком, оптимізацію світлофорних фаз, пріоритет трамваїв, технології V2V та V2I, а також моделюють рух для підвищення безпеки й ефективності транспорту. В Україні ж ми поки що здебільшого лише збираємо статистику, але реальних системних змін майже не впроваджуємо. Більше того, рішення часто приймаються в протилежному напрямку — замість розвитку міського електротранспорту відбувається демонтаж трамвайних колій під приводом «підвищення ПС». Такий підхід не лише суперечить міжнародному досвіду, а й позбавляє міста екологічного, ефективного та прогнозованого виду транспорту. Очевидно, що настав час переходити від пасивного аналізу проблем до активного застосування сучасних транспортних рішень.

**Постановка завдання.** У статті запропоновано дослідити вплив різних варіантів розміщення трамвайних колій на параметри руху ТП та рівень аварійності, поєднуючи ці зміни з сучасними методами ОДР. Метою є визначення оптимального сценарію, який

дозволить підвищити ПС, мінімізувати конфлікти між видами транспорту та покращити безпеку на досліджуваній ділянці вулиці.

#### **Виклад основного матеріалу.**

Для дослідження нами обрана ділянка вул. Полтавський Шлях від вул. Петра Болбочана до вул. Озерянської в м. Харків загальною протяжністю 443 м (див. рис. 1). Відповідно до Генерального плану міста Харкова вул. Полтавський Шлях є магістральною вулицею загальноміського значення регульованого руху. Вздовж магістралі пролягають трамвайні колії. На ділянці вул. Полтавський Шлях від вул. Озерянській до вул. Болбочана трамвайні колії розташовані на проїзній частині, на перехресті вул. Полтавський Шлях - вул. Болбочана трамвайні колії переходять на відокремлене трамвайне полотно.



Рисунок 1 – Схема ділянки по вул. Полтавський шлях, що досліджується

*Джерело: розроблено авторами*

На ділянці вул. Полтавський Шлях від вул. Озерянській до вул. Болбочана існує ряд транспортних проблем:

1. Висока потенційна небезпека зіткнення ТЗ пов'язана з тим, що ТЗ, що рухаються у бік центру при повороті ліворуч на вул. Озерянській на нерегульованому перехресті вимушені довго чекати розрив в щільному потоці автомобілів, які рухаються з центру в напрямку вул. Болбочана, і деякі автомобілісти порушують правила дорожнього руху і не пропускають зустрічний потік, чим створюють аварійну ситуацію (див. рис. 2, рис.3).

2. В місці повороту на вул. Озерянську автомобілі займають смугу попутного руху на трамвайній колії, щоб здійснити поворот ліворуч. Дуже часто виникає ситуація, коли автомобілі займають смугу зустрічного руху на трамвайній колії, що перешкоджає руху трамваю, і трамвай змушений зупинитися. Але на цій ділянці існує ухил, який небезпечний для стоянки трамваю. І трамвай може відкотитися назад, що є дуже небезпечним (див. рис. 4).



Рисунок 2 – Завантаженість ділянки вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська о 08:45  
*Джерело: розроблено авторами*



Рисунок 3 – Створення аварійної ситуації при повороті ліворуч на нерегульованому перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська  
*Джерело: розроблено авторами*



Рисунок 4 – Автомобілі займають смугу зустрічного руху на трамвайній колії на перехресті вул. Полтавський Шлях - вул. Озерянська  
*Джерело: розроблено авторами*

3. На перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Болбочана існує так зване «вузьке місце», коли трамвайна колія переходить на відокремлене полотно. Геометрія перехрестя складна, потік дуже щільний, дорожнє полотно знаходиться в незадовільному стані, що приводить до заторових і аварійних ситуацій (див. рис. 5).



Рисунок 5 – Завантаженість перехрестя вул. Полтавський Шлях – вул. Болбочана  
*Джерело: розроблено авторами*

4. На вулиці Полтавський Шлях в межах дослідження розташовані автобусна та трамвайна зупинки. Автобусні зупинки не облаштовані заїзними кишенями та відсутні павільйони. Трамвайні зупинки розташовані посередині проїзної частини одна проти іншої, та не мають посадкові майданчики. Це призводить не тільки до ризику виникнення аварій, а також до транспортних заторів та затримок (рис. 6).

Для розв'язання виявлених проблем пропонується:

1. Впровадити світлофорне регулювання на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська (див. рис.7).

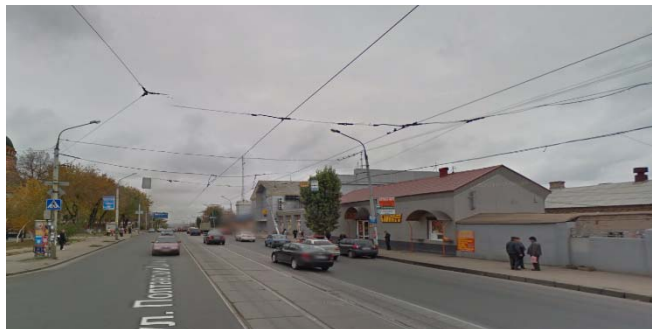


Рисунок 6 – Розташування автобусної та трамвайної зупинок на ділянці вул. Полтавський Шлях між вулицями Кандаурова и Болбочана

Джерело: розроблено авторами

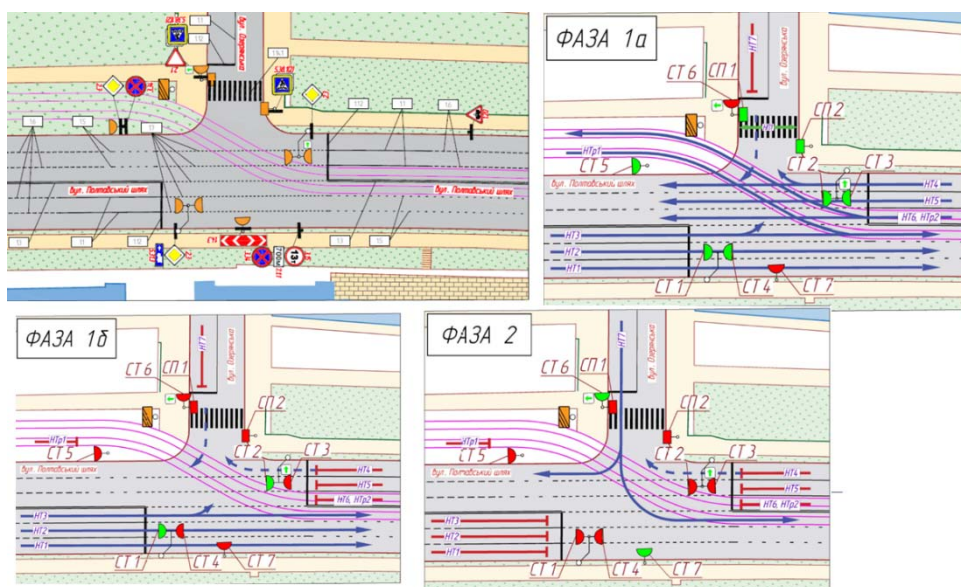


Рисунок 7 – Запропоновані схеми розташування технічних засобів регулювання руху та пофазного роз'їзду

Джерело: розроблено авторами

2. Перенести трамвайні колії з проїзної частині до відокремленого полотна з перехрестя вул. Полтавський Шлях – вул. Болбочана на інше за двома варіантами: на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська (див. рис. 8) та на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Кандаурова (рис. 9).

3. Перенести трамвайну зупинку на відокремлене трамвайне полотно.

4. Налаштувати координований режим роботи між новим світлофорним об'єктом (вул. Полтавський шлях –вул. Озерянська) та двома існуючими (вул. Полтавський шлях –вул. Кандаурова та вул. Полтавський шлях –вул. Болбочана) для



режиму «Зеленої хвилі» (рис. 10).

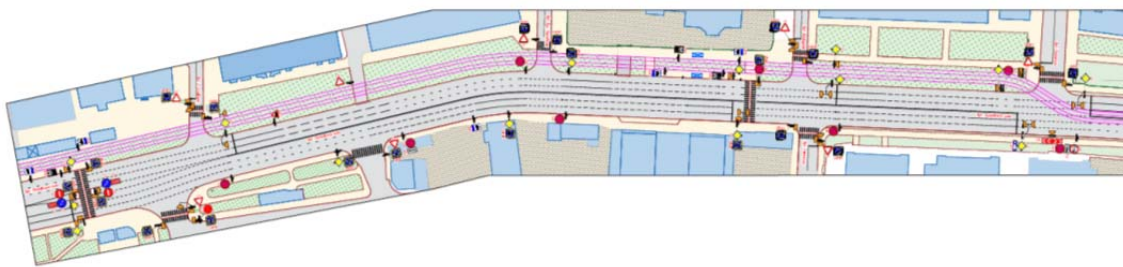


Рисунок 8 – Варіант перенесення трамвайних колій з проїзної частина на окреме трамвайне полотно на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська

*Джерело: розроблено авторами*



Рисунок 9 – Варіант перенесення трамвайних колій з проїзної частина на окреме трамвайне полотно на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Кандаурова

*Джерело: розроблено авторами*

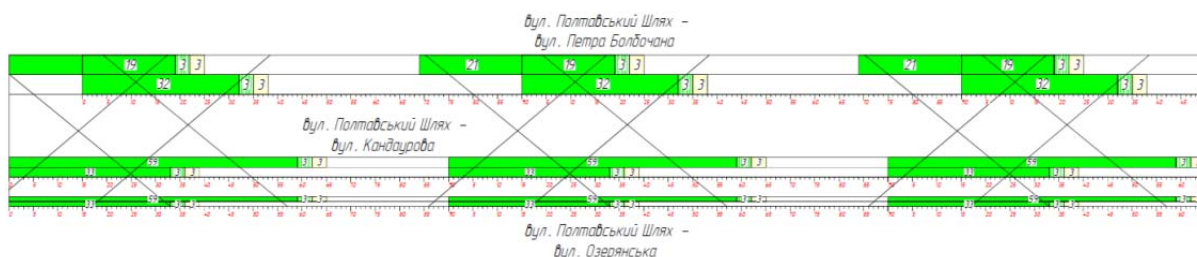


Рисунок 10 – Координація світлофорних об'єктів

*Джерело: розроблено авторами*

Для оцінки запропонованих рішень виконано імітаційне моделювання руху на ділянці вул. Полтавський Шлях від вул. Петра Болбочана до вул. Озерянської в м. Харків в програмному забезпеченні PTV Vissim при трьох варіантах – існуючому та двома запропонованими з перенесенням трамвайної колії (рис. 11).

Отримані результати свідчать про позитивний вплив на безпеку руху від реалізації запропонованих варіантів. Перший варіант має більше зниження конфліктних точок, ніж другий. Очікувана загальна кількість зниження конфліктних точок в порівнянні з базовим варіантом (див. табл. 1). Стосовно інших показників, то аналіз моделей показав суттєве поліпшення, для першого варіанту (див. табл. 2). За варіантом 1 час затримки зменшиться на 11%, кількість зупинок зменшиться на 1%, швидкість руху збільшиться на 6%. Для варіанту 2 час затримки збільшився на 4%, кількість зупинок на 12% та швидкість руху зменшиться на 2%. Час поїздки за найбільш завантаженим напрямком в центр по вул. Полтавський Шлях зменшиться на 2% при 1 варіанті і збільшиться на 2% при другому варіанті.

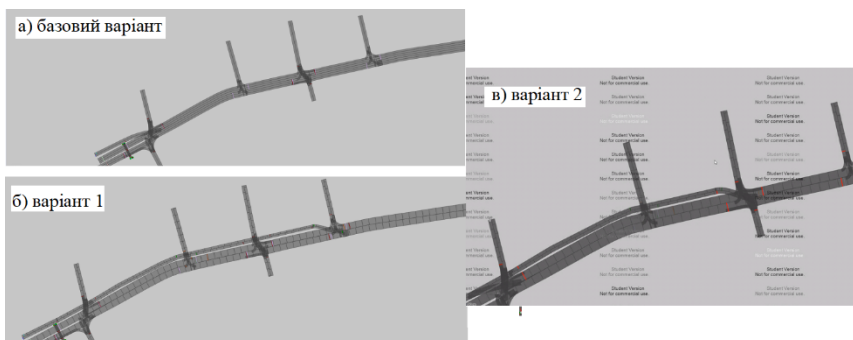


Рисунок 11– Зображення варіантів моделювання

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 – Результати моделювання щодо безпеки руху

Тип конфлікту	Базовий варіант	Варіант 1	Варіант 2
перетинання	197	58	139
злиття	221	114	107
відхилення	57	31	26
загалом	475	203	272

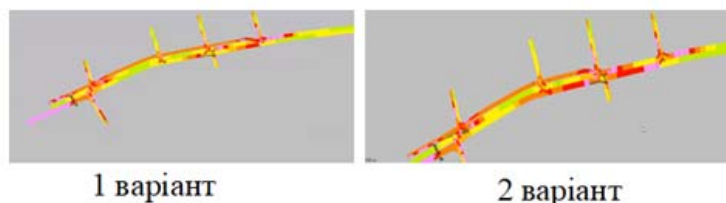
Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Результати моделювання

Показники	Базовий варіант	Варіант 1	Ефект в %	Варіант 2	Ефект в %
Середній час затримки ТЗ, с	55,95	50,41	11%	58,50	4%
Середня кількість зупинок ТЗ	1,70	1,68	1%	1,93	12%
Середня швидкість ТЗ, км/год	22,02	23,35	6%	21,52	2%
Час поїздки в бік центру, с	96,6	94,58	2%	98,75	2%
Час поїздки з центру, с	88,01	86,31	2%	96,13	8%

Джерело: розроблено авторами

Як бачимо на теплових картах зміни швидкості руху (див. рис. 12), пропонуваній 1 варіант сприяє підтримці вищих та стабільніших швидкостей руху транспортного потоку на ділянках магістралі ніж варіант 2.



Кольорова схема епюр відрізків  
 Атрибут: Швидкість (км/год)  
 ≤ 10    ≤ 20    ≤ 30    ≤ 40    ≤ 50    ≤ 60    ≤ 80    ≤ MAX

Рисунок 11 – Теплова карта зміни швидкості руху ТП на мережі за варіантами

Джерело: розроблено авторами

**Висновки.** Результати моделювання показали, що перенесення трамвайної колії з проїзної частини на окреме трамвайне полотно у поєднанні зі світлофорним регулюванням на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська (варіант 1) в м. Харків значно покращує безпеку руху, зменшує транспортні затримки та сприяє стабільнішій швидкості руху. Порівняно з базовим сценарієм, цей варіант забезпечує суттєве зниження конфліктних точок, на 11% зменшує час затримки, підвищує швидкість руху на 6% та мінімізує кількість зупинок. Водночас варіант 2 (перенесення на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Кандаурова) виявився менш ефективним, оскільки призводить до збільшення затримок та зниження швидкості. Отже, вирішальним фактором стало саме оптимальне місце перенесення колій – якщо це зроблено завчасно, ТП мають більше простору для розділення, і конфліктні точки зменшуються.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації трамвайної інфраструктури в інших містах, що мають подібні проблеми з інтеграцією електротранспорту в загальний дорожній рух. Це може сприяти покращенню транспортної доступності, зниженню аварійності та підвищенню ефективності роботи громадського транспорту.

## Список літератури

1. Ключев С.О., Сігонін А.С., Цимбал С.В. Развитие интеллектуальных транспортных систем. *ВМТ*, 2023, вып. 18, вып. 2, с. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-80-86>
2. Правила дорожнього руху 2025: веб-сайт. URL: <https://vodiy.ua/pdr/> (дата звернення: 24.01.2025).
3. Ройко Ю.Я. (2017) Аналіз впливу трамваїв на безпеку руху. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. 2017, № 866. С. 225-229. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM\\_2017\\_866\\_41](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2017_866_41)
4. Кульбашна Н. І. Зупиночний пункт як об'єкт дослідження роботи МЕТ в нових ринкових умовах *Сталій розвиток міст. Електричний транспорт – перспективи розвитку та кадрове забезпечення*: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 1-3 жовтня 2009 р. Харків: ХНАМГ, 2009. С.107–109.
5. Павлова І., Грабовець В., Дубицький О., Онищук В. Аналіз роботи маршрутного транспорту в зоні зупиночного пункту. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2019, 2(13), 139-145. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.97>.
6. Nimmi Candappa, Bruce Corben and Jeremy Yuen. Addressing the Conflict Potential between Motor Vehicles and Trams at Cut-through Locations. *Monash University Accident Research Centre*. 2013. Report 317. 47 p.
7. Improving the future of road safety in Australia with Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication Posted. Urban mobility, Passenger experience, Australia. 2022. URL: <https://innovation.keolis.com/en/projects-news-insights/improving-the-future-of-road-safety-in-australia-with-vehicle-to-vehicle-v2v-communication/>
8. Louati, A., Kariri, E. Enhancing Intersection Performance for Tram and Connected Vehicles through a Collaborative Optimization. *Sustainability*, 2023, 15(12), 9231. <https://doi.org/10.3390/su15129231>
9. Mouloud Khelf, Salim Boukebbab, Neila Bhourri. The Effect of Tram Management on Road Traffic Fluidity and its Influence on Drivers Behaviors at a Critical Junction in Algeria. *Transport Problems = Problemy Transportu*, 2023, 18 (2), pp.31-42. [ff10.20858/tp.2023.18.2.03ff.fhal-04273335f](https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.2.03ff.fhal-04273335f)
10. da Silva, L.D., Lollini, P., Mongelli, D. *et al.* A stochastic modeling approach for traffic analysis of a tramway system with virtual tags and local positioning. *J Braz Comput Soc* 27, 2, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13173-021-00105-x>
11. Zhao X, Li Y, Xu S, Zhai H. Modeling a modern tram system integrated with a road traffic simulation. *SIMULATION*. 2018;94(1):77-90. doi:10.1177/0037549717734420
12. Jeremi Rychlewski. Modelling of tram traffic quality. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*. 2004. URL: [www.researchgate.net/publication/290698427\\_Modelling\\_of\\_tram\\_traffic\\_quality](http://www.researchgate.net/publication/290698427_Modelling_of_tram_traffic_quality).
13. A. Sobota, R. Zochowska, E. Szczepański, and P. Golda, "The influence of tram tracks on car vehicle speed and noise emission at four-approach intersections located on multilane arteries in cities," *Journal of Vibroengineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 2453–2468, Sep. 2018, <https://doi.org/10.21595/jve.2018.20087>
14. Soczówka, P., & Zochowska, R. Interactions between tram passengers and road vehicles at tram stops - a pilot study. *Transactions on Transport Sciences*, 2020, 11(2), 64-76. doi: 10.5507/tots.2020.007

## References

1. Kliuiev, S.O., Sihonin, A.Ie., & Tsymbal S.V. (2023) Rozvytok intelektualnykh transportnykh system. *VMT*, vyp. 18, vyp. 2, P. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-80-86> [in Ukrainian].
2. Pravila dorozhnoho rukhu 2025: veb-sait URL: <https://vodiy.ua/pdr/> [in Ukrainian].
3. Roiko, Yu.Ia. (2017) Analiz vplyvu tramvaiv na bezpeku rukhu. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*. Dynamika, mitsnist ta proektuvannia mashyn i prykladiv. № 866. P. 225-229. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM\\_2017\\_866\\_41](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2017_866_41) [in Ukrainian].

4. Kulbashna, N.I. (2009) Zupunochnui punkt yak obekt doslidzennia robotu MET v novuh runkovuh ymovah. *Electrichnui transport – prespektivu rozvutky ta kadrove zabezpechennia: materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp.107-109). Kharkiv:KhNUMG [in Ukrainian].
5. Pavlova, I., Hrabovets, V., Dubytskyi, O., & Onyshchuk, V. (2019). Analiz roboty marshrutnoho transportu v zoni zupunochnoho punktu. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 2(13), 139-145. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.97> [in Ukrainian].
6. Nimmi Candappa, Bruce Corben and Jeremy Yuen (2013). Addressing the Conflict Potential between Motor Vehicles and Trams at Cut-through Locations. *Monash University Accident Research Centre*. Report 317. 47 p.
7. Improving the future of road safety in Australia with Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication (2022) Posted. Urban mobility, Passenger experience, Australia. 2022. URL: <https://innovation.keolis.com/en/projects-news-insights/improving-the-future-of-road-safety-in-australia-with-vehicle-to-vehicle-v2v-communication/>.
8. Louati, A., & Kariri, E. (2023). Enhancing Intersection Performance for Tram and Connected Vehicles through a Collaborative Optimization. *Sustainability*, 15(12), 9231. <https://doi.org/10.3390/su15129231>.
9. Mouloud Khelf, Salim Boukebbab, Neila Bhourri (2023) The Effect of Tram Management on Road Traffic Fluidity and its Influence on Drivers Behaviors at a Critical Junction in Algeria. *Transport Problems = Problemy Transportu*, 18 (2), pp.31-42. [ff10.20858/tp.2023.18.2.03ff.fhal-04273335f](https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.2.03ff.fhal-04273335f) [in English].
10. da Silva, L.D., Lollini, P., Mongelli, D. et al. (2021) A stochastic modeling approach for traffic analysis of a tramway system with virtual tags and local positioning. *J Braz Comput Soc* 27, 2. [doi.org/10.1186/s13173-021-00105-x](https://doi.org/10.1186/s13173-021-00105-x).
11. Zhao, X, Li, Y, Xu, S, & Zhai, H. (2018) Modeling a modern tram system integrated with a road traffic simulation. *SIMULATION*. 94(1):77-90. [doi:10.1177/0037549717734420](https://doi.org/10.1177/0037549717734420) [in English].
12. Jeremi Rychlewski (2004). Modelling of tram traffic quality. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*. URL: [www.researchgate.net/publication/290698427\\_Modelling\\_of\\_tram\\_traffic\\_quality](http://www.researchgate.net/publication/290698427_Modelling_of_tram_traffic_quality).
13. Sobota, A., Żochowska, R., Szczepański, E., & Golda, P. (2018) “The influence of tram tracks on car vehicle speed and noise emission at four-approach intersections located on multilane arteries in cities,” *Journal of Vibroengineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 2453–2468, Sep. 2018, <https://doi.org/10.21595/jve.2018.20087>.
14. Soczówka, P., & Żochowska, R. (2020). Interactions between tram passengers and road vehicles at tram stops - a pilot study. *Transactions on Transport Sciences*, 11(2), 64-76. [doi: 10.5507/tots.2020.007](https://doi.org/10.5507/tots.2020.007).

**Olha Kholodova**<sup>1</sup>, Assoc. Prof., PhD tech. Sci., **Olena Levchenko**<sup>1</sup>, **Maryna Buhaiova**<sup>1</sup>, **Anastasiia Botsman**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*

<sup>2</sup>*O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv*

### **Optimization of Urban Tram Traffic to Improve the Efficiency of the Street and Road Network**

Traffic safety depends not only on the number of road accidents but also on the level of conflict between its participants, especially at intersections and at the junction of traffic flows. One of the key but insufficiently studied aspects is the interaction of tram transport with cars, which directly affects the capacity and safety of the road network. The article analyses the impact of various tramway schemes on the dynamics of traffic flows and accidents, considering modern traffic management methods. The study aims to determine the optimal solution that will increase the efficiency of the transport system, minimize conflicts between modes of transport, and ensure safe traffic conditions in the study area.

The literature analysis shows that tram traffic research abroad includes introducing intelligent control systems, optimizing traffic lights, promoting tram priority, and using V2V and V2I technologies. In Ukraine, however, they are mostly limited to collecting statistics, while systemic changes are hardly implemented, and the dismantling of tram tracks contradicts international experience. To solve the identified problems, it is proposed that traffic lights be introduced at the intersection of Poltavskyi Shlyakh - Ozeryanska Street. The tram tracks should be moved from the carriageway to a separate track from the intersection of Poltavsky Shlyakh - Bolbochan Street to another location, either at the intersection of Poltavsky Shlyakh - Ozeryanska Street or Poltavsky Shlyakh - Kandaurova Street. The tram stop should also be relocated to a separate tram track. Additionally, a coordinated mode of operation between the new traffic light facility (Poltavsky Shlyakh - Ozeryanska Street) and the existing ones (Poltavsky Shlyakh - Kandaurova Street and Poltavsky Shlyakh - Bolbochan Street) is proposed for the ‘green wave’ mode. Traffic modeling using PTV Vissim was conducted on the section of Poltavsky Shlyakh Street from Petra Bolbochan Street to Ozeryanska Street in Kharkiv to evaluate the existing and proposed options.

The modeling results indicate that relocating the tramway to a separate track at the Poltavsky Shlyakh - Ozeryanska intersection (Option 1) in Kharkiv improves traffic safety, reduces delays by 11%, and increases speed by 6%. In contrast, Option 2 (relocation to Poltavskyi Shlyakh - Kandaurova Street) worsens delays and reduces speed. Proper track placement allows smoother traffic flow by reducing conflict points. These findings can inform tram infrastructure optimization in other cities, enhancing accessibility, safety, and public transport efficiency.

**tram traffic, vehicle, street and road network, traffic management, efficiency, accident rate, safety, traffic flow, road traffic accident**

*Одержано (Received) 14.02.2025*

*Прорецензовано (Reviewed) 28.02.2025*

*Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025*