https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.267

УДК 656.021

Сістук В. О.[1], *канд. техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0003-4907-4265*
Беспалов Д. О.[2], *https://orcid.org/0000-0002-0778-5627*
Бойко В. В.[3]
Тарасюк В. П.[2], *канд. техн. наук, http://orcid.org/0000-0003-4762-5668*
Костенко Н. П.[2]

[1] *Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна*
[2] *Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна*
[3] *ТОВ «Про мобільність» м. Київ, Україна*

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗПОДІЛУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ПРИ МІКРОМОДЕЛЮВАННІ ПУНКТІВ ЗБОРУ ОПЛАТИ ЗА ПРОЇЗД

Анотація

Вступ. Практика стягування плати за проїзд автомобільними дорогами для компенсації витрат на будівництво та експлуатацію доріг відома з давніх часів. Традиційний підхід до збору плати за проїзд на автомагістралях полягає у тому, що транспортні засоби мають зупинятися й здійснювати оплату у відповідному пункті збору (Toll Collection Plaza — TCP). При цьому традиційно розрізняють дві системи оплати: відкриту, у якій водій сплачує за проїзд усієї платної ділянки, та закриту, у якій при виїзді на платну автомагістраль водій зобов'язаний взяти квиток у початковому пункті (станції) оплати і повернути його при виїзді з автомагістралі у кінцевому пункті оплати, сплативши за фактично пройдену відстань. В обох системах неодмінно виникають затримки транспортних засобів у TCP. У зв'язку з цим, перед транспортними планувальниками та інженерами з проєктування доріг постає ряд актуальних задач, таких як визначення впливу пунктів оплати за проїзд на рівень обслуговування, пропускну здатність та інші показники руху на автомагістралях, технології стягнення плати за проїзд, оцінку впливу конфігурації TCP на показники руху транспортних потоків в зоні TCP та у всій транспортній мережі.

Проблематика. Одним із сучасних методів дослідження та оцінки стану дорожнього руху у пунктах збору оплати за проїзд є проведення детального транспортного моделювання дорожньої мережі або одиничних TCP. Водночас, надійність даного інструменту аналізу визначатиметься не тільки параметрами калібрування імітаційної моделі, а й якістю прийнятого розподілу транспортних потоків.

Мета. Метою роботи є обґрунтування методу розподілу транспортних потоків при розробці детальної транспортної моделі пунктів збору оплати за проїзд у програмному забезпеченні PTV Vissim.

Матеріали та методи. Виконано моделювання сценаріїв одиничних TCP у PTV Vissim, які відрізняються кількістю смуг руху, підходами для відтворення мережі та застосованими методами розподілу транспортних потоків.

Результати. Вирішена актуальна науково-прикладна задача обґрунтування методу розподілу транспортних потоків при детальному транспортному моделюванні пунктів збору оплати за проїзд у PTV Vissim. Виконано аналіз можливостей методів відтворення руху у TCP за допомогою статичних маршрутів, динамічного розподілу потоків, COM-інтерфейсу PTV Vissim для динамічного розподілу руху, маршрутів «Пункти збору плати за проїзд». У моделях TCP із кількістю смуг від 3 до 6 із статичними маршрутами та динамічним розподілом потоків перевірено реалістичність поведінки водіїв при виборі смуги руху у TCP. Виконано аналіз

затримок транспортних засобів (ТЗ) у детальних транспортних моделях ТСР для порівняння результатів транспортного моделювання при використанні статичних маршрутів та динамічного розподілу потоків.

Висновки. Проведені дослідження показали, з урахуванням реалістичності відтворення поведінки водія, трудомісткості розроблення моделі, залежності від вихідних даних, отриманих показників руху та інших факторів, оптимальними методами задавання руху у детальних транспортних моделях ТСР є динамічний розподіл потоків або використання статичних маршрутів на відокремлених смугах ТСР.

Ключові слова: детальне транспортне моделювання, динамічний розподіл потоків, пункт збору оплати за проїзд, PTV Vissim, статичні маршрути, Toll Collection Plaza (TCP).

Вступ

З метою оптимізації транспортних операцій у пунктах збору оплати за проїзд — Toll Collection Plaza (TCP) зазвичай використовується математичний апарат на основі теорії масового обслуговування [1] або комп'ютерне детальне транспортне (імітаційне) моделювання [2, 14]. Дорожній рух в зоні пунктів збору оплати за проїзд включає у собі як детерміністичні так і стохастичні елементи, які мають бути оцінені за допомогою дієвих та надійних інструментів аналізу. Актуальним залишається питання, який з методів дослідження дорожнього руху є у достатній мірі підходящим для пунктів збору оплати за проїзд.

Використання детального транспортного моделювання для оптимізації пунктів збору оплати за проїзд стикається із рядом початкових умов, які потребують вирішення:

– необхідно вибрати модель розподілу транспортних потоків;

– необхідно вибрати техніко-експлуатаційний показник (показники) дорожнього руху, який (які) виступатиме (виступатимуть) у якості калібрувального параметру для детальної транспортної моделі;

– необхідно вибрати вихідні показники транспортного моделювання у якості критеріїв оптимальності в залежності від поставленої задачі.

Таким чином, коло завдань перед транспортним планувальниками, інженерами з проєктування доріг від яких залежить кінцевий результат транспортного моделювання, є досить широким й потребує додаткової уваги для вивчення.

Проблемі вибору калібрувальних параметрів детальних транспортних моделей ТСР та оціночних показників дорожнього руху на пунктах збору оплати за проїзд присвячено багато наукових робіт. Втім, використання того чи іншого спеціалізованого програмного забезпечення з детального транспортного моделювання передбачає виконання певних процедур для розробки моделей ТСР, методологічний підхід до застосування яких недостатньо висвітлено у відкритих джерелах. Особливо гострою є необхідність реалістичного відтворення руху ТЗ у ТСР. У програмному забезпеченні з детального транспортного моделювання за дану опцію відповідає модель розподілу транспортних потоків.

У зв'язку з цим, актуальною задачею є обґрунтування методу розподілу транспортних потоків при детальному транспортному моделюванні пунктів збору оплати за проїзд.

Одним із провідних програмних продуктів для стохастичного моделювання дорожнього руху є PTV Vissim [2], в якому транспортні операції описуються функціями ймовірності. Дане програмне забезпечення дозволяє проводити оцінку стану дорожнього руху при зміні умов функціонування об'єкту транспортної інфраструктури або при розробці проєкту нового будівництва. Багато задач для ТСР може бути вирішено на основі детального транспортного моделювання у PTV Vissim. Детальне транспортне моделювання за допомогою PTV Vissim дозволяє отримати відповіді на питання, наприклад, які будуть умови руху при збільшенні

транспортного попиту, як збільшуватиметься черга ТЗ при закритті смуг ТСР на ремонт або реконструкцію, який вплив на рух матиме будівництво додаткових смуг, який тип конфігурації ТСР буде раціональним з позиції стану дорожнього руху.

У науковій літературі використанню детального транспортного моделювання у PTV Vissim для оцінки стану дорожнього руху на ТСР присвячено ряд публікацій [3–11].

Одним із перших авторів, який застосував метод детального транспортного моделювання для оцінки руху на пунктах оплати за проїзд був Астаріта [3], який запропонував модель, що враховує взаємодію попиту/пропозиції транспорту та оцінку впливу геометричних та функціональних характеристик інфраструктури пунктів збору оплати за проїзд на показники дорожнього руху.

Себальос [4] застосував можливості програмного забезпечення PTV Vissim для моделювання пунктів збору оплати за проїзд та порівняв результати детального транспортного моделювання із розрахунком багатоканальної моделі масового обслуговування. Детальні транспортні моделі розроблені на основі динамічного розподілу ТЗ, налаштування поведінкової моделі водія, визначення правил пріоритету, призначення розподілів на обслуговування, встановлення зон малошвидкісного руху.

Христофер Руссо у роботі [5] виконав перевіряння можливостей програмного забезпечення PTV Vissim та SHAKER (детермінована модель на основі теорії черг) для пунктів збору оплати за проїзд на дорогах Центральної Флориди. У якості калібрувального параметру для цих моделей використано пропускну здатність пункту оплати, натурні значення якої визначались за допомогою рекомендацій FHWA.

У роботі [6] справедливо показано, що вирішення оптимізаційних задач на основі детального транспортного моделювання зустрічається із проблемою «чорного ящика», оскільки при даному методі цільова функція та обмеження не задані явно алгебраїчними рівняннями. Для вирішення проблеми «чорного ящика» при детальному транспортному моделюванні було докладено значні зусилля для створення замісних моделей. Замісний метод включає метод поверхні відгуку, сплайни багатовимірної адаптивної регресії, метод поліномів регресії, метод Крігінга, метод радіальної базисної функції (RBF) і метод нейронної мережі [6]. У даній роботі представлено підхід discrete-time (DTAP) до моделювання системи масового обслуговування для пунктів збору оплати за проїзд з клієнтами змішаного типу та каналами, де час обслуговування залежить від часу очікування клієнта (ТЗ).

Модель «чорного ящика» також використано у роботі [7] для проєктування та оптимізації системи пунктів збору оплати за проїзд методом імітаційного моделювання.

Питанню оцінки транспортних заторів на ТСР із електронною системою оплати (ETC) методом імітаційного моделювання присвячено роботу [8].

Аналіз сценаріїв конфігурацій пунктів збору оплати за проїзд за критерієм довжини черги ТЗ у програмному забезпеченні PTV Vissim виконано у роботі [9].

У роботі [10] представлені рекомендації щодо кількості смуг ТСР в залежності від транспортного навантаження та складу транспортного потоку, отримані на основі результатів детального транспортного моделювання в PTV Vissim.

Також проводилось дослідження впливу різних конфігурацій пунктів збору оплати за проїзд при використанні ETC, RFID-технології та TNG системи (10 сценаріїв конфігурацій на кожну систему) на стан дорожнього руху, поведінку водіїв і рівень безпеки ТСР за допомогою PTV Vissim та моделі замісних показників безпеки руху SSAM [11].

Відомі роботи з детального транспортного моделювання ТСР у PTV Vissim з використанням COM-інтерфейсу на мові програмування VBA [12]. PTV Vissim застосовувався для моделювання сучасного положення на пунктах збору оплати за проїзд та проробки майбутніх сценаріїв з оцінкою затримки ТЗ та пропускної здатності ТСР. Однак роз'яснення методології даного дослідження відсутнє у відкритих джерелах.

Таким чином, незважаючи на проведені наукові дослідження дорожнього руху у пунктах збору оплати за проїзд за допомогою детального транспортного моделювання у програмному забезпеченні PTV Vissim, розгорнуте описання функціональних можливостей даного програмного забезпечення у частині особливостей вибору підходящої моделі розподілу транспортних потоків відсутнє.

Основна частина

PTV Vissim дозволяє проводити детальне транспортне моделювання транспортного руху на пунктах збору оплати за проїзд у такий спосіб:

- використанням розподілів статичних маршрутів ТЗ;
- використанням динамічного розподілу транспортних потоків;
- використанням адаптивного методу за допомогою COM-інтерфейсу;
- використанням маршрутів типу «Пункти збору плати за проїзд».

Останній тип маршрутів ведеться за двома траєкторіями, що паралельно проходять пункти збору оплати за проїзд від місця старту до місця цілі, для яких, у свою чергу, задається відповідна модель ціноутворення та модель рішення, що дозволяє врахувати ступінь заповнення ТЗ; період доби; актуальну транспортну ситуацію. Задача визначення ймовірності вибору ТЗ пункту оплати за проїзд вирішується за допомогою моделі рішення. Вибір водія залежить від корисності платного маршруту, яка обумовлюється вартістю дорожнього збору, економією часу, яка виникає при виборі платної дороги, середньою швидкістю руху на маршруті. Розрахунок дорожніх зборів враховується у динамічному розподілі.

За відомої інтенсивності руху ТЗ на конкретних смугах ТСР детальна транспортна модель може бути дещо «спрощена» до застосування статичних маршрутів або динамічного розподілу транспортних потоків.

Адаптивний метод на основі COM-інтерфейсу PTV Vissim дозволяє виконувати моделювання пунктів збору оплати за проїзд, відтворюючи реалістичну поведінку водія [13]. Це досягається за рахунок автоматичного вибору найкращої смуги (шлагбауму), який визначається відповідно до типу ТЗ, що під'їжджає, способу оплати та смуги під'їзду на головній дорозі. До черги ТЗ можуть зараховуватись також й ті ТЗ, для яких призначені конкретні смуги на ТСР, при цьому самі ТЗ можуть не знаходитись у черзі. Можлива також опція додаткового автоматичного налаштування відкривання шлагбауму відповідно до поточних умов руху: якщо для кількох входів на смуги ТСР досягнуто певного порогу довжини черги, відкриються додаткові шлагбауми, якщо черги невеликі, певні шлагбауми будуть закритими.

Приведені вище опції можуть бути застосовані при вирішенні часткових задач, які неодмінно виникають при плануванні та/або проєктуванні пунктів збору оплати за проїзд. Однак використання адаптивного методу характеризується значними витратами праці та часу при розробці детальної транспортної моделі ТСР, які не завжди є виправданими. У більшості випадків для отримання оціночних показників впливу планувальних рішень на пунктах збору оплати за проїзд на стан дорожнього руху достатньо використання статичних маршрутів руху або динамічного розподілу. Основні відмінності, недоліки та переваги цих двох підходів розглянуто нижче.

При статичному розподілі маршрутів ТЗ у PTV Vissim, маршрут представляє собою траєкторію руху ТЗ, яка починається в місці старту та закінчується в місці цілі. Місце старту рішення маршруту веде до декількох місць цілі. Довжина маршруту не обмежується. Використання статичних маршрутів є корисним для моделювання поворотів на окремих або декількох вузлах у пунктах збору оплати за проїзд.

Рішення маршрутів стосується тільки тих класів ТЗ, які визначені в параметрах маршруту.

Таким чином, застосовуючи статичні маршрути для організації руху у ТСР, можна спрямовувати ТЗ конкретного класу на необхідні смуги ТСР.

ТЗ, який вже знаходиться на маршруті, може тільки тоді сприймати нову інформацію про маршрут, коли він перетнув місце цілі попереднього маршруту. PTV Vissim пропонує два метода вибору маршруту при статичному розподілі:

– на основі статичного навантаження маршруту ТЗ;
– на основі формули, визначеної користувачем, яка враховує атрибути ТЗ.

Однією із основних задач при задаванні статичних маршрутів для ТСР є визначення частки навантаження для кожного рішення маршруту на окремій смузі пункту збору оплати за проїзд. Якщо кожна смуга ТСР створена у PTV Vissim окремим відрізком, то для кожної смуги можливим стає задавання окремого рішення маршруту. Таким чином, кожен пункт збору оплати за проїзд буде мати власний статичний маршрут із набором рішень, кількість яких визначатиметься кількістю смуг на ТСР, що моделюється. Розподіл ТЗ між смугами ТСР залежить від вихідних умов детального транспортного моделювання: у найпростішому випадку всі транспортні потоки розподіляються між смугами пункту збору оплати за проїзд рівномірно, отже, задавання рішень маршрутів потребує однакової частки навантаження на окремих смугах.

В інших ситуаціях, перша смуга руху призначається для руху автобусів та вантажного автомобільного транспорту, що необхідно враховувати у рішенні маршруту, призначеного на дану смугу, призначаючи для неї відповідні класи транспортних засобів.

В окремих випадках всі ТЗ всіх типів не призначаються на конкретні смуги, а вільно розподіляються між ними, надаючи перевагу першій смузі.

Конфігурація пунктів збору оплати за проїзд може бути виконана наступним чином:

– зона очікування утворена спільним відрізком, кількість смуг якого відповідає кількості смуг на ТСР;
– зона очікування розділена на окремі відрізки, кількість яких відповідає кількості смуг пункту збору оплати за проїзд;
– пункт збору оплати за проїзд має відокремлені смуги для руху ТЗ праворуч, коли перерозподіл ТЗ відбувається не у зоні очікування, а на головній дорозі до заїзду на ТСР.

Відокремлення смуг пунктів збору оплати за проїзд у детальній транспортній моделі, як правило, спрямовано на досягнення двох речей:

– ТЗ виконають маршрути, для яких вони призначені;
– потоки ТЗ розподіляться рівномірно між смугами пункту збору оплати за проїзд (якщо це задано початковими умовами).

Умова виконання статичного маршруту не завжди реалізується належним чином, зважаючи на конфліктні зони, які неодмінно виникають у зоні прибуття, що значно ускладнює зчитування ТЗ місць старту та цілі, призводячи, у свою чергу, до збільшення затримки у мережі. Кількість конфліктів у зоні прибуття залежить від способу відтворення мережі у частині розташування та кількості з'єднувальних відрізків, які виконують роль зони прибуття. При цьому можливі варіанти, коли проїзд ТЗ визначається правилами пріоритету або конфлікт задаватиметься як пасивна зона, коли жоден ТЗ не має переваги у проїзді. Від налаштувань зони прибуття багато в чому залежіть якість детальної транспортної моделі та результати детального транспортного моделювання.

При калібруванні детальної транспортної моделі ТСР із статичними маршрутами особливу увагу слід надавати ТЗ, які після очікування в черзі більше 60 с, зникають з мережі. Таким чином програма забезпечує часткове «деблокування» проблемної ділянки. Однак даний підхід не відображає реальних умов руху. У зв'язку з цим, налаштування конфігурації смуг ТСР та правил його проїзду потребують ретельної перевірки як при відтворенні мережі, так і під час проведення імітації руху.

Окремим питанням при детальному транспортному моделюванні статичних маршрутів у пунктах збору оплати за проїзд є реалістичність імітації руху. Як правило, при моделюванні смуг ТСР суцільним відрізком вибір смуги ТЗ відбувається безпосередньо у зоні очікування. Зміна смуги руху напряму визначатиметься параметрами поведінкової моделі водія PTV Vissim. Якщо поведінка ТЗ налаштована невірно або під'їзди до ТСР прокладені окремими відрізками, що не дозволяє ТЗ перебудуватись, ТЗ будуть вишукуватись у чергу на більш «зручній» для проїзду смузі, залишаючи вільними сусідні смуги, що не відповідає реальним умовам проходження пунктів збору оплати за проїзд.

Якщо робоча зона ТСР представлена відокремленими відрізками, описане вище явище дещо нівелюється, однак, у такому разі все залежить від способу відтворення конфігурації ТСР. При фізичному розділенні прямих та правоповоротних потоків на ТСР вибір смуги руху ТЗ здійснюється заздалегідь. ТЗ розподіляються між смугами руху у відповідності до долі навантажень, заданих у рішеннях маршрутів. Потреби у «тонкому» налаштуванні конфліктів зазвичай не виникає.

Таким чином, організація руху ТЗ на конкретних смугах ТСР у загальному випадку може бути врахована при моделюванні руху за допомогою статичних маршрутів у PTV Vissim. Статичні маршрути, незважаючи на вищезгадані технічні обмеження, є доволі гнучким інструментом для детального транспортного моделювання пунктів збору оплати за проїзд.

При статичному розподілі маршрутів ТЗ їх траєкторії руху наперед задані. Від місця старту до місця цілі поїздки у водія відсутня можливість вибору маршруту подальшого руху. По відношенню до пунктів збору оплати за проїзд такий підхід є доцільним, коли відомі розподіли транспортних навантажень між смугами ТСР. У разі нового будівництва, виконати прогноз таких розподілів стає вкрай складно, зазвичай, вихідними даними виступають тільки початкові інтенсивності руху ТЗ перед ТСР без прив'язки до їх смуг. При використанні певних припущень, статичні маршрути можуть слугувати інструментом реалізації руху у моделі пунктів збору оплати за проїзд, що проєктуються. Особливо актуальними статичні маршрути стають при розбудові смуг ТСР за допомогою відокремлених відрізків. Однак, як було вказано вище, проблемним питанням при застосуванні статичних маршрутів є реалістичність поведінки ТЗ при виборі смуг руху у зоні прибуття.

Принципово іншій підхід пропонується у динамічному розподілі руху у PTV Vissim. Смуги руху на пунктах оплати за проїзд розглядаються як альтернативні шляхи, які обирають водії. Для прийняття рішення вони оцінюються та далі обираються на основі моделі дискретного вибору, закладеної у програмі. З кожною ітерацією програма запам'ятовує варіанти проїзду та обирає найкращу альтернативу.

Оскільки при плануванні та/або проєктуванні пунктів збору оплати за проїзд або перевірці різних планувальних рішень предметом дослідженням може виступати поведінка водія при впровадженні відповідного сценарію, саме динамічний розподіл виглядає дієвим інструментом для відтворення, а потім й оцінки поведінки ТЗ у нових умовах, оскільки він дозволяє відтворювати поведінку водіїв при виборі смуги руху на ТСР у реалістичний спосіб.

Таким чином, використання динамічного розподілу при детальному транспортному моделюванні пунктів збору оплати за проїзд обумовлюється трьома причинами:

1. Необхідність перевірки поведінки водіїв при впровадженні різних заходів з організації дорожнього руху, нових інженерно-планувальних рішень, коли використання припущення про конкретний розподіл транспортних потоків між смугами ТСР стає ускладненим.

2. Необхідність реалізації моделі руху, яка б найбільш адекватно відображала реальну поведінку ТЗ при виборі смуги руху у пунктах збору оплати за проїзд.

В окремих випадках, коли пункти збору оплати за проїзд є частиною великої транспортної мережі, введення статичних маршрутів на кожному вузлі такої мережі стає вельми складним. У

такому разі, транспортний планувальник, інженер з проєктування доріг буде мати додаткову мотивацію до використання динамічного розподілу.

Порівняльна характеристика можливостей відповідного методу розподілу транспортних потоків у PTV Vissim для моделювання пунктів збору оплати за проїзд визначена експертним шляхом та наведена у **табл.1**. Вимірювання аттітюда виконано за 5-бальною шкалою Лайкерта, де ступінь згоди із відповідним твердженням оцінюється: 1 бал означає повну незгоду або несхвалення; 2 — незгода; 3 — байдужість; 4 — згода і 5 — повна згода.

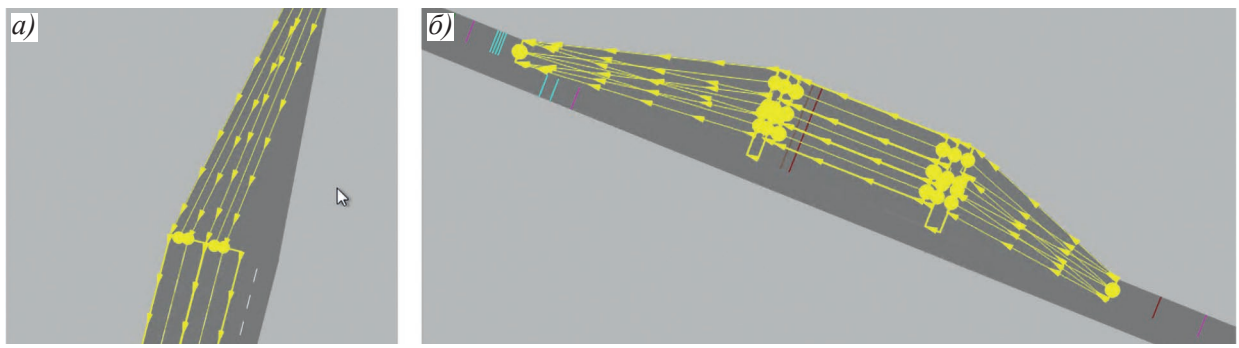
Таблиця 1

Порівняння функціональних можливостей методів відтворення руху у ТСР

Метод представлення транспортного потоку/ Характеристика методу	Статичні маршрути	Динамічний розподіл руху	Адаптивний метод	Маршрути «Пункти збору плати за проїзд»
Великий обсяг вихідних даних для відтворення руху	4	3	4	5
Чутливість розподілу ТЗ по смугам ТСР від початкових умов	5	4	4	4
Висока залежність якості моделі від налаштувань конфліктних зон	5	4	4	4
Реалістичне відтворення руху у ТСР під час імітації	3	4	5	4
Висока трудомісткість моделювання	4	4	5	4

Для перевірки можливостей програмного забезпечення PTV Vissim у частині детального транспортного моделювання пунктів збору оплати за проїзд розроблено моделі сценаріїв ТСР із кількістю смуг на пунктах збору оплати за проїзд від 3 до 6 із використанням статичних маршрутів ТЗ та динамічного розподілу транспортних потоків. Середній час зупинки на майданчиках збору оплати для всіх сценаріїв встановить 15 с.

З метою відтворення одиничного пункту збору оплати за проїзд із 4 майданчиками для зони очікування використано 2 суцільних відрізка по 2 смуги кожен і 2 з'єднувальних відрізка для зони прибуття (**рис. 1, *а***). Рух ТЗ відбувається у відповідності до налаштувань динамічного розподілу. При застосуванні статичних маршрутів у тому самому пункті збору оплати за проїзд з 4 майданчиками у зоні очікування конфігурація з'єднувальних відрізків виглядає так, як показано на **рис. 1, *б***.



а) при динамічному розподілі потоків;

б) при використанні статичних маршрутів

Рисунок 1 — Відтворення 4-х смугової ТСР при динамічному розподілі потоків

Приклад детальної транспортної моделі 6-тисмугової ТСР із відокремленням 3-х смуг для поворотного напрямку і статичними маршрутами ТЗ наведений на **рис. 2**.

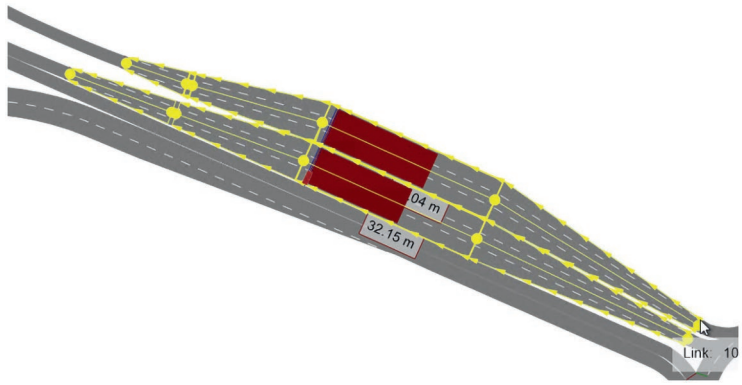


Рисунок 2 — Відтворення 6-ти смугової ТСР із відокремленими смугами для поворотного напрямку із статичними маршрутами

Під час імітації руху стає зрозумілим, що при однаковому підході до відтворення конфігурації ТСР (різні смуги утворені суцільним відрізком) застосування динамічного розподілу дозволяє реалістичніше моделювати рух ТЗ при виборі майданчика для оплати проїзду: водії ТЗ частіше виконують перебудову на сусідні смуги, які є вільними, або характеризуються меншою довжиною черги ТЗ (**рис. 3**), отже, транспортне навантаження у ТСР розподіляється більш рівномірно.

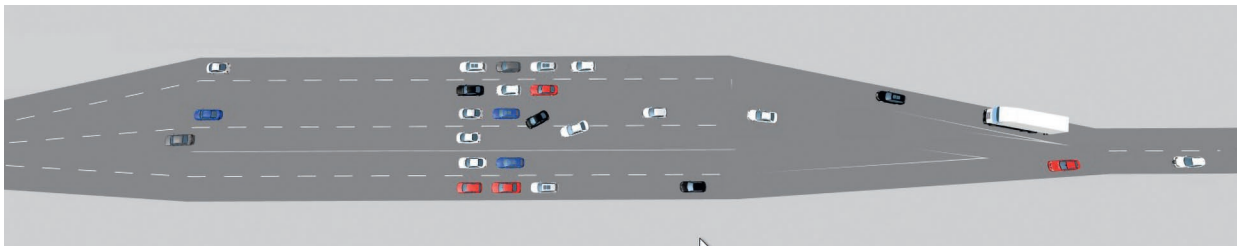


Рисунок 3 — Фрагмент імітації руху ТЗ у пункті збору оплати за проїзд із використанням динамічного розподілу потоків

При застосуванні підходу із відокремленими смугами у ТСР для конкретних напрямків руху (**рис. 4**) та статичних маршрутів поведінка водіїв при русі у пункті збору оплати за проїзд під час проведення імітації також є передбачуваною, відповідаючи умовам руху.

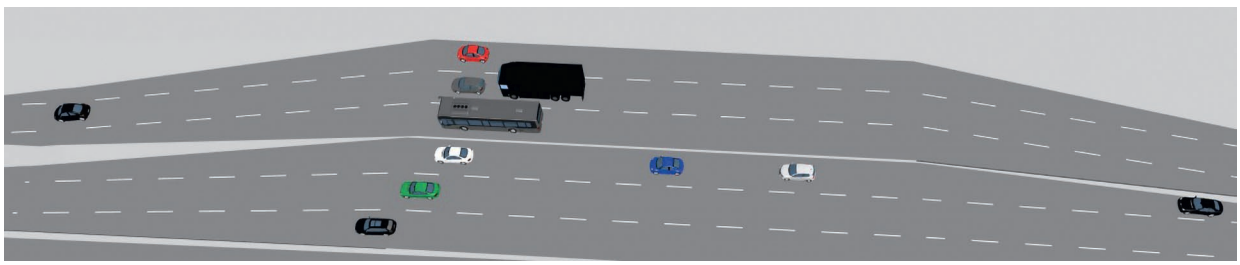


Рисунок 4 — Фрагмент імітації руху ТЗ у пункті збору оплати за проїзд із використанням відокремлених смуг для поворотного напрямку та статичних маршрутів

Порівнюючи показники часу простою та середньої затримки ТЗ на ТСР для різних сценаріїв відтворення руху транспортних потоків, було встановлено, що

– час простою для 4-х смугової ТСР при використанні статичних маршрутів та динамічного розподілу потоків відрізняється на 11 %, для 3-х смугової ТСР — цей показник відрізняється при застосуванні названих підходів до детального транспортного моделювання на 14 %;

– середня затримка ТЗ для 4-х смугової ТСР при використанні статичних маршрутів та динамічного розподілу потоків відрізняється на 14 %, для 3-х смугової ТСР — лише на 2 %.

Висновки

Роботу присвячено вирішенню науково-прикладної задачі обґрунтування методу розподілу транспортних потоків при детальному транспортному моделюванні пунктів збору оплати за проїзд у програмному середовищі PTV Vissim. В основі розроблених рекомендацій по використанню того чи іншого метода розподілу дорожнього руху у пунктах збору оплати за проїзд покладено:

– аналіз функціональних можливостей методів відтворення руху у ТСР: статичні маршрути, динамічний розподіл потоків, адаптивний метод (COM-інтерфейс для динамічного розподілу руху), маршрути «Пункти збору плати за проїзд»;

– перевірку реалістичності відтворення руху під час імітації у детальних транспортних моделях із статичними маршрутами та динамічним розподілом;

– порівняння показників транспортної затримки ТЗ у ТСР, отриманих у результаті моделювання одиничного пункту збору оплати за проїзд в одному випадку зі статичними маршрутами, в іншому – із динамічним розподілом потоків.

1. При достатньому обсязі вихідних даних (швидкість руху у ТСР, економія часу при проїзді платної ділянки мережі (автомагістралі), структура тарифу, розподіл транспортних потоків між смугами ТСР, час виконання технологічних операцій) для моделювання ТСР рекомендовано використовувати об’єкт PTV Vissim «Маршрути «Пункти збору плати за проїзд»» або адаптивний метод за допомогою COM-інтерфейсу PTV Vissim з динамічним розподілом потоків. Використання COM-інтерфейсу PTV Vissim потребує від транспортного планувальника, інженера з проєктування доріг додаткових навичок з програмування, що збільшуватиме витрати праці та, відповідно, вартість робіт з детального транспортного моделювання ТСР. При цьому реалістичність відтворення поведінки ТЗ на смугах ТСР очікується найкращою із усіх методів розподілу потоків. Крім того, з’являється можливість візуалізації технологічних операцій та оцінки їх впливу на поведінку водіїв (наприклад, відкриття/закриття шлагбаумів), детальне транспортне моделювання ТСР як системи масового обслуговування зі зворотнім зв’язком (час обслуговування на майданчиках залежіть від вхідного навантаження на відповідних смугах).

Перевагою використання динамічного розподілу потоків для детального транспортного моделювання ТСР є можливість зменшити кількість вихідних даних за рахунок ітераційного підходу до визначення розподілу транспортних потоків між смугами ТСР:

– задаються лише місце старту до початку заїзду у ТСР та місце цілі після виїзду з ТСР без розподілу потоків між смугами;

– після кожної ітерації програма зберігає архів відомих шляхів з розрахованою оцінкою кожного, відповідно до якої водії ТЗ можуть зробити вибір смуги для проїзду у ТСР.

Моделювання ТСР зі статичними маршрутами ТЗ характеризується чутливістю до способу відтворення мережі, налаштування конфліктних зон, обсягу вихідних даних, особливо стосовно розподілів інтенсивності руху на смугах ТСР. Однак більшість задач, які виникають при дослідженні існуючих або проєктуванні нових ТСР можуть бути вирішені за допомогою детального транспортного моделювання із статичними маршрутами ТЗ.

2. Динамічний розподіл транспортних потоків дозволяє проводити детальне транспортне моделювання руху ТЗ у ТСР у відповідності до реальних умов. У детальних транспортних моделях ТСР зі статичними маршрутами водії ТЗ під час імітації поводяться природньо у разі використання конфігурації із відокремленням смуг ТСР для поворотного напрямку.

3. За результатами детального транспортного моделювання 3-х та 4-х смугових ТСР встановлено, що різниця у показниках затримок при використанні статичних маршрутів ТЗ та динамічного розподілу становить від 2 % до 14 %, що дозволяє вважати їх рівноправними методами розподілу потоків при моделюванні одиничного ТСР.

Список літератури

1. Modeling Toll Plaza Behavior Using Queuing Theory URL: https://sites.math.washington.edu/~morrow/mcm/cary05.pdf (дата звернення: 26.01.2023).
2. PTV Vissim 11 user manual. PTV AG, Karlsruhe, Germany. 1526 p. URL: https://pdfcoffee.com/vissim-11-manual-2-pdf-free.html (дата звернення: 26.01.2023).
3. Astarita V., Florian M. and Musolino G. A microscopic traffic simulation model for the evaluation of toll station systems. *IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585)*. 2001. P. 692–697. DOI: 10.1109/ITSC.2001.948744.
4. Ceballos Gustavo and Owen Curtis. Queue Analysis at Toll and Parking Exit Plazas: A Comparison between Multi-server Queuing Models and Traffic Simulation. URL: http://www.ptvamerica.com/docs/VISSIMQueueAnalysis.pdf (дата звернення: 26.01.2023).
5. Russo Christopher. The Calibration And Verification Of Simulation Models For Toll Plazas. *Electronic Theses and Dissertations*. Roma, 2019. 3480.
6. Shanchuan Yu & Yuchuan Du & Jindong Wang & Yishun Li & Yong Zhu. Simulation-Based Optimization for the Operation of Toll Plaza at Car Park Exit with Mixed Types of Tollbooths and Waiting-Time-Dependent Service. *Journal of Advanced Transportation*. 2021. P. 1–27. DOI: 10.1155/2021/6674037.
7. He L., Wu Y., Zeng X. and Yang A. The design of toll plaza using the combination of modeling and simulation. *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services*. 2011, P. 744–747. DOI: 10.1109/GSIS.2011.6044043.
8. Teruaki Ito. Process simulation approach to design and evaluation of toll plaza with ETC gates. Poland, 2004. URL: https://ijssst.info/Vol-06/No-5/Ito.pdf (дата звернення: 26.01.2023).
9. Surbakti Medis & Satria Tadeus. Simulation of queue length on Amplas Entrance Toll before and after the ramp off development with Vissim software. *MATEC Web of Conferences.* 2008. P. 35–37. DOI: 181.07002.10.1051/matecconf/201818107002.
10. Malipatil Naveen & Avati Soumya & Nanjegowda Vinay & Siddaraju Sunil. Application of Queuing Theory to a Toll Plaza-A Case Study. *Transportation Research*. 2020. P. 343–354. DOI: 10.1007/978-981-32-9042-6_27.
11. Emad Ali & Ismail Amiruddin & Borhan Muhamad & Ishak Siti. Modelling and optimizing of electronic toll collection (ETC) at Malaysian toll plazas using microsimulation models. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. P. 345–347. DOI: 7.2304-2308.10.14419/ijet.v7i4.14338.
12. PTV Vissim: Tollplaza Simulation using COM Interface. URL: https://www.wdmtraffic.com/vs/ptv-vissim-tollplaza-simulation-using-com-interfac (дата звернення: 26.01.2023).
13. МР Б.2.2-37641918-928:2022 Методичні рекомендації з моделювання транспортних потоків під час оцінювання ефективності проєктних рішень щодо дорожньої інфраструктури. Київ, 2022. 47 с. (Інформація та документація).

References

1. Modeling Toll Plaza Behavior Using Queuing Theory URL: https://sites.math.washington.edu/~morrow/mcm/cary05.pdf (Last accessed: 26.01.2023) [in English].
2. PTV Vissim 11 user manual. PTV AG, Karlsruhe, Germany. 1526 p. URL: https://pdfcoffee.com/vissim-11-manual-2-pdf-free.html (Last accessed: 26.01.2023) [in English].
3. Astarita V., Florian M. and Musolino G. A microscopic traffic simulation model for the evaluation of toll station systems. *IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585)*. 2001. P. 692–697. DOI: 10.1109/ITSC.2001.948744 [in English].
4. Ceballos Gustavo and Owen Curtis. Queue Analysis at Toll and Parking Exit Plazas: A Comparison between Multi-server Queuing Models and Traffic Simulation. URL: http://www.ptvamerica.com/docs/VISSIMQueueAnalysis.pdf (Last accessed: 26.01.2023) [in English].
5. Russo Christopher. The Calibration And Verification Of Simulation Models For Toll Plazas. *Electronic Theses and Dissertations*. Roma, 2019. 3480 [in English].
6. Shanchuan Yu & Yuchuan Du & Jindong Wang & Yishun Li & Yong Zhu. Simulation-Based Optimization for the Operation of Toll Plaza at Car Park Exit with Mixed Types of Tollbooths and Waiting-Time-Dependent Service. *Journal of Advanced Transportation*. 2021. P. 1–27. DOI: 10.1155/2021/6674037 [in English].
7. He L., Wu Y., Zeng X. and Yang A. The design of toll plaza using the combination of modeling and simulation. *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services*. 2011, P. 744–747. DOI: 10.1109/GSIS.2011.6044043 [in English].
8. Teruaki Ito. Process simulation approach to design and evaluation of toll plaza with ETC gates. Poland, 2004. URL: https://ijssst.info/Vol-06/No-5/Ito.pdf (Last accessed: 26.01.2023) [in English].
9. Surbakti Medis & Satria Tadeus. Simulation of queue length on Amplas Entrance Toll before and after the ramp off development with Vissim software. *MATEC Web of Conferences.* 2008. P. 35–37. DOI: 181.07002.10.1051/matecconf/201818107002 [in English].
10. Malipatil Naveen & Avati Soumya & Nanjegowda Vinay & Siddaraju Sunil. Application of Queuing Theory to a Toll Plaza-A Case Study. *Transportation Research*. 2020. P. 343–354. DOI: 10.1007/978-981-32-9042-6_27 [in English].
11. Emad Ali & Ismail Amiruddin & Borhan Muhamad & Ishak Siti. Modelling and optimizing of electronic toll collection (ETC) at Malaysian toll plazas using microsimulation models. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. P. 345–347. DOI: 7.2304-2308.10.14419/ijet.v7i4.14338 [in English].
12. PTV Vissim: Tollplaza Simulation using COM Interface. URL: https://www.wdmtraffic.com/vs/ptv-vissim-tollplaza-simulation-using-com-interfac (Last accessed: 26.01.2023) [in English].
13. MR B.2.2-37641918-928:2022 Metodychni rekomendatsii z modeliuvannia transportnykh potokiv pid chas otsiniuvannia efektyvnosti proiektnykh rishen shchodo dorozhnoi infrastruktury [Methodological recommendations (MR B.2.2-37641918-928:2022) Methodological recommendations for modeling traffic flows during the evaluation of the effectiveness of project decisions regarding road infrastructure]. Kyiv, 2022, 47 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

Volodymyr Sistuk[1], *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0003-4907-4265*
Dmytro Bespalov[2], *https://orcid.org/0000-0002-0778-5627*
Vitalii Boyko[3]
Volodymyr Tarasuik[2], *Ph.D., http://orcid.org/0000-0003-4762-5668*
Nataliia Kostenko[2]
[1] *Kryvyi Rih National Univrsity, Kryvyi Rih, Ukraine*
[2] *Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine*
[3] *LCC Pro-Mobility, Kyiv, Ukraine*

SUBSTANTIATION OF THE METHOD OF TRAFFIC FLOWS DISTRIBUTION IN MICROSIMULATION OF TOLL COLLECTION PLAZAS

Abstract

Introduction. The practice of charging road tolls to compensate for the costs of the road construction and operation has been known since ancient times. The traditional approach to toll collection on motorways is that vehicles must stop and pay at the appropriate collection point (Toll Collection Plaza — TCP). At the same time, two payment systems are traditionally distinguished: an open one, in which the driver pays for traveling the entire toll section, and a closed one, in which, upon entering the toll motorway, the driver is obliged to take a ticket at the first point (station) of payment and return it upon exiting the motorway at the final payment point, paying for the actual distance traveled. In both systems, there are bound to be vehicle delays in TCP. In this regard, transport engineers and road design specialists face several urgent tasks, such as determining the impact of toll booths on the level of service, capacity and other traffic indicators on motorways, assessing the impact of TCP configuration and toll collection technologies on of the traffic flows indicators in the TCP zone and in the transport network.

Problem statement. One of the modern methods of research and assessment of the state of traffic at toll collection points is microsimulation of the road network or individual TCPs. At the same time, the reliability of this analysis tool will be determined not only by the calibration parameters of the simulation model, but also by the quality of the adopted distribution of traffic flows.

Purpose. The purpose of the work is to substantiate the method of traffic flows distribution when developing a microsimulation model of toll collection plazas via PTV Vissim software.

Materials and methods. Single TCP scenarios are simulated in Vissim, which differ in the number of operation lanes, approaches to network reproduction, and applied traffic distribution methods.

The results. The actual scientific and applied problem of justifying the method of traffic flows distribution in the microsimulation of toll collection plazas in PTV Vissim has been solved. An analysis of the possibilities of traffic reproduction methods in TCP using static routes, dynamic assignment, the PTV Vissim COM interface for dynamic assignment, “Managed lanes” routes was performed. In TCP models with the number of lanes from 3 to 6 with static routes and dynamic assignment, the realistic behavior of drivers when choosing a traffic lane in TCP is verified. An analysis of transport delays in TCP models was performed to compare the simulation results when using static routes and dynamic assignment.

Conclusions. The conducted studies showed that, considering the realism of driver behavior reproduction, the complexity of model development, the dependence on the initial data, the obtained traffic indicators and other factors, the optimal methods of specifying traffic in PTV Vissim TCP models are the dynamic assignment or the use of static routes on separate TCP lanes.

Keywords: toll collection plaza, TCP, microsimulation, PTV Vissim, static routes, dynamic assignment.