

УДК 625.7/.8

Сістук В. О., канд. техн. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0003-4907-4265>

Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна

МОЖЛИВОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВІДЕОАНАЛІЗУ ДОРОЖНЬОГО РУХУ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ОПОРУ У ВУЗЛАХ ТРАНСПОРТНОЇ МОДЕЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ІСА

Анотація

Вступ. Обстеження дорожнього руху (ДР) за допомогою візуальних спостережень у польових умовах залишається основним методом збору даних про інтенсивність транспортних потоків. Однак, в останні роки, зростає популярність використання програмного забезпечення для автоматизованого відеоаналізу ДР, що базується на технологіях штучного інтелекту. Такий підхід стає альтернативою традиційним методам збору даних, забезпечуючи високу ефективність і точність у вимірюванні показників ДР. За допомогою пост-обробки відеоматеріалів руху можна отримувати матриці зародження-призначення для транспортних засобів (ТЗ) конкретного типу, а також аналізувати експлуатаційні показники ДР для кожного ТЗ, що дозволяє отримати детальні дані про транспортні потоки та покращити якість планування й управління дорожньою інфраструктурою.

Проблематика. Метод використання відеоаналізу даних ДР за допомогою програмного забезпечення DataFromSky від R.C.E. systems може бути ефективно застосований для розрахунку опору у вузлах (intersection capacity analysis – ICA) в транспортній макромоделі, що створена в програмному забезпеченні PTV Visum. Однак на даний момент дослідження, які б були спрямовані на перевірку ефективності інтеграції двох зазначених технологій, не проводились.

Мета. Оцінювання можливостей програмного забезпечення для автоматизованого відеоаналізу даних ДР для моделювання опору у вузлах транспортної макромоделі.

Матеріали і методи. У роботі використані відеоаналіз даних ДР на основі штучного інтелекту, розрахунок показників ДР за методикою HCM та транспортне моделювання опору у вузлах у програмному забезпеченні PTV Visum із застосуванням ІСА.

Результати. На прикладі регульованого перехрестя вулиці В. Матусевича та проспекту Металургів у місті Кривий Ріг було встановлено, що різниця в отриманих показниках ДР, визначеними за допомогою ІСА та програмного забезпечення DataFromSky є незначною, що свідчить про можливість використання результатів аналізу, здійсненого за допомогою програмного забезпечення DFS, для калібрування транспортної моделі, створеної в PTV Visum.

Висновки. До показників, які можуть бути перевірені за допомогою результатів аналізу ДР в DataFromSky, відносяться: середній загальний час очікування (затримка), середній рівень обслуговування (LOS), відношення завантаження до пропускної здатності, обсяг руху (інтенсивність транспортного потоку), фактор години пік, максимальний обсяг руху за 15 хвилин, а також доли правих і лівих поворотів. Показники черги ТЗ, які визначаються за ІСА, не мають аналога в DataFromSky, але дані звіту Trajectories Movement Dynamics, який генерується у даному програмному забезпеченні, дозволяють встановити залежності між швидкістю руху, відстанню та часом у дорозі для конкретного ТЗ. Незважаючи на те, що підходи до аналізу показників транспортних потоків та транспортних розв'язок в ІСА та DataFromSky мають різний рівень деталізації, результати відеоаналізу даних ДР можуть бути використані для калібрування транспортних моделей і порівняння модельних та натурних показників ДР.

Ключові слова: відеоаналіз дорожнього руху, опір у вузлах, показники дорожнього руху, транспортне моделювання, штучний інтелект, DataFromSky, HCM, ICA, PTV Visum.

Вступ

Дані про інтенсивність руху, швидкість, прискорення та уповільнення та інші параметри транспортних потоків (ТП) за визначений період часу є необхідними для оцінки стану доріг,

проектування дорожньої інфраструктури та реорганізації руху на окремих ділянках вулично-дорожньої мережі [1]. Обстеження дорожнього руху (ДР) за допомогою візуальних спостережень у польових умовах залишається основним методом отримання даних про інтенсивність ТП, незважаючи на те, що вони мають низку обмежень, зокрема непередбачуваність результатів, необхідність залучення більшої кількості обліковців для великих за площею транспортних розв'язок, складність перевірки отриманих даних. Використання автоматизованої обробки даних про ДР дозволяє лише частково подолати зазначені незручності. Сучасні інструменти для визначення статистичних показників ДР базуються на використанні детекторів транспорту, що працюють за принципом індукційної петлі, а також ультразвукових датчиків, які призначені для підрахунку кількості транспортних засобів (ТЗ), що проходять визначену ділянку дороги. Вони, як і візуальні спостереження, мають ряд слабких сторін, зокрема, необхідність фіксації обладнання на конкретній ділянці дороги, обмежений оглядовий кут та залежність від типу конструктивних характеристик використовуваних датчиків [2]. Крім того, складні транспортні розв'язки важко обстежити в повному обсязі через їх великі площі та конструктивні особливості систем спостереження, що фіксуються зазвичай лише на вхідних та вихідних ділянках, а також через високі витрати на встановлення детекторів. Повітряне відеоспостереження з використанням широкооглядових датчиків відкриває нові можливості для дослідження дорожнього руху на локаціях подібного типу, а безпілотні літальні апарати (БПЛА), обладнані стабілізаторами та камерами високої роздільної здатності, можуть слугувати більш ефективним інструментом для збору якісних даних.

Програмне забезпечення для автоматизованого відеоаналізу даних ДР, що базується на технологіях штучного інтелекту (ШІ), стає альтернативою традиційним методам збору даних про ДР. У останні роки методи збору даних, що використовують відеоаналіз ДР, набувають все більшої популярності [3 – 6]. Зокрема, за допомогою пост-обробки відеоматеріалів ДР можна отримувати матриці призначення-відправлення у розрізі ТЗ конкретного типу та експлуатаційні показники ДР у розрізі кожного ТЗ.

Обмеженням використання зазначеної технології в Україні є заборона польотів цивільної авіації під час воєнного стану. Крім того, слід враховувати, що незалежно від обраного інструментального методу визначення інтенсивності ДР, нормативний документ [7] встановлює порогові значення відносної похибки вимірювань годинної інтенсивності руху для інструментальних методів у порівнянні з результатами візуальних спостережень. Згідно з вимогами стандарту [7] відносна похибка вимірювань не повинна перевищувати 10 % для доріг Іа, Іб, ІІ та ІІІ категорій, а для доріг ІV і V категорії — 20 %.

Метод використання відеоаналізу даних ДР за допомогою програмного забезпечення DataFromSky від R.C.E. systems [3] для калібрування транспортної мікромоделі, виконаної у програмному забезпеченні PTV Vissim [8], описаний у статті [1]. У той же час, потреба у детальному моделюванні перетинів вулично-дорожньої мережі виникає й на макрорівні моделювання у програмному забезпеченні PTV Visum [9]. У цьому випадку для розрахунку опору в конкретних вузлах і поворотах транспортної моделі зазвичай використовується додаткова опція програми «розрахунок опору у вузлах за методом HCM 2000» — аналіз пропускної здатності перехрестя (intersection capacity analysis, ICA) [9]. На сьогоднішній день можливості відеоаналізу даних руху для розрахунку опору в вузлах і поворотах транспортної моделі на основі ICA не були достатньо досліджені.

Мета роботи — Оцінювання можливостей програмного забезпечення відеоаналізу даних дорожнього руху для моделювання опору у вузлах і поворотах транспортної моделі на макрорівні.

Основна частина

Загальна архітектура системи розпізнавання відео зображень на основі технології ШІ, представлена на **рис. 1** [10], складається з трьох основних етапів: попередньої обробки, виявлення ТЗ та відстеження (управління траєкторією). Класифікатор вищого рівня розподілений на дві частини: сильну та слабку. Виявлення, здійснене сильним класифікатором, застосовуються для ініціалізації нових цілей або оновлення зовнішніх моделей вже існуючих цілей під час їх взаємодії. Виявлення, виконані слабким класифікатором, використовуються як підказка в процесі відстеження.

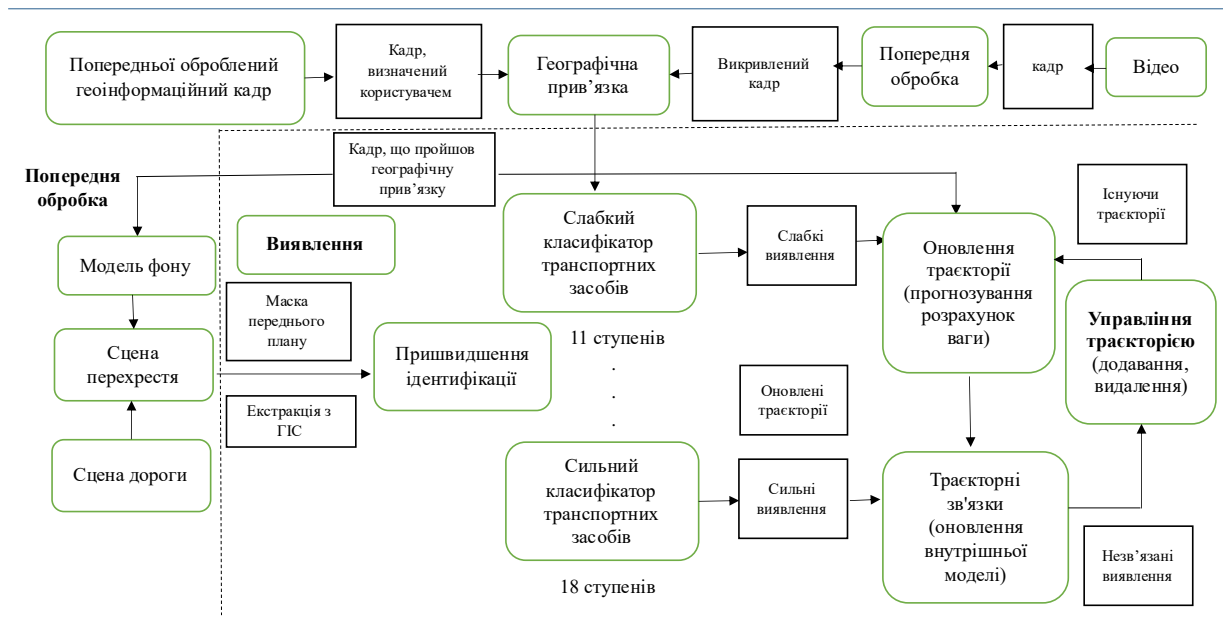


Рисунок 1 — Архітектура системи розпізнавання відеокadrів ДР із використанням ШІ [10]

На першочерговому етапі відеозапис дорожнього руху, зафіксований на перехресті, завантажується на хмарну платформу DataFromSky (DFS) [3], де автоматично генерується журнал відстеження з розширенням «tg1x». Подальша обробка цього файлу здійснюється за допомогою інструменту DataFromSky Viewer, що дозволяє створити нову конфігурацію робочої розмітки відеокadrів, що включає лічильники, смуги, вузли та географічну прив'язку. Дані про інтенсивність руху транспорту і пішоходів експортуються у форматі CSV для кожної відповідності «пункт відправлення - пункт призначення» (OD-матриця) (Origin-Destination Statistics), а також генерується статистика, що відображає динаміку транспортних потоків (звіти Trajectories Movement Dynamics, Traffic Analysis).

Розширений список властивостей цього інструменту включає:

- Визначення транспортних навантажень на лічильниках.
- Класифікація всіх об'єктів відстеження, включаючи велосипедистів та пішоходів.
- Підрахунок матриць зародження-призначення / поворотів у визначених напрямках, їх кольорове маркування та створення Excel-звітів для налаштованих лічильників.
- Вимірювання швидкості та прискорення в будь-якій точці сцени із створенням теплових карт.
- Розширений аналіз дорожнього руху, зокрема, аналіз часу розриву ТП та часу до слідування.
- Вимірювання відстані між транспортними засобами в потоці (м, с).
- Аналіз безпеки руху на основі замісних показників, таких як час до зіткнення (TTC) або час після вторгнення (PET).

Перелік ТЗ відображає всі траєкторії, що були виявлені або відстежені у відеоряді. Для кожної траєкторії доступна наступна інформація:

- *ID* – унікальний ідентифікаційний номер траєкторії.
- *Тип ТЗ* – класифікаційна ознака ТЗ.
- *Поточна швидкість* – абсолютне значення вектора поточної швидкості руху ТЗ в км/год.
- *Повздовжнє прискорення* – поточне тангенціальне прискорення ТЗ, виміряне в м/с²; позитивне значення означає прискорення, негативне – уповільнення.
- *Бокове прискорення* – поточне бокове прискорення транспортного засобу в м/с²; позитивне значення відповідає прискоренню праворуч, негативне – ліворуч.
- *Загальне прискорення* – абсолютне значення вектора миттєвого прискорення.

- *Середня швидкість на перехресті* – середня швидкість ТЗ в районі перехрестя (між вхідним та вихідним лічильником) в км/год.
- *Час на перехресті* – тривалість часу, який ТЗ проводить у районі перехрестя, в с.
- *Перше зображення ID* – індекс зображення від початку відеокадру, де починається траєкторія.
- *Останнє зображення ID* – індекс зображення від початку відеокадру, де закінчується траєкторія.
- *Вхідний лічильник ID* – унікальний ідентифікаційний номер вхідного лічильника, який перетинає ТЗ при в'їзді на територію перехрестя. Список лічильників для аналізу ДР включає всі доступні лічильники та відповідні дані. Лічильники поділяються на три класи: вхідний, вихідний, нейтральний. Для кожного типу доступні такі дані:
 - *Унікальний лічильник ID* – унікальний ідентифікатор, присвоєний лічильнику програмним засобом DataFromSky.
 - *Журнал лічильників* – значення, яке може бути призначене користувачем до лічильника за допомогою інструментів маркування DataFromSky. За замовчуванням це значення збігається з ідентифікатором Gate Unique.
 - *Транспортні засоби, що пройшли* – кількість ТЗ, що пройшли лічильник.
 - *Середня швидкість* – середня швидкість ТЗ, що проходять лічильник.

Метод HCM 2010, застосовуваний в ІСА, є одним із визнаних методів для аналізу ефективності вузлів (транспортних розв'язок в одному рівні), враховуючи з високим рівнем деталізації розподіл смуг руху та конфліктуючі повороти [11]. Однак даний підхід вимагає значних витрат на моделювання та калібрування розв'язок, оскільки вузли, для яких розраховується опір за допомогою ІСА, потребують додаткового опрацювання [9]. Для калібрування опору у вузлах пропонується використовувати результати відеоаналізу ДР як фактичні показники ДР. У таблиці 1 представлені показники ДР, отримані шляхом розрахунку опору у вузлах (ІСА) у PTV Visum, які можуть бути перевірені за допомогою даних звітів Trajectories Movement Dynamics та Traffic Analysis.

Порівнюючи підходи до визначення показників ДР у звітах ІСА та DFS, можна виявити кілька ключових відмінностей у методології та описах для кожного з показників на прикладі перехрестя, які регулюються світлофорною сигналізацією.

Середній час очікування для транспортного вузла, розрахований за методом HCM 2010 в звітах ІСА, представляє собою середньозважений час очікування для кожного під'їзду до вузла. Останній показник є середньозваженим значенням часу очікування для групи смуг руху, з урахуванням навантаження на кожен смугу руху V_i . При цьому група смуг руху або група сигналів є однією або декількома смугами руху у напрямку вузла, які мають однакову фазу світлофора. Таким чином, геометрія вузла розбирається на групи смуг руху або групи сигналів, які застосовуються як одиниця аналізу. Середній час очікування для кожного ТЗ у групі смуг руху i , у свою чергу, передбачає врахування декількох складових затримки [9]:

$$d_i = d_{Ui} \cdot PF + d_{Ii} + d_{Ri}, \quad (1)$$

де d_{Ui} — рівномірний час очікування;
 PF — коефіцієнт врахування оптимізації координування;
 d_{Ii} — час очікування, що покроково збільшується;
 d_{Ri} — час очікування залишкового попиту.

Рівномірний час очікування для групи смуг руху залежить від пропускної здатності групи смуг руху c_i , коефіцієнта завантаження v/c , долі часу дозволяючого сигналу у загальному часі циклу — g/C .

Стохастичний час очікування d_{Ii} виникає через нерівномірність розподілу часу прибуття ТЗ за період аналізу T , залежить від транспортного завантаження.

Час очікування залишкового попиту d_{Ri} виводиться із попиту, який є незадовільненим на початковому етапі аналізу та розраховується тільки у тому випадку, якщо на початку аналізу виникає такий незадовільнений попит.

Як й інші показники ДР, в DFS затримка ТЗ не розраховується через опосередковані індикатори, а визначається на основі розпізнання траєкторій об'єктів відстеження, тому вона не прив'язана до конкретних груп смуг руху, а може бути знайдена для конкретного ТЗ. Значення даного показника для локації обстеження виводиться як середньоарифметичне значення по всіх об'єктах відстеження або конкретному типу ТЗ. У ICA затримка фокусується саме на часі, проведеному ТЗ на перехресті при забороняючому сигналі світлофора, тоді як у DFS стаціонарний час включає більш широкий спектр ситуацій, у тому числі, спричинених затором, коли ТЗ рухаються з дуже низькою швидкістю або стоять.

Класифікація рівня обслуговування LOS (Level of Service) при ICA з використанням методу розрахунку HCM 2010 ґрунтується на показнику середнього часу очікування вузла, а при використанні ICU 1, ICU2 та TRB Circular 212 [9] – на співвідношенні між навантаженням та потоком насичення v/s . Рівень обслуговування за DFS можна визначити через середній загальний стаціонарний час. При ICA рівень обслуговування оцінюється на основі різних факторів, таких як затримка і потік насичення. У DFS середній LOS для перехрестя залежить від часу, проведеного ТЗ в стаціонарному стані.

У ICA співвідношення між обсягом руху і пропускною здатністю v/c визначається на одному з етапів розрахунку вузла, надаючи загальне уявлення про його завантаженість. У DFS v/c не є вихідним параметром аналізу ДР, а базується на даних матриці OD, що дозволяє врахувати інформацію про походження і призначення потоків ТЗ між конкретними напрямками руху (вхідними та вихідними лічильниками).

У методиці ICA обсяг руху (навантаження) визначається безпосередньо за одну годину в залежності від заданої геометрії вузла та поворотів у вузлі. Початковий обсяг руху задається користувачем як результат підрахунків або оптимізоване значення із моделі попиту. Натомість у DFS цей показник представляє собою «фактичну» величину, визначену на основі матриці OD, що дозволяє враховувати рух ТЗ за конкретними маршрутами між вхідними та вихідними лічильниками.

Початкове навантаження в ICA (починаючи від одиниці аналізу «група смуг руху») оптимізується під інтервал години «пік» для вузлів та поворотів. Для цього використовується фактор години пік (Peak hour factor — PHF), який показує, наскільки стабільними є транспортні потоки в годину пік. PHF порівнює загальну інтенсивність руху в годину пік з інтенсивністю руху в найбільш завантажені 15 хвилин години пік [11].

Таблиця 1

Порівняння показників ДР за ICA та DFS

Показник у звіті ICA	Опис	Показник-відповідник в DFS та джерело його визначення	Опис
Весь перетин			
Середній загальний час очікування, с	Середній час, який ТЗ витрачає на перехресті у затримці	Загальний стаціонарний час, с (Trajectories Movement Dynamics)	Загальна кількість часу, протягом якого ТЗ залишаються на місці або рухаються з дуже низькою швидкістю на певній ділянці дороги або перехресті
Середній LOS	Середній рівень обслуговування для всіх учасників руху на перехресті	Середній LOS (Розрахунок)	Визначається окремо через показник загального стаціонарного часу
Коефіцієнт v/c	Співвідношення між обсягом ДР і пропускною здатністю перехрестя	Коефіцієнт v/c (Розрахунок)	Визначається окремо через місткість OD-матриці та з урахуванням нормативних значень пропускної здатності

Показник у звіті ICA	Опис	Показник-відповідник в DFS та джерело його визначення	Опис
Напрямки руху на перетині			
Обсяги руху, авт./год	Середнє годинне значення інтенсивності руху	Перетинання лічильнику (OD-матриця)	Визначаються по кожному маршруту руху ТЗ
Фактор години пік (PHF)	Дозволяє порівняти середній обсяг руху на перехресті протягом доби з його максимальним обсягом під час годин пік	Фактор часу пік (PHF) (Графік інтенсивності транспортного потоку)	Розраховується при проведенні обстеження у пікову годину доби
Максимальний обсяг руху за 15 хв, авт.	Використовується для оцінки інтенсивності руху в умовах пікових навантажень	Транспортний потік, приведений до інтервалу 15 хв. (OD-матриця, графік інтенсивності транспортного потоку)	Визначається по кожному маршруту руху ТЗ
Долі правих/лівих поворотів	Визначається для груп смуг руху	Поворотні рухи (Traffic Analysis)	Визначаються по кожному маршруту руху ТЗ
Поток насичення (пропускна здатність), авт./год/см	Максимальна кількість ТЗ, які можуть пройти у даному напрямку за годину, при цьому зберігаючи стабільний рух і без значних затримок	Поток насичення (Розрахунок)	Розраховується окремо графоаналітичним методом

У DFS параметр PHF не визначається безпосередньо, однак його можна обчислити через відомий аналітичний вираз [11]:

$$PHF = \frac{V}{V_{max,15}} \cdot 4, \quad (2)$$

де V — годинна інтенсивність ДР у пікову годину, авт./год;
 $V_{max,15}$ — інтенсивність руху у пікові 15-хвилин даної години, авт./год.

Якщо DFS використовується як окремий інструмент для аналізу ДР, розрахунок програми світлосигнального регулювання не здійснюється, і обстеження відповідної локації проводиться у піковий 15-хвилинний інтервал конкретної години доби, то немає необхідності в визначенні PHF, оскільки отримані показники навантаження для кожного напрямку руху є остаточними, що не потребують корегування.

Виходячи з відомого PHF можливо розрахувати інтенсивність руху у пікові 15-хвилин для години, у якій була проведена відеозйомка ДР, якщо ця година є піковою. Також, за необхідності, PHF можна визначити аналітичним шляхом, провівши обстеження локації тривалістю мінімум одна пікова година (технічні можливості БПЛА дозволяють виконати за понад годину часу 4 польоти по 15 хвилин кожен).

Показник $V_{max,15}$ за допомогою ICA визначається як оптимізоване навантаження для групи смуг руху i через формулу (2), в якій під V розуміється неоптимізоване (введене) навантаження для тієї ж групи смуг руху. У DFS максимальний обсяг руху за 15 хвилин у пікову годину добу може

бути визначений із графіка інтенсивності транспортного потоку як для перехрестя у цілому, так і для конкретного напрямку руху, приведеного до 15-хвилинного інтервалу руху. Даний графік доповнюється матрицею OD (рис. 2). Таким чином, перевагою використання DFS для аналізу ДР є можливість безпосереднього визначення $V_{max,15}$, у той час як, при ІСА для виконання даної задачі проводяться розрахунки за HCM 2010 [11]. Таким чином, DFS дозволяє провести перевірку транспортного навантаження на конкретних напрямках руху, які розраховані за ІСА у вузлі та його поворотах після оптимізації.

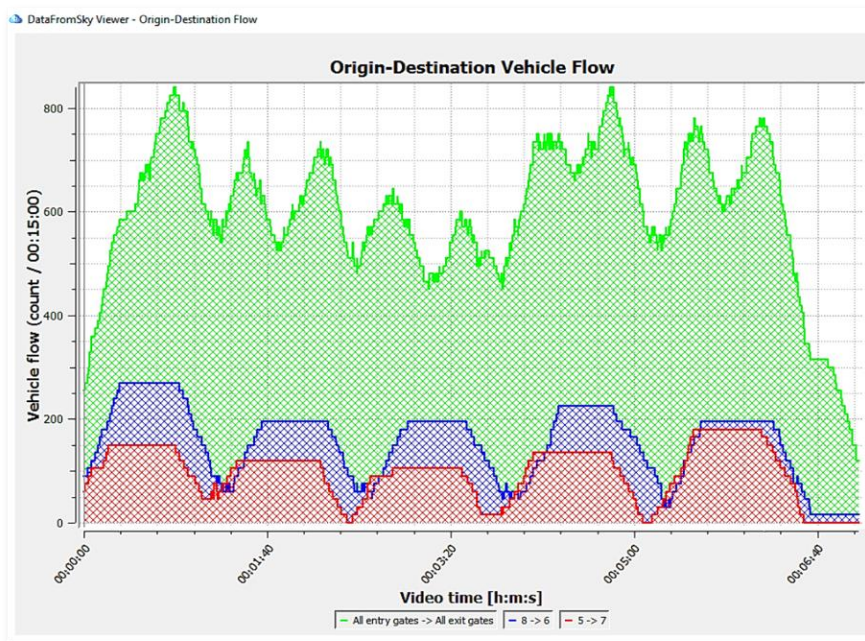


Рисунок 2 — Графіки інтенсивності транспортних потоків

Для кожної групи смуг руху в ІСА розраховується доля навантаження поворотів праворуч PRT та ліворуч PLT ітеративним шляхом відповідно до HCM 2010 [11]:

$$\begin{aligned} PLT &= \frac{V_{LT}}{V_i}, \\ PRT &= \frac{V_{RT}}{V_i}, \end{aligned} \quad (3)$$

де V_{LT} — навантаження ТЗ, які повертають ліворуч для групи смуг руху, авт./год;
 V_{RT} — навантаження ТЗ, які повертають праворуч для групи смуг руху, авт./год;
 V_i — оптимізоване навантаження ТЗ для групи смуг руху i .

Долі транспортних навантажень при розподілі руху за напрямками для окремих типів ТЗ в DFS визначаються зі звіту підрахунку інтенсивності ДР Traffic Analysis.

Потік насичення відіграє значну роль у визначенні пропускної здатності вузла. Для кожної групи смуг руху за допомогою ІСА проводиться розрахунок потоку насичення, виходячи із заданого потоку насичення S_0 та корегуючих коефіцієнтів [11]:

$$S_i = S_0 \cdot N \cdot (f_1 \dots f_{14}), \quad (4)$$

де S_i — потік насичення для групи смуг руху i ;
 S_0 — базовий потік насичення для кожної смуги руху (зазвичай приймається 1 900 авт./год/см);
 $f_1 \dots f_{14}$ — коефіцієнти оптимізації потоку насичення.

У DFS за відомого базового показника потоку насичення можливий розрахунок потоку насичення для групи смуг руху шляхом визначення коефіцієнтів оптимізації. Для цього необхідною стає інформація по інтенсивності транспортних потоків з матриці OD, графіку інтенсивності транспортного потоку, звіту Traffic Analysis. Таким чином, прямого визначення потоку насичення в DFS не передбачено й показники, які дозволяють отримати результати відеоаналізу ДР, у подальшому можуть бути використані для визначення S_i за методом HCM 2010 [11]. Під час моделювання на макрорівні з використанням ICA для визначення опору у вузлах та поворотах перевірка потоку насичення за допомогою показників з DFS є трудомісткою, виходячи із складності визначення коефіцієнтів оптимізації $f_1 \dots f_{14}$.

Показники черги ТЗ, які розраховуються при використанні ICA (середня довжина, проценти довжини черги, кількість ТЗ), не мають прямого відповідника в DFS.

Для пояснення запропонованого підходу використано результати дослідження ДР, проведеного за допомогою відеоаналізу руху в програмному забезпеченні DataFromSky Viewer на перехресті вулиці В. Матусевича та проспекту Металургів у місті Кривий Ріг. Дослідження проводилося в години пік робочого дня з 16:00 до 18:00, тривалість відеозапису становила 15 хвилин, а його основні результати представлені у роботі [1].

На **рис. 3** показана конфігурація маркування позначень в DataFromSkyViewer для даного перехрестя.

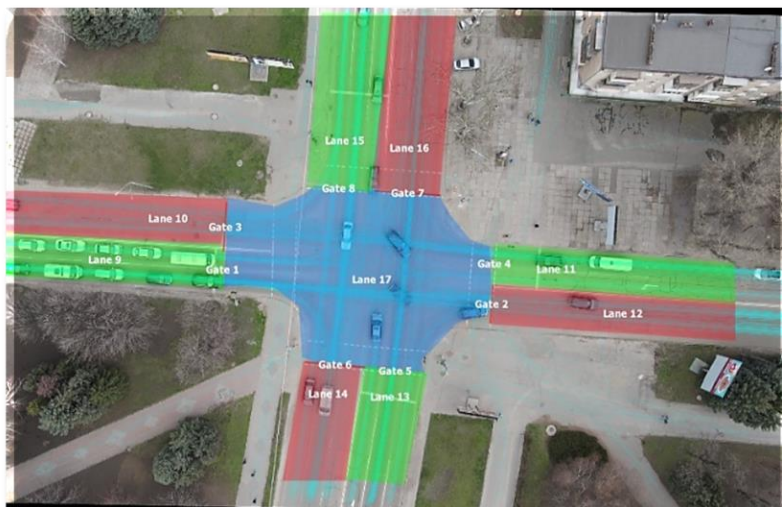


Рисунок 3 — Маркування позначень на досліджуваному перехресті в DataFromSky Viewer

Враховуючи позначені лічильники ТЗ в DataFromSky Viewer (**рис. 3**), можна проводити аналіз інтенсивності ДР, приведеної до 15-хвилинного інтервалу, для конкретних напрямків, зокрема, з виділенням найбільш навантажених (**рис. 2**).

У **табл. 2** наведено отримані за ICA та DFS значення показників ДР для даного перехрестя. Різниця в отриманих показниках є несуттєвою, що говорить про можливість використання результатів аналізу з DFS для калібрування транспортної моделі.

Звіт Trajectories Movement Dynamics, який створюється в DFS в CSV форматі, дозволяє проводити поглиблений аналіз тих показників ДР, які можуть бути використані при перевірці результатів моделювання у PTV Visum при будь-якому методі розрахунку опору у вузлах та поворотах (на основі функцій «обсяг-затримка» або ICA), насамперед, при перевірці швидкісних параметрів транспортних потоків.

Обробка даних звіту Trajectories Movement Dynamics дозволяє встановити залежності показників ДР в категоріях «швидкість руху – пройдена відстань», «швидкість руху – час руху», «відстань – час» по кожному об'єкту відстеження (**рис. 4 – рис. 6**).

Таблиця 2

Визначені показники ДР за ICA (HCM 2010) та DFS

Показник у звіті ICA		Значення				Показник-відповідник в DFS		Значення	
Весь перетин									
Середній загальний час очікування, с		26				Загальний стаціонарний час, с		22	
Середній LOS		C				Середній LOS		C	
Коефіцієнт v/c		0,36				Коефіцієнт v/c		0,32	
Напрямки руху на перетині*									
	1	2	3	4		1	2	3	4
Обсяги руху, авт./год	526	431	623	500	Перетинання лічильнику	587	461	597	486
Фактор години пік (PHF)	0,38	0,36	0,36	0,37	Фактор часу пік (PHF)	0,40	0,37	0,35	0,37
Максимальний обсяг руху за 15 хв., авт.	225	186	222	198	Транспортний потік, приведений до інтервалу 15 хв.	235	171	214	180
Долі правих/лівих поворотів	0,31/ 0,28	0,12/ 0,60	0,42/ 0,15	0,23/ 0,40	Поворотні рухи	0,27/ 0,27	0,10/ 0,55	0,48/ 0,10	0,19/ 0,46

*1 – Gate 8; 2 – Gate 4; 3 – Gate 5; 4 – Gate 1

З рис. 4 виходить, що більшість легкових автомобілів проходять відстань на перехресті у діапазоні від 80 м до 140 м, витрачаючи при цьому від 10 с до 60 с (рис. 6). Середня пройдена відстань складає 99,1 м із стандартним відхиленням у 39,0 м.

Швидкість руху легкових автомобілів зменшується по експоненті із збільшенням часу руху при проїзді перехрестя (рис. 5).

В редакторі вузла PTV Visum для кожного з поворотів на основі перерозподілу індивідуального транспорту в залежності від прийнятої моделі опору визначається час повороту в завантаженій мережі для конкретної системи транспорту.

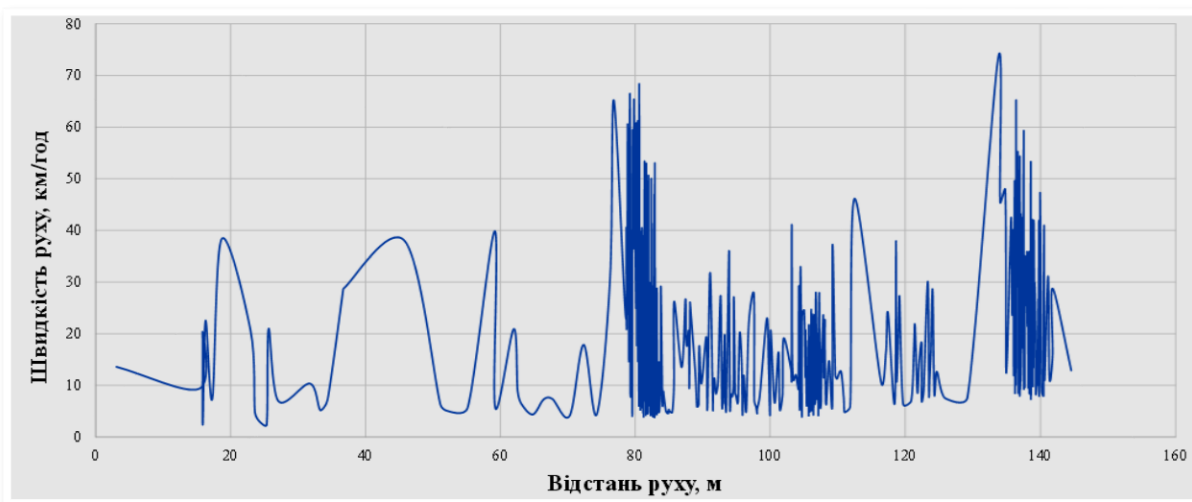


Рисунок 4 — Залежність швидкості руху легкових автомобілів від пройденої відстані

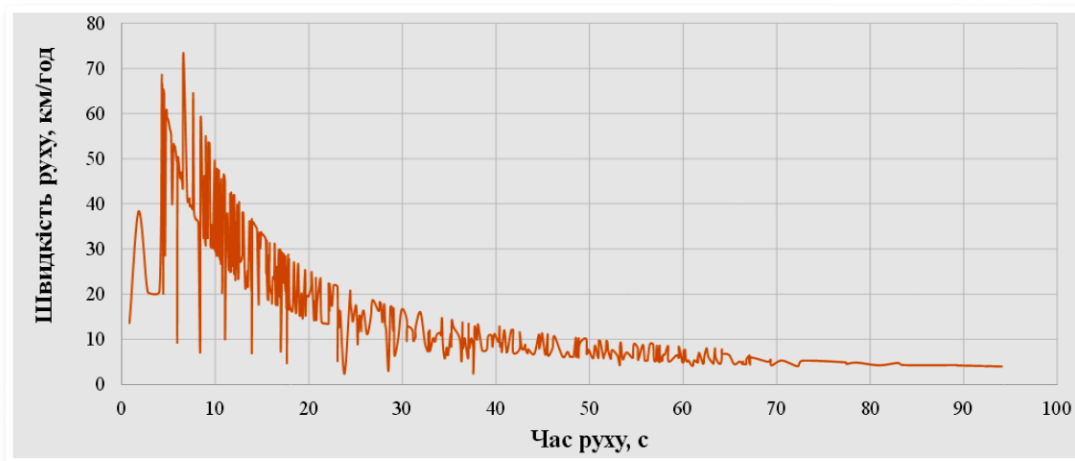


Рисунок 5 — Залежність швидкості руху легкових автомобілів від часу руху

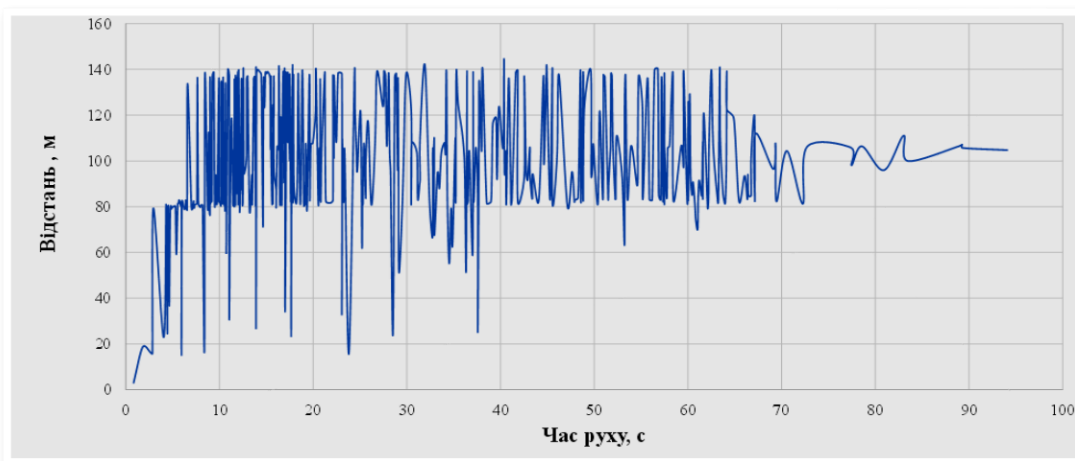


Рисунок 6 — Залежність пройденої відстані легкових автомобілів від часу руху

За допомогою сортування об'єктів відстеження в звіті Trajectories Movement Dynamics за відповідними лічильниками з'являється можливість порівняння модельних показників часу повороту з натурними даними. Так, для перехрестя, що розглядається, модельний час повороту становить від 21 с до 33 с для різних напрямків руху та систем транспорту, а час повороту отриманий з DFS — від 24 с до 36 с.

Для кожного ТЗ DFS визначає мінімальну, середню та максимальну загальну швидкість руху. Середнє значення розподілу швидкості руху при під'їзді до відповідного вхідного лічильника та при виїзді через вихідний лічильник може бути використано у транспортній моделі для калібрування поточної швидкості як атрибуту відрізків, що примикають до вузла, за допомогою якого відтворюється досліджуване перехрестя. При цьому для таких відрізків мають бути дозволені системи індивідуального та громадського транспорту, які були розпізнані DFS.

На **рис. 7** для перехрестя, що досліджується, представлено епюру із зображенням поточної швидкості легкових автомобілів у завантаженій мережі. Поточна швидкість легкових автомобілів у завантаженій мережі у PTV Visum визначається у результаті розрахунку процедури перерозподілу індивідуального транспорту. Порівняння графіків на **рис. 4** та **рис. 5** з результатами перерозподілу на **рис. 7** показує, що величини модельних швидкостей руху значно перевищують польові показники. Таким чином, на даному прикладі стає зрозумілим, що транспортна модель потребує калібрування.



Рисунок 7 — Епюра поточної швидкості легкових автомобілів у завантаженій мережі

Висновки

Порівнюючи підходи до визначення показників ДР у звітах ICA та DFS, можна виявити кілька ключових відмінностей та подібностей у методології та описах для кожного з показників для перехресть, які регулюються світлофорною сигналізацією. Розрахунок опору у вузлах та поворотах через ICA за методом HCM дає загальне уявлення про стан ДР на перехресті, тоді як DFS пропонує глибший аналіз з можливостями врахування показників ДР по кожному об'єкту (ТЗ). Для можливості калібрування транспортної моделі при використанні ICA, з DFS потрібні дані руху, які створюються у матрицях зародження-призначення, звітах Traffic Analysis та Trajectories Movement Dynamics. До показників, які можуть бути відкалібровані за допомогою результатів аналізу в DFS відносяться: середній загальний час очікування (затримка), середній LOS, відношення завантаження до пропускної здатності, обсяг руху, фактор години пік, максимальний обсяг руху за 15 хв, долі правих та лівих поворотів.

На прикладі перехрестя вулиці В. Матусевича та проспекту Металургів у місті Кривий Ріг встановлено, що різниця в отриманих показниках дорожнього руху (ДР) є незначною, що підтверджує можливість використання результатів аналізу, виконаного за допомогою DFS, для калібрування транспортної моделі у PTV Visum. Показники черги ТЗ, які обчислюються за допомогою ICA (середня довжина черги, проценти довжини черги, кількість ТЗ у черзі), не мають прямого аналогу в DFS. Водночас дані зі звіту Trajectories Movement Dynamics надають можливість встановлення залежностей між показниками ДР у таких категоріях, як «швидкість руху — пройдена відстань», «швидкість руху – час руху», «відстань – час» для кожного ТЗ та його типу.

Після сортування показників ДР в звіті Trajectories Movement Dynamics за відповідними лічильниками з'являється можливість отримання та порівняння модельних показників часу повороту з натурними даними.

Швидкісні характеристики транспортних потоків на підходах до перехрестя також можуть бути проаналізовані шляхом порівняння швидкості руху при під'їзді до вхідного лічильника та при виїзді через вихідний лічильник, що дозволяє оцінити зміну швидкості як атрибут відрізків дороги, що примикають до відповідного вузла, і забезпечує більш точну інформацію про динаміку руху транспортних засобів на цих ділянках.

Список літератури

1. Sistuk V., Monastyrskiy Y., Maksymenko I. Calibration of traffic microsimulation models using the results of intelligent video analysis of the traffic. *Transport Means: Proceedings of the 27th International Scientific Conference* (4 – 6 Oct. 2023, Palanga). Palanga, 2023. P. 368–374.
2. Степенко І. В., Стельмах О. П. Технологія визначення інтенсивності дорожнього руху за даними відеоряду. *Технічні науки та технології*. Чернівці, 2020. Вип. 2(20). С. 116–125.
3. One traffic framework. Any video source. All traffic tasks. Brno, 2024. URL: <https://datafromsky.com/> (Дата звернення 01.12.2024).
4. intuVision VA Traffic. Woburn, 2024. URL: https://www.intuvisiontech.com/intuvisionVA_solutions/intuvisionVA_traffic (Дата звернення 01.12.2024).
5. Video Analytics for Traffic & Transport Monitoring. Teddington, 2024. URL: <https://vcatechnology.com/industry-solution/traffic-video-monitoring/> (Дата звернення 01.12.2024).
6. Traffic Data Collection from Video. London, 2024. URL: <https://goodvisionlive.com/solutions/traffic-data-collection/> (Дата звернення 01.12.2024).
7. ДСТУ 8824:2019 Автомобільні дороги. Визначення інтенсивності руху та складу транспортного потоку. Київ, 2019. 33 с. (Інформація та документація).
8. Manual PTV VISSIM 2024. Karlsruhe, 2023, 1250 p.
9. Manual PTV VISUM 2023. Karlsruhe, 2023. 2694 p.
10. Apeltauer J., Babinec A., Herman D., Apeltauer T. Automatic vehicle trajectory extraction for traffic analysis from aerial video data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (25 – 27 March 2015, Munich). Munich, 2015. P. 9–15.
11. HCM 2010: highway capacity manual. Washington D. C., 2010. 1475 p.

References

1. Sistuk V., Monastyrskiy Y., Maksymenko I. Calibration of traffic microsimulation models using the results of intelligent video analysis of the traffic. *Transport Means: Proceedings of the 27th International Scientific Conference* (4 - 6 Oct. 2023, Palanga). Palanga, 2023. P. 368–374. 125 [in English].
2. Inna Stetsenko, Oleksandr Stelmakh. Tekhnolohiia vyznachennia intensyvnosti dorozhnoho rukhu za danymy videoriadu (Technology of traffic intensity evaluation according to the video data). *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*. Chernihiv, 2020. Vol. 2(20). P. 116–125 [in Ukrainian].
3. One traffic framework. Any video source. All traffic tasks. Brno, 2024. URL: <https://datafromsky.com/> (Last accessed: 01.12.2024) [in English].
4. IntuVision VA Traffic. Woburn, 2024. URL: https://www.intuvisiontech.com/intuvisionVA_solutions/intuvisionVA_traffic (Last accessed: 01.12.2024) [in English].
5. Video Analytics for Traffic & Transport Monitoring. Teddington, 2024. URL: <https://vcatechnology.com/industry-solution/traffic-video-monitoring/> (Last accessed: 01.12.2024) [in English].
6. Traffic Data Collection from Video. London, 2024. URL: <https://goodvisionlive.com/solutions/traffic-data-collection/> (Last accessed: 01.12.2024) [in English].
7. DSTU 8824:2019 Avtomobilni dorohy. Vyznachennya intensyvnosti rukhu ta skladu transportnoho potoku [State Standard of Ukraine (DSTU 8824:2019) Highways. Determining the traffic intensity and composition of the traffic flow]. Kyiv, 2019. 33 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
8. Manual PTV VISSIM 2024. Karlsruhe, 2023, 1250 p. [in English].
9. Manual PTV VISUM 2023. Karlsruhe, 2023. 2694 p. [in English].
10. Apeltauer J., Babinec A., Herman D., Apeltauer T. Automatic vehicle trajectory extraction for traffic analysis from aerial video data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (25 – 27 March 2015, Munich). Munich, 2015. P. 9–15 [in English].
11. HCM 2010: highway capacity manual. Washington D.C., 2010. 1475 p. [in English].

Volodymyr Sistuk, Ph.D., Assoc. Prof., <https://orcid.org/0000-0003-4907-4265>

Kyryvyi Rih National University, Kyryvyi Rih, Ukraine

THE POTENTIAL OF AUTOMATED VIDEO ANALYSIS OF TRAFFIC FOR ESTIMATING IMPEDANCE IN TRANSPORTATION MODEL NODES WITH ICA

Abstract

Introduction. Road traffic surveys based on visual field observations continue to be the primary method for collecting traffic flow data. However, in recent years, the adoption of automated video analysis software utilizing artificial intelligence technologies has gained significant traction. This approach is emerging as a viable alternative to traditional data collection techniques, offering enhanced efficiency and precision in measuring traffic parameters. By processing traffic video footage, it is possible to generate origin-destination matrices for specific vehicle types and analyze individual vehicle performance. This enables the collection of detailed traffic flow data, thereby improving the planning and management of road infrastructure.

Problem statement. The approach of utilizing traffic data video analysis with DataFromSky software by R.C.E. Systems can be effectively employed to calculate node impedance with intersection capacity analysis (ICA) within a transport macro model developed using PTV Visum software. However, to date, no studies have been conducted to assess the effectiveness of integrating these two technologies.

Purpose. Evaluation of the capabilities of software for automated video analysis of traffic data for modeling impedance in the nodes of a transport macro-model.

Materials and Methods. The study utilized traffic data video analysis powered by artificial intelligence, traffic indicator calculation based on the Highway Capacity Manual (HCM) methodology, and transport modeling of node impedance using ICA in PTV Visum.

Results. The case study of the controlled intersection at V. Matushevych Street and Metalurhiv Avenue in Kyryvyi Rih revealed that the difference in traffic indicators obtained using ICA and DataFromSky (DFS) software was minimal. This suggests that the results from DFS analysis can be effectively used to calibrate the transport model developed in PTV Visum.

Conclusions. The indicators that can be assessed through traffic analysis results in DataFromSky include average total waiting time (delay), average level of service (LOS), load-to-capacity ratio, traffic volume (flow intensity), peak hour factor, maximum traffic volume in 15 minutes, and the proportion of right and left turns. While the vehicle queue indicators determined by ICA do not have a direct equivalent in DataFromSky, the Trajectories Movement Dynamics report generated by this software enables the establishment of relationships between speed, distance, and travel time for individual vehicles. Although ICA and DataFromSky employ different methodologies for analyzing traffic flow and intersection indicators, the results from video traffic data analysis can still be utilized for calibrating transport models and comparing model-based and real-world traffic indicators.

Keywords: artificial intelligence, DataFromSky, HCM, ICA, nodes impedance, PTV Visum, traffic video analysis, transport modeling, traffic indicators.