

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТРАНСПОРТНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної роботи бакалавра

на тему **Калібрування VISSIM-моделі перехрестя за результатами відеоаналізу дорожнього руху**

Виконав:

студентка 3 курсу, групи ТТ-17ск _____

(шифр групи)

(підпис)

М.А.Тюріна

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент _____

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

В.О.Сістук

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри:

д.т.н., професор _____

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Ю.А. Монастирський

(прізвище та ініціали)

Кривий Ріг – 2020р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТРАНСПОРТНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський) рівень вищої освіти

Галузь знань: 27 – «Транспорт»

Спеціальність: 275 – «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
автомобільного транспорту
_____/_____.
_____”_____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
НА ВИПУСКНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Тюріної Марині Анатоліївни

1. Тема *Калібрування VISSIM-моделі перехрестя за результатами відеоаналізу дорожнього руху*

керівник проекту Сістук В.О., к.т.н., доцент

затверджені наказом університету від “12” травня 2020 року № 390.

2. Строк подання студентом роботи для перевірки на плагіат 06.06.2020

3. Вихідні дані до роботи: Навчально-методичне забезпечення з програм відеоаналізу руху GoodVision та мікроімітаційного моделювання транспортних потоків PTV VISSIM.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз показників руху GoodVision для можливості калібрування імітаційної моделі у VISSIM. 2. Розробка загальної методики досліджень. 3. Відеоаналіз даних руху Т-подібного перехрестя в GoodVision. 4 Розробка імітаційної моделі руху на Т-подібному перехресті. 5. Калібрування імітаційної моделі 6. Оцінка вартості проекту.

5.Графіки та діаграми по результатам досліджень у вигляді презентації в програмі Microsoft Office Power Point, на компакт диску з шістьма екземплярами роздруківки презентації для членів ДЕКу.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1	Розробка загальної методики досліджень	12.05–18.05	
2	Збір вихідний даних та відеоаналіз руху	18.05-21.05	
3	Розробка і калібрування імітаційної моделі	21.05-28.05	
4	Оцінка вартості проекту	28.05-29.05	
5	Оформлення пояснювальної записки та презентації	29.05-06.06	

Студент

(підпис)

М. А. Тюріна

Керівник роботи

(підпис)

В. О. Сістук

РЕФЕРАТ

Для отримання якісних результатів, імітаційна комп'ютерна модель транспортної розв'язки підлягає калібруванню, яке представляє собою процедуру зміни параметрів моделі за замовчуванням на параметри, що відображають локальні умови на дорозі.

У роботі інструментом для виконання процедури калібрування імітаційної моделі виступили результати інтелектуального відеоаналізу даних руху з використанням штучного інтелекту.

Об'єктом дослідження виступив процес калібрування параметрів поведінкової моделі водія та у програмі комп'ютерного мікроімітаційного моделювання VISSIM, а предметом – показники транспортних потоків з програми відеоаналізу даних руху GoodVision в якості параметрів калібрування імітаційної моделі в VISSIM.

Розроблено метод калібрування параметрів моделей Wiedemann 74 із використанням даних відеоаналізу руху GoodVision на основі трьохкрокової процедури: калібрування часу у дорозі на основі зон зниження швидкості усередині перехрестя, часової затримки між транспортними засобами та розподілу часу прибуття транспортних засобів.

Для показника часу у дорозі калібрування дозволило зменшити величину середньоквадратичної похибки з 43,4% до 11,3% та збільшити коефіцієнт кореляції між спостережуваними та модельованими показниками з 12,1% до 88,9%, для часової затримки – зменшити середньоквадратичну похибку до 11%, а відстань між середніми величинами – з 17 до 8%, що говорить про якісність запропонованого методу.

Робота складається з реферату, вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 24 найменувань. Загальний обсяг роботи – 41 с, 13 рисунків, 3 таблиці.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ.1. МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ VISSIM-МОДЕЛІ ЗА ДАНИМИ ВІДЕОАНАЛІЗУ ДОРОЖНЬОГО РУХУ	8
1.1. Необхідність калібрування мікроімітаційних моделей у симуляторах руху	8
1.2. Поведінкова модель слідування за лідером в основі програмного забезпечення VISSIM.....	9
1.3. Вихідні показники руху GoodVision як інструмент калібрування	12
1.4. Загальна схема методики калібрування VISSIM-моделі на основі даних інтелектуального відеоаналізу руху GoodVision	13
1.5. Висновки до розділу 1	16
РОЗДІЛ 2. КАЛІБРУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ НА ПРИКЛАДІ Т-ПОДІБНОГО ПЕРЕХРЕСТЯ	17
2.1. Характеристика ділянки дослідження та порядок виконання робіт зі збору польових даних.....	17
2.2. Результати інтелектуального відеоаналізу даних руху.....	20
2.3. Розробка імітаційної моделі ділянки	22
2.4. Калібрування імітаційної моделі.....	23
2.4. Висновки до розділу 2	33
РОЗДІЛ 3. ВАРТІСНА ОЦІНКА ВИКОНАННЯ ПРОЦЕДУРИ КАЛІБРУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ	35
3.1. Метод визначення вартості калібрування	35
3.2. Приклад розрахунку для досліджуваного перехрестя	36
РОЗДІЛ 4. ОРГАНІЗАЦІЯ РУХУ НА НЕРЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ ..	38
ВИСНОВКИ.....	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	40

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасним інструментом для прийняття рішень під час оптимізації організації руху як в складних мережах, так на локальних ділянках вулично-дорожній мережі та автомагістралей виступає комп'ютерне мікроімітаційне моделювання із застосуванням симуляторів руху. Даний інструмент автоматизації аналізу дозволяє відтворити у певній мірі реальні умови руху та, що найголовніше, програвати різні сценарії ще до того, як рішення прийнято та буде впроваджене. В основі симуляторів руху лежить модель поведінки водія на дорозі, що описує слідування за лідером у колоні та зміну смуги руху. Математичний апарат даних моделей розроблено ще у минулому столітті. Так, для симулятора PTV VISSIM модель слідування за лідером Wiedemann 74 (міський рух) та Wiedemann 99 (автомагістраль) розроблено відповідно у 1974 та 1999 роках [3].

Для отримання якісних результатів, імітаційна модель підлягає калібруванню, яке представляє собою процедуру зміни параметрів моделі за замовчуванням на параметри, що відображають локальні умови на дорозі.

При цьому у сучасній науковій літературі можна спостерігати різні підходи до виконання калібрування, починаючи із обраного методу та алгоритму, закінчуючи перебором параметрів поведінкових моделей, спрямованим на відбір лише тих параметрів для калібрування, які мають найбільший вплив на характер руху транспортного потоку. У той же час, передовим підходом до аналізу руху стали технології комп'ютерного зору, які дозволяють проводити інтелектуальний аналіз даних руху із застосовуванням автоматизованої обробки відеозаписів руху (GoodVision, DataFromSky). Результати аналізу руху, отримані за допомогою таких програм, можуть стати корисними для калібрування поведінкової моделі водія у симуляторах руху. У зв'язку з цим, метою роботи є розробка методу калібрування VISSIM-моделі перехрестя за результатами відеоаналізу дорожнього руху.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення точності калібрування параметрів поведінкової моделі водія у програмі мікроімітаційного моделювання VISSIM на основі використання мікропоказників руху, отриманих за допомогою програми інтелектуального відеоаналізу руху GoodVision.

Задачі дослідження:

- проаналізувати параметри поведінкових моделей Wiedemann 74, які підлягають калібруванню та моделей зміни смуги руху;
- проаналізувати показники дорожнього руху на виході програми GoodVision, які можуть виступати у ролі калібрувальних параметрів для VISSIM;
- розробити метод калібрування параметрів моделей Wiedemann 74 із використанням даних відеоаналізу руху GoodVision;
- перевірити точність розробленого методу калібрування на прикладі імітаційної моделі нерегульованого перехрестя у місті Кривий Ріг.

Об’єкт дослідження – калібрування параметрів поведінкової моделі водія та у програмі комп’ютерного мікроімітаційного моделювання VISSIM.

Предмет дослідження – показники транспортних потоків з програми відеоаналізу даних руху GoodVision в якості параметрів калібрування імітаційної моделі в VISSIM.

Методи дослідження. Аналіз, синтез, класифікація, відеообробка, штучний інтелект, імітаційне мікромоделювання, порівняння, статистичний аналіз.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена процедура калібрування імітаційних моделей може бути застосована для адаптації VISSIM-мікромоделей до локальних умов конкретного перехрестя.

Структура і обсяг роботи. Робота складається з реферату, вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 24 найменувань. Загальний обсяг роботи – 41 с, 13 рисунків, 3 таблиці.

РОЗДІЛ.1. МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ VISSIM-МОДЕЛІ ЗА ДАНИМИ ВІДЕОАНАЛІЗУ ДОРОЖНЬОГО РУХУ

1.1. Необхідність калібрування мікроімітаційних моделей у симуляторах руху

Імітаційне моделювання представляє собою відтворення умов руху та транспортних потоків відповідно до конфігурацію дорожньої розв'язки. Результатами моделювання для програми VISSIM виступають час у дорозі на кожному із маршрутів, довжина черги транспортних засобів, що утворюється. Однак дані показники не можуть служити керівництвом до прийняття рішень доки модель розв'язки та поведінка водія не будуть налаштовані належним чином, зменшуючи невизначеність транспортного процесу. Калібрування моделі є важливим, оскільки поведінка водіїв значно відрізняється від місця розташування та умов руху (часу доби, погоди тощо). Параметри програмного забезпечення для моделювання, встановлені за замовчуванням, рідко представляють локальні характеристики та умови руху. Через зростаючу популярність мікроскопічного моделювання та важливість калібрування імітаційної моделі запропоновано численні методи калібрування її параметрів. У зв'язку із труднощами, що виникають безпосередньо при вимірюванні мікроскопічних параметрів, більшість із цих методів використовують параметри макроскопічного потоку руху, що визначаються на місцях, в якості показників ефективності (MOEs) для калібрування мікроскопічних параметрів поведінки водія [6].

Стан потоку визначається сумарними показниками, такими як, час у дорозі. Якщо відхилення у значеннях сумарних показників, що моделюються, та даним польових спостережень будуть мінімальними (так званий GEN-критерій [5]), обраний набір мікроскопічних параметрів калібрування та відповідний

метод виконання цієї процедури є адекватними. Дана гіпотеза дозволила дослідникам руху визначити коло пошуку оптимальних методів калібрування. Однак набір мікроскопічних параметрів не завжди відтворює локальні умови. Для міського руху дане ствердження стає вельми актуальним, де набір чинників впливу збільшується на порядок. За певних умов, одним із джерел надійних даних можуть виступати результати автоматизованого відеоаналізу руху, що, насамперед, зменшуватиме кількість ітерацій, оскільки дані генеруватимуться не стохастично, а за допомогою аналізу конкретного відеокадру штучним інтелектом, що значно спрощує загальну процедуру калібрування, а головне, час на її виконання. Перевірити дану гіпотезу стає вкрай важливо, оскільки на теперішній час такого дослідження не проводилось.

1.2. Поведінкова модель слідування за лідером в основі програмного забезпечення VISSIM

В основі мікроскопічного моделювання транспортних потоків у програмному забезпеченні VISSIM [10] лежать поведінкові моделі водіїв транспортних засобів (ТЗ). Встановлено, що наближаючись до ведучого автомобіля, деякі дії усвідомлюються водієм, а інші виконуються несвідомо. Перехід до свідомої реакції залежить від змін у швидкості руху, відносної відстані до ведучого автомобіля, поведінки водія. Даний підхід – в основі психофізіологічних моделей слідування за лідером, розроблених Wiedemann [4], які й використовуються у розрахункових алгоритмах VISSIM.

В моделі Wiedemann припускається, що водій може знаходитися в одному з чотирьох станів:

- вільний рух – водій намагається досягти і дотримуватися своєї бажаної швидкості, однак в реальних умовах технічно швидкість не може підтримуватися постійною;

- **приближення** – процес адаптації швидкості водія до більш низької швидкості ТЗ, що йде попереду. Наближаючись, водій здійснює гальмування таким чином, що різниця у швидкості двох автомобілів стала рівною нулю до моменту, коли він наблизиться до автомобіля попереду на безпечну для себе відстань;

- **слідування** – водій слідує за автомобілем попереду без прискорення та сповільнення, підтримуючи безпечну для себе відстань більш менш постійною. Різниця у швидкостях коливається біля нуля.

- **гальмування** – використання середнього або сильного гальмування, якщо дистанція між ТЗ становиться менше безпечної [11].

Останнє може відбуватись у випадку різкої зміни швидкості ТЗ попереду, або коли третій ТЗ змінює напрям руху перед водієм. Для кожного режиму прискорення описується як результат швидкості руху, різниці швидкостей двох послідовних ТЗ, індивідуальних властивостей водія та ТЗ.

Водій перемикається з одного стану в інший тоді, коли він досягає певного бар'єру, що може бути описано як комбінація різниці швидкостей і відстані між двома ТЗ. Наприклад, невелика різниця в швидкості може допускатися тільки на малих відстанях, в той час як великі різниці швидкостей змушують водіїв, що наближаються, реагувати набагато раніше. Здатність оцінити різницю швидкостей і відстань серед водіїв змінюється, так само як і бажана швидкість руху і безпечна відстань. Через комбінацію психологічних аспектів фізіологічних обмежень дану модель й називають психофізіологічною моделлю слідування.

Прямий рух в VISSIM складається з вибору водієм смуги руху, зміни смуги руху та безпосередньо руху на одній смузі. При русі до перехрестя водій обирає смуги з найкращою дорожньою ситуацією. Визначення дорожньої ситуації проходить в три етапи. На початку приймається рішення про необхідність зміни смуги руху, що всякий раз має місце, коли стан взаємодії між іншими ТЗ (тобто режим руху в моделі Wiedemann) відрізняється від вільного.

Потім перевіряються сусідні смуги, на який є краща дорожня ситуація, тобто або вільний режим руху, або більший час до зіткнення. Якщо одна з сусідніх смуг забезпечує кращу ситуацію по ходу руху, остання перевірка полягає в тому, чи можлива зміна смуги руху з урахуванням ТЗ на протиході, що моделюється як прийняття зазору руху між ТЗ [8].

Однак вибір смуги руху часто визначається обов'язковими змінами смуги для бажаних поворотів на перехрестях по ходу руху. В розбудові транспортної мережі VISSIM, кожен з'єднувальний відрізок має у своєму складі дві закріплені за ним відстані: відстань, на якій відбувається зміна смуги руху та відстань аварійної зупинки. Перша відстань характеризує момент упізнання наявності з'єднувального відрізка, в середньому коливається від 100 до 500 м. Відстань аварійної зупинки, у свою чергу, – це ділянка, на якій зупиниться водій за неможливості досягнення смуги для переходу до з'єднувального відрізка. При чому зв'язок відбувається тільки для певних смуг, наприклад, правий поворот на трьохсмуговій магістралі буде з'єднаний тільки з крайньою правою смугою, що примушує ТЗ у разі необхідності правого повороту, знаходиться виключно на даній смузі.

Алгоритм зміни смуги руху ТЗ в VISSIM заснований на прийнятті рішення при невимушеній або обов'язковій зміні смуг руху, враховуючи зазор між ТЗ. Водій ТЗ готовий погодитися з тим, що він змушує відстаючий автомобіль сповільнюватись на потрібній смузі руху. Величина даного гальмування залежить від налаштувань калібрування програми, й для випадку обов'язкових змін смуги руху представляє собою функцію відстані до положення аварійної зупинки наступного з'єднувального відрізка, на який завершується зміна смуги руху, тобто водій становиться вельми близьким до аварійної зупинки. Допустимі значення сповільнення для автомобілів, відстаючих по ходу руху і для самого ТЗ, є параметрами моделі поведінки водія і можуть бути визначені вибірково для пар відрізків і типів ТЗ.

Вибір водієм бічного положення в смузі руху слідує простому, але ефективному принципу: водій вибирає бічне положення, в якому він має максимальний час до зіткнення. Щоб знайти цю позицію, водій ділить доступну ширину дороги на віртуальні смуги, які розташовані з правого і лівого боку ТЗ, що йдуть попереду, включаючи деяку бічну безпечну відстань. Безпечна відстань, яку водій хоче зберегти при обгоні іншого ТЗ, залежить як від типу останнього, так і від швидкості ТЗ, що обганяє. У програмі передбачено лінійна залежність відстані від швидкості руху ТЗ, користувач може визначити мінімальну безпечну відстань при дуже низьких швидкостях і безпечну відстань за швидкості 50 км/ч.

1.3. Вихідні показники руху GoodVision як інструмент калібрування

Платформа GoodVision Insights ґрунтується на технології комп'ютерного зору та штучного інтелекту для визначення траєкторій руху транспортних засобів із відеозаписів дорожнього руху. Основними блоками для аналізу результатів є підрахунок кількості об'єктів, класифікація об'єктів відстеження (легковий автомобіль, вантажний автомобіль, фургон, велосипед, мотоцикл, пішохід, багатовісні транспортні засоби – OGV2), параметри поведінкової моделі слідування за лідером (час у дорозі, проміжки часу між двома послідовними автомобілями, необережний рух пішоходів, зміна смуги руху, забороняючі сигнали світлофорів), параметри калібрування для імітаційних мікромоделей (потоків насичення, автоматизоване визначення швидкості вільного руху, області зниження швидкості руху).

Елементами, які утворюють позначення робочого простору виступають лічильники (*lanes*), маршрути (*movement*), події (*events*), сценарії (*scenarios*) [1]:

– лічильники визначають напрямки підрахунку об'єктів розпізнання;

- маршрути виділяють частину дорожнього руху, яка проходить через віртуальні лінії лічильників або області робочого простору у визначеному порядку;

- події служать для виділення транспортних засобів, які займають певний період часу конкретну зону ділянки дослідження;

- у сценаріях відслідковуються складні варіанти організації руху, що поєднують маршрути та події.

Аналіз дорожнього руху представлений у відповідних файлах формату CSV. При цьому передбачено такі звіти про дорожній рух:

- підрахунок маршрутів дорожнього руху (*TMC*) – визначаються кількісні показники по кожному із 8 типів об'єктів розпізнання за весь час відеоспостережень або проміжок часу з інтервалом в 1 секунду;

- звіт про вторгнення (*intrusion report*) – визначаються часові затримки між послідовними об'єктами розпізнання (*gap time*), а також час у дорозі (*travel time*) по кожному з їх типів на відповідних маршрутах;

- потоки насичення (*saturation flows*) – визначаються потоки насичення в одиницях еквіваленту пасажирського автомобіля на годину (PCU/h) для кожного маршрута, а також по ділянці у цілому;

- OD-матриці – визначаються кореспонденції між обраними маршрутами.

Показники «часу у дорозі», «проміжок часу між послідовними ТЗ (*gap time*)» можуть служити показниками для калібрування мікроімітаційної моделі.

Представлена нижче модель більш детально розкриває сутність даного ствердження.

1.4. Загальна схема методики калібрування VISSIM-моделі на основі даних інтелектуального відеоаналізу руху GoodVision

Загальна процедура калібрування імітаційної моделі виглядає таким чином:

- 1.Визначення відповідних параметрів моделі, необхідних для налаштування або калібрування.
- 2.Вибір необхідних показників ефективності (MOEs) та дані для валідації.
- 3.Визначення числа симуляцій, необхідних для досягнення довірчого інтервалу 95% із абсолютною похибкою 5% для всіх MOEs.
- 4.Ідентифікація критеріїв та цілей калібрування.
- 5.Модифікація обраних параметрів до тих пір, поки отримані результати моделювання будуть близько відображати реальні дорожні умови або задовольняти цілям калібрування.

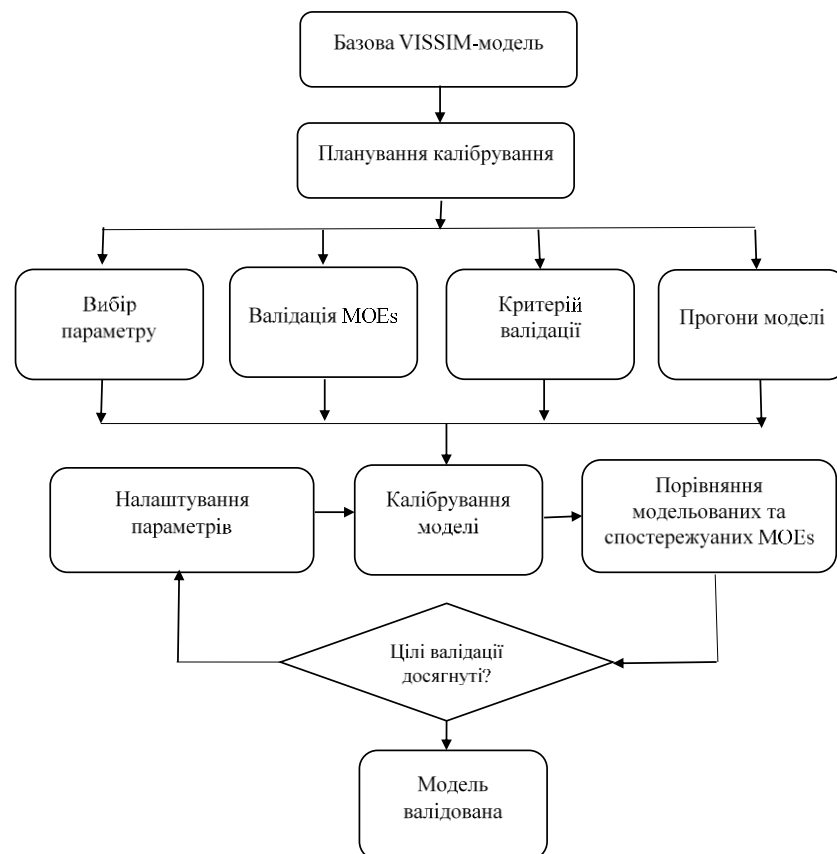


Рис.2.1. Загальна процедура калібрування імітаційної моделі

Параметри калібрування будуть послідовно відкориговані для досягнення прийнятного рівня точності. У VISSIM- моделі є численні вхідні параметри, які описують геометрію мережі, попит на рух, загальну конфігурацію, організацію дорожнього руху, потік руху та характеристики транспортного засобу, поведінку водія та стратегії вибору маршруту. Зазвичай ці вхідні параметри впливають на моделювання у такий спосіб, що сильно співвідноситься із механізмом впливу інших параметрів. Тому виправлення однієї проблеми за допомогою коригування кількох параметрів може легко призвести до виникнення інших проблем. Основні зусилля з калібрування зосереджені на поведінці водія та параметрах транспортного засобу. Параметри поведінки водія безпосередньо впливають на взаємодію транспортного засобу, регулюють дорожній рух, можуть змінювати швидкість потоку насичення на автомагістралях і забезпечувати різні стилі водіння для потоку руху, такі як агресивні та пасивні дії.

На етапі перевірки порівнюються модельовані значення для обраних показників ефективності із спостережуваними значеннями для тих самих показників. Процес перевірки використовується для визначення того, наскільки близько VISSIM-модель копіює реальні умови руху.

Враховуючи представлені цілі калібрування та можливість використання результатів інтелектуального відеоаналізу руху, розроблено трьохкрокову процедуру калібрування імітаційної моделі (рис.2.2).

Дані за результатами відеоаналізу руху відповідають показникам моделювання у VISSIM. До показників відеоаналізу у GoodVision відносяться час проїзду ділянки, проміжок часу між двома ТЗ, час прибуття ТЗ. У VISSIM їм відповідають час у дорозі, час між двома ТЗ у потоці та довжина черги ТЗ, що утворюється. Калібрування виконується саме у тій послідовності, що показана на рис.2.2. Представлені показники налаштовуються незалежно один від одного.

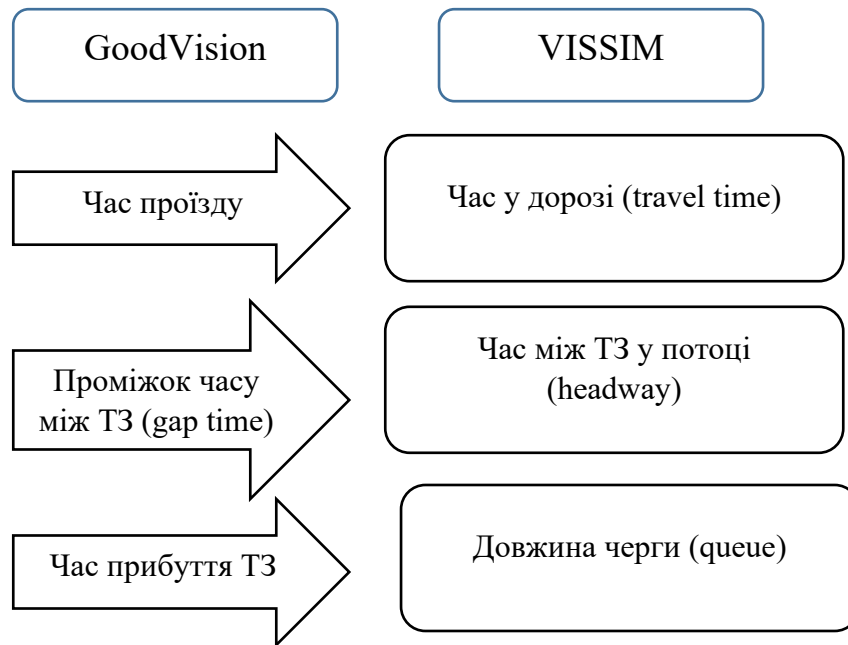


Рис.2.2. Вихідні параметри GoodVision та відповідні ним показники калібрування VISSIM.

1.5. Висновки до розділу 1

У роботі проведено аналіз складових моделі слідування за лідером Wiedemann 74, яка лежить в основі симулятора руху VISSIM, на предмет їх впливу на показники ефективності перехрестя.

До показників відеоаналізу у GoodVision відносяться час проїзду ділянки, проміжок часу між двома ТЗ, час прибуття ТЗ. У VISSIM їм відповідають час у дорозі, час між двома ТЗ у потоці та довжина черги ТЗ, що утворюється. Дані параметри повинні бути відкалібровані незалежно один від одного.

Перехрестя та міст по вулиці Бикова слугують транспортним зв'язком між районом Вечірнього бульвару та мкр.Східним-1,2,3 з виїздом на об'їзну трасу. Неподаляк перехрестя розташовані загальноосвітня школа, торгівельні центри «Метро» та «Епіцентр».

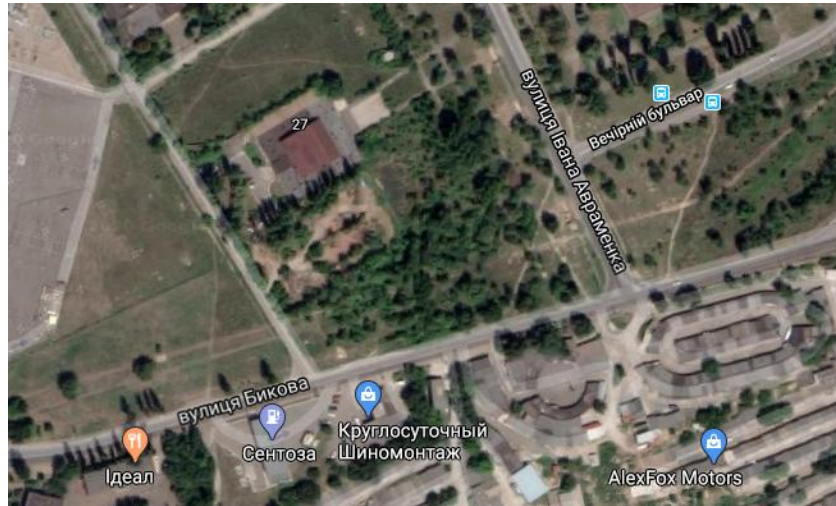


Рис.2.2. Схема перехрестя з Google Maps.



Рис.2.3. Вхідні транспортні потоки: 1 – збоку ТЦ «Епіцентр» у прямому напрямі по вул. Бикова; 2 – правоповоротний з вул. Івана Авраменка на вул. Бикова; 3 –з вул. Бикова на вул. Івана Авраменка; 4 – лівоповоротний з вул. Івана Авраменка на вул. Бикова; 5 – прямий рух з моста по вул. Бикова убік ТЦ «Епіцентр».

Транспортний потік *1* по вулиці Бикова у напрямку мкрн. Східний-1 розділяється перед мостом на лівоповоротні потоки на вул. Івана Авраменка, Об'їзну, а також на прямий рух до вулиці Симонова. Вийзд з вулиці Івана Авраменка можливий у двох напрямках: убік бульвару Вечірнього 2 та по мосту 4 убік мкрн. Східний-1. Довжини представлених напрямків представлено у табл.3.1. Останні визначають межі створюваної імітаційної моделі розв'язки.

Табл. 2.1.

Геометричні параметри перехрестя

№ п/п	Параметр	Довжина напрямку, м
Напрямок транспортного потоку		
1	збоку ТЦ «Епіцентр» у прямому напрямі по вул. Бикова	366
2	правоповоротний з вул. Івана Авраменка на вул. Бикова	283
3	з вул. Бикова на вул. Івана Авраменка	290
4	лівоповоротний з вул. Івана Авраменка на вул. Бикова	232
5	прямий рух з моста по вул. Бикова убік ТЦ «Епіцентр»	112

Спостереження за дорожнім рухом проводились у так звані «часи пік» (з 18 години вечора) для визначення вхідних показників імітаційного моделювання (навантаження, склад потоку), величин для калібрування моделі та затримки ТЗ. Частота вихідного відеозапису – 30 кадрів/с, роздільна здатність – 1280 на 720 пікселів, що відповідає мінімальним вимогам програм інтелектуального аналізу даних руху для відео з низько розташованих камер. Наступна інформація отримана з відеозапису руху:

- тип транспортних засобів;
- геометричні параметри перехрестя (ширина смуг, довжина ділянки);
- час прибуття до перехрестя;
- час виходу з перехрестя;

Оцінка відеоряду здійснювалась двома способами: вручну за допомогою прикладних пакетів Microsoft Excel та спеціалізованого програмного

забезпечення GoodVision. Точність міток часу становить $1/25\text{с}$. Загальна кількість траєкторій руху – 473, з них 380 приходить на рух легкових автомобілів (рис.2.4).



Рис.2.4. Фрагмент вихідного відео.

2.2. Результати інтелектуального відеоаналізу даних руху

Для інтелектуального відеоаналізу руху використано програмне забезпечення GoodVision. Фрагмент позначення відеоряду, виконаного в даній платформі представлено на рис. 2.5. Розмитість фону викликана низьким розташуванням камери спостереження смартфона Meizu M5 при зйомці (2,2 м при бажаній висоті від 5 до 27 м). У результаті постобробки відео отримані агреговані показники кількості ТЗ різних типів для кожного напрямку руху (TMC traffic report), OD-матриці кореспонденцій, звіт по часу їздки на кожному напрямку та проміжків часу між ТЗ, що рухаються послідовно (табл.2.3– Intrusion traffic report).

Дані звіти слугували відправною точкою для отримання інформації для калібрування імітаційної моделі. Так, з OD-матриць кореспонденцій (табл.2.2)

визначено годинне навантаження (авто/год.) для вхідних потоків ТЗ (Vehicle Inputs) у VISSIM.

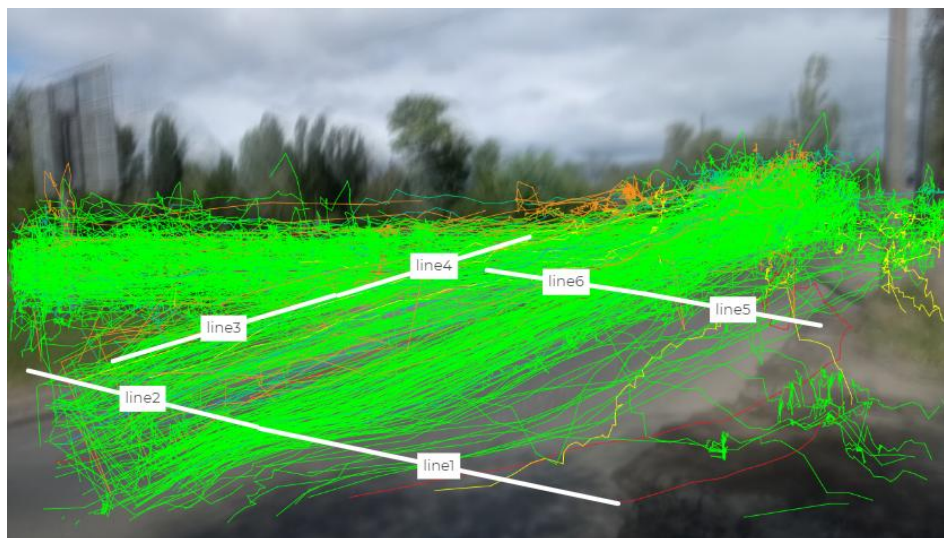


Рис.2.5. Позначення кадру в GoodVision.

Табл.2.2

OD-матриця кореспонденцій

Зародження/призначення	LINE2	LINE4	LINE5
LINE1	---	11	33
LINE3	39	---	0
LINE6	33	28	---

Табл.2.3

Приклад таблиці з Intrusion traffic report

Тип ТЗ	Проміжок часу (с)	Час входу (line1)	Час виходу (line4)	Час у дорозі (с)
Легковий автомобіль	0	23:48:19.000	23:48:22.467	3,467
	2,4	23:48:21.400	23:48:24.867	3,467
	9,467	23:48:30.867	23:48:37.000	6,134
	126,8	23:50:37.667	23:51:00.867	23,2
	145,733	23:53:03.400	23:53:07.534	4,134
	70,667	23:54:14.067	23:54:22.600	8,534
	35,467	23:54:49.534	23:55:03.667	14,134
	18,4	23:55:07.934	23:55:12.867	4,934
	217,066	23:58:45.000	23:59:02.600	17,6
	105,334	00:00:30.334	00:00:33.934	3,6
	66,4	00:01:36.734	00:01:40.734	4

2.3. Розробка імітаційної моделі ділянки

Імітаційна модель перехрестя у програмі VISSIM розроблена на основі геометричних даних супутникових систем. Довжина смуг на перехрестя, що моделюються становила близько 200 м. Розподіл вхідних потоків отриманий за даними OD-матриць (табл.2.2) та TMC traffic report та підпорядковується закону розподілу Пуасона, основним правилом якого є відсутність післядії. Навантаження вхідних потоків руху задавались точно, оскільки існувала можливість їх отримання за результатами інтелектуального аналізу відеореяду. Для моделювання взаємозв'язків ТЗ на повороті використана статична модель вибору маршруту. З метою моделювання ефекту зниження швидкості при наближенні до перехрестя для кожної смуги у середині перехрестя додана зона зниження швидкості (reduced speed area) довжиною 2 м, всередині якої швидкість ТЗ відповідає новому розподілу бажаної швидкості. Для моделювання поведінки водія прийнята Wiedemann 74 модель слідування за лідером у міському русі.

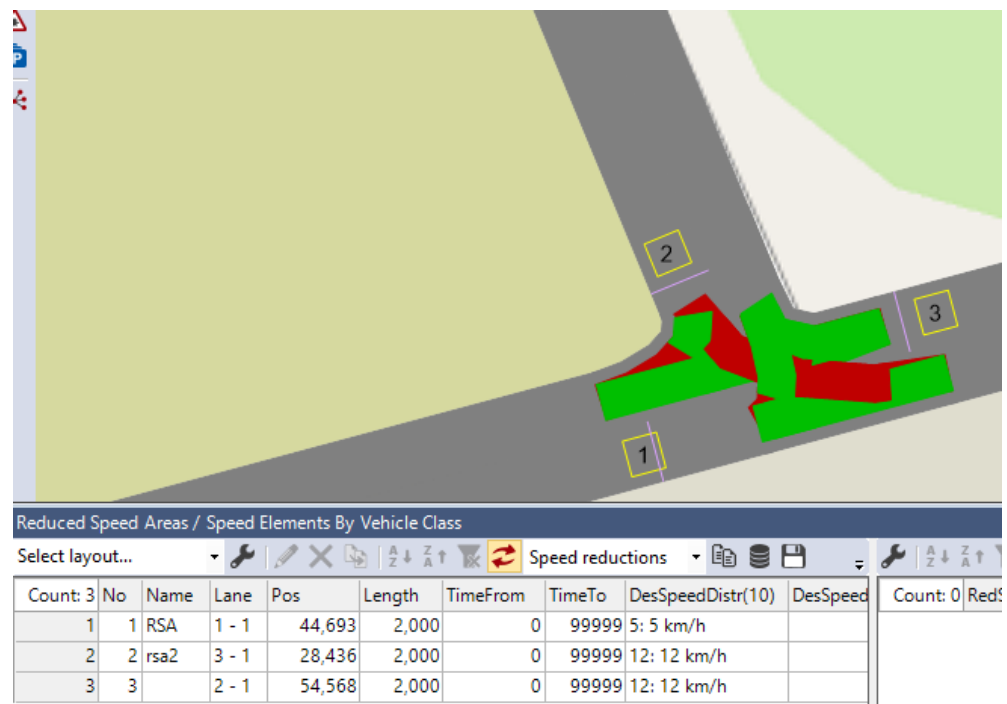


Рис.2.6. Зони зниження швидкості руху.

Для аналізу використано оцінку записів ТЗ у VISSIM. Конфігурація програми включала запис затримок, часу у дорозі, кількості ТЗ, час симуляції, дані по смугам, швидкість руху та тип ТЗ для кожного об'єкту на кожному етапі моделювання.

2.4. Калібрування імітаційної моделі

Одним із показників ефективності руху на даній транспортній розв'язці є затримка. Затримка, обумовлена геометрією ділянки, спричиняє проходження перехрестя із зниженням швидкості руху, особливо на поворотах. Затримка управління пов'язана із регулюванням руху на перехресті. Однією із важливих складових даної затримки є час у циклі, за якого ТЗ зупиняється на забороняючий сигнал світлофору. Зважаючи на чергу, що формується при цьому, ТЗ затримуються навіть після включення зеленого сигналу світлофору. Даний різновид затримки у роботі не враховується, оскільки перехрестя вулиць Івана Авраменка та Бикова світлофором не обладнане. Калібрування величини затримки, пов'язаної із геометрією ділянки, засноване на визначенні часу проходження перехрестя (travel time). Даний параметр відкалібрований шляхом налаштування розподілу бажаної швидкості руху всередині відповідних зон зниження швидкості (рис.2.6). У PTV VISSIM доступ до списку розподілу бажаної швидкості отримується, перейшовши до «Базові дані> Розподіли> бажана швидкість» (*Base Data > Distributions > Desired Speed*). Потім завантажується вікно «Бажані розподіли швидкості» (*Desired Speed Distributions*). У вікні може бути список існуючих бажаних розподілів швидкості, які вже використовуються в програмі за замовчуванням [23].

Час знаходження ТЗ у черзі залежить від довжини черги, що утворюються попереду ТЗ та рівня її розсіювання, що описується базовою величиною потоку насичення. Зворотна швидкість потоку насичення є різницею у часі між двома

ТЗ, прибувши послідовно до стоп-лінії. Для моделювання даних показник може бути налаштований у параметрах моделі слідування за лідером. Окрім показника відстані між ТЗ у потоці, важливим показником є кількість ТЗ у черзі попереду. Довжина черги, виміряна у кількості ТЗ, залежить від загальної кількості ТЗ, що прибувають до ділянки за певний період часу (цикл світлофора) та відсотку ТЗ, що прибувають протягом забороняючого сигналу, або за наявності черги. Для регульованих перехресть дані показники відтворюються задаванням реальних циклів світлофору в моделі. Для досліджуваного випадку довжина черги регулюватиметься розподілом бажаної швидкості у зонах зниження швидкості (при під'їзді на перехрестя), коли умови міського руху характеризуються нерівномірністю прибуття ТЗ на перехрестя. Калібрування проведено за три послідовних кроки, кожен з яких враховує час проходження перехрестя, відстань між ТЗ у потоці, час прибуття ТЗ. Кожний з кроків є незалежним один від одного, окрім прямого впливу часу проходження перехрестя на відстань між ТЗ при зупинці. Для одержання стабільності результатів моделювання на кожному кроці калібрування проводилось достатня кількість прогонів моделі.

Час проходження перехрестя є залежить від довжини смуги та швидкості руху. Оскільки геометрія перехрестя однозначно визначена, розподіл бажаної швидкості залишається єдиним фактором впливу на час проходження перехрестя.

Для аналізу часу проходження перехрестя враховані середньоарифметичне значення показника та закон його розподілу на основі відповідної гістограми. Ширина карману в даній гістограмі становить 2 –3 с. На рисунку показаний розподіл часу проходження перехрестя за результатами інтелектуального аналізу даних GoodVision, який приймається за вихідний спостережуваний показник (рис.2.7). Більшість випадків (ТЗ) приходить на діапазон часу від 2,54 до 5,18 с.

Для порівняння результатів моделювання з даними спостереження (GoodVision) використано показник відносної кількості випадків, який визначається відношенням поточного діапазону кількості транспортних засобів на маршруті до загальної кількості ТЗ у мережі. На основі гістограми 2.7 та результатів моделювання встановлена залежність при налаштуваннях параметрів VISSIM за замовчуванням (рис.2.8).

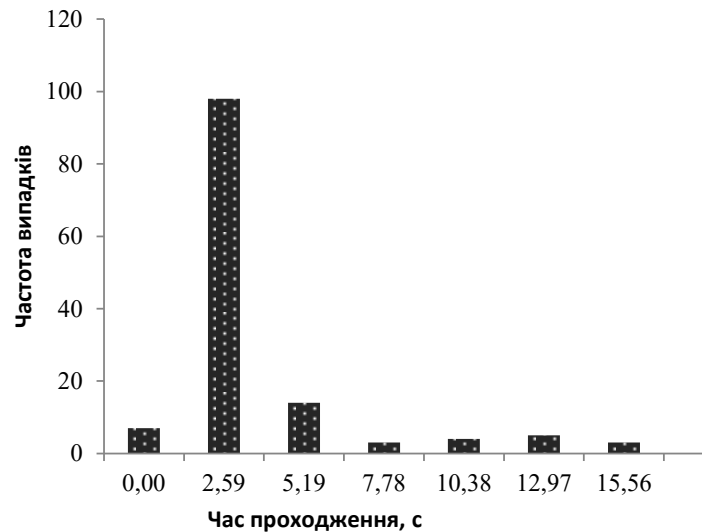


Рис.2.7. Гістограма розподілу часу проходження перехрестя за GoodVision (агреговані дані по кожному маршруту)

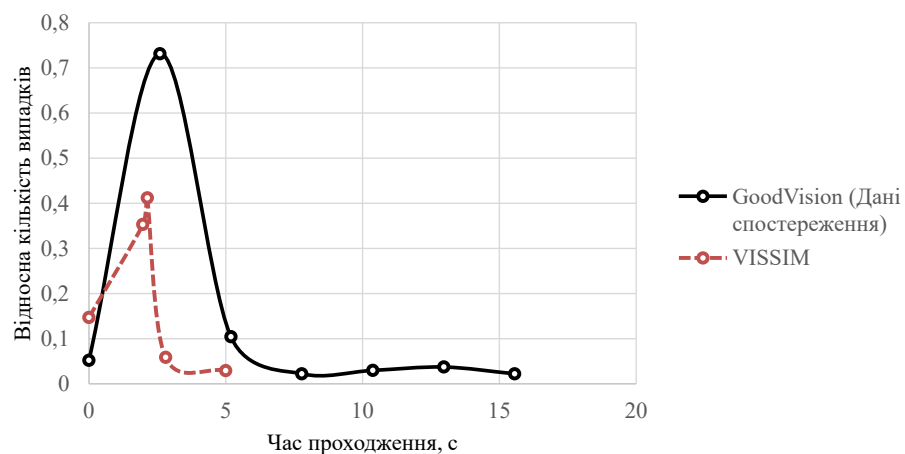


Рис.2.8. Залежність відносної кількості випадків від часу проходження маршруту на перехресті до калібрування.

Також на рис.2.9 показаний розподіл часу проходження ТЗ на одному з маршрутів (Line 1 – Line 5) у порівнянні з результатами моделювання за 11 прогонами.

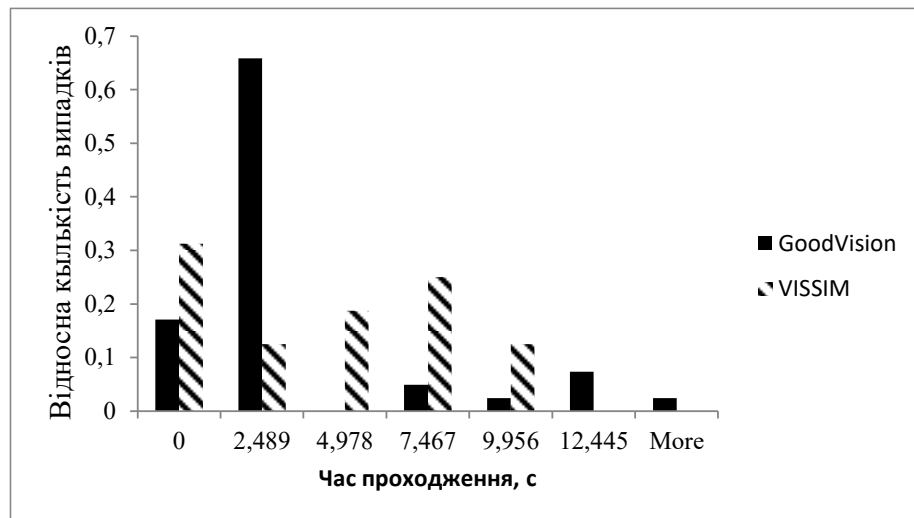


Рис.2.9. Гістограма відносної кількості випадків від часу проходження маршруту на перехресті до калібрування для маршруту Line 1 – Line 5.

З рис.2.8 – рис.2.9 випливає, що за необхідне стає калібрування імітаційної моделі для відповідності модельованих та натурних показників часу проходження ТЗ на окремих маршрутах та у цілому на перехресті (рис.2.10).

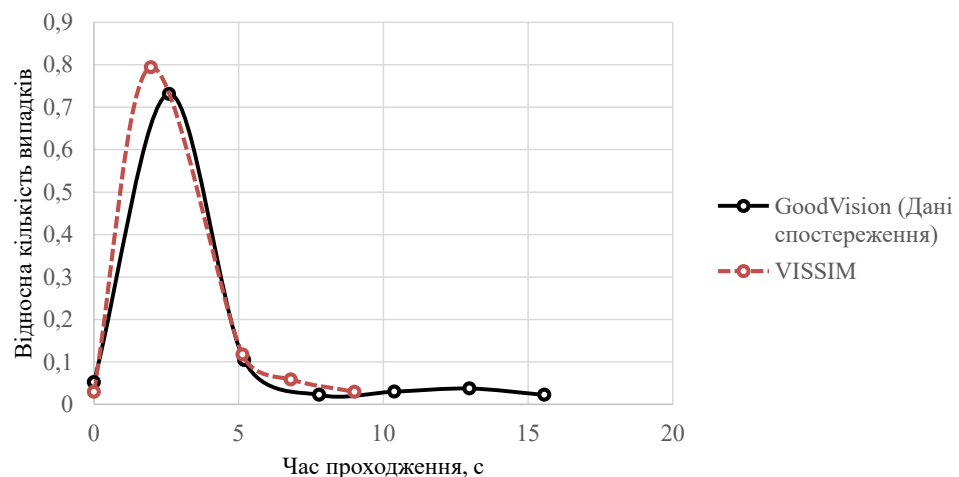


Рис.2.10. Залежність відносної кількості випадків від часу проходження маршруту на перехресті після калібрування.

Достовірність розподілу часу проходження перехрестя визначалась за величиною перекриття між даними спостережень та моделювання відповідно до рівняння:

$$\Pi = \sum_{c=1}^N \min(x_{c,v}, x_{c,g}) \quad (2.1)$$

$x_{c,v}$ – доля ТЗ даного типу (модельована);

$x_{c,g}$ – доля ТЗ даного типу (за даними спостережень);

Π – перекриття величин;

N – кількість ТЗ даного типу.

Для визначення величини перекриття використовується сума мінімальних значень для кожного типу ТЗ. У випадку точної збіжності розподілів, перекриття буде дорівнювати одиниці, коли долі ТЗ даного типу за даними спостережень та отримана у результаті моделювання будуть дорівнювати одна одній. Якщо розподілі не перекриваються, величина (2.1) буде дорівнювати нулю, що означає, що мінімум кожного типу ТЗ також дорівнює нулю.

Для оцінки середнього часу у дорозі на перехресті використовується величина відносної відстані між середніми значеннями:

$$D = \frac{x_{cv} - x_{cg}}{x_{cv}}$$

D – відносна відстань між середніми;

x_{cv} – середнє значення модельованих даних;

x_{cg} – середнє значення даних спостереження.

Однак, оптимальне калібрування може призвести до значення перекриття рівному 1 та відносної відстані рівної 0. Розподіл швидкості для кожної зони зниження швидкості був налаштований ітераційним шляхом для зменшення відстані між середніми наскільки це можливо, у той же час досягаючи доброго перекриття розподілів. Розподіл бажаної швидкості визначений шляхом вибору функції рівномірного розподілу за замовчуванням у VISSIM.

Для випадку на рис. 2.10 розподіл бажаної швидкості за замовчуванням з 48 км/год до 58 км/год до калібрування замінено розподілом з 12 км/год до 20 км/год за даними GoodVision. Після калібрування відносна похибка (відстань між середніми) зменшилась з 0,26 до 0,03, а величина перекриття досягла 0,89. Модельовані та спостережувані показники порівняно на рис.2.11. Для кількісної оцінки для модельованих та спостережуваних даних всіх смуг розрахована лінійну регресію.

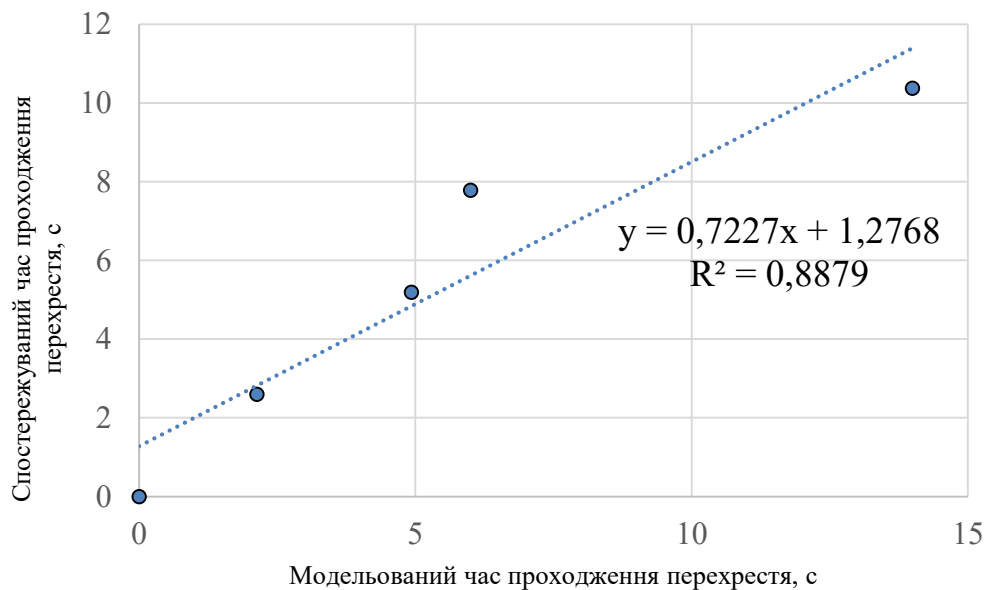


Рис.2.11. Час проходження перехрестя за даними моделювання та спостережень.

Відхилення модельованих та спостережуваних показників визначалось за величиною кореня середньоквадратичної похибки – RMSE (Root Mean Square Error):

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_{i,v} - x_{i,g}}{x_{i,g}} \right)^2} \quad (2.2)$$

α – середньоквадратична похибка;

$x_{i,v}$ – модельована величина;

$x_{i,g}$ – спостережувана величина;

N – кількість спостережень.

Додатково визначено коефіцієнт кореляції Пірсона, який визначає міру лінійного зв'язку між двома вимірюваними величинами:

$$R = \frac{cov_{v,g}}{s_v \cdot s_g} \quad (2.3)$$

R – коефіцієнт кореляції Пірсона;

cov – коваріація;

s_v – стандартне відхилення модельованої величини;

s_g – стандартне відхилення спостережуваної величини.

Оптимізація параметрів бажаної швидкості на першому кроці калібрування дозволила знизити величину середньоквадратичної похибки з 43,4% до 11,3%, а коефіцієнт кореляції між спостережуваними (за GoodVision) та модельованими показниками часу у дорозі підвищити з 12,1% (слабкий зв'язок) до 88,9% (сильний зв'язок досліджуваних величин), що говорить про успішне калібрування розподілів швидкості руху для кожної смуги.

Проміжок часу між двома послідовними ТЗ у потоці визначається із різниці між міткою часу для даного ТЗ та ТЗ, що йде попереду. Враховуються тільки ті ТЗ, які наблизились до кінця черги до моменту часу, коли ТЗ-лідер пройшов стоп-лінію.

У VISSIM проміжок часу між двома ТЗ суттєво залежить від двох факторів: бажаної швидкості руху за стоп-лінією та параметрів моделі слідування за лідером. Чим нижче швидкості руху, тим менше різниця між поточною та бажаною швидкістю, як результат, менше прискорення та більше проміжки часу між ТЗ. У даній імітаційній моделі швидкості поза стоп-лінією обмежені зонами зниження швидкості, які створені на попередньому етапі калібрування.

У моделі Wiedemann 74 (міський рух) модель поведінки водія містить три основних параметра: 1. CC0 – середня відстань при зупинці; 2. CC1 – адитивна

складова бажаної безпечної відстані; 3. CC2 – мультиплікативна складова бажаної безпечної відстані.

CC0 є середньою бажаною відстанню між двома ТЗ при зупинці у черзі. Друга складова описує залежну від швидкості частину безпечної відстані, яку дотримується водій. У VISSIM безпечна відстань даного ТЗ визначається:

$$d_6 = CC0 + CC1 \cdot v \quad (2.4)$$

d_6 – безпечна відстань, м;

CC0 – середня відстань при зупинці, м;

CC1 – проміжок часу між ТЗ у потоці, с;

v – швидкість руху ТЗ, м/с.

Вплив параметрів CC0 та CC1 на швидкість ТЗ у черзі буде різним: перша складова має більший вплив на ТЗ, які знаходяться близько до стоп-лінії, у той час як друга складова впливатиме більше на ТЗ за стоп-лінією. Збільшення ефекту впливу другої складової на ТЗ, що рухаються поза ділянкою стоп-лінії, обумовлено проходженням стоп-лінії на більш високих швидкостях. Вочевидь, проміжок часу між двома ТЗ залежить від позиції ТЗ у черзі.

Для досліджуваного перехрестя черга ТЗ не утворюється ні за GoodVision, ні за VISSIM. Це означає, що налаштувати параметри CC0, CC1, CC2 стає вкрай складно, оскільки вони враховують відстань як у вимірі дистанції, так і у вимірі часу, при знаходженні ТЗ у черзі. У той же час, GoodVision дозволяє визначити часові проміжки (затримки) між появою у мережі ТЗ (*gap time*) зі звіту про вторгнення (*intrusion report*). Дані часові проміжки впливатимуть на інтенсивність руху та можуть задаватись окремо для кожної смуги.

У зв'язку з цим, проміжки часу між двома послідовними ТЗ у потоці підлягали калібруванню за величиною середньої часової затримки (*gap time*) відповідно до *GoodVision intrusion report*. Для калібрування використано опцію VISSIM «Манера поведінки на смузі руху» (*Link Behavior Type*). Відповідно до

intrusion report, величина часових затримок для кореспонденцій line 1 – line 5, line 3 – line 2, line 6 – line 2, line 6 – line 4 становила від 21 до 30 с, для кореспонденції line 1 – line 4 – 72 с. Таким чином, можна виділити два типу поведінки водія на смузі – для маршруту «збоку ТЦ «Епіцентр» у прямому напрямі по вул. Бикова» та на всіх інших маршрутах перехрестя. Одночасному коригуванню підлягали величини параметрів CC0 та CC1. Набір комбінацій цих параметрів було систематизовано в інтервалі 0,1 м у діапазоні 1 м. Для кожної комбінації з метою стабільності результатів проведено декілька імітацій. У результаті обрано ту комбінацію, якій відповідає одночасно мінімальне значення відстані між середніми значеннями та середньоквадратичної похибки.

Набір параметрів поведінкової моделі за замовчуванням та після калібрування представлено у табл.2.3.

Табл.2.3

Калібровані параметри моделі слідування за лідером

Параметр	За замовчуванням	Після калібрування	D		RMSE, %	
CC0	2,0	2,8	0,17	0,08	23	11
CC1	2,0	2,2				
CC2	3,0	3,3				

Таким чином, після проведення процедури калібрування відстань між середніми модельованими величинами та величинами за даними спостережень зменшилась з 17 до 8%, а середньоквадратична похибка зменшилась до 11%.

Параметри CC0, CC1, CC2 за замовчуванням виявились низькими для досліджуваного перехрестя, що призвело до переоцінки його пропускну здатності. Часові проміжки, визначені у результаті інтелектуального відеоаналізу даних руху та подальше калібрування моделі Wiedemann 74 дозволили

встановити, що реалістичні затримки можна отримати при відстанях у потоці від 2,2 до 3,3 м.

Процедура калібрування описана вище, заснована на представленні навантажень за розподілом Пуассона, коли визначається тільки загальний об'єм ТЗ за період часу. У міському середовищі на транспортні потоки впливають оточуючі з'єднання. Тому до уваги слід приймати точний розподіл часу прибуття при порівнянні результатів імітації та натурних показників. Розподіл за Пуассоном може призвести до різної дольової участі ТЗ при проходженні перехрестя без зупинки на ньому. Для відтворення точного часу прибуття згідно до даних польових умов бажано використовувати API або COM-інтерфейс у VISSIM, якій дозволяє управляти об'єктами у мережі та їх атрибутами за певний проміжок часу. Першою часовою міткою при цьому виступатиме час прибуття на кінець черги. Оскільки відстань між кінцем черги та стоп-лінією є змінною величиною, точна відстань від стоп-лінії для ТЗ, прибувших на кінець черги, невідома. Для оцінки відповідності модельованих та вимірюваних показників часу прибуття, визначено долю ТЗ, що рухаються без зупинки. Вочевидь, дані параметри не співпадають при розподілі Пуассона: для деяких маршрутів, дана доля є занадто великою, а для деяких малою. Оскільки для досліджуваного перехрестя загальна доля ТЗ, які рухаються без зупинки становить 94%, даний етап калібрування дає лише приблизні результати.

Основним завданням калібрування є отримання реалістичних показників ефективності перехрестя, за основу при цьому взяті результати інтелектуального відеоаналізу даних руху.

Дана мета реалізована за декілька етапів калібрування таких показників:

- часу проїзду перехрестя;
- часової затримки між двома послідовними ТЗ;
- розподілу часу прибуття.

Всі калібрувальні параметри незалежні один від одного. Тільки зони зниження швидкості мають значний вплив на затримки на перехресті. Тому час у дорозі відкалібровано на попередньому етапі. Час у дорозі має негативний вплив на затримку. Це є зрозумілим, оскільки час, що витрачається на проїзд без очікування становить кілька секунд, що значно менше самого часу очікування. Середній проміжок часу між двома ТЗ за різними маршрутами відповідно до *GoodVision intrusion report* виявився більше ніж той, що моделювався у VISSIM при параметрах поведінкової моделі за замовчуванням. Це знову має пояснення: чим більший проміжок часу між ТЗ, тим менша пропускна здатність смуги. Показник часу прибуття на перехрестя відіграє важливу роль у випадку, коли швидкість руху близька до швидкості вільного потоку для даного класу вулиць, що дозволяє ТЗ рухатись на перехресті майже без зупинки (що актуального також і для регульованих перехресть). Як тільки збільшується черга, вплив часу прибуття зменшується, оскільки черга призводить до застою транспортного потоку між стоп-лінією та вхідним потоком.

2.4. Висновки до розділу 2

Метою даної роботи є розробка та перевірка методу калібрування VISSIM-моделі нерегульованого перехрестя із малою інтенсивністю навантаження за результатами інтелектуального відеоаналізу даних руху. Для прикладу вибрано Т-подібне перехрестя вулиць Бикова та Івана Авраменка у місті Кривий Ріг.

Для виконання поставленої мети проведено відеофіксація даних руху та отримано 15-хвилинний відеозапис руху, якій підлягав постобробці у спеціалізованій програмі аналізу даних руху за допомогою штучного інтелекту GoodVision. Дані зі звітів GoodVision використані для подальшого калібрування VISSIM-моделі перехрестя.

Такими показниками виступали: час у дорозі, середня часова затримка між ТЗ, розподіл прибуття ТЗ. Калібрування часу у дорозі виявилось еквівалентним калібруванню затримки, викликаной геометрією розв'язки. Середня часова затримка між ТЗ визначає швидкість розсіювання черги на перехресті, а отже, впливає на затримку, пов'язану із організацію руху. Довжина черги в основному залежить від розподілу часу прибуття ТЗ, а саме, кількості ТЗ, що прибувають наприкінці черги, що утворилась. Калібрування часу проїзду не мало значного впливу на загальну затримку. Ефект величини проміжку часу між ТЗ значно більший. Оскільки розподіл часу прибуття за замовчуванням при моделювання має значне відхилення від даних спостереження, налаштування даного параметра мало самий високий ефект на величину затримки.

Калібрування параметрів бажаної швидкості дозволило знизити величину середньоквадратичної похибки для часу у дорозі з 43,4% до 11,3%, а коефіцієнт кореляції між спостережуваними (за GoodVision) та модельованими показниками часу у дорозі підвищити з 12,1% (слабкий зв'язок) до 88,9% (сильний зв'язок досліджуваних величин).

Після проведення процедури калібрування відстань між середніми модельованими величинами та величинами за даними спостережень часу між ТЗ зменшилась з 17 до 8%, а середньоквадратична похибка – до 11%, що говорить про успішність калібрування.

Використовуючи представлену процедуру можливо реалістично відтворювати умови руху навіть на нерегульованих перехрестях з малою інтенсивністю руху.

РОЗДІЛ 3. ВАРТІСНА ОЦІНКА ВИКОНАННЯ ПРОЦЕДУРИ КАЛІБРУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

3.1. Метод визначення вартості калібрування

Визначення вартості калібрування VISSIM-моделі на основі використання автоматизованого підрахунку даних дорожнього руху GoodVision проводилось на прикладі перехрестя вулиць Івана Авраменка та Бикова у місті Кривий Ріг.

Вартість проведення досліджень такого типу складається з чотирьох компонентів: проведення польових досліджень зі збору вихідних даних для моделювання, постобробка відеозапису (C_1), розробка імітаційної моделі перехрестя (C_2), калібрування імітаційної моделі (C_3):

$$E = C_1 + C_2 + C_3 \quad (3.1)$$

Експлуатаційні витрати на автоматизований облік показників руху за допомогою програми GoodVision визначаються:

$$C_1 = T_{ij} \cdot N_{ij} \cdot p_{ij} + K \cdot p_k \quad (3.2)$$

де T_{ij} – час, необхідний на виконання робіт j -того профілю (маркування робочого простору відеофрагменту та експорт результатів аналізу руху) працівниками i -тої посади (експерт з транспортного моделювання – traffic modeler); N_{ij} – кількість виконавців i -тої посади, задіяних у роботі j -того профілю; p_{ij} – погодинна оплата j -тої праці i -того виконавця робіт; K – кількість кредитів, витрачених на автоматизовану обробку відеозапису у хмарі розробника програмного забезпечення та створення протоколу трасування; p_k – вартість одного кредиту.

Експлуатаційні витрати на розробку імітаційної моделі можуть бути враховані разом із витратами на її калібрування, виходячи з погодинної ставки експерта з транспортного моделювання:

$$V = A \cdot T_{ij} \cdot N_{ij} \cdot p_{ij} \quad (3.3)$$

де A – питома вартість використання ліцензії програмного забезпечення (грн./доба) T_{ij} – час, необхідний на виконання робіт j -того профілю (розробка імітаційної моделі перехрестя) працівниками i -тої посади (експерт з транспортного моделювання); N_{ij} – кількість виконавців i -тої посади, задіяних у роботі j -того профілю; p_{ij} – погодинна оплата j -тої праці i -того виконавця робіт.

Питома вартість використання академічного пакету програми імітаційного моделювання:

$$A = C \cdot /M \cdot n \cdot 365$$

де C – ціна ліцензії, грн.; M – кількість персональних комп'ютерів, для яких надається ліцензія; n – кількість років, протягом яких дійсна ліцензія; 365 – кількість днів у році.

3.2. Приклад розрахунку для досліджуваного перехрестя

На маркування робочого простору відеофрагменту в GoodVision та експорт результатів аналізу руху було витрачено 60 хв. (1 год.). Середня погодинна ставка експерта з транспортного моделювання становить 8 євро (239,2 грн.) [1]. Для обробки відеозапису було витрачено 2 кредиту (кредити округлюються). Вартість одного кредиту, який дозволяє обробити 1 годину відео, становить 4,0 євро (120 грн.) [1].

Звідси експлуатаційні витрати на аналіз руху в GoodVision становитимуть:

$$C_1 = 1,0 \cdot 1 \cdot 239,2 + 2 \cdot 120 = 480 \text{ грн.}$$

На виконання робіт з розробки імітаційної моделі перехрестя в VISSIM витрачено 15 хв. (0,25 години), середня погодинна ставка експерта з транспортного моделювання становить 8 євро (239,2 грн.) [1]. На калібрування імітаційної моделі витрачено 5 годин. Вартість академічної ліцензії VISSIM на 3 роки на 100 машин становить 5000 євро [8]. Враховуючи поточний курс євро, питома вартість використання академічного пакету VISSIM становить, грн./доба:

$$A = 5000 \cdot 29,29 \cdot /3 \cdot 100 \cdot 365 = 1,33.$$

Виходячи з цього,

$$C_2 + C_3 = 1,33 \cdot 5,25 \cdot 1 \cdot 239,2 = 1700 \text{ грн.}$$

Таким чином, загальна вартість робіт з калібрування VISSIM-моделі перехрестя становить 2180 грн.

РОЗДІЛ 4. ОРГАНІЗАЦІЯ РУХУ НА НЕРЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ

Правила проїзду нерегульованих перехресть описані в п.16.2, 16.11– 16.15 Правил дорожнього руху [2].

На перехресті нерівнозначних доріг водій транспортного засобу, що рухається по другорядній дорозі, повинен дати дорогу транспортним засобам, які наближаються до даного перехрещення проїзних частин по головній дорозі, незалежно від напрямку їх подальшого руху. На перехресті рівнозначних доріг водій нерейкового транспортного засобу зобов'язаний дати дорогу транспортним засобам, що наближаються праворуч, крім перехресть, де організовано круговий рух (нові зміни від 15.11.2017). Цим правилом повинні керуватися між собою і водії трамваїв.

Перевага в русі на нерегульованих перехрестях, де організовано круговий рух і які позначені дорожнім знаком 4.10 , надається транспортним засобам, які вже рухаються по колу (нові зміни від 15.11.2017).

Перед поворотом ліворуч і розворотом водій нерейкового транспортного засобу зобов'язаний дати дорогу трамваю попутного напрямку, а також транспортним засобам, що рухаються по рівнозначній дорозі в зустрічному напрямку прямо чи праворуч. Цим правилом повинні керуватися між собою і водії трамваїв.

Якщо головна дорога на перехресті змінює напрямок, водії транспортних засобів, які рухаються по ній, повинні керуватися між собою правилами проїзду перехресть рівнозначних доріг. Цим правилом повинні керуватися між собою і водії, які рухаються по другорядних дорогах.

Якщо неможливо визначити наявність покриття на дорозі (темна пора доби, грязь, сніг тощо), а знаки пріоритету відсутні, водій повинен вважати, що перебуває на другорядній дорозі.

ВИСНОВКИ

У роботі розроблено та перевірено метод калібрування VISSIM-моделі нерегульованого перехрестя із малою інтенсивністю навантаження за результатами інтелектуального відеоаналізу даних руху GoodVision. Для прикладу вибрано Т-подібне перехрестя вулиць Бикова та Івана Авраменка у місті Кривий Ріг.

1. Проаналізовано складові моделі слідування за лідером Wiedemann 74, яка лежить в основі симулятора руху VISSIM, на предмет їх впливу на показники ефективності перехрестя.

2. Встановлено, що вихідними показниками GoodVision для використання під час калібрування імітаційної моделі є інтенсивність руху у відповідних кореспонденціях, час у дорозі на маршруті, проміжок часу між двома послідовними ТЗ.

4. Розроблено метод калібрування параметрів моделей Wiedemann 74 із використанням даних відеоаналізу руху GoodVision на основі трьохкрокової процедури: калібрування часу у дорозі на основі зон зниження швидкості усередині перехрестя, часової затримки між ТЗ за даними GoodVision та розподілу часу прибуття ТЗ за даними спостережень.

5. Точність розробленого методу калібрування перевірено за допомогою системи статистичних показників. Калібрування дозволило знизити величину середньоквадратичної похибки для часу у дорозі з 43,4% до 11,3%, а коефіцієнт кореляції між спостережуваними (за GoodVision) та модельованими показниками часу у дорозі підвищити з 12,1% (слабкий зв'язок) до 88,9% (сильний зв'язок досліджуваних величин). Після калібрування відстань між середніми модельованими величинами та величинами за даними спостережень часу між ТЗ зменшилась з 17 до 8%, а середньоквадратична похибка – до 11%, що говорить про якість запропонованого методу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електронний ресурс: <https://goodvisionlive.com/>
2. Електронний ресурс: <https://vodiya.ua/pdr/16/>
3. Gao Y. (2008). Calibration and Comparison of the VISSIM and INTEGRATION Microscopic Traffic Simulation Models
4. Kim S. (2008). Simultaneous Calibration of a Microscopic Traffic Simulation Model and OD Matrix.
5. Park B., Schneeberger J.D. (2003). Microscopic Simulation Model Calibration and Validation Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System
6. Park B., Qi H. (2005). Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models
7. Park B., Won J., Yin I. (2006). Application of Microscopic Simulation Model Calibration and Validation Procedure: A Case Study of Coordinated Actuated Signal System.
8. Lownes E., Machemehl R. (2006). VISSIM: A Multi-parameter Sensitivity Analysis.
9. Woody T. (2006) Calibrating Freeway Simulation Model in VISSIM
10. Menneni S., Sun C., Vortisch P. (2008). Microsimulation Calibration Using Speed Flow Relationships, Transportation Research Record, 2008.
11. Zenkov D., Yurshevich E. (2008). Development of VISSIM model calibration software.
12. Miller D., M. (2009). Developing a Procedure for Identifying Parameters for Calibration of a VISSIM Model
13. Manjunatha P., Vortisch P., Mathew T. (2012). Methodology for the Calibration of VISSIM in Mixed Traffic. Transportation Research Board, 2013.
14. Aghabayk K., Sarvi M., Young W., Kautzch L. A novel methodology for

evolutionary of VISSIM by Multi-Threading. Australian Transportation Research Board Conference (2013).

15. Ge Q., Menendez. An Efficient Sensitivity Analysis Approach for Computationally Expensive Microscopic Traffic Simulation Models. *International Journal of Transportation* Vol. 2, No. 2, (2014).

16. Duong D. (2011) Calibration and validation of VISSIM microscopic traffic simulation model parameters using Pareto Archived Dynamically Dimensioned Search.

17. Herrera J., Amin S., Bayen S., Madanat S., Zhang M., Nie Y, Qian Z., Lou Y., Yin Y and Li M., Dynamic Estimation of OD Matrices for Freeways and Arterials.

18. Talukder S. (2011) Mathematical Modelling and Applications of Particle Swarm Optimization.

19. Abdalhaq B., Baker M. (2014) Using Meta-Heuristic algorithms to improve traffic simulations. *Journal of Algorithms and Optimization*.

20. Kim S., Kim W. and Rilett L. (2005) Calibration of Micro-simulation Models Using Nonparametric Statistical Techniques.

21. Duong D., Saccomanno F., Hellinga B. (2011). Effects of microscopic traffic platform calibration on errors in safety and traffic metrics. *Third International Conference on Road Safety and Simulation*, Indianapolis, USA.

22. B.R. Hellinga Requirement for the Calibration of Traffic Simulation Models Department of Civil Engineering, University of Waterloo (2015). <http://www.civil.uwaterloo.ca/bhellinga/publications/Publications/CSCE-1998-Calibration.PDF>. Accessed Jul. 8, 2015.

23. Higgs et al., 2011. B. Higgs, M. Abbas, A. Medina. Analysis of the Wiedemann car following model over different speeds using naturalistic data. *Road Safety and Simulation*, Indianapolis, Indiana (2011).

24. Highway Capacity Manual, 2010. Highway Capacity Manual Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC (2010), p.