

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

*Дослідження експлуатації підключених автомобілів (CV) в міських умовах
методом мікроімітаційного моделювання*

Виконав

А.О. Рішняк

Керівник

В.О. Сістук

Допущено до захисту

“ _____ ” _____ 2024 р.

Зав. кафедрою АТ

_____ Ю.А. Монастирський

Кривий Ріг 2024 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Механічної інженерії та транспорту

Кафедра Автомобільного транспорту

Спеціальність 274 – автомобільний транспорт

Затверджую:

Зав. кафедрою АТ

_____ Ю.А.Монастирський

« » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ РІШНЯКУ АНТОНУ ОЛЕГОВИЧУ

Тема роботи: Дослідження експлуатації підключених автомобілів (CV) в міських умовах методом мікроімітаційного моделювання

1. Затверджена наказом по університету від 16.09.2024 р. № 838 с
2. Термін здачі студентами закінченого проекту (роботи) 30.11. 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: Керівництво до ПЗ PTV VISSIM.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити). Досвід експлуатації підключених автомобілів (CV). Методологія моделювання підключених автомобілів. Дослідження експлуатації V2V та V2I.
5. Перелік графічного матеріалу: 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.
7. Дата видачі завдання 16.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання	Примітка
1.	Досвід експлуатації підключених автомобілів (CV)	16.09.24 – 30.09.24	
2.	Методологія моделювання підключених автомобілів	01.10.24 – 14.10.24	
3.	Дослідження експлуатації V2V та V2I	15.10.24 – 07.11.24	
4	Підготовка та оформлення пояснювальної записки та презентації	10.11.24 – 30.11.24	

Студент _____ А.О. Рішняк

Керівник _____ В.О. Сістук

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ДОСВІД ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПІДКЛЮЧЕНИХ АВТОМОБІЛІВ (CV)	9
1.1. Наукові дослідження технології та експлуатації підключених автомобілів (CV)	9
1.2. Огляд технологій забезпечення зв'язку	11
1.3. Парадигма V2X	25
1.3.1. Експлуатація V2X у системі безпеки на автомобільному транспорті	27
1.3.2. Інші застосування CV на автомобільному транспорті.....	34
1.4. Висновки до розділу 1	35
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПІДКЛЮЧЕНИХ АВТОМОБІЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ VISSIM ВІД PTV.....	37
2.1. Можливості PTV VISSIM для моделювання підключених автомобілів.....	37
2.2. Зменшення стохастичності при моделюванні.....	44
2.3. Особливості налаштування моделі при внутрішньому способі моделювання (без COM).....	47
2.4. Висновки до розділу 2	57
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ V2V ТА V2I НА ПРИКЛАДІ МІСЬКОЇ КІЛЬЦЕВОЇ РОЗВ'ЯЗКИ.....	59
3.1. Загальна методологія досліджень	59
3.2. Вплив автоматизації на дорожній рух: робота перехресть з пріоритетом руху (кільцевих розв'язок)	60
3.3. Результати моделювання та техніко-експлуатаційні показники	66

3.4. Висновки до розділу 3	70
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74
ДОДАТОК А. Налаштовані параметри поведінкової моделі водія Wiedmann 99 ..	80
ДОДАТОК Б. Теплові картограми показників транспортних потоків у моделі базового сценарію	84
ДОДАТОК В. Теплові картограми показників транспортних потоків у моделі сценарію 1	86
ДОДАТОК Г. Теплові картограми показників транспортних потоків у моделі сценарію 2	88
ДОДАТОК Д. Теплові картограми показників транспортних потоків у моделі сценарію 3	90

ВСТУП

Актуальність теми. Автоматизовані транспортні засоби (безпілотні та підключені автомобілі – connected vehicles - CV) можуть мати різні рівні автоматизації, різні функції, сенсорне обладнання та логіку водіння. Перед впровадженням даної технології необхідно дослідити поведінку таких автотранспортних засобів у реальних умовах експлуатації. На сьогодні не існує загального підходу до вирішення цієї задачі. Сучасним та мало затратним підходом є проведення мікромоделювання транспортного руху на прикладі локальних реальних дорожньо-транспортних умов з урахуванням певної кількості CV у складі транспортного потоку з відповідною логікою водіння. При цьому метод моделювання руху CV залежить від деталізації інформації про них.

Оскільки існує багато невизначеностей щодо поведінки майбутніх автономних транспортних засобів, у тому числі, CV, підхід до транспортного моделювання зосереджується на описі різноманітних можливих сценаріїв їхньої поведінки. Поведінка автоматизованих транспортних засобів визначається логікою водіння, яка функціонально окреслює, як і де вони можуть безпечно працювати, незалежно від того, які технології це забезпечують.

У рамках грантового проєкту Horizon 2020 CoEXist було досягнуто значного прогресу в розробці макро- та мікроскопічних інструментів для моделювання автоматизованих автомобілів та їхньої взаємодії зі звичайними транспортними засобами та іншими учасниками дорожнього руху. Програмне забезпечення для мікромоделювання PTV VISSIM було вдосконалено для моделювання поведінки безпілотних транспортних засобів, зокрема з урахуванням різниці у відстанях між автомобілями, комунікацій транспортних засобів між собою (vehicle-to-vehicle – V2V) та інфраструктурою (vehicle-to infrastructure – V2I) та поведінки під час прискорення, а також інших аспектів.

Якщо алгоритми керування відомі або перебувають на стадії розробки, один із інтерфейсів PTV VISSIM можна використовувати для підключення цих алгоритмів до програмного забезпечення, що дозволяє тестувати їх безпосередньо,

а також візуалізувати й порівнювати взаємодію між автоматизованими транспортними засобами з детермінованою поведінкою та звичайними транспортними засобами, змодельованими в PTV VISSIM.

У той же час, основні досягнення в області моделювання експлуатації підключених автомобілів звужуються до результатів проєкту Horizon 2020 CoEXist та нечисельних наукових робіт, проведених закордонними дослідниками. У зв'язку з цим, дослідження експлуатації підключених транспортних засобів на приклади їх роботи в реальних дорожньо-транспортних умовах є актуальним науково-прикладним завданням.

Мета дослідження. Дослідити вплив технології підключених автомобілів на техніко-експлуатаційні показники дорожнього руху на прикладі реальних міських умов їх експлуатації.

Для того, щоб поставлена мета була досягнута, необхідно виконати коло **завдань:**

- виконати аналіз і всебічний огляд технологій підключених автомобілів (CV), а також розглянуто ключові технології зв'язку, з точки зору ефективності, безпеки та перспективності даної технології;

- виконати аналіз можливостей сучасного програмного забезпечення для моделювання експлуатації підключених автомобілів у міських умовах;

- провести дослідження експлуатації підключених транспортних засобів на приклади роботи реального перехрестя з пріоритетом руху.

Об'єкт дослідження – логіка поведінки водіння підключених автомобілів в міських умовах їх експлуатації.

Предмет дослідження – техніко-експлуатаційні показники дорожнього руху при використанні підключених автомобілів.

Методи дослідження. Аналіз, синтез, огляд літературних джерел, транспортне мікромоделювання, порівняння, математична статистика.

Наукова новизна одержаних результатів. Визначений вплив різних логік поведінки водіння на техніко-експлуатаційні показники експлуатації підключених автомобілів у міських умовах експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів. Робота представляє практичний інтерес для дослідників та транспортних інженерів на етапі дизайну технології підключених автомобілів.

Структура і обсяг. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку літературних джерел з 52 найменувань та п'яти додатків. Загальний обсяг роботи – 86 с, у тому числі 26 рисунків та 4 таблиці.

РОЗДІЛ 1. ДОСВІД ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПІДКЛЮЧЕНИХ АВТОМОБІЛІВ (CV)

1.1. Наукові дослідження технології та експлуатації підключених автомобілів (CV)

Навіть попри наявність багатьох превентивних заходів безпеки дорожнього руху кількість дорожньо-транспортних пригод у світі продовжує збільшуватись. Вплив дорожньо-транспортних пригод не обмежується лише збільшенням кількості смертей і травм на дорогах, але й вважається основним фактором, що стримує економічне зростання. Економічні втрати та грошовий тягар, пов'язані з дорожньо-транспортними пригодами, мають негативний і значний вплив на суспільство, оскільки вони виникають через вартість медичних послуг, що надаються травмованим людям, або втрату продуктивності населення через інвалідність.

Інноваційні та промислові автомобільні мережеві рішення виникли внаслідок потреби вирішення численних питань безпеки та інших аспектів. Дані рішення включають впровадження зв'язку в транспортних засобах, що отримали назву «підключені транспортні засоби» (connected vehicles – CV), що у свою чергу, призвело до значних змін у транспортній галузі. Інтелектуальні транспортні засоби обмінюються даними про дорожній рух між собою та з навколишнім середовищем, що дозволяє покращити обізнаність про ситуацію на дорозі, зменшити аварійність і затори, а також забезпечити безпечніший і комфортніший досвід водіння.

Загалом, CV створюють нові середовища даних, які дозволяють багатьом додаткам і сервісам підвищити рівень безпеки руху та зменшити кількість транспортних заторів. Такі додатки доповнюються, але не обмежуються, підключеними інформаційно-розважальними системи (IVI), навігацією та

маршрутизацію в режимі реального часу, інформацією про дорожній рух, попередження про безпеку, запобігання аваріям, вдосконаленими системами допомоги водієві (ADAS), автоматизованими системами контролю за дорожнім рухом (ADAS), автоматизованими системами водіння (ADS), дистанційною діагностикою, прогнозуванням, ремонтом або дистанційним керуванням у разі несправності ADS, монетизацією даних та управлінням автопарком.

Незважаючи на значний прогрес у розвитку таких технологій у транспортних системах, існують виклики. Наприклад, додатки для інтелектуального паркування та системи попередження про рух заднім ходом обмежені в полі зору та стикаються з проблемами точності і надійності датчиків, оскільки вони залежать від ультразвукових та електромагнітних сенсорів, чутливих до змін температури і вологості. Крім того, відсутність загальновизнаних стандартів для інтеграції датчиків з іншими компонентами є ще однією проблемою, яку слід вирішувати [1]. Отже, для підвищення ефективності експлуатації транспортного засобу необхідні передові та ефективні можливості збору та аналізу даних про навколишнє середовище, що є ключовим аспектом у технологіях підключених транспортних засобів [2].

В останні роки спостерігається зростаючий інтерес з боку всіх учасників до реалізації концепції підключених транспортних засобів (CV). Дослідники активно вивчають сприятливі технології, виклики, можливості та різні аспекти CV.

Лу та інші автори в своєму огляді [3] систематично досліджують потенційні виклики та альтернативи для створення надійних технологій бездротового зв'язку, які забезпечують зв'язок транспортного засобу та інфраструктури (V2X), а також проблеми, що виникають з дротових технологій, зосереджуючись на нижньому рівні (фізичному і середньому контролі доступу) спеціальних протоколів короткого радіусу дії і підключення до Інтернету.

У своїй роботі Сігел та інші [4] вивчають аспекти розробки технологій і додатків CV, розглядаючи невирішені проблеми щодо конфіденційності,

масштабованості та розширюваності. Вони аналізують, як ці аспекти впливають на розвиток систем CV.

Автори в [6] надають детальний огляд особливостей і функціональних можливостей сервісів CV, а також технічні проблеми, пов'язані з апаратним і програмним забезпеченням. Вони докладно розглядають технічні виклики, які виникають при розробці та впровадженні систем CV.

У [7] автори обговорюють потребу в життєздатних системах перевірки на основі безпеки і вказують на основні триєдині аспекти (моделювання, аналіз і креслення), пов'язані з контролем поздовжньої динаміки і керованості самокерованих транспортних засобів. Вони також представляють соціальні та економічні наслідки і надають пропозиції щодо покращення динаміки руху на основі впровадження підключених і автономних транспортних засобів (CAV).

Хоча ці дослідження зосереджуються на різних аспектах CV, ми не знайшли комплексного огляду CV, який би давав глибоке розуміння технологій, що сприяють цьому, відкритих викликів і потенційних можливостей. У даному розділі магістерської роботи надано цілісний огляд останніх досягнень технологій створення CV, щоб зрозуміти швидкі темпи технологічного розвитку в цій галузі. Авторський внесок у це дослідження у даній частині можна підсумувати наступним чином. Проведений огляд включає всебічний аналіз поточних зусиль щодо стандартизації ключових комунікаційних технологій, таких як Wi-Fi 6 та 5G. Обговорені виклики, з якими стикається технологія CV, зокрема спільні обчислення, конфіденційність та безпека даних, а також оновлення по повітрю. Вказано на відкриті дослідницькі питання, які потребують уваги наукової спільноти.

1.2. Огляд технологій забезпечення зв'язку

Зростаючий попит на парадигму «завжди на зв'язку» підштовхує автовиробників до пошуку більш інноваційного програмного забезпечення та дизайну електроніки, які відповідають потребам зв'язку [4, 7].

За оцінками McKinsey & Company, частка ринку автомобільного зв'язку продовжить зростати з нинішніх 50% CV у роздрібній торгівлі до 95% світових продажів у 2030 році [8].

Майже половина проданих автомобілів матиме проміжний та просунутий рівні підключення. Широке впровадження зв'язку в автомобільній промисловості буде вважатися значним при використанні даних про транспортні засоби для підвищення безпеки, оптимізації витрат і отримання прибутку. Монетизація зв'язку для надання на вимогу та індивідуальних функцій зв'язку, включаючи передплачену точку доступу в транспортному засобі та регулярні сервісні перевірки на основі використання водієм, привертає значну увагу автомобільної промисловості [9].

Інтеграція зв'язку в CV вимагатиме базових технологій, які забезпечать його розгортання, функціональність і надійність в рамках інтелектуальної транспортної системи (ІТС) [10]. Ці технології також можуть полегшати передачу та обмін даними в режимі реального часу з високою надійністю, а також забезпечити безперебійну інтеграцію між пристроями смартфонів і бортовими комунікаційними мережами [11]. Мінімальне енергоспоживання, вартість і масштабованість є критичними факторами, які впливають на ці технології [7], особливо у випадку експлуатації електромобілів (EV).

Дослідники доклали чимало зусиль, щоб забезпечити бездротовий зв'язок транспортних засобів у щільному, динамічному та суворому погодному середовищі [4, 11]. Технології бездротового зв'язку, які зараз використовуються в підключених транспортних засобах, в основному включають виділений зв'язок малого радіусу дії (DSRC), Wi-Fi 6 і зв'язок «мобільний транспортний засіб з

усім» (C-V2X). Поточні дослідження вивчають, чи призведе поєднання різних комунікаційних технологій до кращого зв'язку для майбутніх CV.

Понад десять років DSRC був одним з ключових стандартів бездротових комунікаційних технологій, розроблених спеціально для автомобільного зв'язку [3, 12]. Стандарт IEEE для бездротового доступу в автомобільному середовищі (WAVE) представляє фундаментальні специфікації DSRC [13, 14]. WAVE включає в себе IEEE 802.11р, який має справу з рівнем управління доступом до середовища (MAC) і який вирішує проблеми проектування на фізичному (PHY) рівні DSRC, як показано у таблиці 1.1.

Табл.1.1

Багаторівнева архітектура зв'язку WAVE/DSRC

IEEE 1609,2 Security	Підрівень додатків безпеки	Підрівень інших додатків
	Підрівень повідомлень	Транспортний рівень (TCP/UDP)
	Бездротовий доступ до транспортного середовища WAVE. Протокол коротких повідомлень WSMP IEEE 1609,3	Мережевий рівень (IPv6)
IEEE 802,2	Підрівень управління логічними зв'язками (LLC)	
IEEE 1609,4	Розширення підрівня MAC	
IEEE 802,11	Середній рівень контролю доступу (MAC)	
	Фізичний рівень (PHY)	

Потреба в надійній і ефективній технології бездротового зв'язку для підтримки багатьох інноваційних автомобільних застосувань призвела до подальшого вдосконалення і розвитку сучасної технології DSRC.

Незважаючи на ці зусилля, в листопаді 2020 року FCC ухвалила нові правила щодо перерозподілу діапазону від 5,850 до 5,925 ГГц (тобто смуги спектра 5,9 ГГц), призначеного для стандартних операцій DSRC з 1999 року. Перерозподіл спектру, оголошений FCC, є радикальним заходом на шляху до повільного розгортання технології DSRC. Існуючий безпечний спектр 75 МГц буде розділений на дві смуги частот. Верхня смуга 30 МГц в діапазоні від 5,850 до 5,925 ГГц більше не підтримується DSRC і замість цього перерозподілена для просування і прискорення розгортання технології «мобільний зв'язок між автомобілем і всім» (C-V2X). Решта 45 МГц смуги буде вилучена і зарезервована для неліцензійного бездротового використання, ймовірно, для Wi-Fi [15].

В автомобільній промисловості технологія на основі DSRC не була впроваджена в жодній з попередніх моделей лінійки виробників оригінального обладнання (OEM). GM був єдиним автомобільним брендом, який впровадив технологію DSRC у виробництво модельного ряду Cadillac, випустивши лише 50 000 автомобілів, оснащених DSRC.

Хоча деякі автовиробники вважають DSRC застарілою, технології бездротового зв'язку LTE сьогодні не можуть забезпечити підтримку систем безпеки транспортних засобів, що загрожують аваріями, через їх високу затримку. 5G обіцяє впоратися з цим обмеженням, але його широке розгортання може зайняти деякий час, а також потребуватиме кращого навчання і розуміння. Подальші занепокоєння і скептицизм викликають перевантаження спектра і перехресні перешкоди, які можуть виникнути від інших радіопристроїв, що використовують сусідні частоти до спектра 30 МГц, де, як очікується, буде працювати технологія C-V2X.

Навіть незважаючи на недостатню кількість досліджень з вищезгаданих питань, рух у бік технології C-V2X прискорюється. Незважаючи на те, що Toyota була однією з перших автомобільних компаній, яка підтримала DSRC і інтегрувала її у свою виробничу лінійку 2021 року, цей план був нещодавно

призупинений для переоцінки середовища розгортання. GM розглядає можливість використання стільникових технологій, але вже інтегрувала можливості DSRC в автономні автомобілі Cadillac CT6 і рівня автономності 3. Nissan займає нейтральну позицію і вивчає потенціал і недоліки кожної технології; вони відкриті до розгортання будь-якої технології в залежності від попиту. Автовиробники перейшли від фази вичікувального підходу до впровадження технології C-V2X у свої лінійки.

SAE International провели публікацію стандарту SAE J3216, який в першу чергу фокусується на автоматизації кооперативного водіння за рахунок інтеграції як підключення, так і автоматизації [16]. Цей документ описує між машинний зв'язок (M2M) для забезпечення співпраці між двома або більше суб'єктами-учасниками або комунікаційними пристроями, що знаходяться у власності або під контролем цих суб'єктів. Співпраця підтримує або уможливорює виконання динамічного завдання водіння (DDT) для транспортного засобу з увімкненою функцією(-ями) автоматизації водіння. Іншими учасниками можуть бути інші транспортні засоби з увімкненими функціями автоматизації водіння, учасники дорожнього руху (наприклад, водії транспортних засобів з ручним керуванням або пішоходи чи велосипедисти з персональними пристроями) або дорожні оператори (наприклад, ті, хто обслуговує або експлуатує світлофори або робочі зони).

Остання хвиля технології Wi-Fi відноситься до Wi-Fi 6 (802.11ax). Wi-Fi 6 – це найновіше покоління стандартів Wi-Fi, яке прийшло на зміну Wi-Fi 5 (802.11ac). Він має низку покращень порівняно зі своїми попередниками, зокрема вищу швидкість передачі даних, збільшену пропускну здатність, кращу продуктивність у переповнених приміщеннях та підвищену енергоефективність. Wi-Fi 6 покликаний покращити загальний користувацький досвід, особливо в густонаселених міських районах, офісах, стадіонах та інших місцях з високим трафіком, де одночасно підключаються кілька пристроїв.

Прогнозується широке впровадження і домінування процесорів на основі Wi-Fi 6 в автомобільній промисловості. Ці прогнози стверджують, що Wi-Fi 6 стане основною технологією бездротового інтерфейсу в автомобілях, оскільки він має багато переваг над попередніми версіями Wi-Fi. Завдяки вищій спектральній ефективності/пропускній здатності каналу, ширшому зовнішньому покриттю та гнучкості, більше клієнтів можуть працювати з однією точкою доступу і використовувати випадки, що вимагають більшої пропускної здатності, наприклад, високоякісне потокове відео, яке може підтримуватися Wi-Fi 6. Також підтримується зниження накладних витрат за рахунок передачі трафіку невеликого розміру.

Wi-Fi 6 також зменшує перевантаження сигналу завдяки використанню ортогонального частотного розділення каналів (OFDMA) (для декількох користувачів з різними вимогами до пропускної здатності) і базового набору послуг, який називається BSS (для ідентифікації сигналу від різнорідних радіопристроїв). Вищезазначені переваги технології Wi-Fi 6 дозволять задовольнити попит на експоненціальне зростання автомобільних додатків для безпеки/зручності та сценаріїв використання всередині/ззовні транспортного засобу та підвищену якість обслуговування (QoX) для користувачів [17, 18]. Навіть з урахуванням вищезазначених переваг, Wi-Fi 6 матиме менший діапазон покриття в порівнянні з технологією стільникового зв'язку 5G.

Стільникові технології, такі як п'яте покоління (5G), є ще одним сильним конкурентом для досягнення ефективного та надійного бездротового зв'язку для підтримки додатків CV.

Пропускна здатність мережі в стільникових технологіях висока, що забезпечує вищу пропускну здатність і може підтримувати різноманітні додатки, що базуються на даних. Стільникові технології охоплюють широкий діапазон покриття. У цьому випадку транспортні засоби можуть залишатися на зв'язку з базовою станцією протягом тривалого часу, на відміну від короткого проміжку

часу між транспортним засобом і RSU, де лінія зв'язку залишається дійсною [19]. Крім того, він точно фокусується на показниках продуктивності, пов'язаних з досягненням наднизької затримки, підвищенням надійності, зменшенням енергоспоживання та максимізацією пропускної здатності мережі за сеанс [20].

Розвиток мобільних стільникових мереж 5G як нової інноваційної технології відкриває потенціал для створення повністю мобільних і взаємопов'язаних систем. Проект партнерства третього покоління (3GPP), версія 15 [21] та Технічні специфікації (TS) 23.501 [22] забезпечують довідкову базу для сукупності вимог і функціональних можливостей, необхідних для розвитку та створення мереж 5G [23]. Крім того, автомобільна асоціація 5G (5GAA) – це організація, в якій найбільші автомобільні та телекомунікаційні корпорації, включаючи BMW, Audi, Ericsson, Intel, Nokia і багато інших, об'єднуються для просування, використання і надання рішень для мобільності і транзиту для мобільного зв'язку V2X на основі стільникового зв'язку [23, 24].

Мережі 5G залежатимуть від довгострокової еволюції – LTE-A, міліметрової WAVE (mm WAVE), Wi-Fi і WiGig, які є новітніми технологіями, що підтримують радіозв'язок і працюють від стільників з надвисокою щільністю до пристроїв (D2D) [23].

Технологія LTE-A відповідає вимогам специфікацій для різних застосувань, включаючи безпеку, високу мобільність, широкий охоплення, поліпшену якість обслуговування (QoS) і багатадресний зв'язок. Використання методів OFDMA і SC-FDMA для низхідного і висхідного доступу в LTE-A дозволяє ефективно використовувати частотно-часові ресурси з високою відмовостійкістю і ефективністю планування. Технологія LTE-A може досягати спектральної ефективності в високодинамічних середовищах завдяки передовим можливостям багаторазового входу і виходу (MIMO). Однак незважаючи на ці переваги, LTE-A має проблеми зі затримкою, оскільки максимально досяжна затримка становить близько 80 мс, що може бути незручно для додатків, які

вимагають максимальної затримки в 10 мс [20]. Технологія mmWave включає в себе технологію формування променя, що дозволяє досягти високої швидкості передачі даних, нарівні з широкою смугою пропускання від 30 до 300 ГГц. Це значно покращує ефективність системи [20, 24]. У високодинамічних середовищах ефект Доплера на частотах mmWave можна контролювати за допомогою спрямованих передач і вузькопроменевих антен [24].

Фундаментальний дизайн 5G значно залежить від автоматизації ресурсів мережі, що використовує мережеве розгалуження (NS), віртуалізацію мережевих функцій (NFW) і програмно-визначені мережі (SDN). Ці технології можуть допомогти вирішити такі проблеми, як неналежне з'єднання і втрата пакетів, шляхом інтеграції SDN і периферійних обчислень. Використання транспортних мереж на основі SDN може покращити ефективність використання ресурсів [25].

Однак стільниковий зв'язок 5G зіштовхується з численними викликами, зокрема відповідь на динамічні зміни в автомобільних мережах, високу мобільність транспортних засобів і значний обсяг передачі даних, пов'язаний з технологією CV [24]. Такі виклики потребують уваги та вирішення для успішного впровадження телекомунікацій 5G.

Сервісні та бізнес-моделі. З інтенсивним зростанням кількості пристроїв Інтернету речей (IoT), які підключаються до мережі через 5G, з'являється потреба у нових сервісних і бізнес-моделях. Мережева технологія 5G є ідеальною для забезпечення зв'язку з IoT-пристроями, що призводить до виникнення потреби у розробці інфраструктури, яка здатна надавати послуги забезпечення якості обслуговування (QoS) на периферії мережі. Важливо відзначити, що у зв'язку з великим обсягом пропускну здатності, яку потребує 5G, та постійною мобільністю пристроїв виникають значні труднощі у наданні послуг віртуалізації та периферійних обчислень [26].

Централізована архітектура стільникових мереж. Централізована архітектура стільникових мереж викликає значні труднощі у забезпеченні вимог

середовища Connected Vehicles (CV). Згідно з цією архітектурою, інформація, що передається транспортними засобами, спочатку повинна надсилатися до базової станції (БС), що призводить до збільшення затримок у доставці повідомлень. Це особливо критично для додатків, які потребують мінімальної затримки, таких як додатки безпеки. Наприклад, у режимі одноадресної передачі транспортний засіб передає критично важливу інформацію на стільникову БС, і це повідомлення тоді транслюється на всі транспортні засоби в зоні дії стільникової БС або лише на відповідні транспортні засоби. У обох випадках низхідний канал зв'язку може стати перевантаженим, навіть при наявності обмеженої кількості транспортних засобів [19, 27]. Пропоновані рішення для безпеки мовлення включають мультимедійні послуги ширококомовлення і багатоадресної передачі (MBMS) і розвинені мультимедійні послуги ширококомовлення і багатоадресної передачі (eMBMS), які знаходяться в стандарті 3GPP. У випадках ширококомовлення дані про безпеку передаються базовій станції (БС), яка ретранслює їх усім транспортним засобам, що знаходяться в зоні її покриття. Таким чином, транспортні засоби мають можливість приймати рішення щодо того, чи вважати отримані дані про безпеку релевантними і використовувати їх для подальшої обробки і дій, чи ж відкинути цю інформацію. Таким чином, транспортні засоби можуть виконувати непотрібні обчислення. Використання багатоадресних послуг, де дані доставляються групі транспортних засобів, вважається одним із запропонованих рішень цієї проблеми [19].

Перешкоди на малих висотах. У середовищі CV транспортні засоби повинні мати можливість час від часу виявляти сусідні транспортні засоби та спілкуватися з ними. Важливою специфікацією телекомунікацій з підтримкою 5G є наявність послуги наближення (ProSe) [28, 29]. Основна мета ProSe полягає в тому, щоб дозволити транспортним засобам мати краще сприйняття шляхом виявлення пристроїв і послуг на основі інформації про положення і географічне розташування [14, 29]. ProSe вважається критично важливою для багатьох

додатків і можливостей зв'язку в межах певного діапазону. Крім того, вона забезпечує зв'язок і виявлення в спеціальному режимі, що вважається найбільш зручним для критично важливих для безпеки додатків. Однак, зміна парадигми в ProSe призводить до поширення радіосигналу серед транспортних засобів, що спричиняється високими будівлями, вежами та багатьма іншими перешкодами, наприклад, в мегаполісах, які призводять до високого рівня перешкод [29].

Сучасні мобільні технології здатні забезпечити деякі з вимог, необхідних для CV. Наприклад, LTE-CAT-M і вузькосмуговий Інтернет речей (NB-IoT) є досить надійними і використовують телекомунікаційні технології з мінімальним енергоспоживанням. Проте, в цілому, стільникові технології не відповідають багатьом вимогам, що висувуються до додатків V2X, таким як висока швидкість, мінімальна затримка, складне маневрування транспортних засобів та багато інших. Багато сторін, включаючи провідні автомобільну, телекомунікаційну галузі та уряди, прагнуть до 5G, щоб використовувати його переваги в ІТС. Намагаючись підтримати технологію 5G, рада провідних компаній допомагає розвивати комплексну системну архітектуру 5G для використання оптимізованого наскрізного зв'язку V2X. На підтримку цих зусиль був запущений проект 5GCAR, що фінансується Європейською комісією, в якому беруть участь 14 європейських компаній, таких як Bosch, Orange, Volvo, PSA group та багато інших. У червні 2019 року консорціум представив у Франції перший приклад використання «Координація злиття смуг руху», щоб продемонструвати оптимізацію злиття транспортних засобів, що в'їжджають на автомагістраль. Транспортні засоби можуть обмінюватися даними про свій поточний стан з централізованою системою планування маневрів, а отже, на основі цих даних надаються рекомендації щодо прискорення, уповільнення і зміни смуги руху для транспортних засобів. Інший приклад використання, продемонстрований 5GCAR, – це «спільне сприйняття» для демонстрації зв'язку між транспортними засобами та вразливими учасниками дорожнього руху (ВУД).

Розгортання 5G NR буде переважно класифікується на два основних режими роботи, а саме: неавтономний (NSA) та автономний (SA). Режим NSA включатиме розгортання попередніх етапів 5G NR за допомогою існуючої інфраструктури 4G з метою прискорення 5G з метою прискорення розгортання мережі. Режим роботи NSA матиме низку переваг завдяки взаємозв'язку між мережами 4G і 5G. Це включає в себе скорочення часу розгортання мережі 5G та підтримку пристроїв, що працюють у двох мережах 4G/5G. Основні архітектурними компонентами режиму NSA є LTE BS (eNB), LTE evolved packet core (EPC), базові станції 5G (gNB) і опорні мережі 5G (5GC) технологій мультирадіодоступу (RAT) і підключення з подвійною підтримкою для клієнтів.

З іншого боку, режим роботи SA передбачає реалізацію повної версії 5G NR. 5G NR, що працює в режимі SA, буде використовувати повні наскрізні мережі та архітектуру на основі 5GC, які можуть забезпечити сценарії використання з наднизькою затримкою і великою пропускнуою здатністю. Таким чином, взаємозв'язок між gNB і мережами 5GC буде використовувати осередки 5G для передачі інформації в площині користувач/контроль. Мережі 5G NR в режимі SA, з'єднані з хмарним ядром 5G, покращать наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC) і підтримуватимуть широкий спектр сценаріїв використання і розширені функціональні можливості та послуги на основі NS. Простота впровадження, вдосконалені технології радіодоступу (RAT) і краща продуктивність є додатковими перевагами режиму SA. Однак одним з викликів, пов'язаних з режимом SA, є широке впровадження 5G [41,42].

Новий радіостандарт (NR) V2X – це останнє досягнення, яке 3GPP розробляє і стандартизує для 16-ї версії. Він побудований на базі 5G NR, який був стандартизований у версії 15. NR V2X має великий потенціал щодо додатків V2X, які вимагають більш високих вимог до якості обслуговування порівняно з додатками, що підтримуються стільниковим V2X. Деякі з цих додатків вимагають наднизької затримки, яка може досягати 3 мс з надійністю 99% [43]. Очікується,

що ці досягнення в технології стільникового зв'язку 5G ще більше підвищать потенційні переваги CV, уможлививши різні додаткові послуги, які можуть відповідати вимогам QoX і QoS. QoX - це ступінь задоволення або роздратування кінцевого користувача в результаті виконання його очікувань щодо корисності та/або задоволення від використання технології з урахуванням індивідуальних особливостей і поточного стану користувача.

Прикладами такої адаптації може бути встановлення спеціального ретранслятора V2V-зв'язку на випадок втрати зв'язку з інфраструктурою або якщо інфраструктура, до якої ми хочемо дістатися, знаходиться за межами діапазону зв'язку транспортного засобу. Інформаційно-розважальні послуги в транспортному засобі, такі як доставка відео/карт високої чіткості та інтерактивні ігри в реальному часі, є прикладом нових засобів зручності, які можуть бути надані за допомогою нової технології стільникового зв'язку V2X [30].

Табл.1.2

Порівняння технологій DSRC, 5G-стільникового зв'язку та Wi-Fi 6

Особливості	DSRC	5G	Wi-Fi 6
Затримка	Низька затримка та висока надійність на менш навантажених ділянках	Затримка залишається стабільною в порівнянні з DSRC, менше 1 мс	2-3 мс
Діапазон роботи	0,3 – 1,0 км	До 2 км	50 м всередині приміщення та 300 м назовні
Переваги	Створена та впроваджена технологія. Маємо виділений спектр 5,9 ГГц. Добре працює при суворих погодних умовах	Максимальна швидкість завантаження даних може досягати 4,5 Гбіт/с. Покриває велику площу і підходить для застосування на великих відстанях.	Вища спектральна ефективність/пропускна здатність каналу. Ширше зовнішнє покриття
Недоліки	Короткострокове з'єднання V2I. Низька масштабованість в	Високі витрати на зв'язок. Немає встановленого спеціального стандарту. Перешкоди на	Менший діапазон покриття

	умовах щільного трафіку середовищах з високим трафіком.	на малій висоті. Централізована архітектура стільникових мереж.	
--	---	---	--

Для досягнення надійного, налагодженого і захищеного безшовного з'єднання для додатків/сервісів V2X дуже важливо забезпечити реалістичні рішення для з'єднання, які можуть бути інтегровані з вбудованими продуктами V2X, встановленими в CV [28,45].

Останні зусилля [31-33] були спрямовані на інтеграцію обох технологій для розвитку і вдосконалення бездротового зв'язку транспортних засобів шляхом використання взаємодоповнюючих аспектів DSRC і стільникових технологій. Це пов'язано з тим, що додатки і послуги V2X вимагають ефективного і раціонального використання технологій бездротового зв'язку з різноманітним доступом [34].

Взаємодія між DSRC і стільниковими технологіями, яка утворює гібридне рішення, вважається перспективною, оскільки вона використовує переваги обох технологій.

Наприклад, в ситуаціях, коли дані, що передаються між транспортними засобами, руйнуються, а міжстанційний зв'язок V2V не працює, мобільні технології можуть слугувати резервним рішенням для ретрансляції інформації, що передається. Крім того, транспортні засоби можуть знову підключатися до мережі доступу стільникового зв'язку у випадку втрати інтернет-зв'язку з RSU.

На рис. 1.1 показані приклади застосувань у сфері безпеки, де інтеграція між DSRC і стільниковими технологіями буде корисною.

Інтеграція між DSRC і стільниковими технологіями може значно полегшити ефективні методи кластеризації в контексті транспортних систем. У такому підході транспортні засоби, що перебувають поблизу, групуються в кластери, де керування мережевими ресурсами здійснюється за допомогою головного кластера (CH). Елементи кластера (CM), в свою чергу, можуть бути

частинами кількох сусідніх кластерів. Головний кластер може також визначати певні транспортні засоби як шлюзи для полегшення комунікації між сусідніми кластерами. У кластерному підході СН та шлюзи формують динамічну ієрархію, що дозволяє двосторонню передачу даних через стільникові мережі і DSRC. Наприклад, мультимедійний файл може спочатку бути завантажений СН зі стільникової мережі, а потім розповсюджуватись через DSRC серед своїх СН у кластері [14]. Основними перевагами кластеризації є ефективне зменшення розміру мережі та зменшення затримок у кожному кластері. Однак швидка зміна мобільності транспортних засобів може вплинути на стійкість кластера, спричиняючи його розпад або об'єднання, що може призвести до значних витрат на управління кластером. Це важливо враховувати при розробці гібридних архітектури DSRC-стільникових мереж, які базуються на кластерному підході [14, 35].



Рис.1.1. VRU Попередження про зіткнення, заборону проїзду та попередження про несправний транспортний засіб.

Стратегічна парадигма для вибору мережі між гібридною архітектурою DSRC і стільниковими технологіями включає ряд важливих аспектів, які враховуються при прийнятті рішень щодо комутації між цими двома системами.

Однією з проблем, яку слід ретельно враховувати при проектуванні мережі, є бажання водія підтримувати свою поточну мережу без переходу на іншу мережу для тривіального підвищення продуктивності та якості. Більше того, на перехідному етапі, коли не всі транспортні засоби обладнані пристроями, що дозволяють взаємозв'язку між DSRC та стільниковими технологіями, можуть виникнути питання справедливості, особливо в тих випадках, коли рішення про вибір мережі та перехід до неї приймаються лише кожним транспортним засобом відповідно до його власних уподобань [14].

Гібридна архітектура DSRC і стільникові технології, згідно з дослідженням ABI [36], є більш економічно ефективною і простішою у впровадженні та розробці. Вважається, що гібридна архітектура DSRC-стільникового зв'язку має багатообіцяючі перспективи, але важливо враховувати виклики на ранній стадії її розгортання.

1.3. Парадигма V2X

Додатки для підключених транспортних засобів спроектовані і розроблені для вирішення багатьох актуальних сучасних транспортних проблем [37]. Що стосується продуктивності і вартості впровадження цих додатків, то вони в значній мірі залежать від проектних рішень, таких як вхідні дані датчиків в реальному часі, режимів зв'язку, що використовуються, місце розташування обчислювального процесу і безпечна передача даних [4, 37]. Широка парасолька

зв'язку – це транспортний засіб до всього (V2X), який забезпечує безперешкодний обмін інформацією між транспортним засобом і всім у потрібному форматі в потрібний час. Існує кілька потенційних застосувань для різних форм зв'язку в рамках парадигми V2X, наприклад, такі.

Від автомобіля до пасажир (водія/пасажир) (V2O). Включення таких функцій, як BLE/UWB-телефон як ключ; послуги бортового зв'язку для роботи, розваг і комерції; розпізнавання і прогнозування помилок водіння; і QoX.

Транспортний засіб для вразливих учасників дорожнього руху (V2VRU). До V2VRU відносяться пішоходи/пішоходи-пішоходи та велосипедистів, а також мотоциклістів та осіб з інвалідністю або обмеженою рухливістю та орієнтації. V2VRU може бути інструментом для виявлення VRU, розпізнавання намірів перетину дороги та розпізнавання намірів перетину дороги, розпізнавання поведінки та попередження про аварії.

Від транспортного засобу до транспортного засобу (V2V). Застосування включає післяаварійне попередження, попередження перед аварією, попередження про зміну смуги руху, спільне попередження про зіткнення, спільний адаптивний круїз-контроль, покращення видимості, попередження про неправильну поведінку, контроль, покращення видимості, попередження водія про неправильний рух, допомога при проїзді перехресть, допомога, попередження про сліпі зони, кооперативне попередження про фронтальне зіткнення, попередження про стан дороги на основі транспортного засобу, попередження про стан дороги, ретрансляція зв'язку в разі надзвичайних ситуацій, системи доставки «останньої милі», системи управління автопарком та самоорганізовані автономні транспортні засоби.

Зв'язок транспортного засобу з навколишнім середовищем (V2E) включає моніторинг стану доріг, розпізнавання дорожніх знаків і світлофорів, прогнозування ризиків під час водіння та системи моніторингу периметра.

Транспортний засіб - інфраструктура (V2I). V2I використовується для попередження про стан доріг, послуг SOS, попередження про робочі зони, попередження про заборону проїзду, випередження сигналів аварійних транспортних засобів, попередження про зіткнення на перехрестях, попередження про жовті сигнали в автомобілі, дистанційна діагностика та ремонт, інформація про пішохідні переходи, попередження про червоне світло, виявлення та попередження пішоходів, виявлення та попередження велосипедів, попередження про заборону повороту ліворуч, моніторинг стану дорожнього руху, погодні умови, системи управління світлофорами, управління взаємодією системи керування світлофорами, системи керування паркуванням, а також телеуправління у випадку несправності, безпілотні автомобілі. Наприклад, послуги OnStar забезпечують автоматичне сповіщення про зіткнення, розширену допомогу на дорозі, екстрену допомогу SOS, автоматичну діагностику, повідомлення про коди несправностей, щомісячні звіти про стан автомобіля, посилення на сервісні центри, нагадування про технічне обслуговування, нагадування про технічне обслуговування, інформацію про водіння та діагностику на вимогу.

Транспортний засіб до мережі (V2N). V2N використовується для попередження придорожніх транспортних засобів з обмеженими можливостями, систем управління обліковими даними, мультимодальних систем мобільності, динамічних систем і послуг мобільності на вимогу, хмарних сервісів зондування натовпу, моніторингу дорожнього руху в реальному часі, а також для створення привабливих споживчих вражень в салоні для підвищення лояльності до бренду.

1.3.1. Експлуатація V2X у системі безпеки на автомобільному транспорті

Активні системи безпеки сприяють уникненню аварій шляхом надання завчасних звукових і візуальних сигналів або через допомогу у керуванні автомобілем, наприклад, завдяки антиблокувальним системам гальм. Ці системи є

превентивними і допомагають водіям уникнути аварій до їхнього виникнення. Натомість пасивні системи безпеки зменшують наслідки аварій для водіїв і пасажирів, якщо вони все ж трапляються; до таких систем відносяться ремені безпеки та подушки безпеки. Інтеграція бездротового зв'язку в автомобільну промисловість сприяла появі численних інноваційних активних бездротових додатків, які взаємодіють між транспортними засобами та між транспортними засобами і інфраструктурою. Ці додатки для безпечного спільного водіння надають водіям дані про дорожній рух, які недоступні безпосередньо їхньому сприйняттю, тим самим зменшуючи кількість аварій і заторів.

Додатки підключених транспортних засобів (CV) потребують низької затримки, ефективних, швидких і надійних протоколів ширококомунікації для передачі повідомлень як в однохопових, так і в багатохопових комунікаціях. Проте, деякі з поширених проблем, пов'язаних з алгоритмами розповсюдження, включають проблеми з прихованими вузлами, відсутність зворотного зв'язку та високу частоту колізій у ширококомунікаційних повідомленнях. В транспортному середовищі існує кілька форм трансляції повідомлень, включаючи маячкові повідомлення, які періодично надсилають інформацію про стан транспортного засобу та ситуаційні дані у вигляді високочастотних і невеликих пакетів. Незважаючи на свою важливість для додатків спільного інформування, маячкові повідомлення мають ряд недоліків, таких як затримка, переповнення мережі та недостатня точність визначення місцезнаходження. Натомість, повідомлення, керовані подіями, передають критичну інформацію, засновану на конкретних подіях, наприклад, у випадках, коли потрібно відзначити важливі для безпеки ситуації. Такі повідомлення вимагають мінімальної затримки та зниженої ймовірності колізій.

Дані, що стосуються безпеки, такі як базові повідомлення безпеки (BSM), забезпечують водіїв актуальною інформацією про навколишнє середовище в реальному часі. Вони постійно передають дані про швидкість, прискорення,

напрямок руху та інші критично важливі показники безпеки. Ще однією формою даних про безпеку є подійні повідомлення, як показано на рис. 1.2. Наприклад, транспортний засіб, що рухається попереду, може сповіщати інші автомобілі про інциденти, що очікують попереду, або про небезпечні ситуації, такі як ввімкнення аварійного електронного стоп-сигналу або можливе зіткнення.

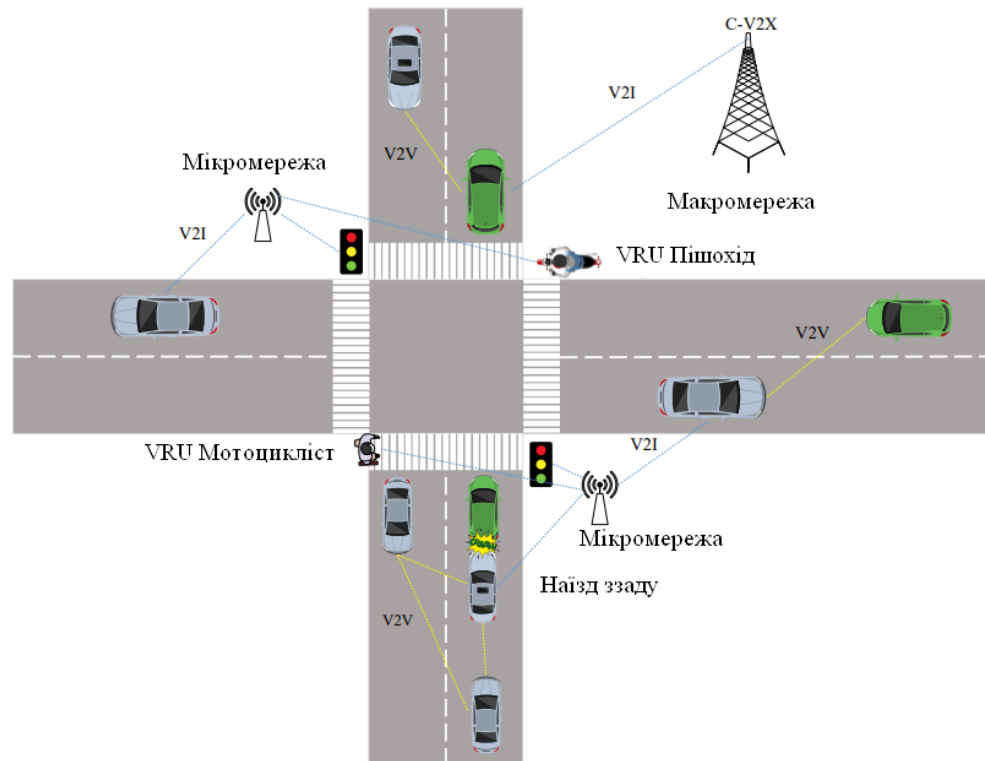


Рис.1.2. Сценарій попередження про безпеку після аварії

Програмне забезпечення, пов'язане із безпекою – це критичні до часу програми, які вимагають передачі даних в режимі реального часу з низькою затримкою, надійністю і високою швидкістю передачі. Однак, щоб зменшити затримку і підвищити продуктивність, необхідно вирішити проблеми управління і аналізу даних. Навіть з огляду на високу масштабованість хмарних технологій та їхню низьку вартість, такі рішення, як збільшення обчислювальних потужностей,

не є доцільними з точки зору проблем управління даними. Більше того, додатки для забезпечення безпеки вимагатимуть ретельного аналізу.

Попередження про проїзд на червоне світло (RLVW). У цьому додатку мікроелемент/RSU надсилає інформацію про синхронізацію сигналу та геометрію перехрестя через повідомлення SPAT (синхронізація фази сигналу) і MAP відповідно. Транспортний засіб використовує ці дані разом зі швидкістю та прискоренням, щоб оцінити, чи може він безпечно проїхати на червоний сигнал чи ні. Наприклад, водієві надходить попередження, якщо він наближається до перехрестя на початку жовтого сигналу, і час, необхідний для перетину перехрестя, перевищує тривалість жовтого сигналу.

Було проведено ряд досліджень, спрямованих на покращення та вдосконалення програми RLVW (Red Light Violation Warning). Знання про порушення правил проїзду на червоне світло можуть допомогти виявляти такі інциденти і завчасно сповіщати сусідні транспортні засоби, щоб вони могли вжити необхідних заходів. У дослідженні [38] автори запропонували системну модель для прогнозування проїзду на червоне світло, з метою зменшення кількості смертельних аварій, викликаних такими порушеннями. Модель передбачає використання датчиків LIDAR (виявлення і визначення дальності світла) на основі часу польоту (ToF) для розрахунку швидкості та алгоритму прогнозування, що використовує формулу відстані зупинки (SSD) для визначення гальмівного шляху в залежності від швидкості. ЛІДАР, розташований збоку та спереду автомобіля, може вимірювати швидкість транспортних засобів, що наближаються до перехрестя, та передбачити можливі порушення правил дорожнього руху. Традиційна технологія датчиків ToF LIDAR є широко застосовуваною завдяки своїй простоті, точності та чутливості, що робить її популярним вибором для оцінки швидкості та відстані порівняно з іншими методами вимірювання.

Аварійне електронне гальмівне світло (EEBL). Ця програма попереджає водіїв про екстрене різке гальмування, яке виконують транспортні засоби, що

рухаються попереду, щоб водії могли вжити необхідних заходів для уникнення аварії. Прапорець події екстреного різкого гальмування вказує на те, що подія була зафіксована у даних. Важливо зазначити, що елементи даних з прапорцями подій не включаються в базові повідомлення безпеки (BSM), за винятком випадків, коли один з цих прапорців встановлений в одиницю. Застосування EEBL (Emergency Emergency Braking Light) є особливо корисним у ситуаціях поганої видимості, таких як несприятливі погодні умови, наприклад, сильний дощ, або коли видимість обмежена іншими транспортними засобами.

Багато досліджень були спрямовані на покращення та розвиток продуктивності додатків EEBL (Emergency Emergency Braking Light). Наприклад, у роботі [39] автори порівнюють два підходи для оцінки важливості електронних звітів про гальмування в системах EEBL. Перший метод передбачає використання аналітичного рівняння, яке базується на схемі мінімальної відстані у потоці транспортних засобів. Другий метод використовує тактику машинного навчання, розроблену та запропоновану авторами.

У цьому контексті повідомлення про транспортні засоби, що сповільнилися, транслуються для інформування та попередження водіїв, які можуть потребувати екстреного гальмування. На основі актуальності цього повідомлення для водія, транспортні засоби вирішують, чи слід повідомляти водіїв. Смуга руху та напрямок даних були основними ознаками для визначення релевантності. Проте можливі хибнопозитивні попередження, що можуть призвести до ігнорування водіями таких попереджень або вимикання системи, що зменшує її безпекову ефективність. Аналіз показав, що модель машинного навчання перевершила аналітичний метод у зменшенні кількості хибнопозитивних попереджень завдяки навчанню на основі подальших дій водіїв після отримання звіту.

Попередження про швидкість на повороті (CSW). Додатки CSW розроблені для інформування водіїв про наближення до поворотів, якщо їхня

поточна швидкість є надто високою і небезпечною для проходження повороту. Додаток використовує дані, надані інфраструктурою, а також дані з датчиків транспортного засобу, щоб забезпечити рекомендовану безпечну швидкість. Рекомендована швидкість залежить від геометричної форми кривої, дорожніх і погодних умов у реальному часі, динаміки транспортних засобів і телематичної інформації про стабільність [40, 41].

Серна та ін. [42] розглянули питання відсутності врахування геометрії дороги в інтелектуальних системах адаптації швидкості. Базуючись лише на фіксованих обмеженнях швидкості, водії отримують лише попередження, коли вони перевищують запропоновану швидкість. Автори продемонстрували методологію динамічної адаптації швидкості, яка забезпечує ідеальну швидкість з урахуванням кривизни дороги. Вони також виконали аналіз кривих за допомогою алгоритму, який використовує автономні ідентифікатори даних GPS, що вказують на величезні сегменти кривизни і забезпечують оцінку швидкості для кожної кривої. Запропонована ними модель використовує дані GPS, засновані на кінематиці GPS в реальному часі, для визначення максимальної швидкості та визначення різкості кривизни дороги, щоб гарантувати плавний перехід між існуючими швидкостями. Модель була протестована за допомогою експериментальних симуляцій, які показали зменшення бічних помилок на крутих поворотах [42]. Ці результати були отримані з використанням підходу, заснованого на моделюванні, і було б також важливо, якби їхні висновки були додатково підтвержені за допомогою польових тестових експериментів, щоб забезпечити більш контекстуальний аналіз помилок. Крім того, кінематичний GPS в реальному часі, прийнятий в їхньому дослідженні, має високу точність позиціонування, але він все ще схильний до залишкових помилок в діапазонах великих і середніх відстаней.

Рух колонами. Спільне використання автомобілів/вантажівок у колонах вважається одним з найбільш перспективних застосувань, яке привертає значну

увагу як з боку автомобільної промисловості (наприклад, Volvo, Daimler і Scania), так і з боку академічних кіл. Очікується, що автомобілі/вантажівки у колоні підтримуватимуть безпечну дистанцію між транспортними засобами і синхронізовану швидкість, маршрути і гальмування завдяки використанню датчиків/радіолокаційних технологій, що забезпечується зв'язком V2V при тісному слідуванні за автомобілем/вантажівкою-лідером. Колони отримують вигоду від значного зменшення споживання пального, заторів, викидів шкідливих газів та аеродинамічного опору. Очікується, що вантажні транспортні засоби у колоні зможуть заощаджувати до 15% пального, коли будуть рухатися слідом за машиною-лідером. Навіть з урахуванням вищезазначених переваг, зв'язок між колонами може зазнавати перешкод між сусідніми/протилежними колонами, особливо на перехрестях, де можуть співіснувати кілька колон. Раптові перебої у роботі програмного/апаратного забезпечення, різномірні колони в реальних умовах та стабільність колон у – це лише деякі з проблем, пов'язаних із застосуванням такої технології експлуатації. Також проводились дослідження, спрямовані на вдосконалення як централізованих (де автомобілі спілкуються тільки з лідером колони), так і децентралізованих (взаємодія між транспортними засобами в колоні) систем [43]. У роботі [44] автори пропонують для цього сервісну структуру, що використовує централізований підхід на основі мобільних периферійних обчислень (MEC) для управління швидкістю та прискоренням транспортних засобів у колоні. В симуляторі SUMO досліджено вплив затримок у передачі даних по висхідній та низхідній лініях зв'язку, ймовірність втрати пакетів та затримки електромеханічного спрацьовування транспортних засобів.

В інших дослідженнях використовувався децентралізований підхід. Наприклад, у роботі [44] автори запропонували розподілений алгоритм розподілу ресурсів (виділення каналів і розподіл потужності), розроблений для колон на базі C-V2X. Оптимізаційні рішення на основі алгоритму навчання приймаються

машиною-лідером для розподілу оптимізованого піддіапазону і потужності переданих сигналів між машинами, що автоматично слідують за нею.

1.3.2. Інші застосування CV на автомобільному транспорті

Зважаючи на обсяг даних, якими обмінюються транспортні засоби, у взаємопов'язаних середовищах можна розробити багато додатків і сервісів, що не стосуються безпеки. Такі програми, як управління дорожнім рухом, спрямовані на зменшення заторів і покращення стану руху, що досягається шляхом обміну інформацією про моніторинг дорожнього руху, яка допомагає водіям змінювати маршрут, а дорожнім інженерам оптимізувати роботу світлофорів, тим самим зменшуючи вірогідність транспортних заторів на дорогах.

Остання миля визначається в транспортному плануванні та управлінні ланцюгами поставок як переміщення товарів і людей від транспортного вузла до кінцевого пункту призначення [45]. Зростаючий попит населення на онлайн-покупки значно збільшив кількість посилок, що доставляються кур'єрськими, експрес- та посылковими службами. Тому інноваційні рішення для доставки «останньої милі» з метою зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, пов'язаний з додатковим пробігом, стають необхідністю. До таких рішень належать, зокрема, вантажні велосипеди [45], напів- та повністю автономна доставка «останньої милі», дроїди-доставщики (боти), електронні палети, поштова доставка, доставка без водія та приватний безпілотний транспорт.

Такі дані CV, такі як напрямок руху, швидкість і положення в реальному часі, вважаються важливими елементами, що допомагають оптимізувати системи управління дорожнім рухом. Це стосується випадків, пов'язаних з безпекою та експлуатацією, коли управління світлофорами є необхідністю при співіснуванні різних транспортних потоків. Цього можна досягти за допомогою правил пріоритету, які включають в себе знаки зупинки, перехрестя і правила проїзду по

смузі, а також різні підходи до типу світлофорів як з фіксованим циклом, так і з адаптивним керуванням.

Автомобільні компанії, серед яких Volvo, Bosch та багато інших, використовують додатки для смартфонів для надання нових інноваційних послуг. Наприклад, додаток для смартфона може розблокувати автомобіль і запустити/зупинити двигун, надати доступ до авторизованих водіїв (наприклад, у сценаріях шерінгу), повідомити власника про майбутні послуги та дистанційно перевірити рівень палива [46, 47]. Іншим прикладом є цифрова карта водія, яку водії можуть використовувати для пошуку/резервування місць для паркування [46]. Потенціал цих додатків забезпечить безліч нових інноваційних послуг на автомобільному транспорті.

1.4. Висновки до розділу 1

Технологія підключених автомобілів приносить нові виклики та відкриває нові можливості, програми та послуги. Такі рішення варіюються від безключового доступу до автомобілів, цифрових карток для паркування, розумного управління дорожнім рухом до екологічних ініціатив, що стало можливим завдяки численним автомобільним датчикам і вдосконаленню бортових обчислень, мереж і комунікацій, ведучи до появи нових додатків, які забезпечують безпечніший, зручніший і екологічний досвід водіння.

У даному розділі було проведено глибокий аналіз і всебічний огляд технологій підключених автомобілів (CV), а також розглянуто ключові технології зв'язку, що їх підтримують, такі як DSRC і стільниковий зв'язок 5G. Надано рекомендації щодо технічних викликів, пов'язаних із технологією, оновлення, конфіденційність, безпека, інтеграція обчислень та питання зв'язку. Також було розглянуті питання безпечної експлуатації CV, привернуто увагу до відкритих

проблем і перспективних напрямків, які можуть суттєво підвищити ефективність управління транспортними операціями.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПІДКЛЮЧЕНИХ АВТОМОБІЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ VISSIM ВІД PTV

2.1. Можливості PTV VISSIM для моделювання підключених автомобілів

Підключені транспортні засоби (CV) можуть мати різні рівні автоматизації, різні функції автоматизації, різне сенсорне обладнання та різну логіку водіння. Методика моделювання таких транспортних засобів залежить від обсягу інформації, яку ви про них маєте.

Моделювання підключених автомобілів проведено за допомогою програмного забезпечення для транспортного мікромоделювання PTV VISSIM [48].

Якщо алгоритми логіки керування відомі або знаходяться на стадії розробки, один з інтерфейсів PTV Vissim може бути використаний для поєднання алгоритмів з PTV VISSIM, що дозволяє безпосередньо тестувати алгоритми, даючи можливість візуалізувати і порівняти взаємодію між CV, оснащеними алгоритмами, і звичайними транспортними засобами, що забезпечується моделлю PTV VISSIM.

Якщо алгоритми ще не відомі, для моделювання можна використати поведінку водія, що запропонована в PTV VISSIM. Важливо завжди враховувати очікувану поведінку автоматизованих транспортних засобів. Наприклад, рівень автоматизації 4 недостатній для мікроскопічного моделювання, оскільки він потребує знань або припущень про поведінку при зміні смуги, реагуванні на сигнали або вирішенні конфліктів, таких як розриви, пороги тощо. Використовуючи поведінку «людина-водіння» як еталон, можна визначити очікувану поведінку автоматизованих транспортних засобів, зокрема бажану

швидкість або прискорення (наприклад, підтримання швидкості та її змінюваність).

Базові функції взаємодії вже реалізовані в PTV VISSIM, але ці функції були розроблені для моделювання взаємодії людей. Взаємодія, що виходить за ці межі, повинна бути відображена іншим способом.

Комунікація та співпраця можуть бути складним процесом зі складними або простими результатами та наслідками. Наприклад, якщо вплив комунікації між транспортними засобами призводить до зменшення швидкості руху між ними, ви можете досягти цього, змінивши параметри поведінки водія.

Для того, щоб врахувати різну поведінку транспортних засобів під час руху, певні властивості об'єднуються в репрезентативні набори параметрів поведінки. За замовчуванням можуть бути попередньо визначені наступні набори параметрів стилю водіння. Значення атрибутів кожного з них представляють типовий тип поведінки під час водіння [48]:

- Міський (моторизований)
- Правило повільного руху (моторизовані)
- За містом (вільний вибір смуги)
- Пішохідна доріжка (без взаємодії)
- Велодоріжка (вільний обгін).

Також існує можливість визначити додаткові набори параметрів поведінки водіння та значення атрибутів, які відповідають вашим вимогам. Кожен автоматизований автомобіль використовує свою логіку водіння. Замість того, щоб розрізнити логіку водіння виробника автомобіля або компанії, PTV VISSIM працює з 4 основними логіками водіння. Якщо попередньо визначено наведені нижче режими водіння, можна імітувати типові режими водіння підключених та автономних транспортних засобів (CAV) [49]:

AV безпечний (CoEXist): вимагає специфічних параметрів і особливого підходу до моделювання. Логіка безпечного водіння описує детерміновану

поведінку в закритому, контрольованому середовищі, подібному до портів або заводів. Вона включає наявність фізично відокремлених смуг руху або значних бічних відстаней, чітко визначений маршрут для транспортних засобів, відсутність зміни смуги та перехресть без світлофорів. Крім того, дистанція зупинки завжди залишається активною.

AV обережний (CoEXist): транспортний засіб дотримується правил дорожнього руху і завжди дотримується безпечної поведінки під час руху. Транспортний засіб завжди застосовує атрибут «Дотримуватися абсолютного гальмівного шляху» і таким чином зберігає відносно велику дистанцію до інших транспортних засобів (редагування параметра «Поведінка водія - Дотримуватися поведінки»). Транспортний засіб може перетинати нерегульоване перехрестя та змінювати смугу руху.

AV нормальний (CoEXist): поведінка автономного (підключеного) транспортного засобу порівнянна з поведінкою неавтономних транспортних засобів. Крім того, система датчиків у транспортному засобі може визначати відстань до інших транспортних засобів поблизу та швидкість, з якою вони рухаються.

AV агресивний (CoEXist) (все знає): усвідомлюючи всю дорожню ситуацію і оснащений прогнозом дорожньої ситуації, автономний (підключений) транспортний засіб здатний залишати лише мінімальні проміжки для інших транспортних засобів. Така поведінка призводить до кооперативного водіння.

Модель транспортного потоку PTV Vissim – це стохастична мікроскопічна модель, що базується на часовому кроці і розглядає водія та транспортний засіб як базові одиниці.

Оскільки модель враховує психологічні аспекти, а також фізіологічні обмеження сприйняття водіїв, вона називається психофізичною моделлю слідування за лідером. Вона містить психофізичну модель слідування за автомобілем для поздовжнього руху транспортного засобу та алгоритм,

заснований на правилах, для поперечного руху транспортного засобу. Застосовані моделі ґрунтуються на обширній дослідницькій роботі Відемана [48].

Модель транспортного потоку Відемана (Wiedemann 74 та Wiedemann 99) базується на припущенні, що водій може перебувати в чотирьох різних станах:

Вільне водіння: у цьому режимі водій не відчуває впливу транспортних засобів, що рухаються попереду, і прагне досягти та підтримувати бажану швидкість. Швидкість при вільному водінні може коливатися навколо заданого значення через недосконале регулювання газу.

Наближення: це процес адаптації швидкості водієм до меншої швидкості автомобіля, що їде попереду. Під час наближення водій сповільнюється, щоб досягти безпечної відстані, зменшивши різницю у швидкості між своїм автомобілем і попереднім.

Слідування: водій слідує за попереднім автомобілем, підтримуючи безпечну дистанцію, без свідомого регулювання швидкості. Хоча дистанція залишається відносно стабільною, швидкість може коливатися навколо нульової різниці через недосконале управління дроселем.

Гальмування: водій застосовує середнє або сильне уповільнення, якщо відстань до автомобіля попереду зменшується до рівня, менше ніж бажана безпечна відстань. Це може статися через різке зменшення швидкості автомобіля попереду або через те, що третій автомобіль змінює смугу, намагаючись вписатися між двома транспортними засобами.

Для моделі Wiedemann 74 у частині слідування за транспортним засобом доступні такі параметри:

Середня відстань у спокої (w_{74ax}): базове значення середньої бажаної відстані між двома нерухомими автомобілями. Допуск знаходиться в діапазоні від $-1,0$ м до $+1,0$ м, який зазвичай розподіляється приблизно на $0,0$ м, зі стандартним відхиленням $0,3$ м. Це призводить до «стохастичного розмазування» ax . За замовчуванням дорівнює $2,0$ м.

Додаткова частина безпечної відстані (w74bxAdd): параметр, що використовується для розрахунку бажаної безпечної відстані d . Дозволяє регулювати значення вимог часу. За замовчуванням – 2,0 м.

Множна частина безпечної відстані (w74bxMult): значення, що використовується для розрахунку бажаної безпечної відстані d . Дозволяє регулювати значення вимог часу. Більше значення = більший розподіл (стандартне відхилення) безпечної відстані. За замовчуванням – 3,0 м.

Для моделі Wiedemann 99 доступні такі параметри:

CC0: відстань без руху: бажана відстань між двома транспортними засобами, не має варіацій.

CC1: відстань слідування – розподіл часу, що залежить від швидкості, для частини бажаної безпечної відстані. Показує тип і параметри розподілу часу, які можуть бути як емпіричними, так і нормальними. Кожен транспортний засіб має індивідуальну випадкову змінну безпеки, яку Vissim використовує як фрактил для вибраного розподілу часу *CC1*. На основі цього розподілу розраховується наступна відстань для автомобіля. Це відстань у секундах, яку водій прагне підтримувати на певній швидкості; чим більше значення, тим обережніший водій. Безпечна відстань у моделі автомобіля визначається як мінімальна відстань, яку водій буде підтримувати, рухаючись за іншим транспортним засобом. У випадку великих обсягів руху ця відстань має значний вплив на пропускну здатність дороги.

CC2: поздовжні коливання – параметр, який обмежує максимальну різницю у відстані, яку водій дозволяє між своїм автомобілем і автомобілем, що їде попереду, перш ніж навмисно наблизитися до останнього. Значення за замовчуванням становить 4,0 м, що забезпечує відносно стабільну поведінку водія.

CC3: поріг сприйняття для слідування – параметр, який визначає момент початку процесу уповільнення, тобто кількість секунд, через яку водій почне

адаптувати свою швидкість для досягнення безпечної відстані. На цьому етапі водій виявляє, що автомобіль попереду рухається повільніше.

СС4: негативна різниця швидкості – визначає від’ємну різницю в швидкості під час процесу слідування. Низькі значення негативної різниці швидкості призводять до більш чутливої реакції водія на зміни швидкості автомобіля, що рухається попереду, як то прискорення або уповільнення.

СС5: позитивна різниця швидкості – визначає позитивну різницю в швидкості під час процесу слідування. Низькі значення позитивної різниці швидкості призводять до більш чутливої реакції водія на прискорення або уповільнення автомобіля, що рухається попереду.

СС6: визначає вплив відстані на коливання швидкості під час наступного процесу: якщо значення параметра дорівнюють 0, то коливання швидкості не залежать від відстані, якщо використовуються більші значення, то це призводить до більших коливань швидкості зі збільшенням відстані.

СС7: прискорення коливань – мінімальне значення абсолютного прискорення або уповільнення, яке водій використовує під час слідування за іншим транспортним засобом.

СС8: прискорення, починаючи з місця – це бажане прискорення, яке застосовується при старті з місця. Воно обмежується максимальним прискоренням, яке визначено в кривих прискорення для транспортного засобу.

СС9: прискорення при 80 км/год – бажане прискорення при 80 км/год (обмежене максимальним прискоренням, визначеним у кривих прискорення).

PTV VISSIM розрізняє такі типи змін смуги руху:

Необхідна зміна смуги: це зміна смуги, яка необхідна для того, щоб дістатися до наступного сполучення маршруту. Для такої зміни смуги параметри поведінки водіння включають максимально допустиме уповільнення як для транспортного засобу, що змінює смугу, так і для транспортного засобу, що йде за

ним на новій смузі. Уповільнення залежить від відстані до позиції аварійної зупинки на наступному сполучному пункті.

Вільна зміна смуги: це зміна смуги, яка виконується, якщо потрібно більше місця на новій смузі або якщо водій хоче довше їхати на бажаній швидкості. Під час вільної зміни смуги PTV VISSIM перевіряє, чи дотримуються обидві бажані безпечні відстані на новій смузі:

Бажана безпечна відстань між транспортним засобом, що прямує, і транспортним засобом, що змінює смугу.

Бажана безпечна відстань між транспортним засобом, що змінює смугу, і транспортним засобом, що їде попереду.

Коефіцієнт зменшення безпечної відстані застосовується до обох бажаних безпечних відстаней (рис.2.1).

The screenshot shows the 'Driving Behavior' dialog box with the 'Lane Change' tab selected. The 'General behavior' is set to 'Free lane selection'. The 'Necessary lane change (route)' section has a dropdown menu. Below this, there are two columns for 'Own' and 'Trailing vehicle' with the following parameters:

	Own	Trailing vehicle
Maximum deceleration:	-4.00 m/s ²	-4.00 m/s ²
- 1 m/s ² per distance:	100.00 m	100.00 m
Accepted deceleration:	-1.00 m/s ²	-1.50 m/s ²

Other parameters include:

- Waiting time before diffusion: 60.00 s
- Min. net headway (front to rear): 0.50 m
- To slower lane if collision time is above: 11.00 s
- Safety distance reduction factor: 0.75
- Maximum deceleration for cooperative braking: -6.00 m/s²
- Cooperative lane change: (highlighted)
- Maximum speed difference: 10.80 km/h (highlighted)
- Maximum collision time: 10.00 s (highlighted)
- Rear correction of lateral position:
- Maximum speed: 3.00 km/h
- Active during time period from 1.00 s until 10.00 s after lane change start

Additional options: Overtake reduced speed areas, Advanced merging (highlighted), Vehicle routing decisions look ahead.

Buttons: OK, Cancel

Рис.2.1. Вікно поведінки водіння у PTV VISSIM 2024, де виділено розширене об'єднання та параметри для кооперативної зміни смуги руху.

За замовчуванням у PTV VISSIM транспортний засіб використовує всю ширину смуги. Існує можливість налаштувати поведінку водіння та параметри бокової поведінки, щоб визначити, чи можуть транспортні засоби на смузі руху розташовуватися ліворуч, праворуч або посередині смуги, без явного визначення бокової орієнтації.

Якщо смуга достатньо широка і параметри в розділі *«Поведінка за замовчуванням при обгоні транспортних засобів на тій самій смузі або на суміжних смугах»* дозволяють обгін, можливі також маневри обгону на одній смузі. У випадку, коли максимальне уповільнення заважає транспортному засобу, що обганяє, вчасно загальмувати, він, якщо це можливо, продовжує обгін навіть попри те, що це може бути заборонено параметрами поведінки водіння. При цьому враховується напрямок повороту та мінімальна бічна відстань. Тобто, неправильний обгін вважається більш прийнятним варіантом, ніж зіткнення.

2.2. Зменшення стохастичності при моделюванні

Стохастичні залежності було впроваджено в PTV VISSIM, щоб відобразити випадковість поведінки людини за кермом. У PTV VISSIM доступні два типи стохастичних залежностей: явна стохастика, що визначається функціями та розподілами, які користувач може змінювати безпосередньо, та неявна стохастика, яка закодована жорстко і не може бути змінена користувачем. Проте, починаючи з PTV VISSIM 11, її можна увімкнути або вимкнути через діалогове вікно або список поведінки водіння (вкладка *«Слідування»*), де за замовчуванням вона увімкнена.

Очікується, що CV поводитимуться детерміновано, а не стохастично, як люди-водії. Це може вплинути на поведінку прискорення та уповільнення.

Виходячи з цього припущення, розробник моделі може зменшити розкид статистичних значень для окремих транспортних засобів для:

- Бажане прискорення
- Бажане уповільнення
- Максимальне прискорення
- Максимальне уповільнення

Зменшення можна здійснити, просто змінивши максимальні та мінімальні криві, наблизивши їх до середньої кривої або помістивши їх на середню криву (рис.2.2).

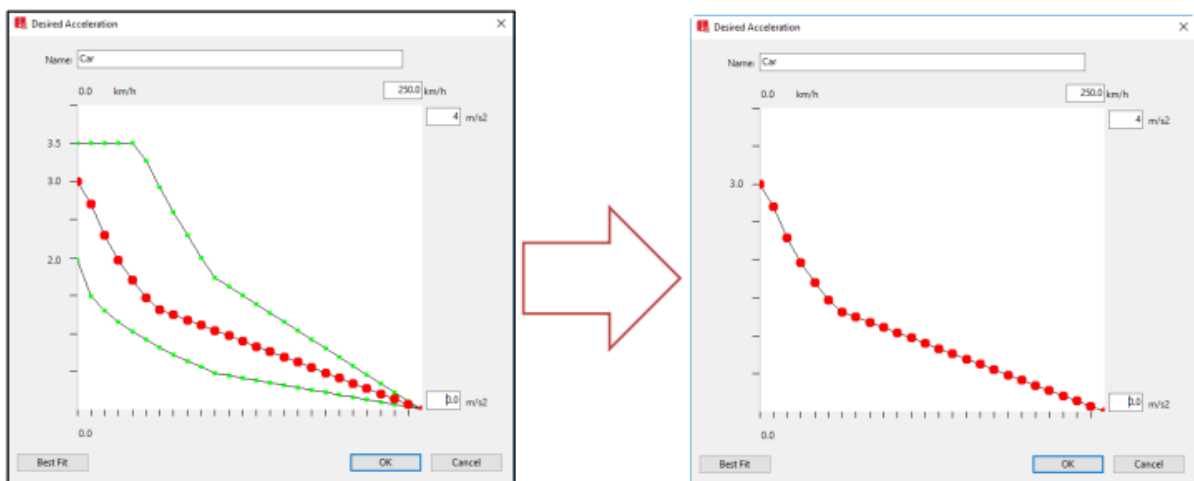


Рис.2.2. Приклад можливої модифікації потрібної кривої прискорення

Щоб внести цю зміну, розробник моделі може скористатися списком відповідної функції, пов'язаним зі списком Data Points, і скопіювати значення Y до параметрів y_{Min} і y_{Max} . Потім ці значення можна помножити на відповідний коефіцієнт або змінити вручну (рис.2.3).

Maximum Acceleration Functions / Data Points				
Select layout...				
Count: 6	No	Name		
1	1	Car		
2	2	HGV		
3	3	Bus		
4	4	Tram		
5	5	Pedestrian		
6	6	Bike		

Count: 26	X	Y	yMin	yMax
1	0.00	3.50	1.96	3.50
2	10.00	3.20	1.49	3.50
3	20.00	2.79	1.30	3.50
4	30.00	2.47	1.15	3.50
5	40.00	2.20	1.03	3.50
6	50.00	1.96	0.92	3.27
7	60.00	1.75	0.82	2.92
8	70.00	1.55	0.72	2.59

Рис.2.3. Ілюстрація того, як змінити функцію максимального прискорення

Функція розподілу бажаних швидкостей є критично важливим параметром, оскільки вона впливає на пропускну здатність дороги та час досягнення кінцевої точки. Бажана швидкість – це швидкість, яку водій хоче підтримувати. Реальна швидкість визначається взаємодією з іншими водіями та об'єктами в симуляції, і кожному транспортному засобу присвоюється індивідуальна бажана швидкість згідно з розподілом швидкості руху.

У випадку з людьми-водіями спостерігається значне розсіювання бажаних швидкостей. Водночас автоматизовані транспортні засоби можуть демонструвати значно менше розсіювання, оскільки вони, ймовірно, суворо дотримуються встановлених обмежень швидкості. Тому автоматизовані транспортні засоби можуть використовувати інший розподіл бажаних швидкостей порівняно з традиційними транспортними засобами. Для цього створюється новий розподіл швидкості, який використовується лише автоматизованими транспортними засобами, і встановлюються відповідні межі розподілу (рис.2.4).

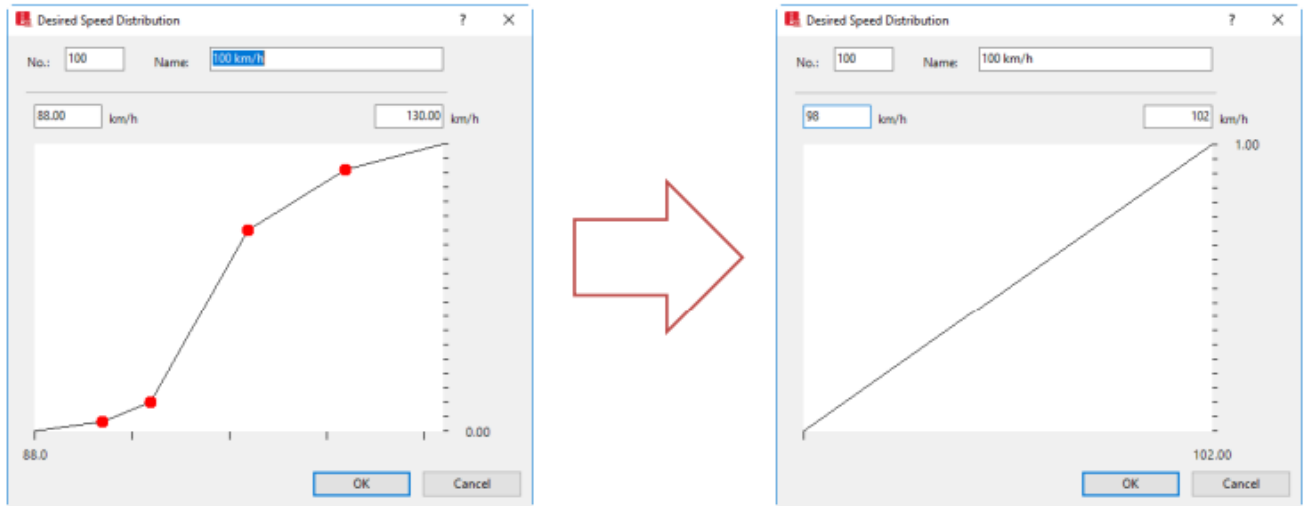


Рис.2.4. Приклад модифікації бажаного розподілу швидкості

Час є критично важливим розподілом, оскільки він використовується для визначення керуючого параметра $CC1$, який впливає на пропускну здатність дороги. $CC1$ – це розподіл у часі частини бажаної безпечної дистанції, яка залежить від швидкості. Кожен розподіл часу може бути як емпіричним, так і нормальним. Кожному транспортному засобу присвоюється індивідуальна випадкова змінна безпеки, яку PTV VISSIM використовує як фрактиль для вибраного розподілу часу $CC1$. Якщо необхідно, випадковість можна вимкнути, деактивувавши неявну стохастичку.

Відповідне значення для розподілу часу параметра $CC1$ залежить від очікуваної поведінки автоматизованого транспортного засобу. Це значення може бути більшим для обережних транспортних засобів або меншим для транспортних засобів, які мають високий рівень автоматизації, порівняно з за замовчуванням значенням для звичайних транспортних засобів (0,9 с).

2.3. Особливості налаштування моделі при внутрішньому способі моделювання (без COM)

PTV VISSIM дозволяє визначати поведінку водіння, залежну від класу автомобіля, для кожного відрізка чи з'єднувального відрізка у мережі. Це означає, що різні транспортні засоби можуть по-різному поводитися на одному відрізку, наприклад, автомобілі та вантажні автомобілі або звичайні автомобілі та автоматизовані автомобілі.

PTV VISSIM пропонує попередньо визначені режими водіння, які користувач може легко налаштувати. Розробники програмного забезпечення рекомендують скопіювати конкретну(-і) поведінку(-и) водіння, відкоригувати їх, якщо необхідно, а потім використовувати у подальшій симуляції.

Поведінка водіння автоматизованих транспортних засобів ще не ретельно перевіряється та не порівнюється з реальним світом через простий факт, що вона не має достатньо великої кількості даних або перевірених сценаріїв для порівняння з реальними умовами на дорозі. Значення керівних параметрів, запропоновані PTV, базуються на емпіричних дослідженнях і даних спільного моделювання, зібраних у проєкті CoEXist (лише для поведінки слідування), а також на кількох припущеннях.

У списку типів поведінки можна вказати, яка поведінка водіння використовуватиметься за замовчуванням, а в пов'язаному правому списку поведінки водіння – додаткові параметри для конкретних класів транспортних засобів. Це дозволяє, наприклад, налаштувати, щоб транспортний засіб класу Car_AV_cautious поведився інакше порівняно зі звичайним автомобілем (рис.2.5).

The screenshot shows the 'Link Behavior Types / Driving Behaviors By Vehicle Class' window. It contains two tables side-by-side. The left table lists driving behavior types, and the right table lists specific vehicle classes and their assigned driving behaviors.

Count	No	Name	DrivBehavDef
1	1	Urban (motorized)	1: Urban (motorized)
2	2	Right-side rule (motorized)	2: Right-side rule (motorized)
3	3	Freeway (free lane selection)	3: Freeway (free lane selection)
4	4	Footpath (no interaction)	4: Footpath (no interaction)
5	5	Cycle-Track (free overtaking)	5: Cycle-Track (free overtaking)

Count	VehClass	DrivBehav
1	101: Car_AV_cautious	101: AV_cautious
2	102: Car_AV_normal	102: AV_normal
3	103: Car_AV_allknowin	103: AV_allknowing

Рис.2.5. Приклад налаштування різних поведінок водіння для класів транспортних засобів

У реальному світі або в сценарії область дослідження може бути просторово розділена на кілька зон, де необхідна різна логіка руху. Наприклад, у частині міста, що орієнтована на автоматизовані транспортні засоби (CV), можуть використовуватися звичайні логіки водіння, тоді як в інших зонах, де потрібна обережна логіка водіння, ці параметри можуть змінюватися. Щоб реалізувати це, слід визначити типи поведінки на відрізку, які покривають всі можливі сценарії для CV, і потім призначити відповідні типи поведінки для кожної частини моделі. В результаті один і той же транспортний засіб може використовувати різні логіки водіння в різних зонах мережі.

Аналогічно, автоматизований транспортний засіб може рухатись за логікою «агресивне водіння» через мережу, але діяти як безпечний або обережний транспортний засіб у гаражі чи спільному просторі (рис.2.6).

The screenshot shows a software window titled "Link Behavior Types / Driving Behaviors By Vehicle Class". It contains two tables side-by-side. The left table lists general driving behavior definitions, and the right table shows how these are assigned to specific vehicle classes on different link types.

Count	No	Name	DrivBehavDef
1	1	Urban (motorized)	1: Urban (motorized)
2	2	Right-side rule (motorized)	2: Right-side rule (motorized)
3	3	Freeway (free lane selection)	3: Freeway (free lane selection)
4	4	Footpath (no interaction)	4: Footpath (no interaction)
5	5	Cycle-Track (free overtaking)	5: Cycle-Track (free overtaking)
6	6	Freeway AV-friendly	3: Freeway (free lane selection)
7	7	Freeway AV-challenging	3: Freeway (free lane selection)

Count	LinkBehavType/Name	VehClass	DrivBehav
1	Freeway AV-friendly	101: Car_AV_cautious	101: AV_cautious
2	Freeway AV-friendly	102: Car_AV_normal	102: AV_normal
3	Freeway AV-friendly	103: Car_AV_allknowin	103: AV_allknowing
4	Freeway AV-challenging	101: Car_AV_cautious	101: AV_cautious
5	Freeway AV-challenging	102: Car_AV_normal	101: AV_cautious
6	Freeway AV-challenging	103: Car_AV_allknowin	101: AV_cautious

Рис.2.6. Приклад налаштування різних поведінок водіння на різних типах відрізків

Кілька додаткових атрибутів доступні в діалогових вікнах поведінки водіння, починаючи з PTV VISSIM 11. Більшість з них потрібні в основному для моделювання CAV (підключених та/або автоматизованих транспортних засобів), але багато з них також можна використовувати для калібрування поведінки водія (рис.2.7).

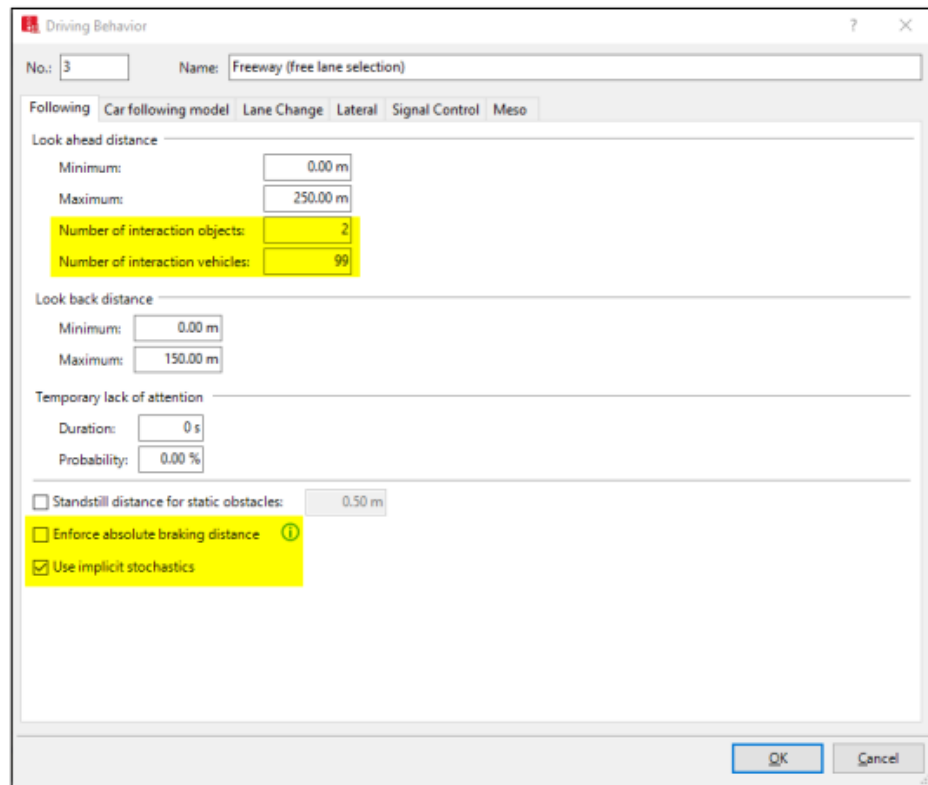


Рис.2.7. Вікно поведінки водіння з відповідними атрибутами, виділеними ЖОВТИМ

Табл.2.1

**Рекомендовані розробником налаштування для властивостей,
пов'язаних з CV**

Логіка водіння	Забезпечення абсолютного гальмівного шляху	Використання неявної стохастики	Кількість підключених транспортних засобів	Збільшене рекомендоване прискорення
Безпечна	+	-	1	100%
Обережна	+	-	1	100%
Нормальна	-	-	1	100-110%
Агресивна	-	-	>1	110%

Якщо позначено атрибут «Застосувати абсолютний гальмівний шлях» (він же зупиночна відстань «цегляна стіна»), транспортні засоби, які використовують цю поведінку водіння, завжди переконуються, що вони можуть загальмувати без зіткнення, навіть якщо автомобіль, що йде попереду, миттєво зупиняється (перетворюється на цегляну стіну).

Ця умова також застосовується:

- на зміну смуги для самого транспортного засобу на новій смузі та для транспортного засобу, що їде на новій смузі, і
- до конфліктних зон для наступного транспортного засобу на головній дорозі.
- Слідування (рис.2.8)



Відстань слідування=відстань гальмування+ відстань у спокою

Рис.2.8. Визначення відстані слідування

- Зміна смуги руху (рис.2.9)



Рис.2.9. Відстані, пов'язані із процесом зміни смуги руху

- Прийняття розривів потоку на перехрестях (лише конфліктні зони) (рис.2.10)



Рис.2.10. Ілюстрація розривів потоку на перехресті

Активація «Застосування абсолютного гальмівного шляху» рекомендована для транспортних засобів із безпечною та обережною логікою водіння.

Якщо атрибут «Використовувати неявну стохастичку» не активований (що є значенням за замовчуванням), транспортний засіб, що використовує цю опцію, не застосовує внутрішню стохастичну варіацію, яка призначена для моделювання недосконалостей поведінки водія. Для всіх розподілів, які не можуть бути явно визначені користувачем, медіанне значення використовуються замість випадкових значень.

Це впливає на: безпечні відстані, бажане прискорення, бажане уповільнення, невизначеність оцінки рішень щодо гальмування.

Три первинні змінні частково визначаються атрибутами або функціями, що є доступними для користувача, тому ця частина моделі залишається актуальною. Однак додатковий стохастичний розподіл, включений в інтегровану модель, зводиться до нуля.

Рекомендується деактивувати опцію «Використовувати неявну стохастичку» для всіх автоматизованих транспортних засобів або для тієї частини інфраструктури, де транспортний засіб функціонує в автоматизованому режимі.

Це дозволяє уникнути впливу внутрішніх стохастичних варіацій і забезпечує більш точне моделювання поведінки автоматизованих транспортних засобів.

Атрибут кількості спостережуваних транспортних засобів, починаючи з PTV VISSIM 10, був розділений на два підатрибути:

- Кількість об'єктів взаємодії стосується транспортних засобів і внутрішніх об'єктів (зони зниженої швидкості, знаки зупинки, правила пріоритету);
- Кількість транспортних засобів взаємодії – стосується лише реальних транспортних засобів.

За замовчуванням у моделі Wiedemann 99 кількість об'єктів взаємодії становить 2, тоді як кількість засобів взаємодії дорівнює 99, що є максимальним можливим значенням. Хоча можна ввести більше суб'єктів взаємодії, ніж об'єктів, кількість об'єктів взаємодії завжди є обмежуючим фактором. Якщо кількість транспортних засобів взаємодії дорівнює або перевищує кількість об'єктів взаємодії, результат буде аналогічний тому, який отримується у PTV VISSIM 2024 або у більш ранніх версіях. Якщо встановити кількість транспортних засобів взаємодії менше, ніж кількість об'єктів взаємодії, це призведе до обмеження числа видимих транспортних засобів лише в межах видимих об'єктів взаємодії.

На вкладці на сторінці «*Car following model*» (Модель слідування за лідером) в діалоговому вікні «*Vehicle Class Following Behavior*» (Поведінка слідування за автомобілем-лідером даного класу) або у відповідному списку є можливість вказувати деякі значення параметрів, що впливають на бажану безпечну відстань, для класу транспортного засобу, що рухається попереду, поряд із значеннями для всіх інших транспортних засобів (рис.2.11, рис.2.12).

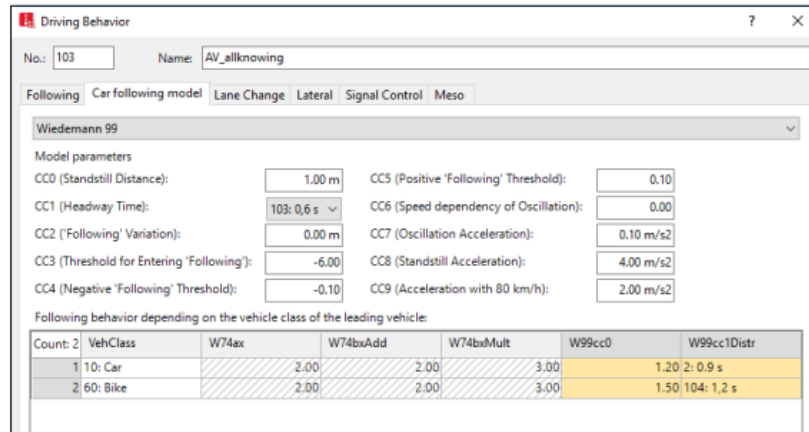


Рис.2.11. Приклад різних налаштувань відстані між транспортними засобами у потоці в залежності від класу транспортного засобу, що рухається попереду

Count: 8	No	Name	NumInteractObj	StandDistisFix	StandDist	CarFollowModType	W74bxA
1	1	Urban (motorized)	4	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 74	
2	2	Right-side rule (motorized)	2	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 99	
3	3	Freeway (free lane selection)	2	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 99	
4	4	Footpath (no interaction)	2	<input type="checkbox"/>	0.50	No interaction	
5	5	Cycle-Track (free overtaking)	2	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 99	
6	101	AV_cautious (CoExist)	2	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 99	
7	102	AV_normal (CoExist)	2	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 99	
8	103	AV_allknowing (CoExist)	10	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 99	

Count: 2	VehClass	W74ax	W74bxAdd	W74bxMult	W99cc0	W99cc1Distr	IncrsAccel
1	10: Car	2,00	2,00	3,00	1,00	2: 0,9 s	100,0 %
2	60: Bike	2,00	2,00	3,00	1,00	102: 1,5 s	100,0 %

Рис.2.12. Перелік класів транспортних засобів, що слідують за лідером, тепер дозволяє вказувати деякі значення параметрів, що впливають на бажану безпечну відстань, для кожного окремого класу транспортного засобу, що рухається попереду.

Звичайна поведінка водія при русі в потоці не дозволяє використовувати достовірну інформацію про майбутню поведінку транспортного засобу, що рухається попереду, через що звичайні автомобілі у PTV VISSIM мають тенденцію відставати, коли транспортний засіб попереду прискорюється. Натомість автоматизовані транспортні засоби, особливо ті, що використовують зв'язок «автомобіль-автомобіль» (C2C), можуть підтримувати щільне зчеплення з незначним випередженням, що дозволяє їм реагувати більш швидко і ефективно.

Якщо атрибут «*Increased acceleration*» (підвищене прискорення) встановлено на значення, що перевищує 100%, транспортний засіб, що використовує цю поведінку водіння, може прискорюватися на зазначений відсоток від свого нормального бажаного прискорення. Проте це прискорення не перевищуватиме його максимального значення, навіть якщо транспортний засіб попереду рухається швидше і прискорюється (рис.2.13).

Count	B	No	Name	NumInteractObj	CarFollowModType	IncrsAccel
1	1	Urban (motorized)		4	Wiedemann 74	100.0 %
2	2	Right-side rule (motorized)		2	Wiedemann 99	100.0 %
3	3	Freeway (free lane selection)		2	Wiedemann 99	100.0 %
4	4	Footpath (no interaction)		2	No interaction	100.0 %
5	5	Cycle-Track (free overtaking)		2	Wiedemann 99	100.0 %
6	101	AV_cautious		2	Wiedemann 99	100.0 %
7	102	AV_normal		2	Wiedemann 99	105.0 %
8	103	AV_allknowing		2	Wiedemann 99	110.0 %

Count	2	VehClass	W74ax	W74bxAdd	W74bxMult	W99cc0	W99cc1Distr	IncrsAccel
1	10:	Car	2.00	2.00	3.00	1.00	2: 0.9 s	100.0 %
2	60:	Bike	2.00	2.00	3.00	1.00	101: 2 s	100.0 %

Рис.2.13. Список стилів водіння/класів транспортних засобів, для яких можна встановити підвищене прискорення

Для порожніх автоматизованих транспортних засобів (без пасажирів) можна визначити емпіричний розподіл заповнюваності, який містить нуль пасажирів (у списку «*Data points*»).

Count	2	No	Name	Type	LowerBound	UpperBound	StdDev	Mean
1	1	Single Occupancy		Normal	1.00	1.00	0.00	1.00
2	2	Zero occupancy		Empirical	0.00	0.00	0.00	1.00

Count	2	X	FX
1		0.00	0.00
2		0.00	1.00

Рис.2.14.. Розподіл заповнюваності / Список точок даних

Таблиці, представлені в Додатках А, надають рекомендації щодо коригування параметрів поведінки водія для моделювання Connected Vehicles (CV). Конкретні числові значення, запропоновані у проекті CoEXist, які можна

використовувати як початкові налаштування, доступні у вигляді трьох додаткових режимів водіння безпосередньо у файлі мережі за замовчуванням. Це забезпечує їх появу у списку режимів водіння після відкриття PTV VISSIM або створення нового файлу. Конкретні значення параметрів, які представлені для обережної, нормальною та обізнаної поведінки водія, не є єдиними можливими. Розвиток у сфері автоматизованих транспортних засобів відбувається дуже швидко, і на поведінку водія впливають численні фактори, такі як законодавчі та правові аспекти, апаратне та програмне забезпечення, погодні умови та умови видимості.

Через детерміновану поведінку автоматизованих транспортних засобів і для відображення значно менших коливань у русі транспортного засобу:

СС2 можна зменшити до нуля

СС4 і СС5 можуть бути значно зменшені

СС6 можна зменшити до нуля.

Для поведінки при зміні смуги руху найважливішим параметром є коефіцієнт зменшення безпечної дистанції, який за замовчуванням у PTV VISSIM встановлений на 0,6. Це означає, що транспортні засоби приймають менші інтервали при зміні смуги руху порівняно з перестроюванням.

Для автоматизованих транспортних засобів коефіцієнт зменшення безпечної дистанції може бути як вищим, так і нижчим за значення за замовчуванням, залежно від логіки водіння або передбачуваної поведінки під час маневрів зі зміни смуги руху. Існують різні значення за замовчуванням для міської та швидкісної їзди. Для включення автоматизованих транспортних засобів рекомендується використовувати два типи поведінки: один для міських доріг та інший для інфраструктури типу автомагістралі.

У CoExist немає жодних пропозицій щодо бічної поведінки при водінні. Автоматизовані транспортні засоби, ймовірно, намагатимуться утримувати бічну позицію посередині смуги руху. Можуть існувати вимоги щодо бічної відстані до інших учасників дорожнього руху, особливо до вразливих учасників дорожнього

руху. Їх можна визначити залежно від класу в діалоговому вікні «Lateral» відповідно до очікуваної поведінки автоматизованого транспортного засобу.

Для поведінки сигналу керування важливим є правильне визначення зменшеного коефіцієнта безпечної відстані. За замовчуванням цей параметр встановлено на 0,6. Для автоматизованих транспортних засобів він може бути встановлений на 1, якщо очікується, що вони не змінюватимуть безпечну дистанцію поблизу перехрестя, що регулюється сигналом світлофора.

З іншого боку, якщо очікується, що автоматизовані транспортні засоби також скоротять безпечну дистанцію на перехрестях, то необхідним стає встановити значення даного параметру меншим за 1. Безпосередньо близькість транспортних засобів описується зменшеним безпечним початком (кінцем) потоку вгору (вниз) від стоп-лінії.

При тестуванні сценаріїв з CV часто виникає потреба оцінити різні рівні проникнення різних типів CV. Для вирішення цієї задачі можна змінювати склад потоку транспортних засобів, регулюючи частку CV у загальному потоці.

Взаємодія між транспортними засобами та пішоходами моделюється у вигляді конфліктних зон, які блокують певну ділянку, якщо транспортний засіб або пішохід перебуває в межах цієї ділянки або наблизився до неї. У цьому випадку інші користувачі мережі не мають права користуватися цією зоною.

Транспортні засоби, що блокують конфліктну зону, тепер можна розглядати в динамічному потенціалі для конфліктуючих пішоходів. Якщо ця опція активована на пішохідному переході, пішоходи не зупинятимуться на заблокованій зоні конфлікту, а намагатимуться обійти її через проміжки між транспортними засобами, що стоять у черзі. Для цього смуги руху на пішохідному переході мають бути достатньо вузькими.

2.4. Висновки до розділу 2

Моделювання автоматизованих транспортних засобів вимагає специфічних параметрів і функцій через фундаментальні відмінності у їх поведінці.

Динамічні характеристики транспортного засобу, такі як прискорення та сповільнення, зазвичай представлені функціями і повинні бути налаштовані відповідно до сценарію в PTV VISSIM. Бажані швидкості транспортних засобів зазвичай подаються у вигляді розподілів і також потребують налаштування відповідно до сценарію.

Стохастичні елементи можуть бути представлені по-різному в PTV VISSIM. Необхідним стає оцінка всіх можливостей для зменшення стохастичності, яка спочатку використовувалася для імітації поведінки людини за кермом.

Програмні засоби оснащені спеціальними функціями для автоматизованих транспортних засобів, такими як дотримання дистанції до об'єктів, наприклад, стін або інших перешкод. Необхідно ретельно вивчити ці функції і використовувати їх обережно, особливо при налаштуванні значень параметрів, які повинні бути в розумному діапазоні. Виробники програмного забезпечення PTV VISSIM зазвичай надають значення за замовчуванням або рекомендовані значення, а також іноді визначають рекомендовані діапазони.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ V2V ТА V2I НА ПРИКЛАДІ МІСЬКОЇ КІЛЬЦЕВОЇ РОЗВ'ЯЗКИ

3.1. Загальна методологія досліджень

Для оцінки впливу підвищення рівня автоматизації автодорожніх транспортних засобів на дорожній рух на прикладі міста Кривий Ріг розроблено мікроімітаційну модель у програмному забезпеченні PTV VISSIM [48]. Процес застосування транспортних мікроімітаційних моделей включав такі етапи:

1. формулювання цілей та обсягу дослідження,
2. збір вхідних даних,
3. побудова базової мікроімітаційної моделі,
4. верифікація моделі,
5. калібрування моделі,
6. валідація моделі,
7. аналіз альтернатив.

Завдяки сервісу Google Maps отримано супутникове зображення області дослідження, яке буде використовуватися для моделювання в програмі PTV VISSIM. Супутникові знімки дозволяють детально розглянути маршрути доріг, пішохідні переходи, зупинки та інші важливі елементи для створення моделі.

Першим етапом у розробці моделі є масштабування карти до реальних розмірів об'єктів, використовуючи стандартну ширину дороги в Україні – 3,75 м. Наступним кроком є створення основних дорожніх маршрутів на ділянці за допомогою функції «Links». Ця функція дозволяє формувати дороги в різних напрямках, як прямого, так і вигнутого типу, а також з'єднувальні відрізки (connectors), що завершують формування складних транспортних мереж.

У програмі PTV VISSIM можна вводити стохастичні транспортні потоки, які рухатимуться по заданих дорогах. Для цього використовують таблиці

інтенсивності вхідного потоку. Транспорт у програмі поділяється на легкові автомобілі, вантажівки, автобуси, трамваї, пішоходів і велосипеди.

Для коректного функціонування транспортного потоку потрібно додати пішохідні переходи відповідно до супутникових знімків. Для цього використовується функція «Link» з параметром «Pedestrian area», що створює пішохідні переходи, які з'єднують зони для пішоходів. Самі пішохідні зони створюються за допомогою функції «Pedestrian areas». Після цього потрібно додати пішохідні потоки та маршрути, якими пішоходи будуть переміщатися по переходах.

Не менш важливою частиною транспортної моделі є зупинки громадського транспорту, де пішоходи можуть здійснити посадку в транспорт і вирушати в потрібному напрямку. Зупинки створюються за допомогою функції «PuT stops». У налаштуваннях потрібно вказати, що зупинка активна і належить до певного маршруту. Також можна задати параметри, такі як кількість пасажирів, що чекають на зупинці, час перебування пасажирів, тривалість зупинки транспорту та час, протягом якого двері будуть відкриті для посадки пасажирів.

При накладанні доріг у PTV VISSIM програма автоматично створює конфліктні зони, що визначають пріоритети пропуску транспортних засобів. Для кожної конфліктної зони можна встановити один з відрізків, на якому транспортний засіб матиме пріоритет у русі.

Налаштування поведінки водіння CV та інші відповідні атрибути у програмі PTV VISSIM детально описано у розділі 2 даної роботи

3.2. Вплив автоматизації на дорожній рух: робота перехресть з пріоритетом руху (кільцевих розв'язок)

У даному сценарії основна увага була зосереджена на оцінці впливу впровадження системи CV на існуючу інфраструктуру перехрестя з круговим

рухом. Поведінка транспортних засобів на таких кільцевих розв'язках є критично важливою для визначення часу очікування, швидкості під'їзду до перехрестя та ефективності руху на основних магістралях. Перехрестя на вулиці Ф. Караманиць у Покровському районі міста Кривий Ріг є кільцевою розв'язкою з виходами на вулиці Кропивницьку та Кресівську. Розташоване поряд з багатоквартирними житловими будинками. Найближчими до перехрестя є зупинки громадського транспорту: «кільце 129-го кварталу», «вул. Кресівська» та «житловий масив Рибасово» (рис.3.1). Загальна площа області дослідження становила 0,3 км².



Рис.3.1. Область дослідження у моделі PTV VISSIM

Через кільцеве перехрестя, що досліджується проходять маршрути громадського транспорту, такі як маршрутного таксі під номерами №3, №32, №79, №231, №240, маршрути автобусів №4, №8, №428 (приміський) та тролейбусів №9 та №10. Всі названі маршрути проходять у південно-північному напрямку через кругову розв'язку по вулиці Ф. Караманиць. Середній інтервал руху транспорту прийнятий відповідно до даних відкритих джерел моніторингу громадського транспорту у місті Кривий Ріг [50]. Приклад маршруту тролейбусу та перелік створених маршрутів громадського транспорту показані на рис.3.2.

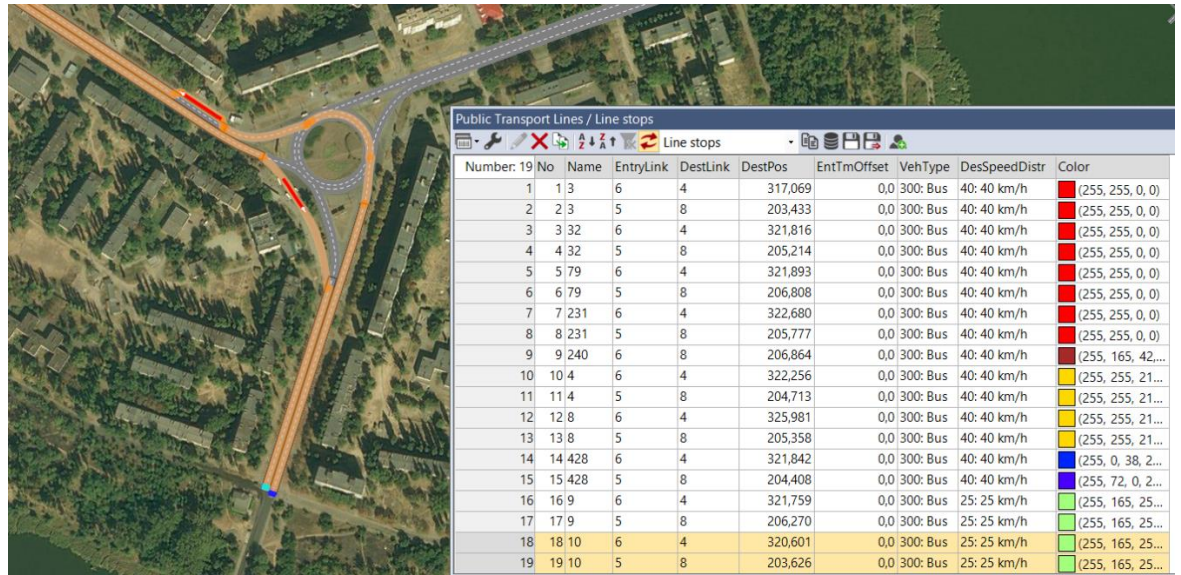


Рис.3.2. Проходження маршрутів громадського транспорту через кільцеву розв'язку

Кожна з зупинок громадського транспорту в області дослідження була створена відповідно до даних Google Maps [51]. Вхідні потоки індивідуального транспорту та склад транспортних потоків визначались з даних системи моніторингу дорожнього руху від компанії ТомТом [52].

Приклади пішохідних переходів показані на рис.3.3.

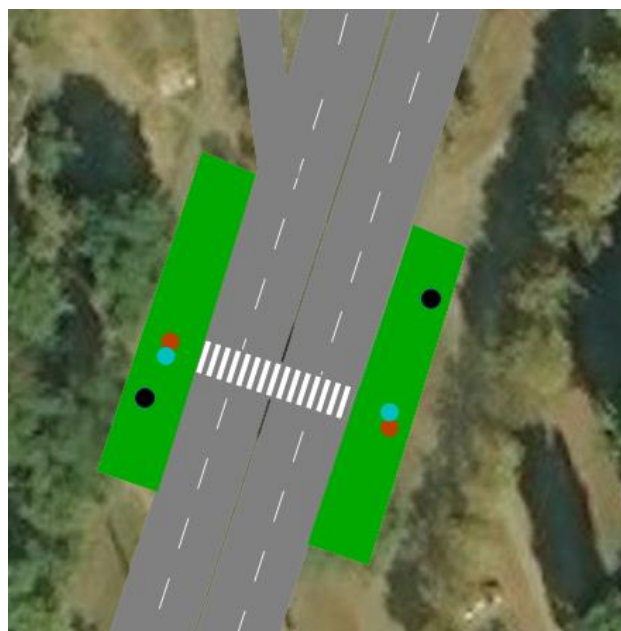


Рис.3.3. Приклади пішохідних переходів

У якості базової моделі вибрана поточна ситуація руху звичайних транспортних засобів у районі 129 кварталу без впровадження CV. Майбутні сценарії, порівняні з існуючою ситуацією, наведені в таблиці 3.1, в якій показані клас автоматизованих транспортних засобів у транспортному потоці і застосована логіка водіння.

У сценарії 1 застосована AV (*Cautions*) обережний для легкових автомобілів. У сценарії 2 логікою водіння для легкових автомобілів виступає AV (*Normal*) нормальний. У сценарії 3 – AV (*Aggressive*) агресивний для тих самих легкових автомобілів.

Налаштовані параметри поведінкової моделі водія Wiedemann 99 при слідування за лідером та зміні смуги руху для всіх сценаріїв, що розглядаються, показані в Додатку А.

Табл.3.1

Сценарії транспортного моделювання

	Клас автоматизованих транспортних засобів	Логіка водіння
Базова модель	-	Urban (motorized) міський рух
Сценарій 1	Легкові автомобілі (Car)	AV (<i>Cautions</i>) обережний
Сценарій 2	Легкові автомобілі (Car)	AV (<i>Normal</i>) нормальний
Сценарій 3	Легкові автомобілі (Car)	AV (<i>Aggressive</i>) агресивний

Слід відмітити, що для всіх сценаріїв, окрім третього, безпечна відстань у спокої (CC1) становить 1,5 м, тоді як для третього сценарію – 1,0 м.

Необхідно звернути увагу на опції «Cooperative lane change» та «Zipper merging», які активуються у моделі зміни смуги руху в залежності від обраної логіки водіння (Додаток А).

Опція «Cooperative lane change» полягає у тому, що, наприклад, транспортний засіб А бачить, що транспортний засіб В на сусідній смузі та хоче перелаштуватися на його смугу А, то транспортний засіб А спробує сам перелаштуватися на сусідню смугу, щоб полегшити перестроювання для транспортного засобу В. Наприклад, транспортний засіб А перелаштується з правої смуги на ліву, коли транспортний засіб В хоче перелаштуватися з правої смуги, що зливається, на ліву.

Транспортний засіб А поводитьсь під час зміни смуги руху так, ніби він повинен був би змінити смугу руху через розв'язку на великій відстані. Він приймає власне максимальне сповільнення та сповільнення транспортного засобу С на новій смузі відповідно до параметрів необхідної зміни смуги руху.

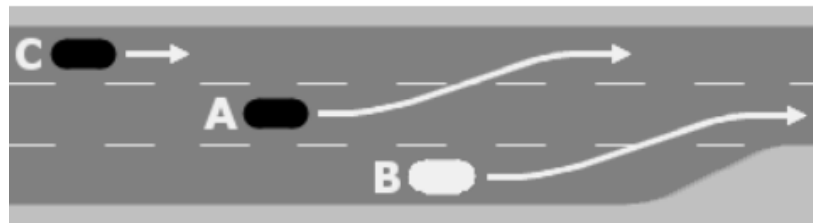


Рис.3.4. Ілюстрація до опції «Cooperative lane change»

Якщо вибрано опцію «Zipper merging», транспортні засоби враховують транспортні засоби на лівій та правій сусідніх смугах. Це відбувається лише тоді, коли транспортний засіб або сусідній транспортний засіб повинен перелаштуватися на сусідню смугу через свій маршрут. Зокрема, якщо позиція аварійної зупинки на власній смузі ближче, ніж на сусідній, але тільки в межах відстані злиття. Вони гальмують належним чином, коли необхідно рухатися в шаховому порядку. Гальмування відбувається виключно тоді, коли транспортні засоби рухаються зі швидкістю, вищою за мінімальну швидкість злиття. У ситуації заторів гальмування уникають, оскільки воно не сприяє покращенню поведінки при злитті.

Приклади налаштування поведінки водія на відрізках показані на рис.3.5. –
рис.3.6.

Number: 5	No	Name	DrivBehavDef
1	1	Urban (motorized)	1: Urban (motorized)
2	2	Right-side rule (motorized)	2: Right-side rule (motorized)
3	3	Freeway (free lane selection)	3: Freeway (free lane selection)
4	4	Footpath (no interaction)	4: Footpath (no interaction)
5	5	Cycle-Track (free overtaking)	5: Cycle-Track (free overtaking)

Number: 4	VehClass	DrivBehav
1	10: Car	1: Urban (motorized)
2	19: LGV	1: Urban (motorized)
3	20: HGV	1: Urban (motorized)
4	30: Bus	1: Urban (motorized)

Рис.3.5. Налаштування поведінки водія у базовій моделі.

Number: 5	No	Name	DrivBehavDef
1	1	Urban (motorized)	1: Urban (motorized)
2	2	Right-side rule (motorized)	2: Right-side rule (motorized)
3	3	Freeway (free lane selection)	3: Freeway (free lane selection)
4	4	Footpath (no interaction)	4: Footpath (no interaction)
5	5	Cycle-Track (free overtaking)	5: Cycle-Track (free overtaking)

Number: 4	VehClass	DrivBehav
1	10: Car	103: AV aggressive
2	19: LGV	1: Urban (motorized)
3	20: HGV	1: Urban (motorized)
4	30: Bus	1: Urban (motorized)

Рис.3.6. Налаштування поведінки водія у моделі сценарію 3.

Для даного дослідження найважливішими показниками оцінки впливу автоматизації на дорожній рух були покращення середнього часу в дорозі (рис.3.7) та середньої затримки, які очікуються у зв'язку із впровадженням нової технології. Ці показники є ключовими для розуміння заторів на кільцевих розв'язках, особливо в умовах впровадження CV у майбутньому.



Рис. 3.7. Напрямки визначення часу у дорозі транспортних засобів

3.3. Результати моделювання та техніко-експлуатаційні показники

Моделювання базової моделі та сценаріїв 1-3 дозволило визначити вплив логіки поведінки водія при різних ступенях впровадження технології підключених автотранспортних засобів (для легкових автомобілів) на основні техніко-експлуатаційні показники дорожнього руху на перехресті у вигляді кругової розв'язки.

Показник середньої затримки у мережі у порівнянні з моделлю базового сценарію суттєво не відрізняється для сценарію 1 та 2. При використанні логік водіння за сценаріями 1 та 2, середня затримка зменшується на 45% (с 10 с до 5,0 – 5,5 с). Для сценарію 3 (AV Aggressive) характерне 1200% збільшення середньої затримки порівняно із базовою моделлю (130 с проти 10 с) (рис.3.8).

Це частково пояснюється зменшенням безпечної відстані у спокої з 1,5 м для базового сценарію, сценаріїв 1 та 2 до 1,0 м у сценарії 3.

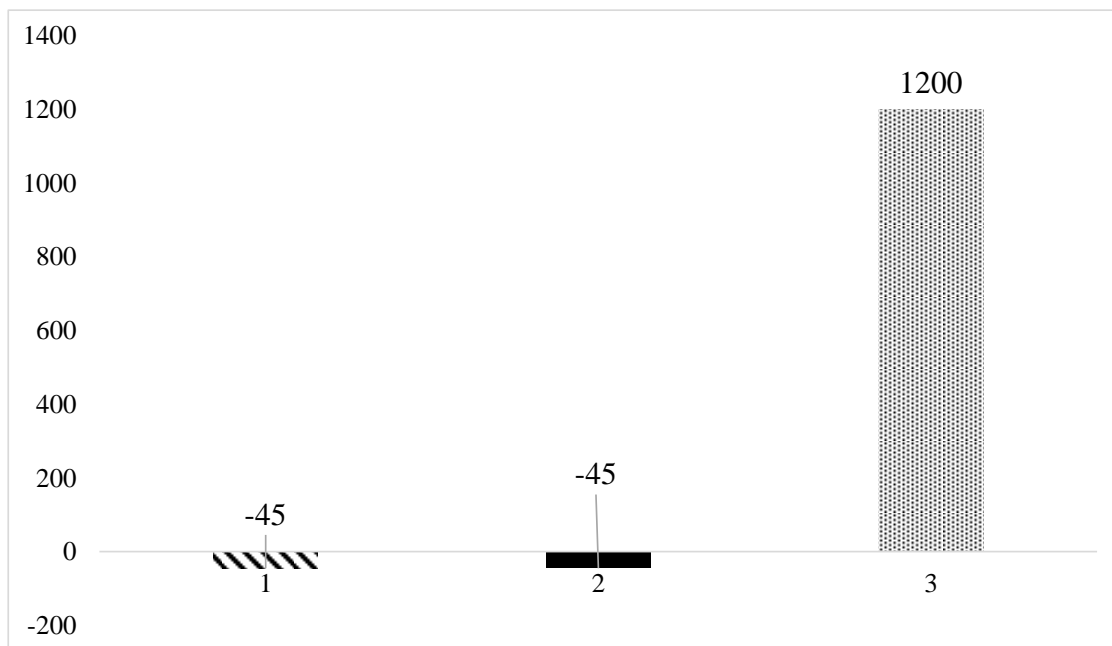


Рис.3.8. Зміна показника середньої затримки (%) у мережі відносно базового сценарію при використанні різних логік водіння: 1 – AV Cautions, 2 – AV Normal, 3- AV Aggressive

Відповідно, середній час у дорозі порівняно із базовим сценарієм зменшується при використанні підключених автомобілів із логікою водіння AV Cautions та AV Normal на 6,5 – 7,0 %. При використанні логіки водіння AV Aggressive час у дорозі збільшуватиметься на 126% (у зв'язку із збільшенням затримки) (рис.3.9).

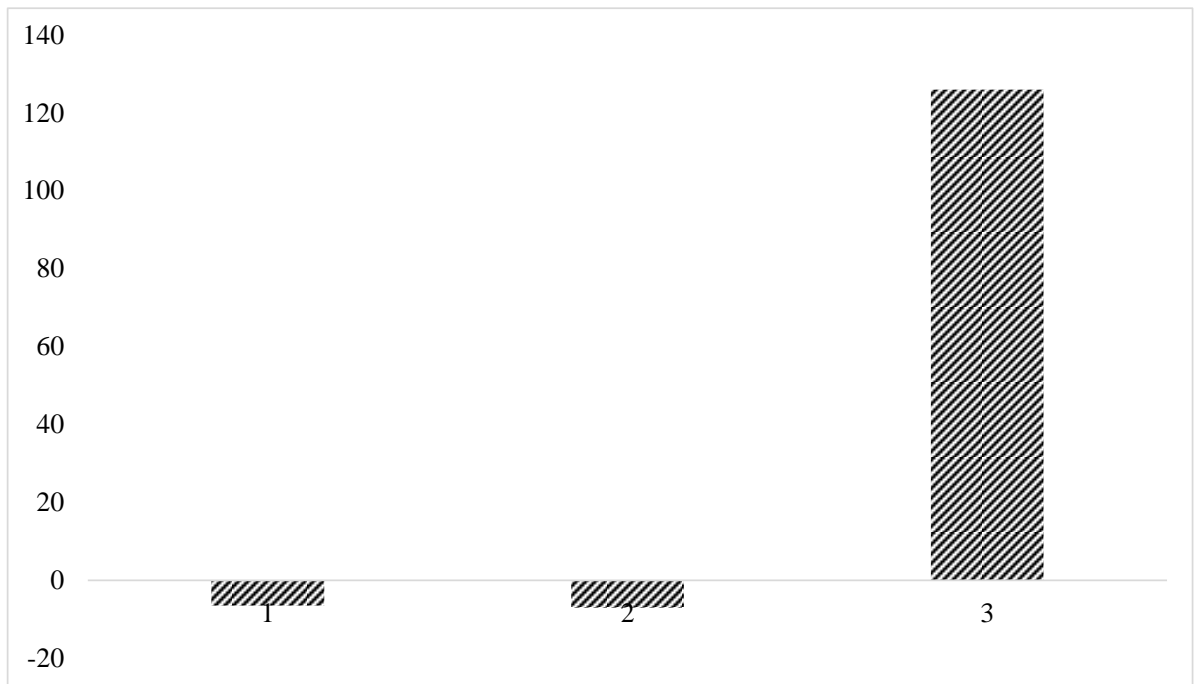


Рис.3.9. Зміна показника середнього часу у дорозі (%) у мережі відносно базового сценарію при використанні різних логік водіння: 1 – AV Cautions, 2 – AV Normal, 3- AV Aggressive

Якщо провести аналіз кількості транспортних засобів, які досягли свого місця призначення у мережі (рис.3.9) стає зрозумілим, що кількість таких автомобілів не змінюється у сценаріях 1 та 2 порівняно із базовою моделлю, у той час як при використанні AV Aggressive кількість таких автомобілів зменшується на 57%, що пов'язано із збільшенням затримки у мережі при даному сценарії.

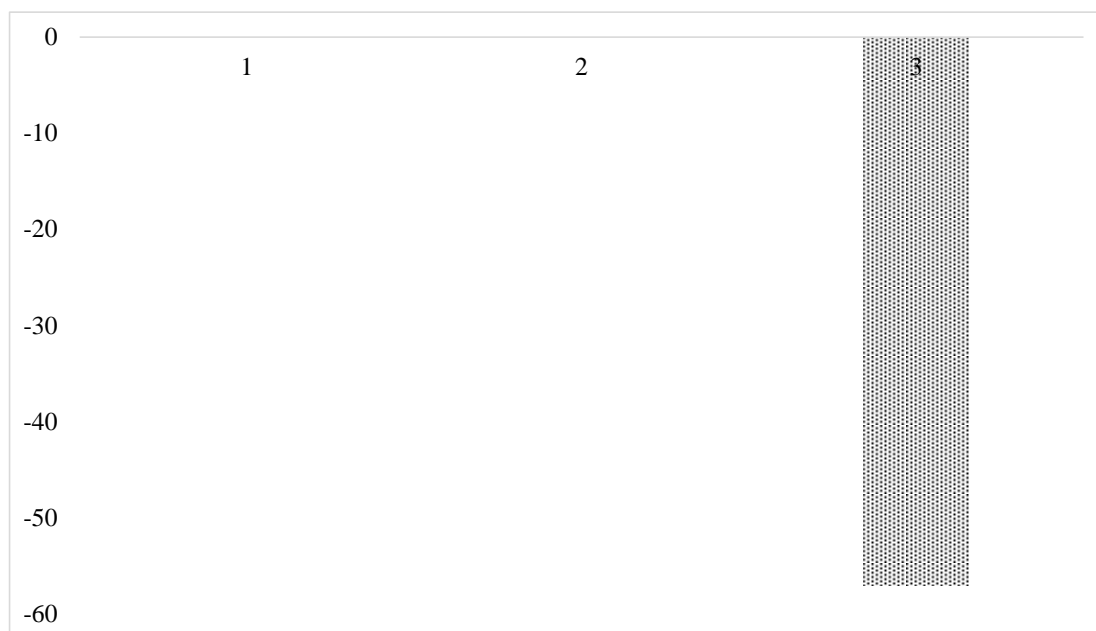


Рис.3.10. Зміна показника кількості транспортних засобів, які досягли свого місця призначення (%), відносно базового сценарію при використанні різних логік водіння: 1 – AV Cautions, 2 – AV Normal, 3- AV Aggressive

У Додатках Б-Д представлені теплові картограми середньої швидкості руху, відносної затримки, кількості транспортних засобів у мережі та щільності транспортного руху з урахуванням всіх класів транспортних засобів на досліджуваному перехресті.

Як видно з теплових картограм, основне погіршення техніко-експлуатаційних показників (зменшення швидкості руху, збільшення щільності потоку, збільшення затримки, навантаження на мережу) для сценарію 3 порівняно з базової моделі відбувається для напрямку руху з півдня на північний схід по вулиці Ф.Караманиць (напрямок 2-6 на рис. 3.7).

3.4. Висновки до розділу 3

У роботі було опрацьовано три сценарію впровадження технології підключених транспортних засобів:

AV обережний (CoEXist): Автомобіль дотримується правил дорожнього руху та завжди забезпечує безпечну поведінку під час руху. Він здатний перетинати нерегульовані перехрестя та змінювати смугу руху, зберігаючи обережність.

AV нормальний (CoEXist): Поведінка автономного транспортного засобу аналогічна до поведінки звичайних автомобілів. Крім того, система датчиків дозволяє автомобілю визначати відстань до інших транспортних засобів та їхню швидкість.

AV агресивний (CoEXist) (все знає): Знаючи всю дорожню ситуацію та використовуючи прогнози, автономний транспортний засіб залишає мінімальні проміжки для інших автомобілів, що призводить до кооперативного водіння.

Для опрацювання сценаріїв була розроблена транспортна мікромодель кругової розв'язки на вулиці Ф. Караманиць у Покровському районі міста Кривий Ріг у програмному забезпеченні PTV VISSIM.

У результаті моделювання встановлено, що у порівнянні з існуючим станом (без використання підключених автомобілів) для покращення техніко-експлуатаційних показників дорожнього руху рекомендується використання технологій підключених автомобілів *AV обережний* або *AV нормальний* для легкових автомобілів: середня затримка зменшується на 45%, середній час у дорозі зменшується до 7%, при цьому кількість транспортних засобів, які досягли свого місця призначення, не змінюється. Це означає, що ефективність технологій *AV обережний* та *AV нормальний* є вищою, ніж технологій водіння для традиційних транспортних засобів.

ВИСНОВКИ

Робота присвячена вивченню ефективності експлуатації підключених автомобілів (CV) в міських умовах дорожнього руху на кругових розв'язках.

1. Проведено аналіз технологій підключених автомобілів (CV), а також розглянуто ключові технології зв'язку, з точки зору ефективності, безпеки та перспективності даної технології. У зв'язку з численними невизначеностями, пов'язаними з впровадженням автоматизованих транспортних засобів, виникає необхідність у структурованому підході для оцінки їх впливу за різними сценаріями майбутнього розвитку. Це стосується темпів проникнення автоматизованих транспортних засобів, поєднання різних їх типів, рівнів попиту на перевезення та змін у поведінці учасників дорожнього руху. Для того, щоб надати загальне уявлення про можливий вплив на різних етапах співіснування автоматизованих транспортних засобів з іншими учасниками дорожнього руху, було розроблено спеціальний підхід до їх оцінки. З метою спрощення цього процесу та стандартизації представлення результатів, враховуючи невизначеності, даний підхід був реалізований у вигляді інструменту на основі транспортного мікромодельювання для оцінки продуктивності руху та ефективності використання простору.

2. Виконано аналіз можливостей сучасного програмного забезпечення для моделювання експлуатації підключених автомобілів у міських умовах.

Програмне забезпечення для транспортного моделювання PTV VISSIM дозволяє проводити оцінку проникнення різних типів CV на різних рівнях автоматизації:

AV обережний (AV Cautions): автомобіль суворо дотримується правил дорожнього руху та завжди проявляє обережність під час руху.

AV нормальний (AV Normal): поведінка автономного транспортного засобу схожа на поведінку звичайних автомобілів. Також система датчиків дає змогу автомобілю оцінювати відстань до інших транспортних засобів та їхню швидкість.

AV агресивний (AV Aggressive) (все знає): автомобіль, озброєний повним розумінням дорожньої ситуації та прогнозами, залишає лише мінімальні проміжки для інших автомобілів, що сприяє кооперативному водінню.

3. Проведено дослідження експлуатації підключених транспортних засобів на прикладі роботи реального перехрестя з пріоритетом руху у місті Кривий Ріг.

В результаті моделювання у програмному забезпеченні PTV VISSIM було встановлено, що порівняно з поточним станом (без використання підключених автомобілів), для покращення техніко-експлуатаційних характеристик дорожнього руху рекомендується впровадження технологій підключених автомобілів *AV обережний* або *AV нормальний* для легкових автомобілів. Це дозволяє знизити середню затримку на 45% і скоротити середній час у дорозі до 7%, при цьому кількість транспортних засобів, які досягли пункту призначення, залишається незмінною. Це свідчить про те, що ефективність технологій *AV обережний* та *AV нормальний* є вищою, ніж у традиційних транспортних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Guerrero-Ibáñez, J.; Zeadally, S.; Contreras-Castillo, J. Sensor technologies for intelligent transportation systems. *Sensors* 2018, 18, 1212.
2. Spectrum, IEEE. The Car in the Age of Connectivity Enabling Car to Cloud Connectivity. Available online: <https://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/the-car-in-the-age-of-connectivity-enabling-car-to-cloud-connectivity>
3. Lu, N.; Cheng, N.; Zhang, N.; Shen, X.; Mark, J.W. Connected vehicles: Solutions and challenges. *IEEE Internet Things J.* 2014, 1, 289–299.
4. Siegel, J.E.; Erb, D.C.; Sarma, S.E. A survey of the connected vehicle landscape—Architectures, enabling technologies, applications, and development areas. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2018, 19, 2391–2406.
5. Coppola, R.; Morisio, M. Connected car: Technologies, issues, future trends. *ACM Comput. Surv. (CSUR)* 2016, 49, 1–36.
6. Ersal, T.; Kolmanovsky, I.; Masoud, N.; Ozay, N.; Scruggs, J.; Vasudevan, R.; Orosz, G. Connected and automated road vehicles: State of the art and future challenges. *Veh. Syst. Dyn.* 2020, 58, 672–704.
7. Datta, S.K.; Da Costa, R.P.F.; Härri, J.; Bonnet, C. Integrating connected vehicles in Internet of Things ecosystems: Challenges and solutions. In *Proceedings of the 2016 IEEE 17th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Coimbra, Portugal, 21–24 June 2016; pp. 1–6.
8. Bertonecello, M.; Martens, C.; Möller, T.; Schneiderbauer, T. Unlocking the Full Life-Cycle Value from Connected-Car Data. 2021. Available online: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/unlocking-the-full-life-cyclevalue-from-connected-car-data>
9. Bertonecello, M.; Husain, A.; Möller, T. Setting the framework for car connectivity and user experience. *McKinsey Quarterly*, November 2018.

10. Xu, Z.; Li, X.; Zhao, X.; Zhang, M.H.; Wang, Z. DSRC versus 4G-LTE for connected vehicle applications: A study on field experiments of vehicular communication performance. *J. Adv. Transp.* 2017, 2017, 2750452.
11. Bey, T.; Tewolde, G. Evaluation of DSRC and LTE for V2X. In *Proceedings of the 2019 IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, Las Vegas, NV, USA, 7–9 January 2019; pp. 1032–1035
12. Gao, S.; Lim, A.; Bevly, D. An empirical study of DSRC V2V performance in truck platooning scenarios. *Digit. Commun. Netw.* 2016, 2, 233–244.
13. Xiong, W.; He, S.; Qiu, T.Z. Research on connected vehicle architecture based on DSRC technology. In *Proceedings of the 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, Banff, AB, Canada, 8–10 August 2017; pp. 530–534.
14. Al-Fuqaha, A.; Guizani, M.; Mohammadi, M.; Aledhari, M.; Ayyash, M. *Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols and Applications*. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2015, 17, 2347–2376.
15. International, SAE. *Vehicle Safety Communications Landscape Clarified with Controversial FCC Ruling*. Available online: <https://www.sae.org/news/2020/11/fcc-5.9-ghz-cv2x-decision>.
16. International, SAE. *New Cooperative Driving Automation Standard Provides Clarity to Support Advancement of Full Automation*. Available online: <https://www.sae.org/news/2020/06/new-cooperative-driving-automation-standard>
17. Karlsson, P.; Lönegård, F. *Wi-Fi 6 Will Streamline Automotive Connectivity*. Available online: <https://www.edn.com/wi-fi-6-will-streamline-automotive-connectivity>
18. James, J. *6 Reasons Why Automotive OEMs Are Upgrading to Wi-Fi 6*. Available online: <https://www.nxp.com/company/blog/6-reasons-why-automotive-oems-are-upgrading-to-wi-fi-6:BL-6-REASONS-TO-UPGRADE-TO-WI-FI-6>.
19. Abboud, K.; Omar, H.A.; Zhuang, W. *Interworking of DSRC and cellular network technologies for V2X communications*:

- A survey. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2016, 65, 9457–9470.
20. Ullah, H.; Nair, N.G.; Moore, A.; Nugent, C.; Muschamp, P.; Cuevas, M. 5G communication: An overview of vehicle-to-everything, drones, and healthcare use-cases. *IEEE Access* 2019, 7, 37251–37268.
21. 3GPP, A.G.I. 3GPP Release 15: <https://www.3gpp.org/release-15>
22. ETSI. TS 123 501-V15.9.0-5G; System Architecture for the 5G System (5GS) (3GPP TS 23.501 Version 15.9.0 Release 15. In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Montreal, QC, Canada, 14–23 June 2021; Technical Report.
23. Storck, C.R.; Duarte-Figueiredo, F. A 5G V2X ecosystem providing internet of vehicles. *Sensors* 2019, 19, 550.
24. Liang, L.; Peng, H.; Li, G.Y.; Shen, X. Vehicular Communications: A Physical Layer Perspective. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2017, 66, 10647–10659.
25. Nkenyereye, L.; Nkenyereye, L.; Islam, S.; Choi, Y.H.; Bilal, M.; Jang, J.W. Software-defined network-based vehicular networks: A position paper on their modeling and implementation. *Sensors* 2019, 19, 3778.
26. Loghin, D.; Cai, S.; Chen, G.; Dinh, T.T.A.; Fan, F.; Lin, Q.; Ng, J.; Ooi, B.C.; Sun, X.; Ta, Q.T.; et al. The Disruptions of 5G on Data-driven Technologies and Applications. *arXiv* 2019, arXiv:1909.08096.
27. Calabuig, J.; Monserrat, J.F.; Gozalvez, D.; Klemp, O. Safety on the roads: LTE alternatives for sending ITS messages. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 2014, 9, 61–70.
28. Lin, X.; Andrews, J.G.; Ghosh, A.; Ratasuk, R. An overview of 3GPP device-to-device proximity services. *IEEE Commun. Mag.* 2014, 52, 40–48.
29. Shah, S.A.A.; Ahmed, E.; Imran, M.; Zeadally, S. 5G for Vehicular Communications. *IEEE Commun. Mag.* 2018, 56, 111–117.
30. Nokia. Connected Vehicles Making Journeys Safer, More Efficient, and More Fun. Available online: <https://www.nokia.com/networks/5g/use-cases/connected-vehicles/>

31. Ucar, S.; Ergen, S.C.; Ozkasap, O. Multihop-cluster-based IEEE 802.11 p and LTE hybrid architecture for VANET safety message dissemination. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2016, 65, 2621–2636.
32. Sherazi, H.H.R.; Khan, Z.A.; Iqbal, R.; Rizwan, S.; Imran, M.A.; Awan, K. A heterogeneous IoV architecture for data forwarding in vehicle to infrastructure communication. *Mob. Inf. Syst.* 2019, 2019, 3101276.
33. Djilali, Y.D.; Bakhtil, Y.; Kouninef, B.; Senouci, B. Performances evaluation study of VANET communication technologies for smart and autonomous vehicles. In *Proceedings of the 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Prague, Czech Republic, 3–6 July 2018*; pp. 79–84
34. Liu, Z.; Lee, H.; Ali, G.; Pesch, D.; Xiao, P. A Survey on Resource Allocation in Vehicular Networks. *arXiv* 2019, arXiv:1909.13587.
35. Xiang, W.; Zheng, K.; Shen, X.S. *5G Mobile Communications*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016.
36. Congress, G.C. ABI Research: Implementing DSRC above Cellular is More Cost-Effective than Implementing C-V2X. Available online: <https://www.greencarcongress.com/2018/02/20180207-abi.html>
37. Guerrero-Ibanez, J.A.; Zeadally, S.; Contreras-Castillo, J. Integration challenges of intelligent transportation systems with connected vehicle, cloud computing, and internet of things. *IEEE Wirel. Commun.* 2015, 22, 122–128.
38. Kim, N.; Kim, J.; Kim, H.; Lim, K.; Ko, Y.; Jeong, N.; Smith, A.H.; McNally, H.A. Red Light Running Prediction System using LIDAR. In *Proceedings of the 2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Sophia Antipolis, France, 11–13 March 2019*; Volume 3, pp. 1–5.
39. Tsai, M.F.; Chao, Y.C.; Chen, L.W.; Chilamkurti, N.; Rho, S. Cooperative emergency braking warning system in vehicular networks. *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.* 2015, 2015, 32.

40. Denny, S.; Jeremy, S.; Rachel, K. Vehicle to Infrastructure(V2I) Safety Applications; Technical Report FHWA-JPO-16-249; U.S. Department of Transportation: Washington, DC, USA, 2015.

41. CVRIA. Curve Speed Warning.: <https://local.iteris.com/cvria/html/applications/app13>

42. Gámez Serna, C.; Ruichek, Y. Dynamic speed adaptation for path tracking based on curvature information and speed limits. *Sensors* 2017, 17, 1383.

43. Boubakri, A.; Gammar, S.M. Intra-Platoon Communication in Autonomous Vehicle: A survey. In Proceedings of the 2020 9th IFIP International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wireless Networks (PEMWN), Berlin, Germany, 1–3 December 2020; pp. 1–6.

44. Quadri, C.; Mancuso, V.; Ajmone Marsan, M.; Rossi, G.P. Platooning on the edge. In Proceedings of the 23rd International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, Alicante, Spain, 22–26 November 2020; pp. 1–10.

45. Sheth, M.; Butrina, P.; Goodchild, A.; McCormack, E. Measuring delivery route cost trade-offs between electric-assist cargo bicycles and delivery trucks in dense urban areas. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2019, 11, 11.

46. World, A. How Bosch Is Transforming Driving with Connected Services. Available online: <https://www.automotiveworld.com/news-releases/bosch-transforming-driving-connected-services/>

47. Ulrich, L. Available online: <https://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/advanced-cars/smartphones-replacefobs-for-keyless-vehicle-entry>

48. <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim>

49. <https://www.rupprecht-consult.eu/project/coexist>

50. <https://www.eway.in.ua/ua/cities/kryvyirih>

51.

<https://www.google.com/maps/d/viewer?msa=0&hl=en&ie=UTF8&t=m&ll=48.509326>

[40608858%2C30.04431200000002&spn=3.828648%2C12.150879&source=embed&mid=1J_nvpmLPqcmapyozCHA3g05hb4&z=6](https://www.tomtom.com/products/traffic-stats/40608858%2C30.04431200000002&spn=3.828648%2C12.150879&source=embed&mid=1J_nvpmLPqcmapyozCHA3g05hb4&z=6)

52. <https://www.tomtom.com/products/traffic-stats/>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. Налаштовані параметри поведінкової моделі водія Wiedmann 99

Wiedemann 99			
Model parameters			
CC0 (Standstill distance):	1,50 m	CC5 (Positive speed difference):	0,35
CC1 (Gap time distribution):	2: 0.9 s	CC6 (Distance dependency of oscillation):	11,44
CC2 ('Following' distance oscillation):	4,00 m	CC7 (Oscillation acceleration):	0,25 m/s ²
CC3 (Threshold for entering 'Following'):	-8,00	CC8 (Acceleration from standstill):	3,50 m/s ²
CC4 (Negative speed difference):	-0,35	CC9 (Acceleration at 80 km/h):	1,50 m/s ²

А)

General behavior:	Free lane selection		
Necessary lane change (route)			
	Own	Trailing vehicle	
Maximum deceleration:	-4,00 m/s ²	-3,00 m/s ²	
- 1 m/s ² per distance:	200,00 m	200,00 m	
Accepted deceleration:	-1,00 m/s ²	-0,50 m/s ²	
Waiting time before diffusion:	60,00 s	<input type="checkbox"/> Overtake reduced speed areas	
Min. clearance (front/rear):	0,50 m	<input checked="" type="checkbox"/> Vehicle routing decisions look ahead	
To slower lane if collision time is above.	11,00 s		
Safety distance reduction factor:	0,60		
Maximum deceleration for cooperative braking:	-3,00 m/s ²		
<input type="checkbox"/> Cooperative lane change			
Maximum speed difference:	10,80 km/h	Maximum collision time:	10,00 s
<input checked="" type="checkbox"/> Zipper merging ⓘ			
Minimum speed:	20,00 km/h	Overtaking time distribution:	200: 2-4

Б)

Рис.А.1. Параметри поведінкової моделі водія у базовому сценарії (без CV): А) – слідування за лідером, Б) – зміна смуги руху

Wiedemann 99

Model parameters

CC0 (Standstill distance):	<input type="text" value="1,50 m"/>	CC5 (Positive speed difference):	<input type="text" value="0,10"/>
CC1 (Gap time distribution):	<input type="text" value="102: 1.5 : v"/>	CC6 (Distance dependency of oscillation):	<input type="text" value="0,00"/>
CC2 ('Following' distance oscillation):	<input type="text" value="0,00 m"/>	CC7 (Oscillation acceleration):	<input type="text" value="0,10 m/s<sup>2</sup>"/>
CC3 (Threshold for entering 'Following'):	<input type="text" value="-10,00"/>	CC8 (Acceleration from standstill):	<input type="text" value="3,00 m/s<sup>2</sup>"/>
CC4 (Negative speed difference):	<input type="text" value="-0,10"/>	CC9 (Acceleration at 80 km/h):	<input type="text" value="1,20 m/s<sup>2</sup>"/>

General behavior:

Necessary lane change (route)

	Own	Trailing vehicle
Maximum deceleration:	<input type="text" value="-3,50 m/s<sup>2</sup>"/>	<input type="text" value="-2,50 m/s<sup>2</sup>"/>
- 1 m/s ² per distance:	<input type="text" value="80,00 m"/>	<input type="text" value="80,00 m"/>
Accepted deceleration:	<input type="text" value="-1,00 m/s<sup>2</sup>"/>	<input type="text" value="-1,00 m/s<sup>2</sup>"/>

Waiting time before diffusion: Overtake reduced speed areas

Min. clearance (front/rear): Vehicle routing decisions look ahead

To slower lane if collision time is above:

Safety distance reduction factor:

Maximum deceleration for cooperative braking:

Cooperative lane change

Maximum speed difference: Maximum collision time:

Zipper merging i

Minimum speed: Overtaking time distribution:

Рис.А.2. Параметри поведінкової моделі водія у сценарії 1 (AV Cautions):
 А) – слідування за лідером, Б) – зміна смуги руху

Wiedemann 99

Model parameters

CC0 (Standstill distance):	<input type="text" value="1,50 m"/>	CC5 (Positive speed difference):	<input type="text" value="0,10"/>
CC1 (Gap time distribution):	<input type="text" value="2: 0.9 s"/> ▾	CC6 (Distance dependency of oscillation):	<input type="text" value="0,00"/>
CC2 ('Following' distance oscillation):	<input type="text" value="0,00 m"/>	CC7 (Oscillation acceleration):	<input type="text" value="0,10 m/s<sup>2</sup>"/>
CC3 (Threshold for entering 'Following'):	<input type="text" value="-8,00"/>	CC8 (Acceleration from standstill):	<input type="text" value="3,50 m/s<sup>2</sup>"/>
CC4 (Negative speed difference):	<input type="text" value="-0,10"/>	CC9 (Acceleration at 80 km/h):	<input type="text" value="1,50 m/s<sup>2</sup>"/>

General behavior:

Necessary lane change (route)

	Own	Trailing vehicle
Maximum deceleration:	<input type="text" value="-4,00 m/s<sup>2</sup>"/>	<input type="text" value="-3,00 m/s<sup>2</sup>"/>
- 1 m/s ² per distance:	<input type="text" value="100,00"/> m	<input type="text" value="100,00"/> m
Accepted deceleration:	<input type="text" value="-1,00 m/s<sup>2</sup>"/>	<input type="text" value="-1,00 m/s<sup>2</sup>"/>

Waiting time before diffusion: Overtake reduced speed areas

Min. clearance (front/rear): Vehicle routing decisions look ahead

To slower lane if collision time is above:

Safety distance reduction factor:

Maximum deceleration for cooperative braking:

Cooperative lane change

Maximum speed difference: Maximum collision time:

Zipper merging ⓘ

Minimum speed: Overtaking time distribution: ▾

Рис.А.3. Параметри поведінкової моделі водія у сценарії 2 (AV Normal): А) – слідування за лідером, Б) – зміна смуги руху

Wiedemann 99			
Model parameters			
CC0 (Standstill distance):	<input type="text" value="1,00 m"/>	CC5 (Positive speed difference):	<input type="text" value="0,10"/>
CC1 (Gap time distribution):	<input type="text" value="103: 0.6 : v"/>	CC6 (Distance dependency of oscillation):	<input type="text" value="0,00"/>
CC2 ('Following' distance oscillation):	<input type="text" value="0,00 m"/>	CC7 (Oscillation acceleration):	<input type="text" value="0,10 m/s<sup>2</sup>"/>
CC3 (Threshold for entering 'Following'):	<input type="text" value="-6,00"/>	CC8 (Acceleration from standstill):	<input type="text" value="4,00 m/s<sup>2</sup>"/>
CC4 (Negative speed difference):	<input type="text" value="-0,10"/>	CC9 (Acceleration at 80 km/h):	<input type="text" value="2,00 m/s<sup>2</sup>"/>


General behavior:	<input type="text" value="Free lane selection"/>		
Necessary lane change (route)			
	Own	Trailing vehicle	
Maximum deceleration:	<input type="text" value="-4,00 m/s<sup>2</sup>"/>	<input type="text" value="-4,00 m/s<sup>2</sup>"/>	
- 1 m/s ² per distance:	<input type="text" value="100,00 m"/>	<input type="text" value="100,00 m"/>	
Accepted deceleration:	<input type="text" value="-1,00 m/s<sup>2</sup>"/>	<input type="text" value="-1,50 m/s<sup>2</sup>"/>	
Waiting time before diffusion:	<input type="text" value="60,00 s"/>	<input type="checkbox"/> Overtake reduced speed areas	
Min. clearance (front/rear):	<input type="text" value="0,50 m"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Vehicle routing decisions look ahead	
To slower lane if collision time is above.	<input type="text" value="11,00 s"/>		
Safety distance reduction factor:	<input type="text" value="0,75"/>		
Maximum deceleration for cooperative braking:	<input type="text" value="-6,00 m/s<sup>2</sup>"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> Cooperative lane change			
Maximum speed difference:	<input type="text" value="10,80 km/h"/>	Maximum collision time:	<input type="text" value="10,00 s"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Zipper merging 			
Minimum speed:	<input type="text" value="20,00 km/h"/>	Overtaking time distribution:	<input type="text" value="200: 2-4 : v"/>

Рис.А.4. Параметри поведінкової моделі водія у сценарії 3 (AV Aggressive):
 А) – слідування за лідером, Б) – зміна смуги руху

ДОДАТОК Б. Теплові картограми показників транспортних потоків у моделі базового сценарію

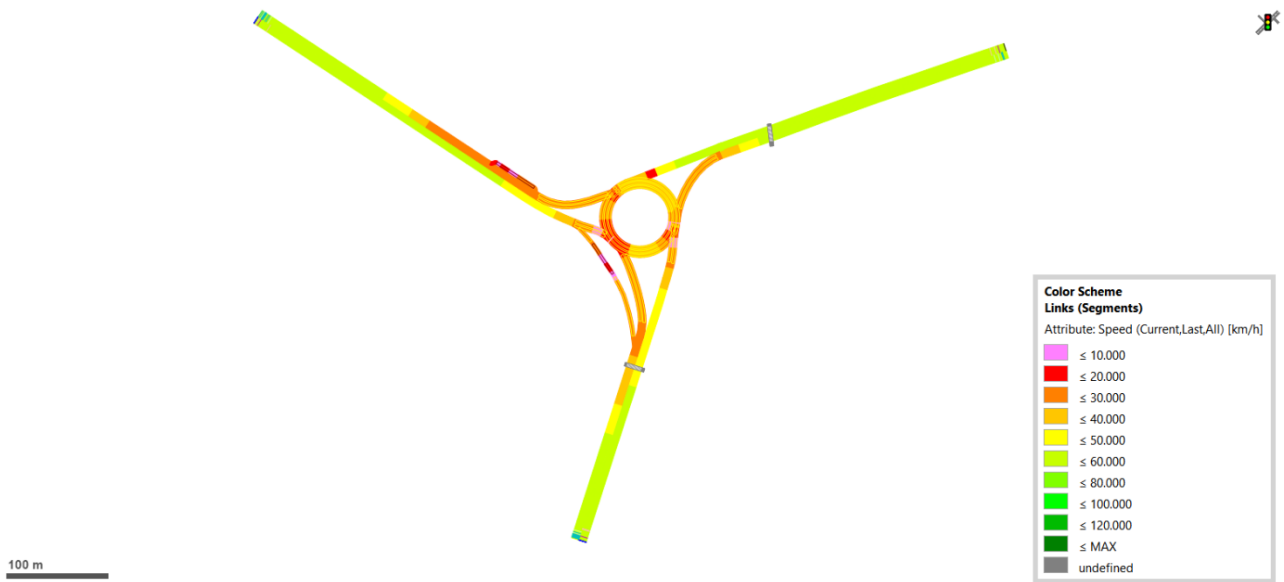


Рис.Б.1. Теплова картограма швидкості руху транспортних засобів, км/ГОД.

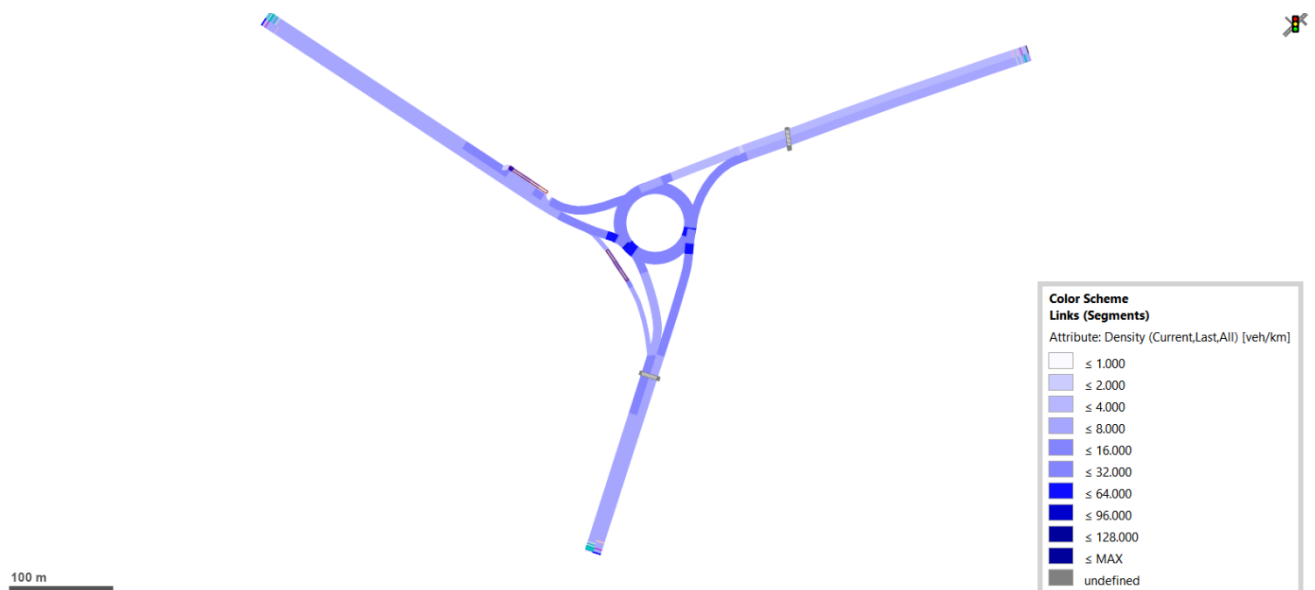


Рис.Б.2. Теплова картограма щільності руху транспортних засобів, авт./км.

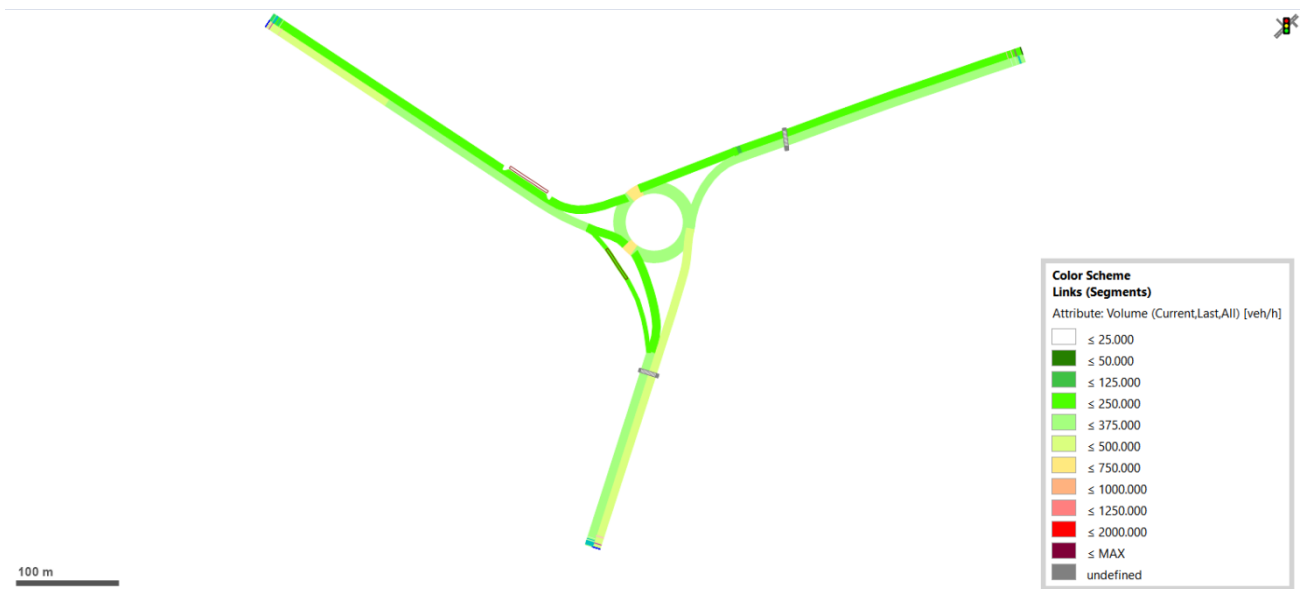


Рис.Б.3. Теплова картограма навантаження на мережу, авт./год.

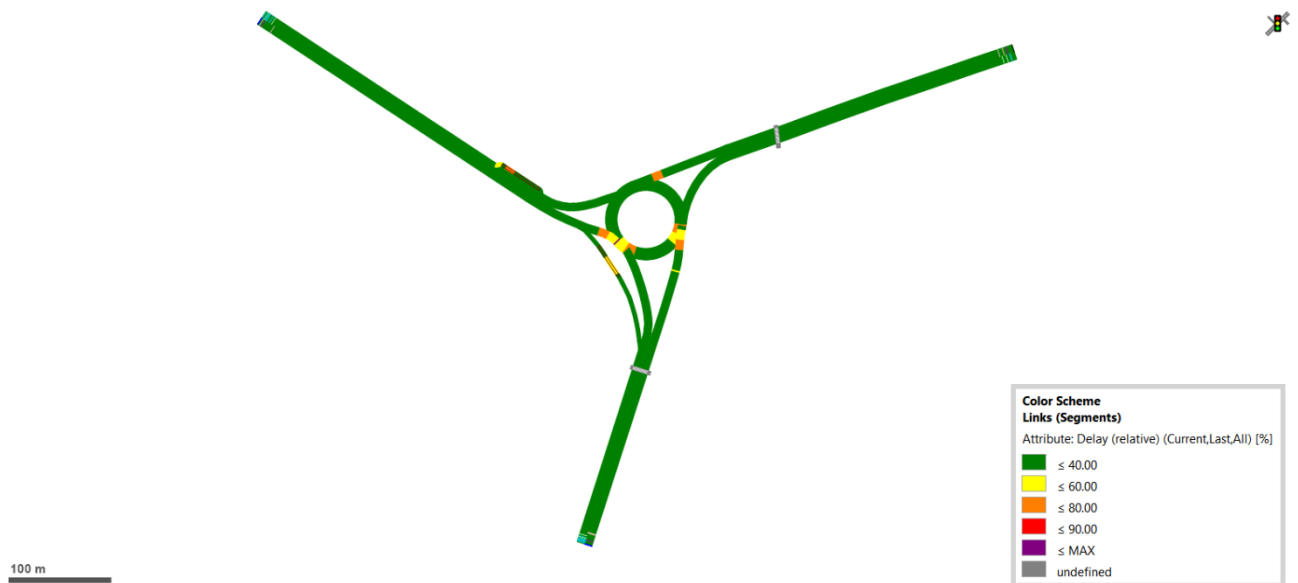


Рис.Б.4. Теплова картограма відносної затримки, %

ДОДАТОК В. Теплові картограми показників транспортних потоків у моделі сценарію 1

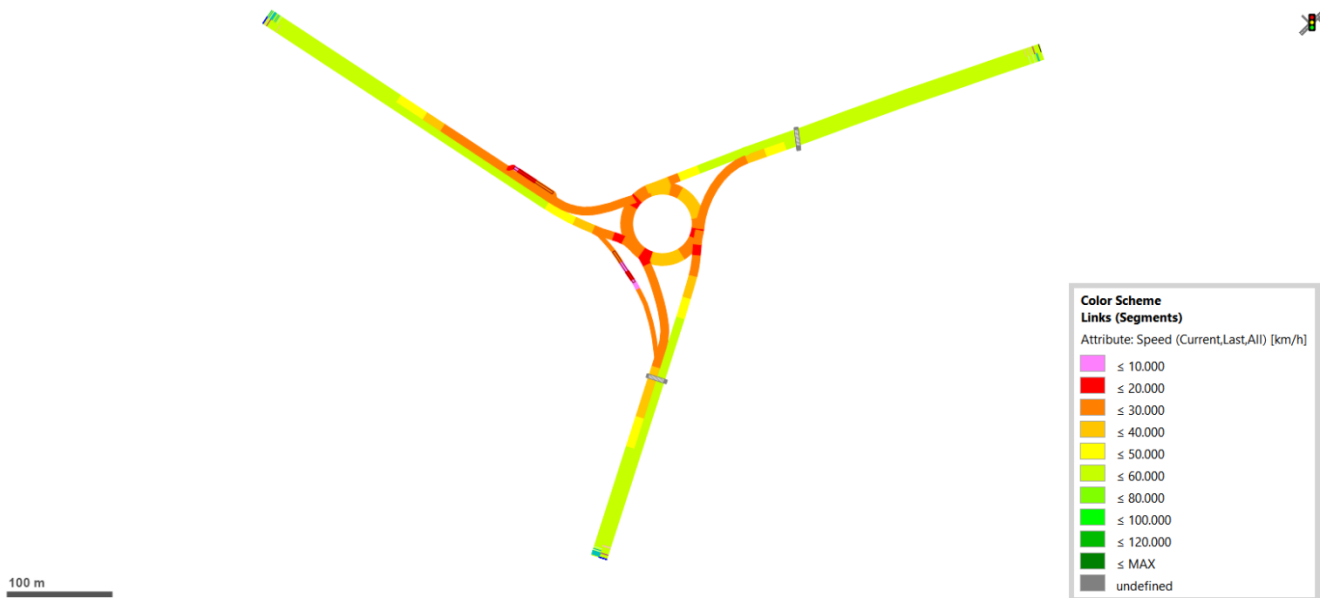


Рис.В.1. Теплова картограма швидкості руху транспортних засобів, км/ГОД.

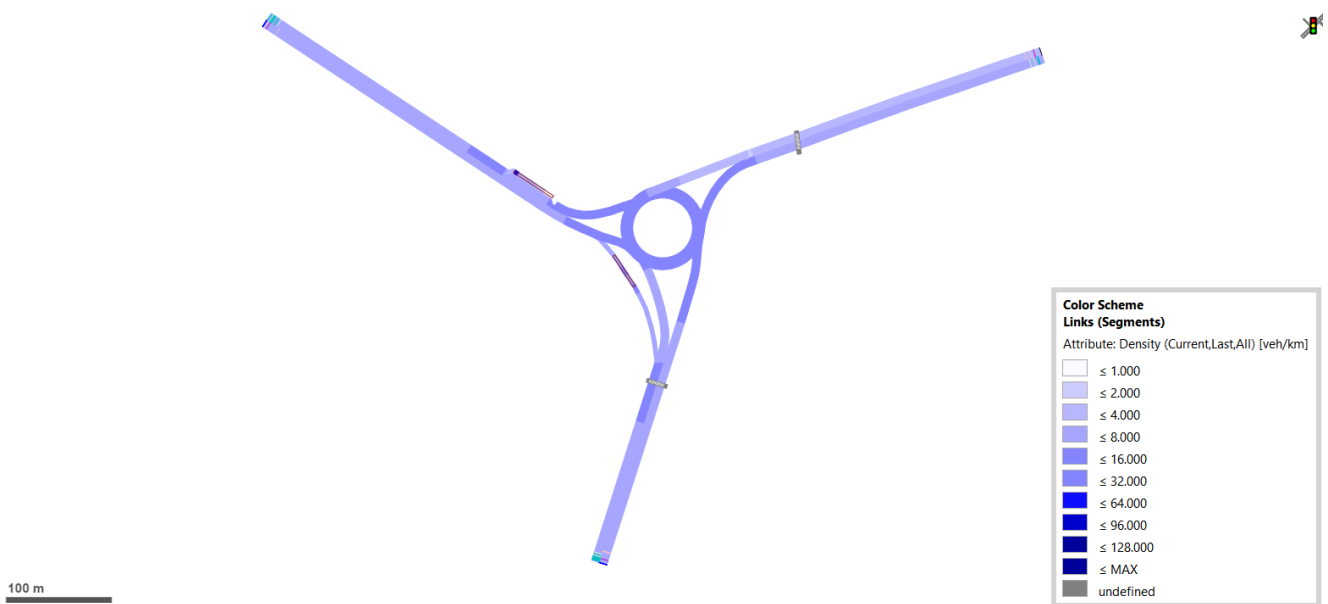


Рис.В.2. Теплова картограма щільності руху транспортних засобів, авт./км.

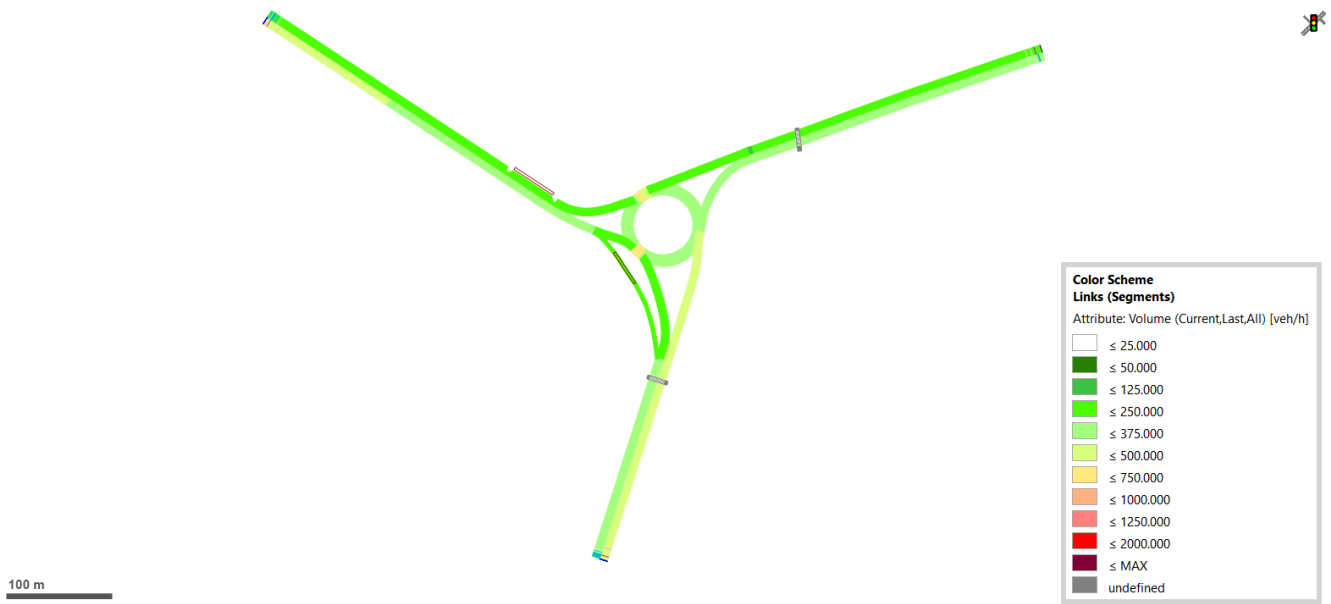


Рис.В.3. Теплова картограма навантаження на мережу, авт./год.

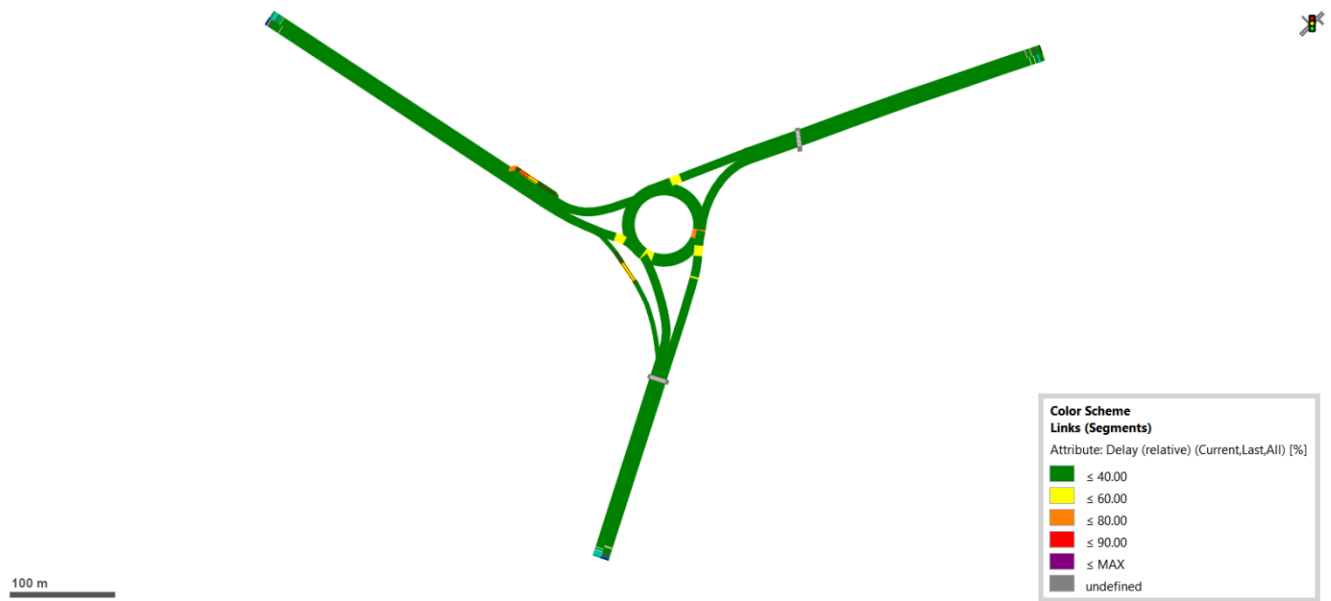


Рис.В.4. Теплова картограма відносної затримки, %

ДОДАТОК Г. Теплові картограми показників транспортних потоків у моделі сценарію 2

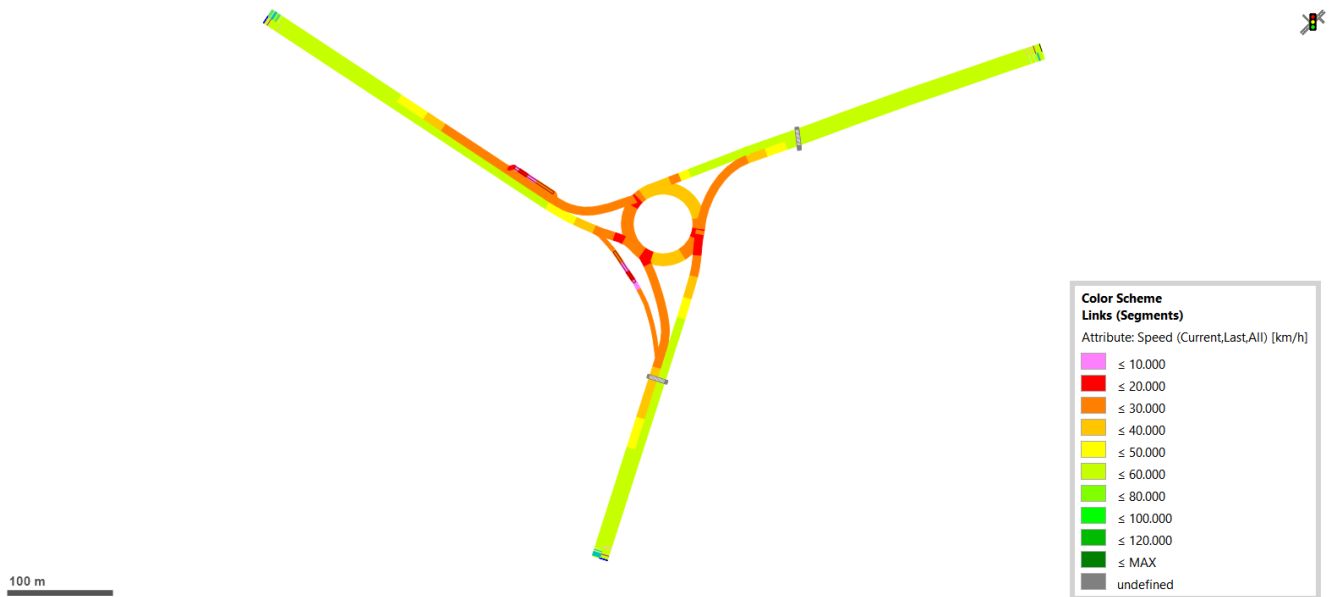


Рис.Г.1. Теплова картограма швидкості руху транспортних засобів, км/год.

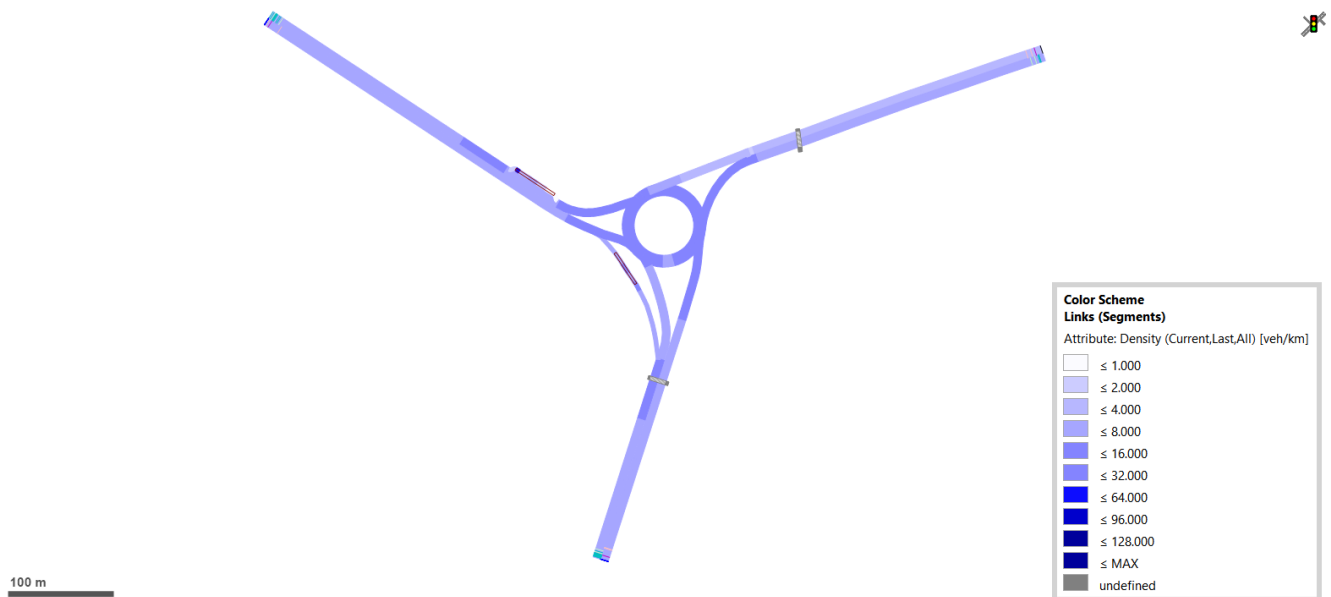


Рис.Г.2. Теплова картограма щільності руху транспортних засобів, авт./км.

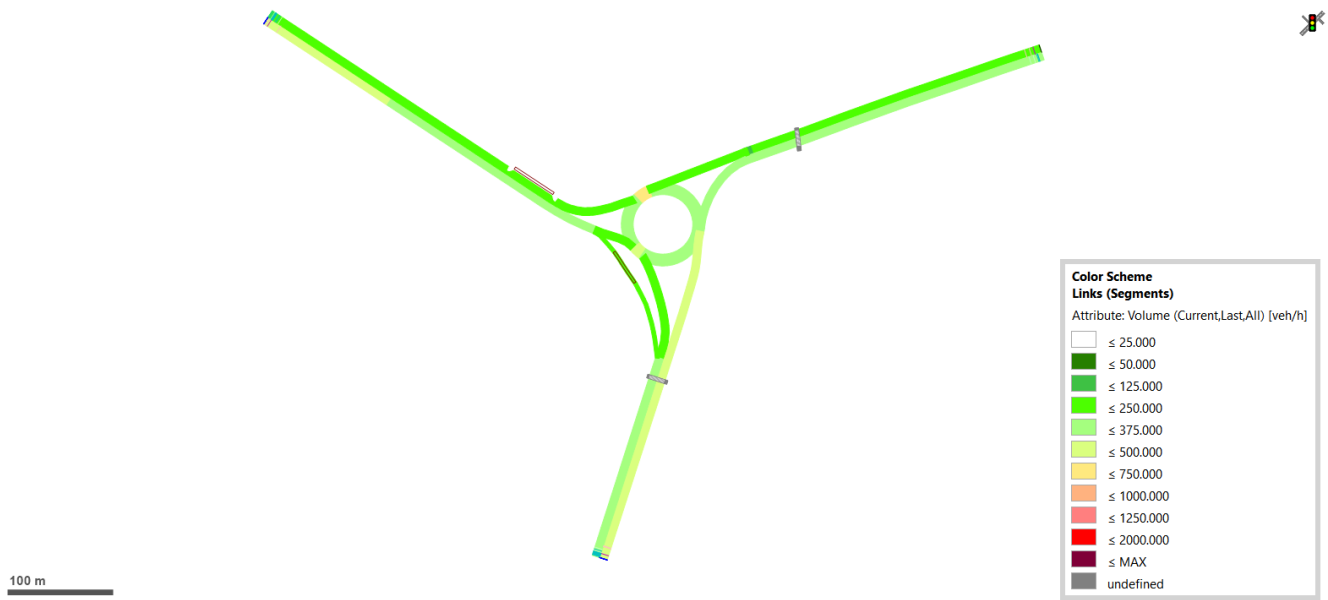


Рис.Г.3. Теплова картограма навантаження на мережу, авт./год.

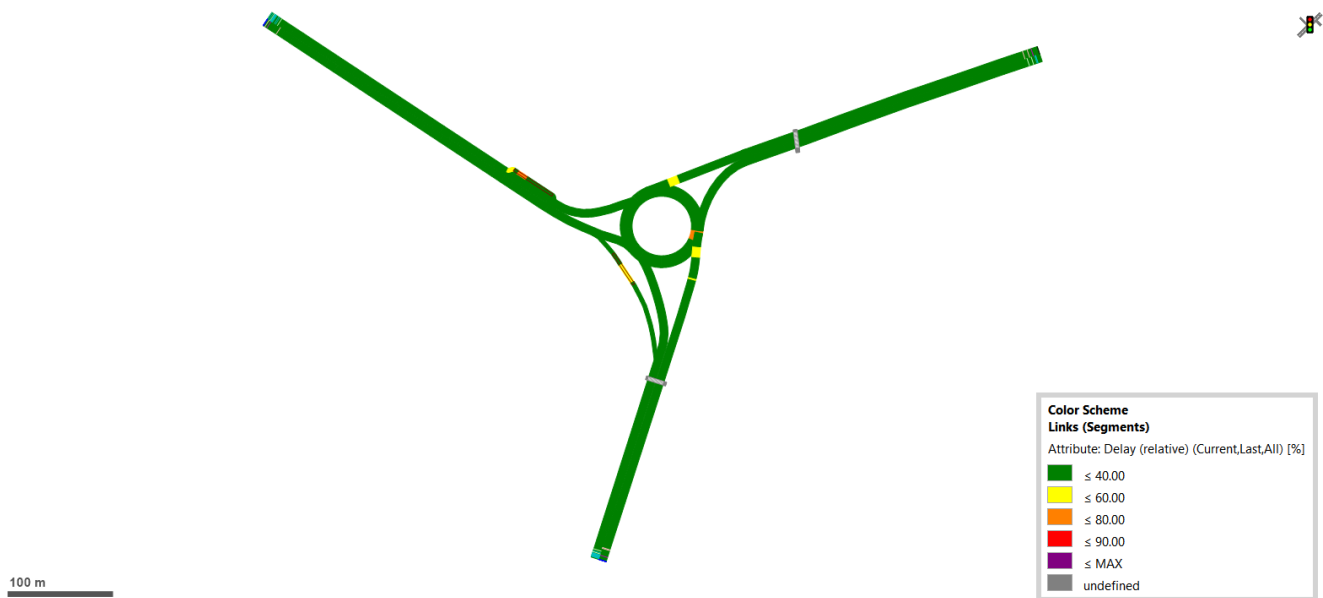


Рис.Г.4. Теплова картограма відносної затримки, %

ДОДАТОК Д. Теплові картограми показників транспортних потоків у моделі сценарію 3

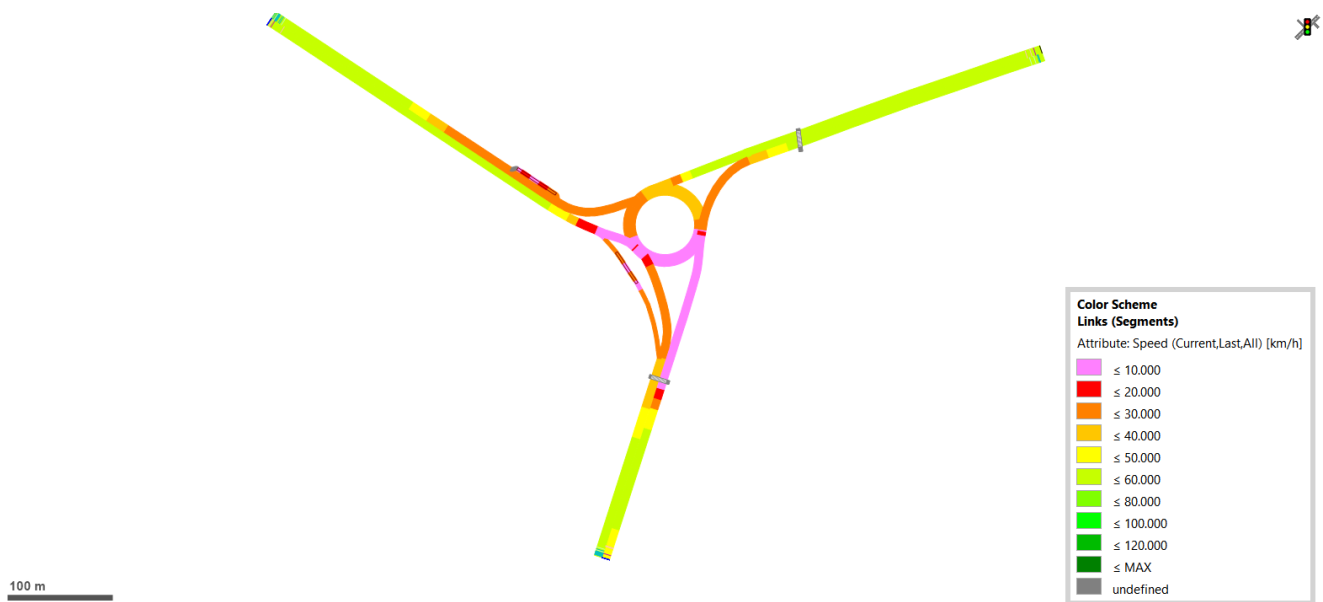


Рис.Д.1. Теплова картограма швидкості руху транспортних засобів, км/ГОД.

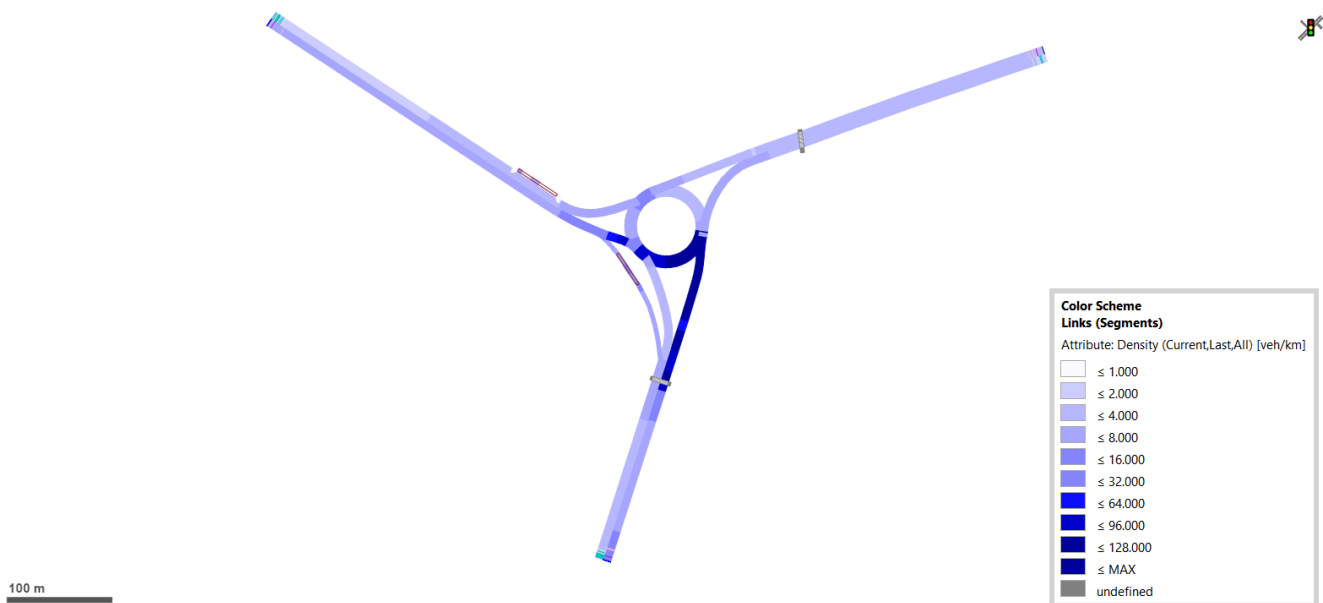


Рис.Д.2. Теплова картограма щільності руху транспортних засобів, авт./км.

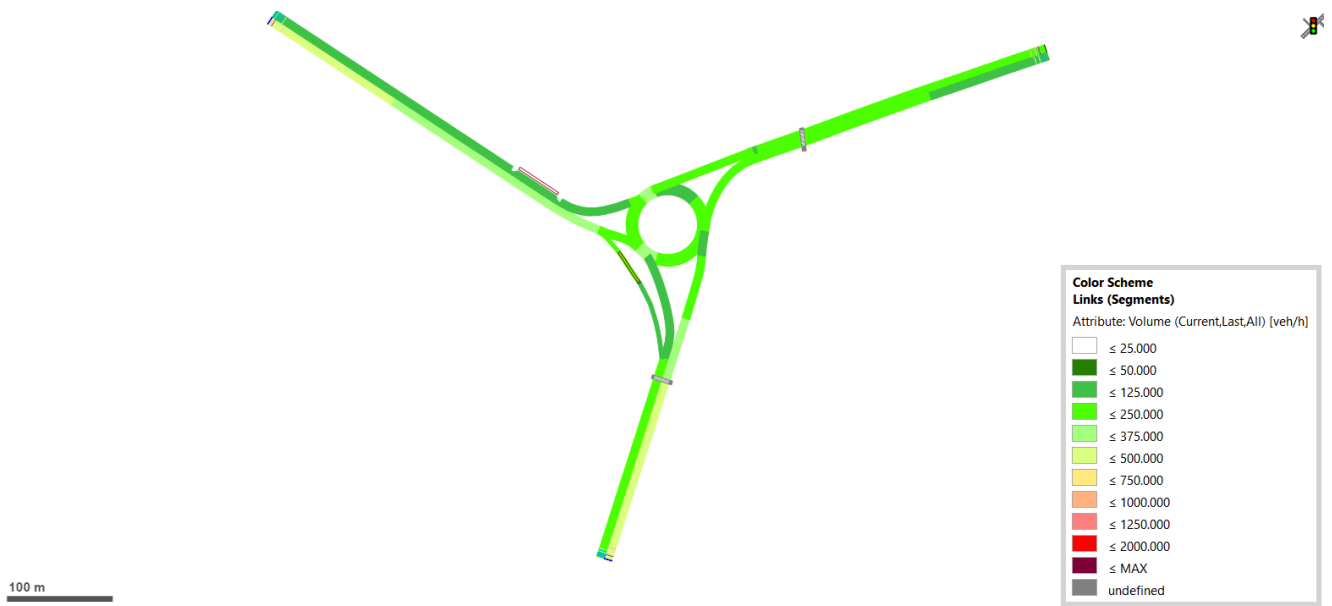


Рис.Д.3. Теплова картограма навантаження на мережу, авт./год.

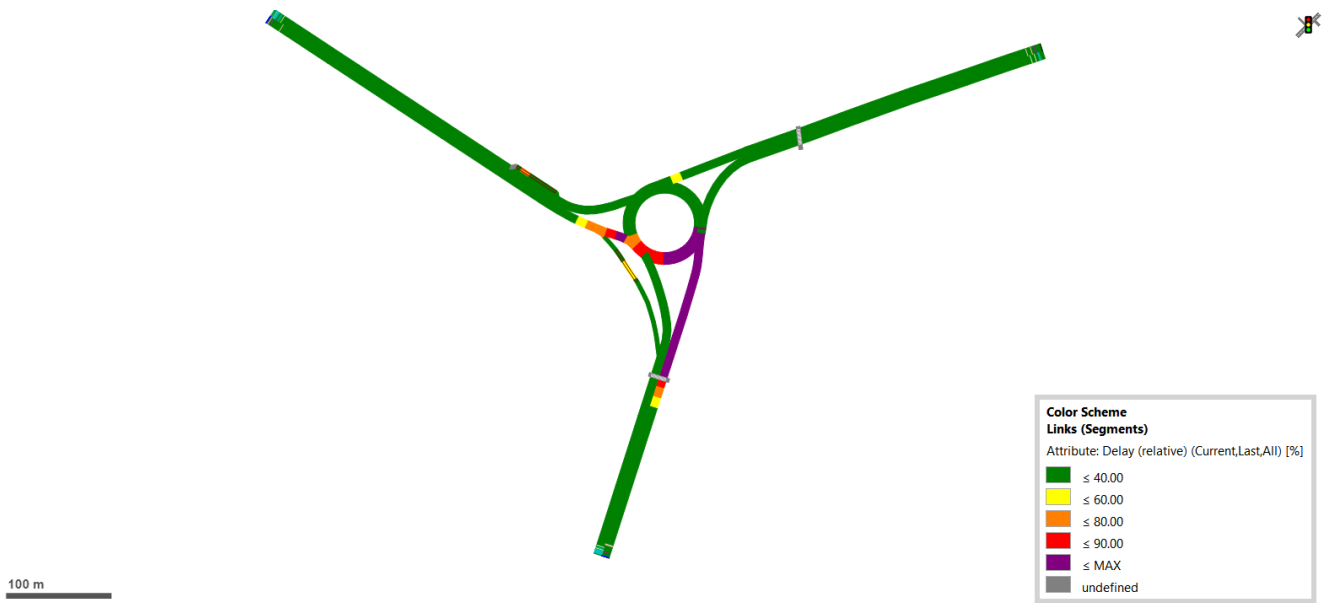


Рис.Д.4. Теплова картограма відносної затримки, %