

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

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

*Ефективність руху вантажних автомобілів у колонах перед
проходженням міжнародного пункту пропуску для автомобільного
сполучення*

Виконав

М. О. Ляшенко

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 ЛЯШЕНКУ МИКИТІ ОЛЕГОВИЧУ

Тема роботи: Ефективність руху вантажних автомобілів у колонах перед проходженням міжнародного пункту пропуску для автомобільного сполучення

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). Аналіз систем координації руху у колоні вантажних автомобілів. Методика дослідження. Транспортне моделювання та результати.
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.	Аналіз систем координації руху у колоні вантажних автомобілів	16.09.24 – 30.09.24	
2.	Методика дослідження	01.10.24 – 14.10.24	
3.	Транспортне моделювання та результати	15.10.24 – 07.11.24	
4	Підготовка та оформлення пояснювальної записки та презентації	10.11.24 – 30.11.24	

Студент _____ М. О. Ляшенко

Керівник _____ В.О. Сістук

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ КООРДИНАЦІЇ РУХУ У КОЛОНІ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ	7
1.1. Актуальність дослідження.....	7
1.2. Рівні автоматизації при русі у колоні	9
1.3. Координація вантажних автомобілів при русі у колоні.....	11
1.3.1 Формування колон на дорогах.....	13
1.3.2. Формування колон на вузлових пунктах.....	14
1.4. Функціональна архітектура системи руху у колоні	19
1.5. Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ КВАТЗ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ МІЖНАРОДНОГО ПУНКТУ ПРОПУСКУ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОГО СПОЛУЧЕННЯ	27
2.1. Технологічні процеси на міжнародному пункту пропуску для автомобільного сполучення	27
2.2. Формулювання задач та підхід до координації КВАТЗ.....	29
2.3. Аналіз можливостей спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання КВАТЗ.....	33
2.4. Висновки до розділу 2	40
РОЗДІЛ 3. ТРАНСПОРТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КВАТЗ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ МПП.....	42
3.1. Модель існуючого положення	42
3.2. Сценарії моделювання при використанні КВАТЗ.....	48
3.3. Порівняння результатів моделювання	49
3.4. Висновки до розділу 3	52
ВИСНОВКИ.....	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57
ДОДАТОК А. Приклад вирішення задачі координації КВАТЗ на Python.....	61

ВСТУП

Актуальність теми. Перспективним підходом для підвищення стійкості транспортного сектору є впровадження руху вантажних автомобілів у колонах, що реалізується завдяки сучасним інформаційним, комунікаційним та автоматизованим технологіям. Існує організаційна система, в якій перевізники співпрацюють у формуванні руху вантажних автомобілів у колоні за допомогою сервісу виклику колон. Служба виклику колон зберігає повідомлення про рішення щодо формування колон та інформує перевізників про можливі варіанти їх формування, коли вони приймають відповідні рішення. Національна модель вантажних перевезень у Швеції була використана для створення пар вантажних автомобілів «пункт відправлення - пункт призначення», а реальні дані були залучені для визначення розмірів перевізників [1]. Моделювання показало, що співпраця між перевізниками та високий рівень впровадження технології руху у колоні є критично важливими для досягнення суттєвої економії енергії та зниження витрат від руху у колоні.

Збільшення обсягу реальних вхідних даних для цих симуляцій могло б суттєво покращити достовірність отриманих результатів. Особливо актуальним було б оцінити рентабельність руху у колоні, використовуючи реальні дані про місії, отримані від перевізників. Важливо зазначити, що в науковій літературі з питань координації руху у колоні існує дефіцит демонстрацій реальних випадків. Цінним внеском у цю галузь стало б представлення економічних та екологічних переваг координації руху у колоні в умовах реальних транспортних операцій.

Важливим з цієї точки зору є кейс Нідерландів, коли шість європейських виробників вантажних автомобілів вивели на дороги загального користування напівавтоматизовані колони вантажних автомобілів, які перетинали кордони між різними європейськими містами для досягнення кінцевого пункту призначення [2].

Однак в науковій та іншій фаховій літературі відсутні відомості про можливість руху у колоні вантажних автомобілів при проходженні міжнародних

пунктів пропуску через кордон. Таким чином, дослідження даної можливості постає як актуальна науково-практична задача.

Мета роботи. Визначити вплив експлуатації вантажних автомобілів при русі у колоні під час проходження міжнародного пункту пропуску через кордон на техніко-експлуатаційні показники організації дорожнього руху.

Завдання:

1. Дослідити системи архітектуру та системи координації руху вантажних автомобілів.

2. Розробити схему технологічних процесів на міжнародному пункті пропуску через кордон Краківець (Україна-Польща).

3. Виконати аналіз можливостей програмного забезпечення для мікроімітаційного моделювання руху у колоні вантажних автомобілів.

3. Розробити та виконати транспортне моделювання існуючого стану організації технологічних процесів та руху транспорту на пункті пропуску Краківець та різних сценаріїв руху вантажних автомобілів у колоні.

4. Дослідити вплив руху у колоні на техніко-експлуатаційні показники організації дорожнього руху на пункті пропуску через кордон.

Об'єкт – параметри руху у колоні вантажних автомобілів при проходженні міжнародного пункту пропуску через кордон.

Предмет – вплив координації та організації транспортного руху у колоні вантажних автомобілів на техніко-експлуатаційні показники дорожнього руху на міжнародному пункті пропуску в автомобільному сполученні.

Методи. Огляд літературних джерел, аналіз, транспортне мікромоделювання, апроксимація, діаграма бізнес-процесу, порівняння.

Наукова новизна результатів. Встановлено вплив способу координації руху у колоні вантажних автомобілів на техніко-експлуатаційні показники руху транспортних засобів при проходженні міжнародного пункту пропуску.

Практичне значення результатів. Робота може бути використана для оптимізації технологічних процесів на міжнародному пункті пропуску в автомобільному сполученні.

Структура і обсяг. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку літературних джерел з 32 найменувань та додатку. Загальний обсяг роботи – 57 с, у тому числі 26 рисунків та 3 таблиці.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ КООРДИНАЦІЇ РУХУ У КОЛОНІ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ

1.1. Актуальність дослідження

Перевезення товарів і людей стимулює економічне зростання, а економічне зростання стимулює попит на перевезення.

Автомобільні перевезення є популярним видом вантажоперевезень завдяки гнучкості в плануванні та можливості надання послуг «від дверей до дверей». Одним із перспективних підходів для підвищення стійкості транспортного сектору є використання руху вантажних автомобілів у колонах, який стає можливим завдяки сучасним інформаційним, комунікаційним та автоматизованим технологіям. Колона вантажних автотранспортних засобів (КВАТЗ) являє собою групу транспортних засобів, що рухаються з невеликими проміжками між собою. Зазвичай водій керує першим вантажним автомобілем у колоні, тоді як рух наступних транспортних засобів контролюється або навіть автоматично регулюється системою автоматизованого водіння. Основні переваги такого підходу включають зменшення енергоспоживання, зниження навантаження на водіїв, підвищення пропускної здатності доріг та забезпечення більш безпечного водіння.

Рух вантажних автомобілів у колонні може суттєво знизити експлуатаційні витрати, основними компонентами яких є заробітна плата водіїв та витрати на пальне. Кожна з цих статей витрат складає приблизно третину від загальних операційних витрат [3, 4, 5]. На початкових етапах автоматизації колонного руху і головний, і слідкуючий вантажні автомобілі керуються водіями-людьми, а зниження операційних витрат досягається за рахунок економії пального. Однак немає єдиної думки щодо того, чи створює це життєздатний бізнес-кейс [6, 7]. На більш високих рівнях автоматизації слідувачі вантажні автомобілі можуть бути

повністю автоматизованими або навіть безпілотними. Це дозволяє зменшити витрати на заробітну плату водіїв і вирішити проблему їх дефіциту, що значно підсилює економічну доцільність колонного руху.

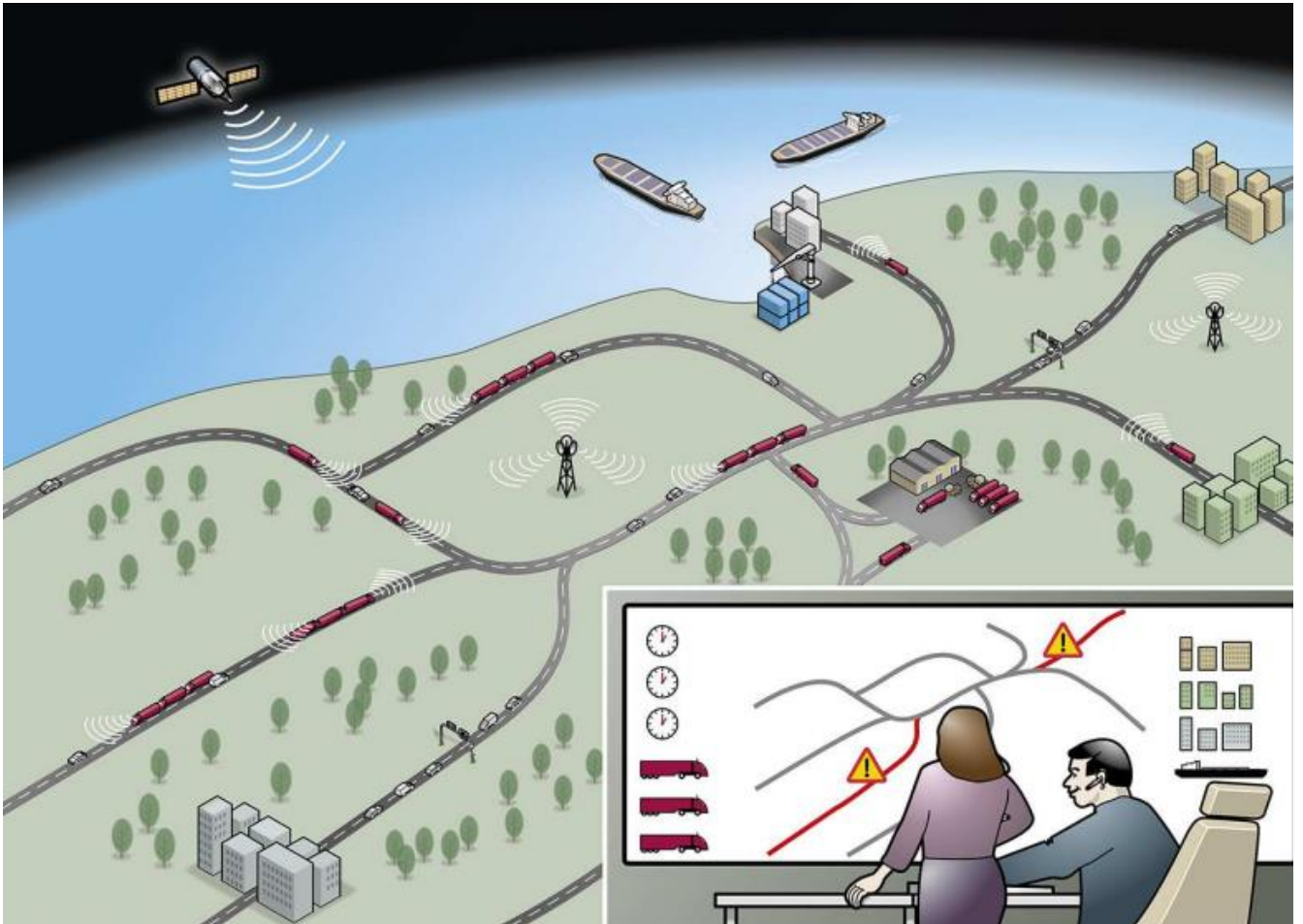


Рис.1.1. Система управління автопарком, яка має на меті максимально ефективно використовувати парк АТЗ

Екологічні та комерційні вигоди стимулюють інвестиції в технологію колонного руху вантажних автомобілів. Більшість переваг колонного руху виникають завдяки невеликим відстаням між транспортними засобами або автоматизованому водінню. Основними перевагами колонного руху є:

- зменшення споживання пального
- зменшення навантаження на водіїв

покращення транспортного потоку, пропускної здатності доріг та безпеки.

Колонний рух зменшує споживання пального завдяки зменшенню аеродинамічного опору через малі відстані між вантажними автомобілями. Це, в свою чергу, веде до зменшення викидів парникових газів та експлуатаційних витрат. Зменшення споживання пального або аеродинамічного опору було продемонстровано в чисельних дослідженнях [8, 9] та польових експериментах [10, 11]. Ці дослідження показали економію пального для вантажних автомобілів, що рухаються слідом, на рівні близько 10%, а також підтвердили економію пального для вантажного автомобіля-лідера близько 5%.

Рух у колоні є технологією напівавтоматизованого водіння, при якій частина маневрування вантажних автомобілів, що рухаються слідом, передається автоматизованій системі водіння. Автоматизація може потенційно полегшити робоче навантаження і когнітивний стрес водіїв, що було досліджено в експерименті на симуляторі водіння [12].

Іншими перевагами колонного руху вантажних автомобілів є збільшення пропускної здатності доріг, зменшення заторів та підвищення безпеки. Пропускна здатність доріг зростає, а затори зменшуються завдяки зменшенню відстаней між транспортними засобами, автоматизації та кооперативному водінню. Безпека руху покращується завдяки автоматизації та спільному водінню. Моделювання [13, 14] продемонструвало як збільшення пропускної здатності доріг, так і підвищення безпеки водіння.

1.2. Рівні автоматизації при русі у колоні

Рух вантажних автомобілів у колоні є частиною розвитку, коли водій поступово відсторонюється від керування. Таким чином, рух у колоні прокладає шлях до повністю автономних вантажних автомобілів. У [10] прогнозується, що

рух вантажних автомобілів у колоні буде розвиватися в чотири етапи з підвищенням рівня автоматизації.

На першому рівні автоматизації руху вантажних автомобілів у колоні всіма автомобілями керують водії, але водіям автомобілів, що їдуть позаду, допомагає вдосконалена система підтримки водіння, подібна до адаптивного круїз-контролю. На другому рівні головний вантажний автомобіль маневрує під керуванням водія, а вантажні автомобілі, що слідуєть за ним, рухаються в колоні з повною автоматизацією.

На третьому рівні всі вантажні автомобілі в колоні рухаються автономно на деяких дорогах, але на інших — головний вантажний автомобіль все ще потребує керування людиною-водієм. На четвертому, останньому рівні, і головний, і слідуєть вантажні автомобілі рухаються з повною автоматизацією на всіх дорогах. Рівні руху вантажних автомобілів у колоні, описані в [10], відповідають рівням автоматизації транспортних засобів, зазначеним у [14].

Табл.1.1

Рівні автоматизації вантажних автомобілів при русі у колоні

Рівень автоматизації транспортного засобу	Назва	Рульове управління та прискорення	Моніторинг	Резервування	Можливості системи
0	Без автоматизації	Людина	Людина	Людина	немає
1	Підтримка водіння	Людина і система	Людина	Людина	Деякі режими водіння
2	Часткова автоматизація	Система	Людина	Людина	Деякі режими водіння
3	Умовна автоматизація	Система	Система	Людина	Деякі режими водіння
4	Висока автоматизація	Система	Система	Система	Деякі режими водіння
5	Повна	Система	Система	Система	Усі режими

	автоматизація				
--	---------------	--	--	--	--

Переваги руху вантажних автомобілів у колоні та, відповідно, стимули для формування таких колон будуть змінюватися залежно від рівня автоматизації.

На першому рівні автоматизації руху вантажних автомобілів у колоні, коли всі автомобілі керуються людьми, основним стимулом для формування колон є зменшення споживання палива. На другому і третьому рівнях автоматизації, коли вантажні автомобілі, що слідуєть за лідером, стають автоматизованими, комерційні вигоди значно зростають, особливо якщо водії цих автомобілів можуть виконувати інші завдання або якщо автомобілі можуть бути безпілотними. На останньому рівні автоматизації, коли всі вантажні автомобілі в колоні повністю автономні, автоматизація перестає бути унікальною перевагою, оскільки вантажні автомобілі зможуть рухатися автономно навіть без колон.

Крім того, стимулом для формування колон вантажних автомобілів є не лише зменшення споживання палива, але й зниження заторів та підвищення безпеки дорожнього руху. У роботі [15] автори досліджують конкурентоспроможність колонного руху як методу вантажних перевезень при різних рівнях автоматизації. Імітаційне дослідження італійської транспортної мережі показало, що на першому рівні автоматизації колонного руху більше 25% загального обсягу вантажів перевозилося колонним або частково колонним способом. На другому рівні автоматизації ця частка зросла до 35%.

1.3. Координація вантажних автомобілів при русі у колоні

Координація руху в колоні вантажних автомобілів – це процес прийняття рішення про те, які вантажні автомобілі будуть формувати колони і як колони будуть формуватися в транспортній системі.

Координація є ключовим елементом для формування колон АТЗ, з огляду на те, що вантажні АТЗ мають різні графіки та маршрути. Процес координації у

КВАТЗ полягає у визначенні, які вантажні АТЗ утворять колони та яким чином буде формуватися кожна з них. Основна мета полягає в максимізації переваг руху у колоні, водночас дотримуючись термінів доставки та інших обмежень.

Деякі вантажні автомобілі можуть спонтанно формувати колони з сусідніми вантажними автомобілями без координації. Однак, враховуючи різні графіки і маршрути руху вантажних автомобілів, координація може значно підвищити можливості формування колон. Проаналізовано літературу про координацію колон і класифіковано, що вона розглядає або випадок, коли колони формуються на дорогах шляхом регулювання швидкості, або випадок, коли колони формуються на вузлових станціях шляхом синхронізації часу виїздів. Ці два випадки формування колони проілюстровані на рис.1.2.

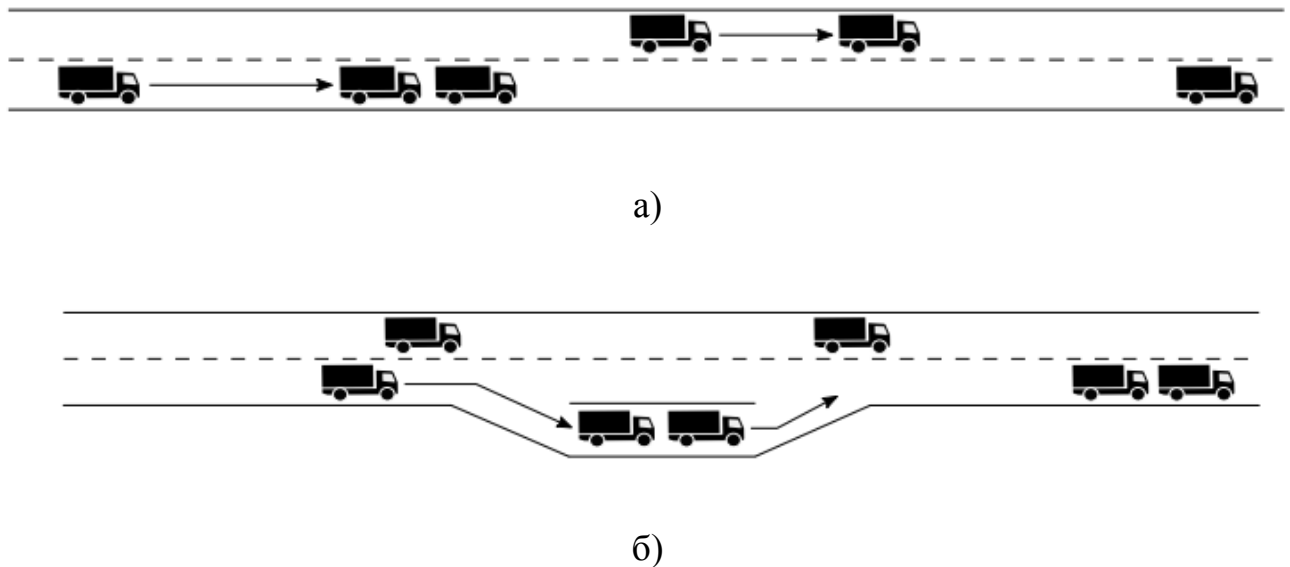


Рис.1.2. Формування колони шляхом регулювання швидкості руху (а) та у вузловому пункті (б)

Також звернемо увагу на літературні джерела, які присвячені координації з одним або декількома перевізниками.

1.3.1 Формування колон на дорогах

Вантажні автомобілі можуть формувати колони на дорогах без зупинок на вузлових станціях, трохи сповільнюючись або прискорюючись, як показано на рис. 2.5а. Основними недоліками формування колон на дорогах є те, що можуть бути порушені швидкісні обмеження, а навколишній рух може заважати або перешкоджати фазі формування. Експерименти в [16] показують, що навіть в умовах інтенсивного руху відстань наздоганяння збільшується на 10% у порівнянні з умовами, коли навколишній рух відсутній. У разі формування колон на дорогах, завдання координації включає визначення профілів швидкості вантажних автомобілів. При розгляді координації колон на дорогах, як правило, існує винагорода за формування колони, а також витрати на коригування швидкості, наприклад, через ризик затримок або підвищеного споживання пального.

В роботах [16 – 19] автори досліджували координацію множини вантажних автомобілів з фіксованими маршрутами при формуванні колон на дорогах. Метою цих досліджень було максимізувати сумарний прибуток розглянутих вантажних автомобілів, що є реалістичним, якщо вони мають спільну мету або належать одному перевізнику. Оптимальне з точки зору витрат пального об'єднання двох вантажних автомобілів на дорозі було розглянуто в роботі [16]. На основі свого методу оцінки оптимальності формування колон з двох вантажних автомобілів автори запропонували евристичний алгоритм координації, придатний для більшої кількості вантажних автомобілів.

Координація руху в колоні в дорожній мережі із загальною топологією розглядалася в роботі [17]. Автори сформулювали цілочисельну лінійну програму для мінімізації сумарного споживання палива всіма вантажними автомобілями. Основна увага приділялася формуванню колон на дорогах, але сформульовану задачу також можна розглядати як таку, що охоплює формування колон на

вузлових станціях. Автори показали, що задача оптимізації є NP-важкою, і запропонували евристичний розв'язок для роботи з великою кількістю вантажних автомобілів.

У роботі [18] розглянуто координацію руху в колоні вантажних автомобілів, що пересуваються в дорожній мережі із загальною топологією. Для вирішення задачі координації колон було запропоновано евристичне рішення. Це рішення базується на виборі відповідного набору головних вантажних автомобілів, а потім на оптимальному узгодженні вантажних автомобілів, що слідує за ними, з головними.

Координація руху в КВАТЗ різних типів у дорожній мережі розглядалася в роботі [19]. Завдання було сформульоване як задача про багатотоварний потік з бінарними змінними рішення, і для її вирішення були запропоновані апроксимації та евристики, щоб обробляти великомасштабні задачі.

У роботі [20] автори досліджували координацію на дорожньому перехресті, коли вантажні автомобілі прибувають відповідно до стохастичного процесу, а метою є максимізація загального прибутку з плином часу. Такий підхід є реалістичним, якщо, наприклад, перевізники дозволяють формувати змішані колони, але не бажають ділитися маршрутами та розкладом з іншими перевізниками. Припускаючи незалежні та однаково розподілені прибуття, автори показують, що оптимально для вантажного автомобіля приєднатися до колони, якщо їх прогнозований час прибуття на перехрестя відрізняється від часу прибуття колони менш ніж на певний поріг.

1.3.2. Формування колон на вузлових пунктах

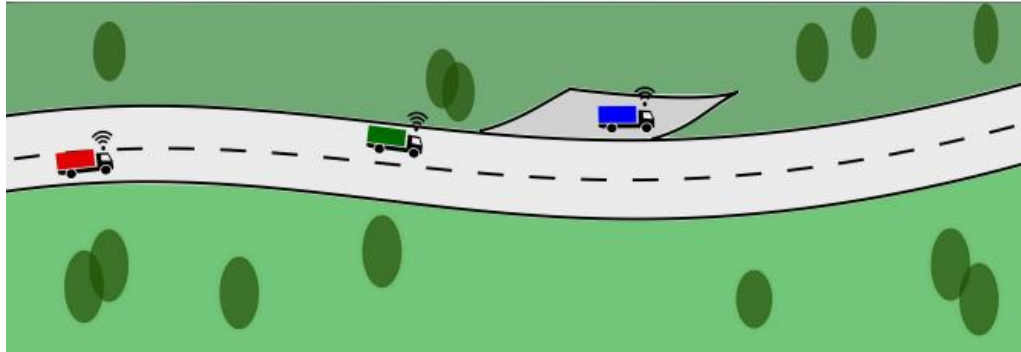
Вантажні автомобілі можуть формувати колони у вузлах уздовж доріг, де вони можуть чекати на інші автомобілі, як показано на рис.1.2 б. Група вантажних АТЗ, що виїжджає з вузла і в'їжджає на дорогу, утворює колону. У сучасній

транспортній інфраструктурі багато місць можуть функціонувати як вузли для формування колон, наприклад, вантажні термінали, заправні станції, автостоянки, пункти збору плати за проїзд та порти. Періоди відпочинку водіїв суворо регламентовані, і водії, які здійснюють міжміські перевезення, змушені відпочивати під час своїх поїздок [21]. Зони відпочинку є ідеальними місцями для розташування хабів, оскільки водії можуть відпочити, чекаючи на інші вантажні автомобілі для формування колон. Що стосується формування колон на базі вузлових пунктів, то завдання координації включає визначення часу очікування або часу відправлення з них вантажних автомобілів. Як правило, існує винагорода за об'єднання в колони та плата за очікування на вузлових пунктах через ризик затримки доставки або оплати понаднормової роботи водіїв.

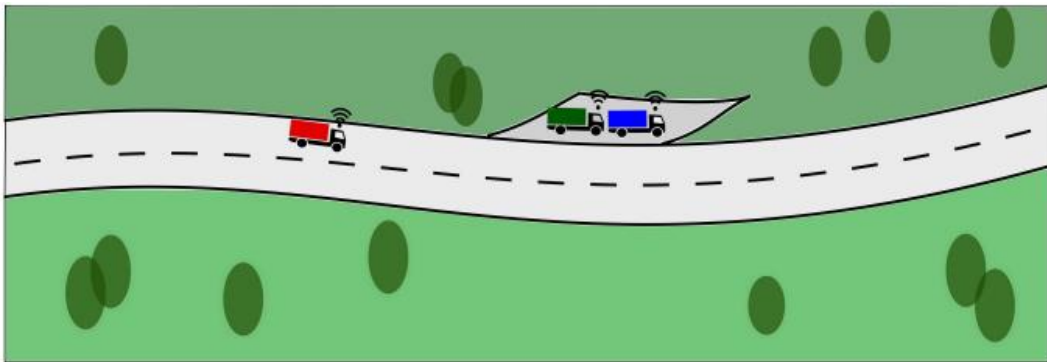
Колонний принцип вимагає координації дій вантажних автомобілів на різних рівнях. По-перше, вантажні автомобілі потребують координації всередині колони для безпечного та ефективного руху на невеликих відстанях між автомобілями. По-друге, координація потрібна на вищому рівні, щоб вантажні автомобілі могли формувати колони, враховуючи відмінності в маршрутах і розкладах руху. Координація колон на високому рівні включає в себе рішення про те, які вантажні автомобілі будуть формувати колони і як вони будуть формуватися. Тоді розглядається координація колони на високому рівні, коли вантажні автомобілі можуть зупинятися і чекати на інші в вузлових пунктах.

Концептуальний приклад формування колони на вузловому пункті показаний на рис. 1.3. Вантажні автомобілі у вузловому пункті приймають рішення, чи виїжджати, чи чекати на прибуття інших вантажних автомобілів. На рис. 1.3 виділено три випадки. У першому випадку синій вантажний автомобіль знаходиться у вузловому пункті і чекає на прибуття інших автомобілів, тоді як зелений і червоний вантажні автомобілі їдуть до вузлового пункту. У другому випадку синій і зелений автомобілі формують колону у вузловому пункті та негайно виїжджають, не чекаючи на червоний автомобіль. У третьому випадку

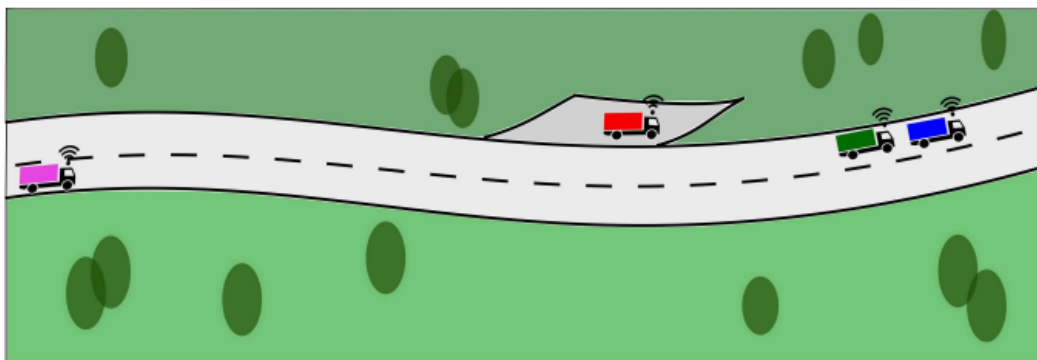
синій і зелений вантажні автомобілі рухаються дорогою у вигляді колони, в той час як червоний вантажний автомобіль залишається на вузловій станції і чекає на прибуття інших автомобілів.



1)



2)



3)

Рис.1.3. Приклад формування колони на вузловому пункті

У роботах [21 - 27] досліджено координацію набору вантажних автомобілів при формуванні колон на вузлових пунктах. Ці дослідження спрямовані на максимізацію сумарного прибутку розглянутих вантажних автомобілів і, отже, підходять для АТЗ з однаковою метою або від одного перевізника.

Автори в [21] розглянули координацію колони з двох вантажних автомобілів, які можуть сформувати колону на вузловому пункті, при цьому час їх прибуття є невизначеним через стохастичний час у дорозі. Автори показали, що оптимально формувати колону з двох вантажівок, якщо прогнозований час прибуття відрізняється менше за певне порогове значення.

Координація КВАТЗ з ідентичними маршрутами між вузлом і пунктом призначення вивчалася в [22]. Час відправлення АТЗ коригується для формування колон. Автори сформулювали задачу координації колон як програму зі змішаними цілими числами. За допомогою теорії графів було показано, що ця задача розв'язується за поліноміальний час при різних припущеннях щодо функції винагороди за колони. Розв'язок був використаний для дослідження прибутковості формування колон та впливу обмежень на довжину колони і час очікування.

Координація колон на вузловому пункті, коли вантажні автомобілі мають різні пункти призначення в дорожній мережі, вивчалася в роботі [23]. Автори сформулювали змішану цілочисельну лінійну програму для максимізації сумарного прибутку всіх вантажних автомобілів. Розв'язок було використано в імітаційному дослідженні з реалістичним попитом на перевезення для демонстрації прибутковості формування колон при різних припущеннях щодо вигоди від формування колон і часових інтервалів відправлення.

Автори [20, 24] вивчали метаевристичні рішення для координації колон. Генетичне програмування і оптимізація на основі мурашиних колоній досліджувалися в роботах [20] та [24] відповідно.

Автори [25] розглянули координацію часу відправлення електромобілів на вузлових пунктах на ділянці дороги, де вантажні автомобілі можуть заряджатися на вузлах, чекаючи, поки інші формують колони. Стимул для формування колон базується на економії часу, оскільки дальність пробігу вантажних АТЗ, що слідують за ними, збільшується завдяки меншому споживанню енергії. Проблему було сформульовано як задачу змішаної цілочисельної оптимізації, яку розв'язано евристичним методом.

Коли вантажні автомобілі належать різним перевізникам і дозволяється формування колон між перевізниками, можна припустити, що АТЗ мають різні цілі, та, відповідно, водії не бажатимуть дотримуватися координаційних рішень, які максимізують загальний прибуток усіх АТЗ. У роботах [26, 27, 28] автори досліджували координацію на базі вузлових пунктів для набору вантажних автомобілів, коли кожен АТЗ або перевізник зацікавлений в оптимізації власного прибутку.

У роботі [26] автори досліджували сценарій, в якому легкові та вантажні автомобілі, що використовують спільну ділянку дороги, приймають рішення про час відправлення з вузлового пункту, щоб максимізувати свої функції корисності. Функція корисності кожного АТЗ включає винагороду за формування колон, вартість відхилення від заданого часу відправлення та витрати на затори. Функція корисності кожного легкового автомобіля включає лише вартість відхилення від заданого часу відправлення та витрати на затори. Стратегічна взаємодія між транспортними засобами вивчалася в рамках некооперативної гри, а чиста рівновага Неша розглядалася як розв'язок задачі координації КВАТЗ [26], при обмеженні односмуговою дорожньою мережею, де АТЗ мають один і той самий початковий вузол, а час у дорозі є детермінованим.

Координація КВАТЗ різних типів, які можуть формувати колони на одній ділянці дороги, розглядалася в [27]. Вважалось, що група вантажних автомобілів з однаковою швидкістю утворює колону. Кожна АТЗ має індивідуальну функцію

корисності, що включає винагороду за формування колони та витрати за відхилення від заданої швидкості. Автори запропонували рішення, яке максимізує загальний прибуток усіх АТЗ, а також механізм розподілу прибутку таким чином, щоб у водіїв вантажних автомобілів не було стимулів відхилитися від оптимального рішення в рамках коаліційної гри.

Автори в роботі [28] дослідили потенціал формування колон як режиму транспорту між двома портами, коли вантажівкам дозволено повну автоматизацію в портах, але не на дорозі між портами. Проблема полягає в плануванні часу відправлення з порту відправлення, а вантажні автомобілі належать різним перевізникам, кожен з яких використовує певну кількість АТЗ. Стратегічна взаємодія між перевізниками моделюється як гра Штакельберга.

У роботі [29] автор дослідив задачу вивільнення колон на вузловому пункті, куди вантажні автомобілі прибувають відповідно до стохастичного процесу, що є реалістичним у випадках, коли маршрути та розклади не є спільними. Автор показав, що вивільнення вантажних автомобілів з вузла є оптимальним у разі, коли кількість вантажних автомобілів перевищує певний поріг, за умови незалежного та однаково розподіленого прибуття.

1.4. Функціональна архітектура системи руху у колоні

Представлено багаторівневу структуру системи руху у колоні та функціональну системну архітектуру служби колонного виклику, за допомогою якої перевізники можуть співпрацювати у формуванні колон. Нарешті, ми описуємо процедуру прийняття рішення про формування колон, що запускається при прибутті вантажного автомобіля на хаб (вузловий пункт).

Система руху в колоні складається з рівнів, необхідних для інтеграції технології колонного руху в сучасну транспортну систему, безперешкодного формування колон і підтримки безпечного та ефективного водіння колон.

Структура, показана на рис. 1.4, демонструє основну функцію кожного шару. Це службовий, стратегічний, тактичний і оперативний рівні, де перші два рівні є позабортовими системами, а останні два – бортовими системами.

Тактичний та оперативний рівні необхідні для безпечного та ефективного управління рухом у колоні. Тактичний рівень включає внутрішню координацію в колоні для підтримання її згуртованості та виконання безпечних маневрів, таких як створення проміжків між транспортними засобами, коли вантажні автомобілі приєднуються до колони або від'їжджають від неї. Вихідними даними тактичного рівня є еталонні прискорення, швидкості та відстані між транспортними засобами, які передаються місцевим диспетчерам вантажних автомобілів. Оперативний рівень включає локальне управління окремими вантажними автомобілями. Залежно від технології руху в колоні, локальний контроль включає поздовжнє і, можливо, поперечне управління. Вантажні автомобілі в колоні взаємодіють за допомогою зв'язку між машинами. Сервісний і стратегічний рівні необхідні для вантажних автомобілів з різними маршрутами, для формування колон, інтеграції колон в транспортну систему і забезпечення співпраці між перевізниками. Стратегічний рівень включає координацію на високому рівні колон, і його основна функція полягає в об'єднанні вантажних автомобілів у колони на основі їхніх маршрутів та обмежень місії. Стратегічний рівень також розраховує, як колони будуть формуватися, наприклад, синхронізуючи час відправлення на вузлових станціях або коригуючи швидкісний режим на дорогах. Стратегічний і тактичний рівні зв'язуються між собою за допомогою системи зв'язку «транспортний засіб - все».

Рівень послуг включає сервіси, які забезпечують високорівневу координацію руху в колоні на стратегічному рівні з вхідними даними та обмеженнями. Наприклад, сервіси перевізників забезпечують координацію на високому рівні з маршрутами і обмеженнями місії, які використовуються для підбору вантажних автомобілів у колоні. Іншими сервісами, корисними для

координації на високому рівні, є сервіси з передачі даних, такі як прогнози часу в дорозі та погоди, а також сервіси органів влади, які надають дані для управління дорожнім рухом та обмеження для колон. Рівень послуг на рис. 1.4 також включає службу виклику колон, яка зберігає плани передислокації колон і інформує, до яких колон можуть приєднатися вантажні автомобілі. Стратегічний і сервісний рівні взаємодіють за допомогою мобільного зв'язку, міжміського зв'язку та хмарних сервісів.

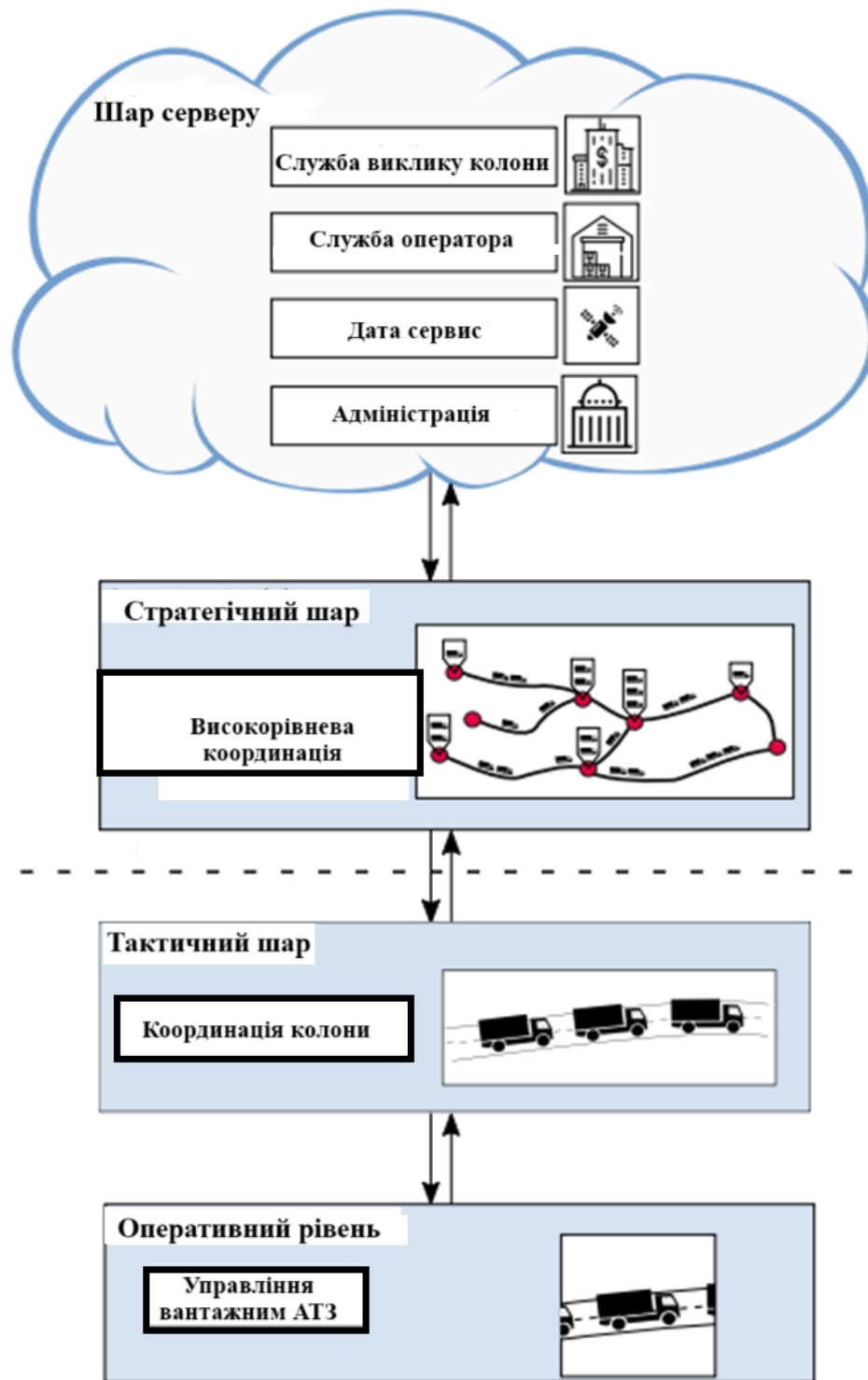


Рис.1.4. Багаторівнева структура системи руху у колоні



Рис.1.5. Функціональна системна архітектура опорного пункту зв'язку для руху у колоні.

Ми розглядаємо систему руху в колоні, в якій перевізники, перелічені від 1 до F , співпрацюють у формуванні колон, але кожен перевізник зберігає контроль над своїм парком вантажних автомобілів. Кожен перевізник наймає координатора, який має доступ до маршрутів та часових обмежень вантажних автомобілів

перевізника i прагне оптимізувати свої плани формування колон. Назвемо координатора перевізника f координатором f .

Співпраця між перевізниками забезпечується службою виклику колон, яка зберігає плани руху вантажних автомобілів у колоні та інформує координаторів конкретних перевізників про те, до яких колон можуть приєднатися їхні вантажні автомобілі на маршрутах їхніх перевезень. Функціональна системна архітектура сервісу колонного виклику показана на рис.1.5. Вхідними даними для координатора f з модуля перевізника f є маршрути та часові обмеження вантажних автомобілів від перевізника f , а вхідними даними від служби колонного виклику є плани колон інших перевізників, які зберігаються в базі даних планів колон. Координатор f використовує цю інформацію для оптимізації планів заїздів вантажних автомобілів перевізника f . Оптимізовані плани колон потім повертаються до бази даних планів колон, щоб інші координатори могли використовувати їх при прийнятті рішень щодо розстановки вантажних автомобілів у колоні. Ми розглянемо випадок, коли колони формуються на вузлових станціях, де вантажні автомобілі можуть чекати на інші, а група вантажних автомобілів формує колону, коли вони виїжджають з вузла і виїжджають на дорогу одночасно. Таким чином, плани формування колон вантажних автомобілів складаються з часу виїзду з вузлових пунктів.

Процедура прийняття рішень у системі руху в колоні показана на рис. 1.6 і запускається, коли вантажний автомобіль прибуває на вузловий пункт. Координатор конкретного перевізника, що прибув, запитує у служби виклику плани колон інших вантажних автомобілів, що прямують за маршрутом прибулого вантажного автомобіля. Координатор перевізника вирішує, до яких колон приєднається прибулий вантажний автомобіль, виходячи з його маршруту, часових обмежень і планів колон інших вантажних автомобілів. Прибулий вантажний автомобіль відправляється у визначений час відправлення з поточного

вузла, а служба колонного виклику інформується про визначений час відправлення на вузлах прибулого вантажного автомобіля.

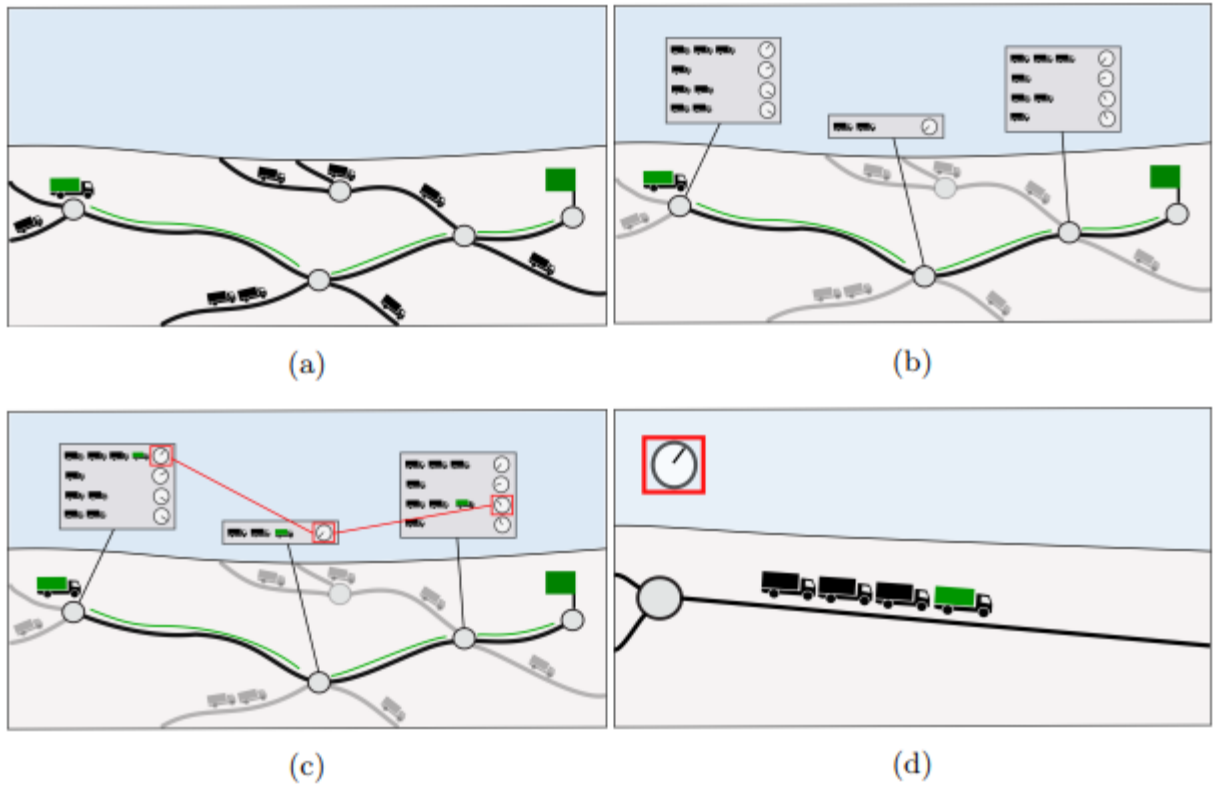


Рис.1.6. Процедура прийняття рішень. (а) Вантажний автомобіль прибуває на вузловий пункт, і запускається процедура прийняття рішень. (б) Координатор конкретного перевізника отримує від служби виклику колони плани об'єднання інших вантажних автомобілів на шляху, що залишився. (с) Координатор перевізника розраховує оптимальні колони для приєднання вантажного автомобіля та інформує службу виклику про своє рішення. (d) Вантажний автомобіль відправляється разом з партнерами по колоні у розрахований час відправлення.

1.5. Висновки до розділу 1

Формування колон вантажних автомобілів було представлено як інновація, яка може зменшити споживання пального та експлуатаційні витрати вантажних автомобілів. Описані переваги формування руху у колоні, які змінюються залежно від рівнів автоматизації АТЗ. Зокрема, експлуатаційні витрати вантажних автомобілів значно знижуються, коли вантажні автомобілі, що слідують за ними, є повністю автоматизованими.

Проведено огляд літератури з питань координації КВАТЗ. Незважаючи на чисельні дослідження координації КВАТЗ при формуванні колони на дорозі або у вузловому пункті, дане питання у частині регулювання проходження міжнародних пунктів пропуску через кордон в автомобільному сполученні із стохастичним прибуттям АТЗ не розглядалось.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ КВАТЗ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ МІЖНАРОДНОГО ПУНКТУ ПРОПУСКУ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОГО СПОЛУЧЕННЯ

2.1. Технологічні процеси на міжнародному пункту пропуску для автомобільного сполучення

Відповідно до «Положення ...» [30] пункт пропуску – це спеціально обладнана територія на транспортних вузлах і в аеропортах, де здійснюються прикордонний і митний контроль осіб, транспортних засобів і вантажів. У даній роботі дослідження можливостей КВАТЗ проводиться для міжнародного пункту пропуску (МПП) для автомобільного сполучення «Краківець» (Львівська область) Україна-Польща. Технологічна схема пропуску осіб, транспортних засобів та вантажів через державний кордон у МПП «Краківець» детально описана в документі Держприкордонслужби України [31].

Технологічні операції, які проходять АТЗ на виїзд з України та на в'їзд, відтворені та показані на рис.1.2.

Для вантажних АТЗ організовано п'ять окремих ліній (10 смуг руху) для виїзду з України та п'ять ліній (10 смуг руху) на в'їзд в Україну, тобто на кожній ділянці прикордонного контролю є дві смуги для обслуговування вантажних АТЗ. Тривалість технологічних операцій та алгоритми прийняття рішень при проходженні прикордонного, митного та фітосанітарного контролю показані на рис.2.1.

Потік вантажних АТЗ поступає на обслуговування стохастично. Транспортні затримки виникають як на в'їзд, так і на виїзд. Черга АТЗ на виїзді можливо обумовлена затримкою з польської сторони та недостатністю смуг на прикордонних ділянках.

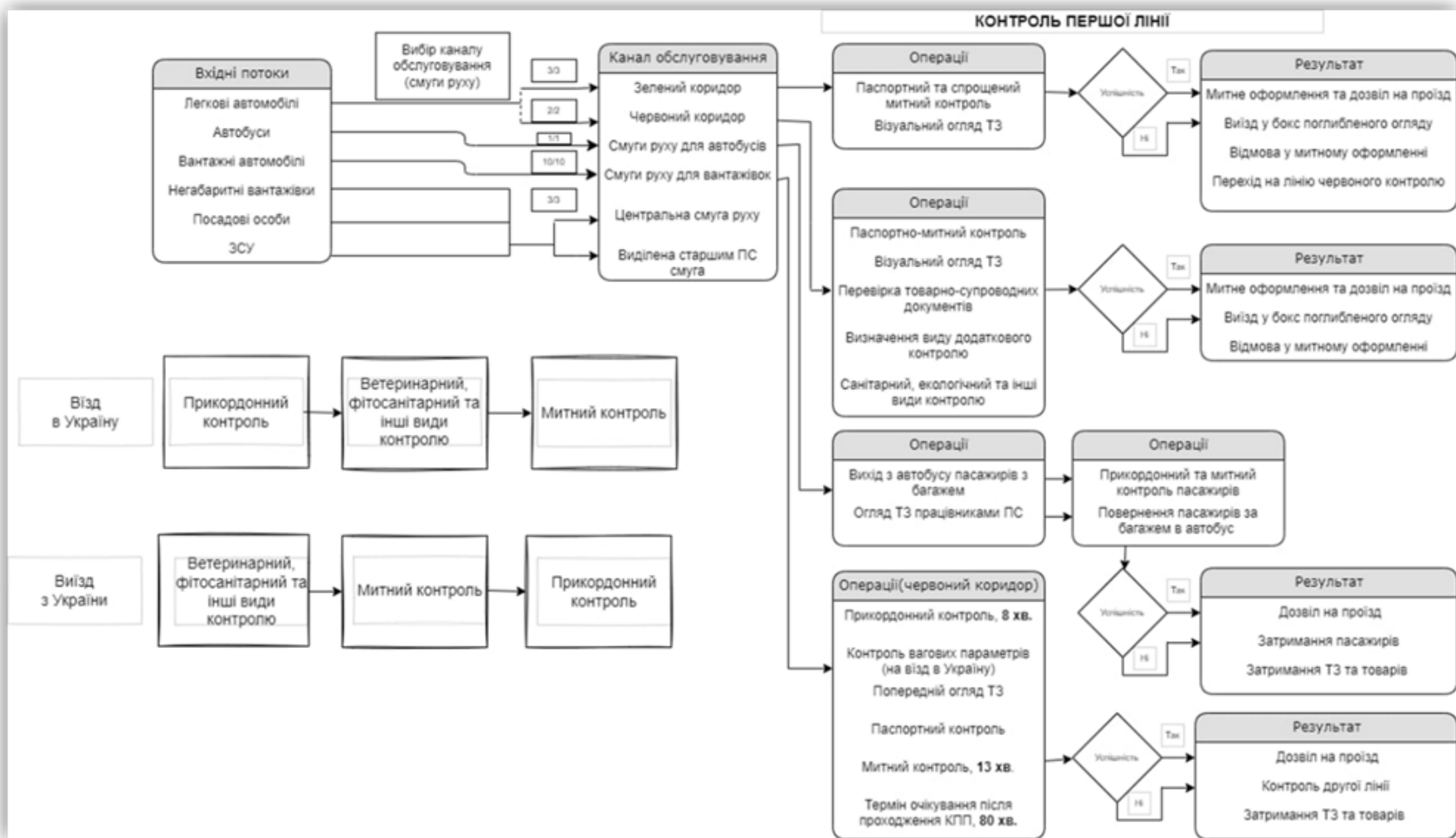


Рис.2.1. Технологічні операції на МПП.

Черга АТЗ на в'їзд викликана тим, що водії вантажних автомобілів для постановки на сканування вимушені виконувати маневри заднім ходом.

2.2. Формулювання задач та підхід до координації КВАТЗ

Розглянемо формулювання задачі координації КВАТЗ, які проходять МПП. У цієї задачі є кілька ключових компонентів:

Вантажні АТЗ і перевізники:

- Набір вантажних АТЗ $N = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$.
- Кожний вантажний АТЗ t_i належить до одного перевізника f , де $f \in \{1, 2, \dots, F\}$. Набір вантажівок для перевізника f позначається як $F_f \in N$.

Координатори перевізників:

Кожен перевізнак має координатора, який позначається як координатор f' для перевізника f .

Маршрути і мережа доріг:

- Вантажні АТЗ мають маршрути в регіоні, що включають мережу вузлових пунктів та відрізків доріг, що з'єднують вузлові пункти.
- Набір вузлів у регіоні V, ξ
- Набір відрізків доріг E , де кожен відрізок доріг з'єднує два вузли.
- Кожний вантажний АТЗ $i \in N$ має маршрут $P_i \in N$, що є послідовністю відрізків доріг.

Час на відрізках доріг:

Для кожного вантажного АТЗ i , визначається прогнозований час на кожному відрізку дороги в маршруті. Це може бути позначено як $t_{i,j}$, де ij — позиція в маршруті.

Для кожного відрізка дороги $e \in \xi$ служба зберігає прогнозований час відправлення вантажних АТЗ D_e , які виїжджають з вузла v і в'їжджають на відрізок

è. Це можна подати як функцію $t_{e,v}$ з прогнозованим часом відправлення для відрізка è з вузла v.

Колона формується, коли група вантажних АТЗ одночасно виїжджає з вузла і в'їжджає на ділянку дороги. Таким чином, колони, до яких приєднається вантажний АТЗ, визначаються часом її виїзду з вузлів за маршрутом, який контролюється часом очікування.

Час відправлення в вузлових пунктах обчислюється як:

$$t_{l+1}^i = w_{l+1}^i + t_l^i + \tau_l^i,$$

де $l=k, \dots, P_i-1$ та τ_l^i – час у дорозі на l -тому сегменті дороги.

Вигоди від формування колон можуть включати зменшене споживання пального, зменшене робоче навантаження або інші економічні переваги. Важливо, щоб розподіл вигод відбувався справедливо, враховуючи, що лідируючий вантажний АТЗ зазвичай отримує менші вигоди в порівнянні з тими, що їдуть за ним.

Ось один із простих механізмів розподілу вигод, який можна використовувати:

- Фіксована частка для лідера: Лідируючий вантажний АТЗ отримує фіксовану частку вигоди, наприклад, 20% від загальної вигоди. Решту вигод розподіляють серед вантажівок, що слідує за лідером.
- Пропорційний розподіл серед інших вантажівок: Залишок вигоди розподіляється пропорційно між вантажівками, що слідує за лідером. Кількість вигоди, що припадає на кожну з цих вантажівок, може бути пропорційна до відстані, яку вантажівка проїжджає в колоні, або до зменшеного споживання пального.

Розрахунок переваг.

Визначення загальної переваги: G_l може бути визначена на основі економії пального, зменшення витрат на обслуговування тощо.

Визначення вигоди для лідера: вигода лідера може бути фіксованою часткою загальної вигоди, наприклад, 20%:

$$G_l = 0,2 \cdot G$$

Залишок вигоди G_r розподіляється пропорційно між вантажівками, що слідує за лідером:

$$G_f = \frac{G_r}{k} = \frac{G - G_l}{k}$$

k – кількість вантажних АТЗ, що слідує за лідером.

Методи пропорційного розподілу переваг, як описано в [80], забезпечують, що вигоди справедливо розподіляються відповідно до внеску кожної вантажівки. Наприклад, можна використовувати такі методи:

- Метод Шеплі: метод розподілу переваг на основі кожного учасника, його внеску в загальний результат. Використовується для визначення справедливого розподілу в ігрових ситуаціях, таких як ваш випадок з рухом у колоні.
- Метод Неш: пропонує розподіл переваг на основі рівноваги у грі, де кожен учасник отримує перевагу відповідно до його внеску у формування колоні.

Якщо загальний прибуток формування колоні залежить лише від кількості машин колоні і не враховує тип, марку, вантаж або інші індивідуальні характеристики вантажних АТЗ, то можна стверджувати, що загальний прибуток є функцією кількості машин колоні.

Оптимізаційна задача стосується максимізації додаткового прибутку перевізника шляхом вибору найбільш вигідних колон для приєднання одного з його вантажних АТЗ.

Мета оптимізації f полягає в максимізації функції переваги:

$$\max_{w_i^l, l=k, \dots, |P_i|} \sum_{l=k}^{|P_i|} \Delta R_{l,p} S_f^k, S_f^l - \Lambda_{l,p} w_i^l \quad (2.1)$$

де: ω_i^l час очікування вантажного АТЗ i на l -ому хабі

$\Delta R_{l,p}$ – зміна в прибутках або вигоді на l -ому сегменті дороги.

S_f^k та S_f^l – функції, що описують якийсь аспект вигоди або витрат, пов'язаних із часом прибуття та відправлення.

$\Lambda_{l,p}$ – штраф або витрати, пов'язані з часом очікування на l -ому хабі.

Умови оптимізації.

1. Визначення часу прибуття на вузловий пункт:

$$t_i^k = t^< + w_i^k \quad (2.2)$$

t_i^k – час прибуття вантажівки i на k -ий вузловий пункт, $t^<$ – час прибуття на початковий вузловий пункт, ω_i^k – час очікування на k -ому вузловому пункті.

2. Час відправлення з вузлового пункту і прибуття на наступний вузловий пункт:

$$t_i^{l+1} = w_i^{l+1} + t_i^l + \tau_i^l \quad (2.3)$$

де t_i^{l+1} час прибуття на $(l+1)$ -ий вузловий пункт, ω_i^{l+1} – час очікування на $(l+1)$ -ому вузловому пункті, τ_i^l – час в дорозі від l -ого до $(l+1)$ -ого вузлового пункту.

3. Час завершення повинний бути не пізніше ніж допустиме значення:

$$t_i^{|P_i|} + \tau_i^{|P_i|} \leq \bar{t}_i \quad (2.4)$$

де $t_i^{|P_i|}$ – час прибуття на останній вузловий пункт, $\tau_i^{|P_i|}$ – час в дорозі від останнього вузлового пункту до кінцевого пункту, \bar{t}_i – максимальний допустимий час для завершення маршруту.

4. Час очікування не може бути від'ємним:

$$w_i^l \geq 0, \quad l = k, \dots, |P_i| \quad (2.5)$$

Функції S_f^l та $S_f^{/l}$ залежать від часу прибуття:

$$\begin{aligned} S_f^l &= N_f^l(t_i^l), \quad l = k, \dots, |P_i| \\ S_f^{/l} &= N_f^{/l}(t_i^l), \quad l = k, \dots, |P_i| \end{aligned} \quad (2.6)$$

N_f^l , $N_f^{/l}$ – функції, що описують деякі аспекти вигоди або витрат, які залежать від часу прибуття на l -ому вузловому пункті.

Потрібно оптимізувати часи очікування на кожному з вузлових пунктів l , щоб максимізувати сумарну перевагу (вигоду) або мінімізувати витрати, дотримуючись обмежень на час прибуття та відправлення, а також часу в дорозі.

Попереднє розв'язання задачі виконано за допомогою розробленого програмного коду мовою програмування Python. Приклад програмного коду наведено у Додатку А.

2.3. Аналіз можливостей спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання КВАТЗ

Для дослідження КВАТЗ при проходженні міжнародного пункту пропуску для автомобільного сполучення у даній роботі використовуємо модуль програмного забезпечення для транспортного мікромодельювання PTV Vissim [32].

Дане програмне забезпечення використовується в плануванні дорожнього руху, розробці транспортної інфраструктури, аналізі безпеки на дорогах, дослідженні ефективності різних транспортних рішень та управлінні дорожнім рухом. Програма дозволяє моделювати поведінку кожного окремого транспортного засобу та пішохода в системі, включаючи взаємодію між ними; підтримує моделювання складних транспортних ситуацій, таких як перехрестя з кількома смугами, кругові перехрестя, регульовані і нерегульовані переходи тощо; інтегрується з іншими рішеннями для транспортного планування, такими як PTV Visum (для макроскопічного моделювання) та PTV Optima (для реального часу), що дозволяє створювати комплексні моделі транспортної мережі; надає потужні інструменти для 3D-візуалізації транспортних потоків, що допомагає краще зрозуміти й проаналізувати результати моделювання.

Починаючи з версії 2020 року, PTV Vissim має вбудовану функцію для моделювання руху в колоні, яка дозволяє оцінювати загальний вплив колон на транспортну мережу. Проте ця функція не підходить для отримання детальних даних про окремі транспортні засоби у складі колони, таких як динаміка руху або розраховані викиди від цих транспортних засобів.

Поведінка машин у колоні спрощена та орієнтована на забезпечення стабільності руху. Стабільність означає, що транспортні засоби колони рівномірно розподіляються між лідером та останньою машиною колони (див. рис.2.2). Процеси зв'язку або затримки не моделюються. Транспортний засіб може приєднатися до колони, якщо він рухається в тій самій смузі, що й колона, наступними способами:

- Колона наздоганяє транспортний засіб, який рухається повільніше, ніж колона, або зупинився, наприклад, на червоний сигнал світлофора. У такому випадку цей транспортний засіб стає новим лідером колони.
- Транспортний засіб приєднується до колони, якщо він може забезпечити необхідний часовий розрив з найближчою машиною колони попереду. Це може статися двома способами:

а) Транспортний засіб рухається позаду колони з більшою швидкістю, ніж колона (наприклад, під час безперервного руху або при наздоганянні колони, яка зупинилася на перехресті).

б) Транспортний засіб приєднується до колони, яка рухається по ділянці дороги, що з'єднує іншу ділянку (наприклад, на перехресті або в місці злиття, без зміни смуги руху).

Транспортні засоби залишаються в колоні, за винятком випадків, коли їм необхідно зупинитися через правило пріоритету, червоний сигнал світлофора або перелаштуватися в інший ряд. Транспортні засоби в колоні ініціюють необхідну зміну смуги руху на основі параметру відстані зміни смуги руху попередніх з'єднувачів під час руху по маршруту або шляху. Ці параметри зміни смуги руху можуть бути фіксованими для всіх транспортних засобів або визначатися для кожного транспортного засобу окремо на основі розподілу.

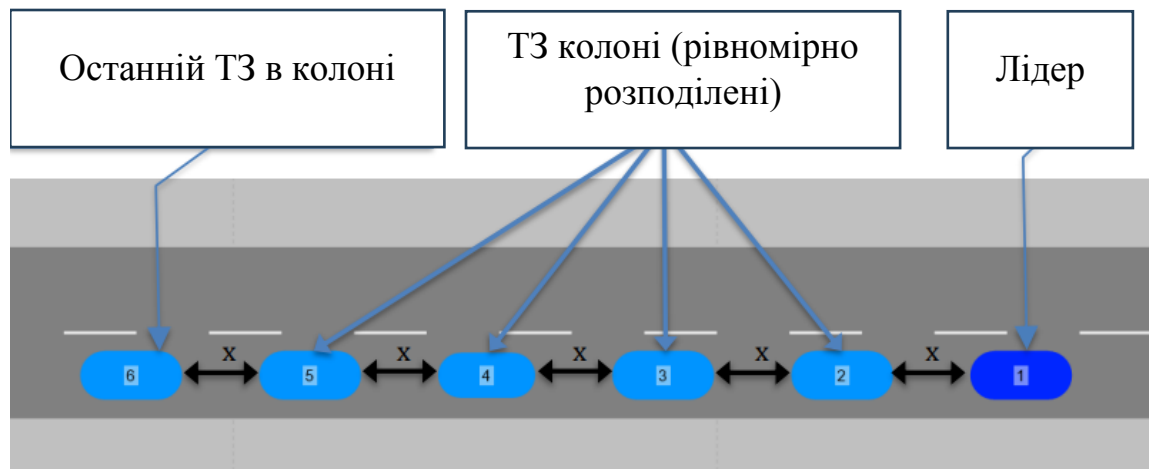


Рис.2.2. Схематичне зображення забезпечення колони

Колона не розділяється в умовах інтенсивного дорожнього руху, якщо використовуються конфліктні зони. Тільки лідер колони реагує на ці зони, як і будь-який інший транспортний засіб, що не належить до колони. Інші транспортні засоби в колоні слідують за лідером, незалежно від ситуації в зоні конфлікту.

Якщо транспортним засобам у колоні потрібно надати пріоритет у несигналізованих конфліктних зонах, слід використовувати правила пріоритету. У такому випадку колона може автоматично розділитися, якщо це необхідно.

Функцію колони можна активувати на вкладці «Автономне водіння» для кожного стилю водіння. Дана функція пропонує п'ять параметрів, які доступні через діалогове вікно або список стилів водіння. Оскільки дані параметри є частиною стилю водіння, вони можуть змінюватися залежно від сегменту дороги або смуги руху. Це означає, що під час подорожі мережею транспортний засіб може використовувати різні значення параметрів колони, оскільки кожен сегмент і кожна смуга можуть мати свій тип поведінки.

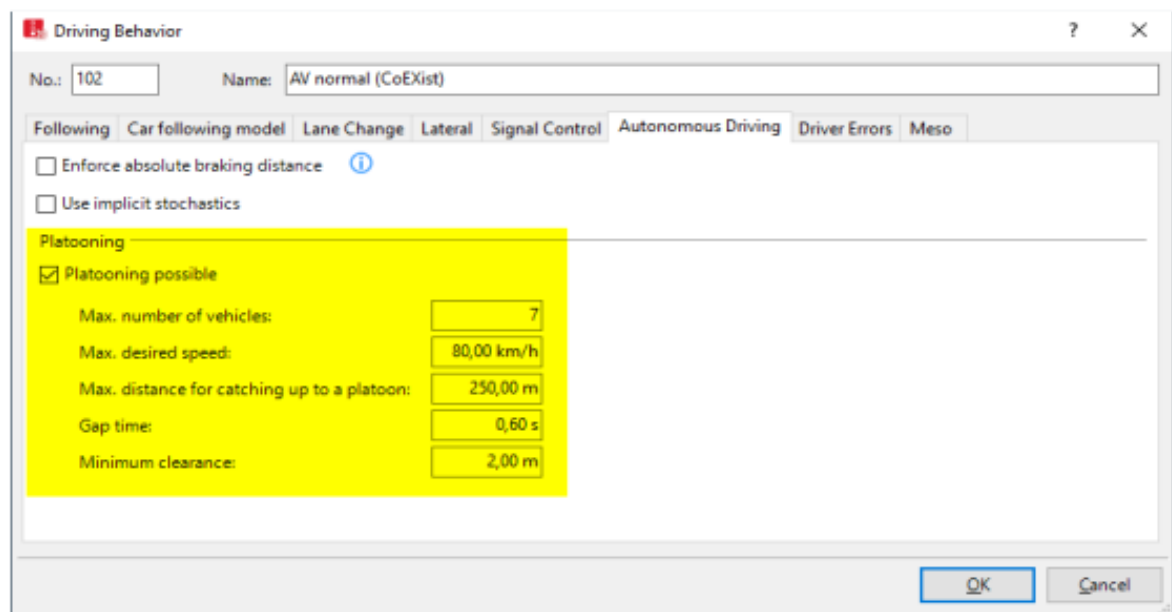


Рис.2.3. Активація параметрів руху у колоні в PTV Vissim

Параметри колони:

1. **Максимальна кількість транспортних засобів.** Встановлює максимально можливий розмір колони.
2. **Максимальна бажана швидкість.** Це значення є верхнім порогом швидкості колони. Колона рухається з мінімальною швидкістю між «бажаною

швидкістю лідера колони» та «максимальною бажаною швидкістю колони». Якщо колона перевищує встановлені межі швидкості або потрапляє в зону зниженої швидкості, лідер колони відповідно змінює швидкість. Інші учасники руху у колоні зберігають нові значення бажаної швидкості, але можуть використовувати їх тільки після виходу з колони.

3. **Максимальна відстань для наздоганяння колони.** Якщо транспортний засіб, здатний наздогнати колону, знаходиться в межах цієї відстані, він наближається до колони з метою приєднатися до неї і дотримуватись наступної дистанції, визначеної параметрами колони. Транспортний засіб, що приєднується, не повинен перевищувати свою бажану швидкість, щоб наздогнати колону. Проте, після приєднання до колони як учасник колони (не лідер), він може їхати швидше, ніж його власна бажана швидкість.

4. **Час розриву.** Це бажаний час розриву між машинами, що рухаються в колоні. Якщо цей параметр дорівнює нулю або розрахований час розриву призводить до відстані, меншої за параметр мінімального розриву, тоді використовується значення параметра мінімального розриву.

5. **Мінімальна дистанція.** Визначає мінімальну відстань між транспортними засобами, що рухаються в межах колони.

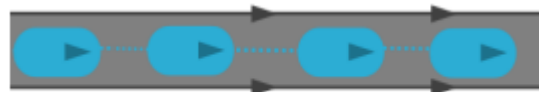


Рис.2.4. Колони не змінюють смугу руху: зберігають однакову дистанцію (залежно від швидкості), зміна прискорення обмежена.

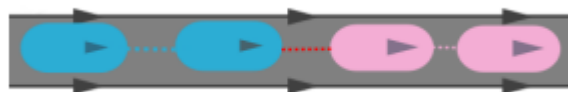


Рис.2.5. Ситуація можливості зміни параметрів поведінки водіння на наступному сегменті дороги.

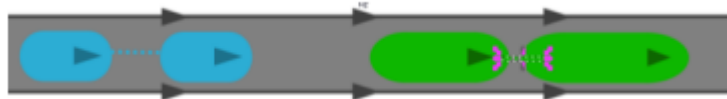


Рис.2.6. Колони залежні від класу ТЗ, які за потреби дублюють поведінку водія для інших класів ТЗ.

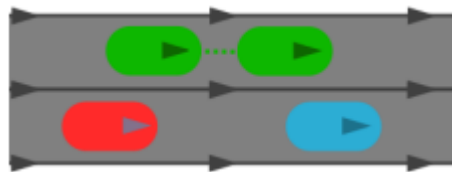


Рис.2.7. Приєднання до колони може бути дозволено на певних смугах, де можливий різний тип поведінки для кожного сегменту.

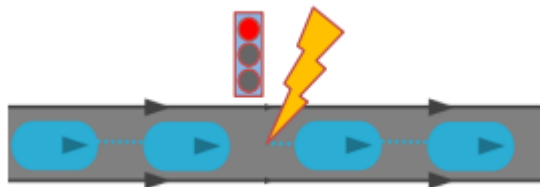


Рис.2.8. Колона автоматично розділяється на дві частини при червоному сигналі світлофора, якщо це необхідно, тобто якщо не всі учасники руху у колоні можуть вчасно перетнути перетин на сигнал світлофору.

Автомобіль, що рухається в колоні, можна ідентифікувати за значенням її атрибута «Індекс у колоні», який вказує на ранг автомобіля в колоні. Починаючи з Vissim 2020 (SP 06), доступні два додаткових параметри для автомобіля:

Номер лідера колони (PlatoonLeaderNo)

Вказує на ідентифікаційний номер першого автомобіля в колоні.

Розмір колони (PlatoonSize)

Вказує на фактичну кількість автомобілів у колоні.

Якщо машина не належить до колони, ці атрибути залишаються порожніми. Коли колона ділиться на дві або коли дві колони об'єднуються в одну, номер лідера колони змінюється для всіх машин, які приєднуються до нової колони, а розмір колони оновлюється для всіх машин, які отримують нового лідера.



Рис.2.10. Колони формуються з транспортних засобів з однаковим стилем водіння і лише в одній смузі. Колони не формуються на маршрутах громадського транспорту або на маршрутах паркування.

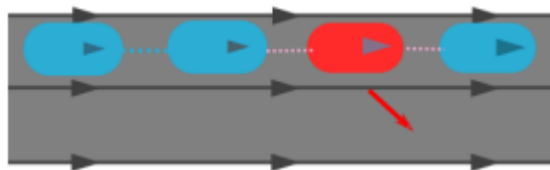


Рис.2.11. Плавне збільшення відстані та розділення колони ТЗ.

Для моделювання координації руху ТЗ у колоні відповідно до математичної моделі (п.2.2) в імітаційній моделі PTV Vissim використаний COM-інтерфейс, який дозволяє ззовні керувати процесом симуляції руху.

Наступні кроки формулюють загальний синтез для реалізації адаптивної логіки управління та координації руху через інтерфейс Vissim-COM:

1. За допомогою графічного інтерфейсу Vissim створюється загальна транспортна мережа (геометрія, світлофори, детектори, входи транспортних засобів тощо).

2. Після вибору мови програмування, що підтримує програмування через СОМ-інтерфейс, створюється СОМ-клієнт.

3. Програмування симуляції через Vissim-COM із використанням спеціальних команд, таких як:

- Налаштування симуляції (багаторазові та автоматизовані прогони),
- Поведінка транспортних засобів,
- Оцінка під час симуляції (онлайн),
- Логіка управління світлофорами, яка реагує на дорожній рух.

4. Запуск симуляції у вигляді СОМ-програми.

Для програмування використана мова Python. Програмний код розроблено відповідно до математичної моделі (п.2.2) та наведено у Додатку А.

2.4. Висновки до розділу 2

У цьому розділі представлено систему колон, у якій перевізники співпрацюють при формуванні колон. Запропоновано архітектуру системи колонного руху між перевізниками, в якій перевізники зберігають контроль над своїми вантажівками, але співпрацюють через службу виклику колон.

Функція служби виклику колон полягає в інформуванні кожного перевізника про можливі варіанти об'єднання його вантажних АТЗ у колони, при цьому кожен перевізник самостійно вирішує, до якого складу приєднати свої АТЗ. Також представлена математична модель, яка включає підхід до координації КВАТЗ, який використовує кожен перевізник при прийнятті рішень щодо розподілу своїх вантажівок по колон, спираючись на інформацію, отриману від служби виклику колон.

Зазначена модель буде реалізовуватись на прикладі проходження вантажними АТЗ міжнародного пункту пропуску через кордон (МПП). Розроблена схема технологічних процесів на МПП Краківець.

Для реалізації математичної моделі з координації КВАТЗ будуть використані можливості програмного забезпечення PTV Vissim у частині моделювання кооперативного руху та руху ТЗ у колоні.

РОЗДІЛ 3. ТРАНСПОРТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КВАТЗ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ МПП

3.1. Модель існуючого положення

Модель існуючого положення в програмному забезпеченні PTV Vissim розроблена відповідно до технологічної схеми МПП Краківець з урахуванням всіх аспектів організації дорожнього руху. Процес імітації руху проілюстровано на рис.3.1 – рис.3.4.

На в'їзді на МПП з боку України організований рух по кільцю (рис.3.1).



Рис. 3.1. Рух на кільці при в'їзді на МПП (Україна).

У північній частині МПП виділені окремі смуги для руху легкових автомобілів в загальному та спрощеному порядку пропуску, для руху офіційних делегацій, посадових осіб дипломатичних або консульських установ, а також смуги для руху автобусів, що здійснюють міжнародні перевезення (рис.3.2).

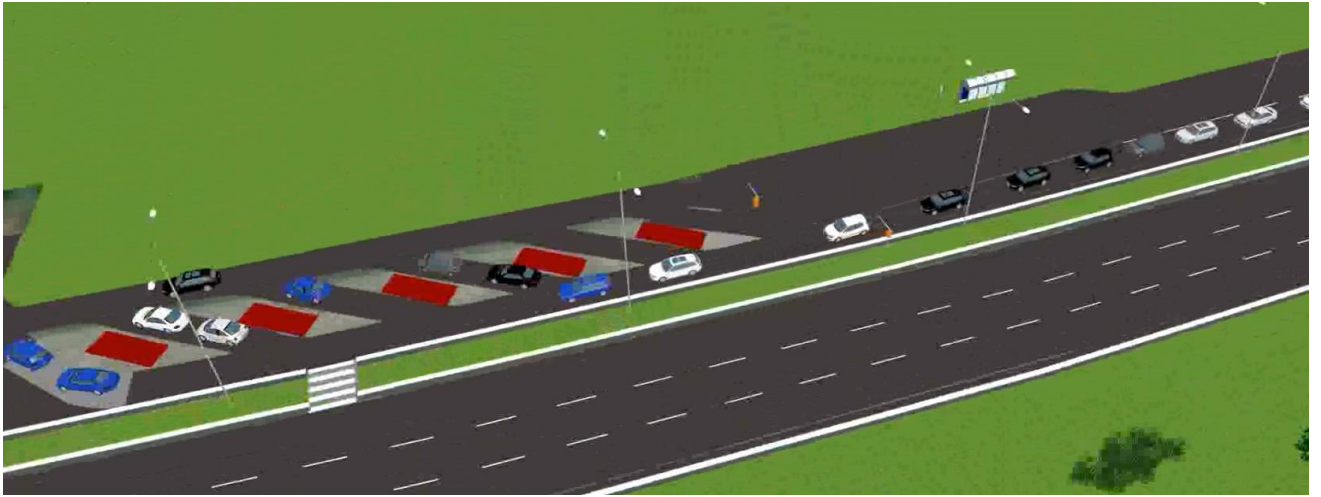


Рис.3.2. Пости обслуговування (прикордонного контролю) для легкового автотранспорту

На рис.3.3. показані смуги для проходження прикордонного, митного та фітосанітарного контролю на виїзд з України (північна частина), та на в'їзд в Україну (південна частина) для вантажних АТЗ. Слід відмітити, що на в'їзд паралельно смугам для вантажних АТЗ проходять смуги для легкових автомобілів.



Рис. 3.3. Смуги обслуговування для вантажних АТЗ (виїзд – південна частина, та в'їзд – північна частина)

Як показали результати моделювання існуючого положення, вузькими місцями в організації руху на МПП є:

на прикордонній ділянці на виїзд утворюється черга з вантажних АТЗ (рис.3.4);

на в'їзді в Україну вантажні автомобілі проходять сканування вантажу, рухаючись заднім ходом у спеціальне приміщення. На заїзд заднім ходом із відповідним маневруванням витрачається додатковий час, що негативно впливає на час операцій прикордонного контролю вантажних АТЗ. Траєкторія руху вантажних АТЗ при постановці на сканування (в'їзд в Україну) показана на рис.3.4.

Таким чином, як при виїзді з України, так і при в'їзді на територію країни, утворюється черга вантажних АТЗ, причинами якої є тривалість технологічних операцій проходження прикордонного контролю з польської сторони (при виїзді з України), та недосконала організація руху вантажних АТЗ при проходженні фітосанітарного контролю на в'їзд в Україну.



Рис.3.4. Модель існуючого положення з утворенням черги АТЗ на МПП

Українська сторона практично не має впливу на першу причину утворення черги АТЗ – на виїзд з України за кордонами держави. Однак при цьому кількість заявок на обслуговування (вантажних АТЗ на постах контролю) може бути відрегульована за рахунок організації та координації руху у КВАТЗ.

На в'їзд в Україну утворення черги залежить суто від організації руху на МПП, отже, зміна способу організації руху дозволяє дослідити сценарій, за якого утворення черги АТЗ буде зменшуватись. Забезпечення координації КВАТЗ у цьому випадку не впливатиме на техніко-експлуатаційні показники МПП, а тільки тієї частини замиської автомагістралі, де КВАТЗ буде організовано.

З теплової картограми щільності руху АТЗ (авт./км) видно, що, окрім ділянок мережі МПП, безпосередньо пов'язаних із пунктами митного та прикордонного контролю, на виїзд з України після кільцевої розв'язки щільність руху досягає 32 авт./км, тоді як на постах обслуговування – до 128 авт./км. При в'їзді в Україну після проходження процедур контролю спостерігається вільний потік АТЗ (рис.3.5).

Модель існуючого положення показала, що черга АТЗ на виїзді з України утворюється не тільки безпосередньо на контрольно-пропускному пункті, а й на під'їзді до нього зі сторони селища Краківець. Результати моделювання підтвердили утворення черги довжиною 2,1 км.

Таким чином, питання координації КВАТЗ становиться гострим саме для тих вантажних автомобілів, які рухаються на виїзд з України. Можлива координація колони як на дорозі, так і в хабі (вузловому пункті).

Кількість транспортних засобів у колоні при координації у вузловому пункті й буде основою для інших сценаріїв, що розглядатимуться за допомогою транспортного моделювання.

Параметри, які налаштовані при моделюванні того чи іншого сценарію, та особливості застосування зовнішнього управління програмою, описані у наступному підпункті даного розділу.



Рис.3.5. Теплова картограма щільності руху АТЗ, авт./км.

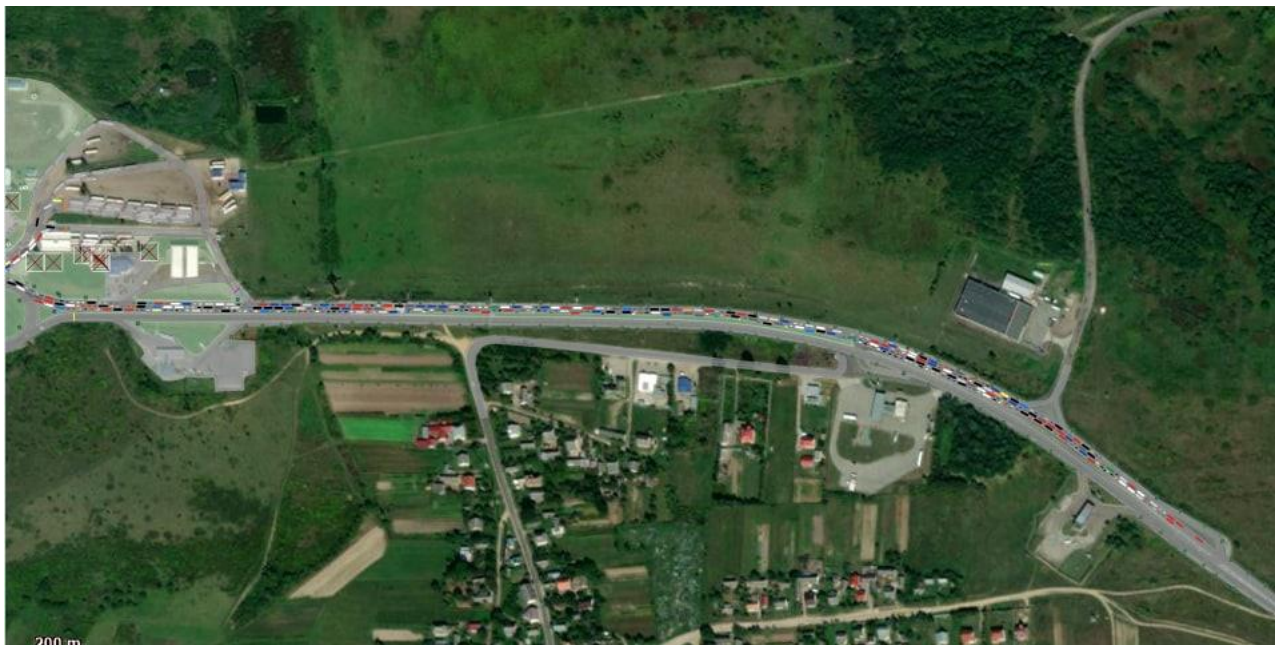


Рис.3.6. Моделювання черги АТЗ, яка утворюється при виїзді з України

Техніко-експлуатаційні показники, отримані у результаті моделювання моделі існуючого положенні представлені у таблиці 3.1.

Табл.3.1

Техніко-експлуатаційні показники

Показник	Існуюче положення без КВАТЗ	
	В'їзд в Україну	Виїзд з України
Середня кількість ТЗ, які проходять пункт пропуску за годину	10	4
Затримка (час у заторі)	29	37
Середній час у дорозі на КПП, хв.	46	41

Як видно з табл.3.1, на в'їзд в Україну проходять через пункт пропуску вдвічі більше автомобілів, ніж на виїзд. При цьому затримка (час у дорозі) на виїзд з України на 8 хв. більша, ніж на в'їзд в країну. Проте середній час у дорозі безпосередньо на КПП більше на в'їзд на 5 хв., а ніж на виїзд.

Розглядаючи отримані результати, слід відмітити, що збільшення затримки на в'їзд відбувається за рахунок необхідності проходження фітосанітарного контролю вантажних автомобілів при заїзді заднім ходом на сканування. У той час, як збільшення затримки на виїзд відбувається за рахунок процесів поза межами контрольно-пропускного пункту, а саме, на під'їзді до нього. Тому загальна затримка буде більшою на виїзд, ніж на в'їзд. Це також підтверджується отриманою довжиною черги до КПП (рис. 3.6).

Спираючись на отримані дані, КВАТЗ застосовується саме для руху вантажних автомобілів на виїзд з України.

Для моделювання сценаріїв використаний програмний код на мові програмування Python (Додаток А) та СОМ-інтерфейс PTV Vissim.

3.2. Сценарії моделювання при використанні КВАТЗ

Особливістю налаштування параметрів моделювання у PTV Vissim у сценаріях, які передбачають використання руху у колоні вантажних автомобілів до МПП, є зміна поведінкової моделі водія.

Параметри, які визначають поведінкову модель водія при русі КВАТЗ, детально описані у розділі 2 даної роботи.

Для моделювання сценаріїв застосовані комбінації таких параметрів, що показані у таблиці 3.2.

Максимальна кількість автомобілів у колоні змінюється від 5 до 12, максимальна бажана швидкість у колоні – від 80 до 60 км/год., максимальна відстань, на якій вантажний автомобіль приєднується до колони – від 250 до 75 м, час розриву – 0,6 с, мінімальна відстань видимості – від 2,0 до 2,7 м.

Табл.3.2

Сценарії моделювання та їх параметри

№ сценарію	Максимальна кількість автомобілів у колоні	Максимальна бажана швидкість у КВАТЗ, км/год.	Максимальна відстань підключення до колони, м	Час розриву, с	Мінімальна відстань видимості, м
1	5	80	250	0,6	2,0
2	6	70	225	0,6	2,1
3	7	70	200	0,6	2,2
4	8	70	175	0,6	2,3
5	9	70	150	0,6	2,4
6	10	70	125	0,6	2,5
7	11	70	100	0,6	2,6

8	12	60	75	0,6	2,7
---	----	----	----	-----	-----

3.3. Порівняння результатів моделювання

Результати моделювання існуючого положення та сценаріїв, за яких формується рух у колоні (табл.3.2) дозволили визначити залежності техніко-експлуатаційних показників руху від параметрів руху у колоні при координуванні КВАТЗ у вузлових пунктах.

Час у заторі та середній час у дорозі на КПП Краківець лінійно зменшується в залежності від збільшення кількості автомобілів у колоні. Достовірність апроксимації відповідно лінії тренду дуже висока на рівні 0,99.

$$T_3 = -2,0952 \cdot N + 36,941 \quad (3.1)$$

$$T_{\text{кпп}} = -2,1433 \cdot N + 45,527 \quad (3.2)$$

T_3 – час у заторі, хв.; $T_{\text{кпп}}$ – середній час у дорозі на КПП, хв.; N – кількість автомобілів у колоні.

Час у заторі та середній час у дорозі на КПП також лінійно збільшується при збільшенні максимальної відстані приєднання автомобілів до колони (параметр моделі поведінки водія).

Відповідно

$$T_3 = -2,0952 \cdot R + 36,941 \quad (3.3)$$

$$T_{\text{кпп}} = -2,1433 \cdot R + 45,527 \quad (3.4)$$

R – максимальна відстань приєднання автомобілів до колони, м.

Черга АТЗ на виїзді з України на під'їзді до КПП зі сторони селища Краківець зменшується від 2,1 до 1,4 км при задіянні до 12 вантажних автомобілів у колоні.

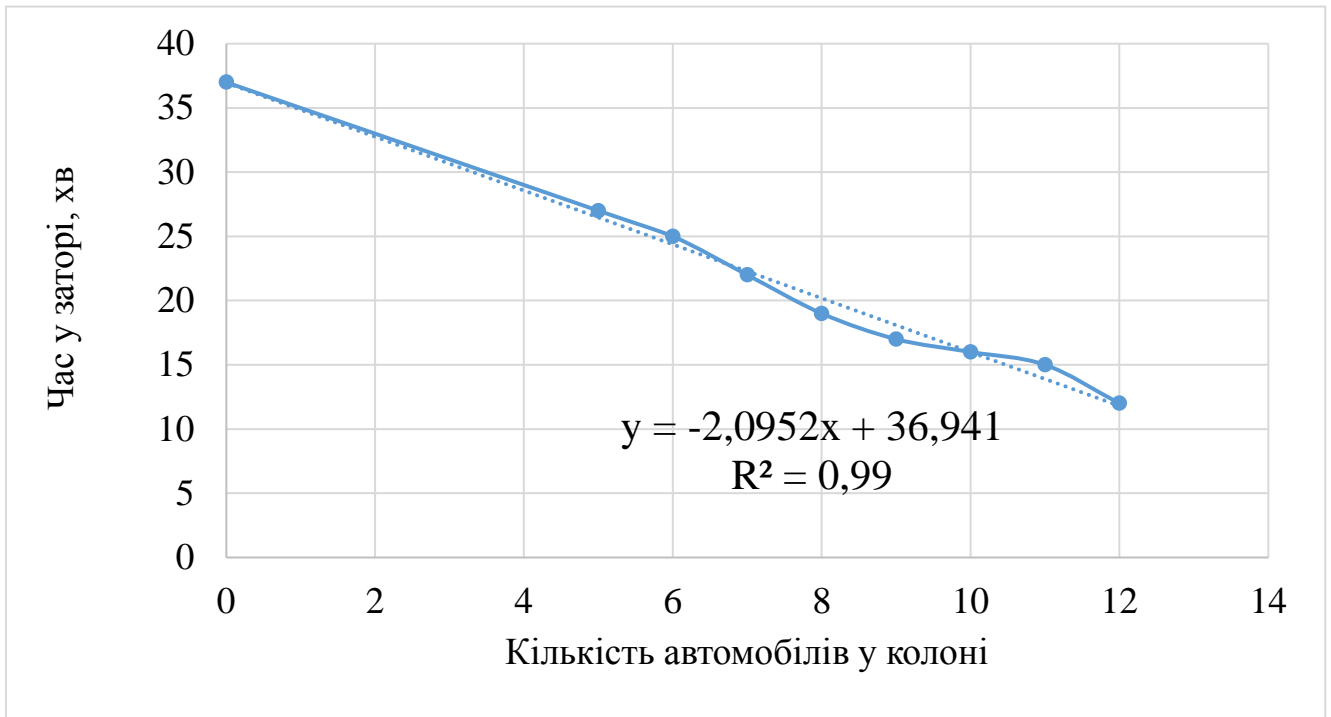


Рис.3.7. Залежність часу у загорі ТЗ від кількості вантажних автомобілів у колоні

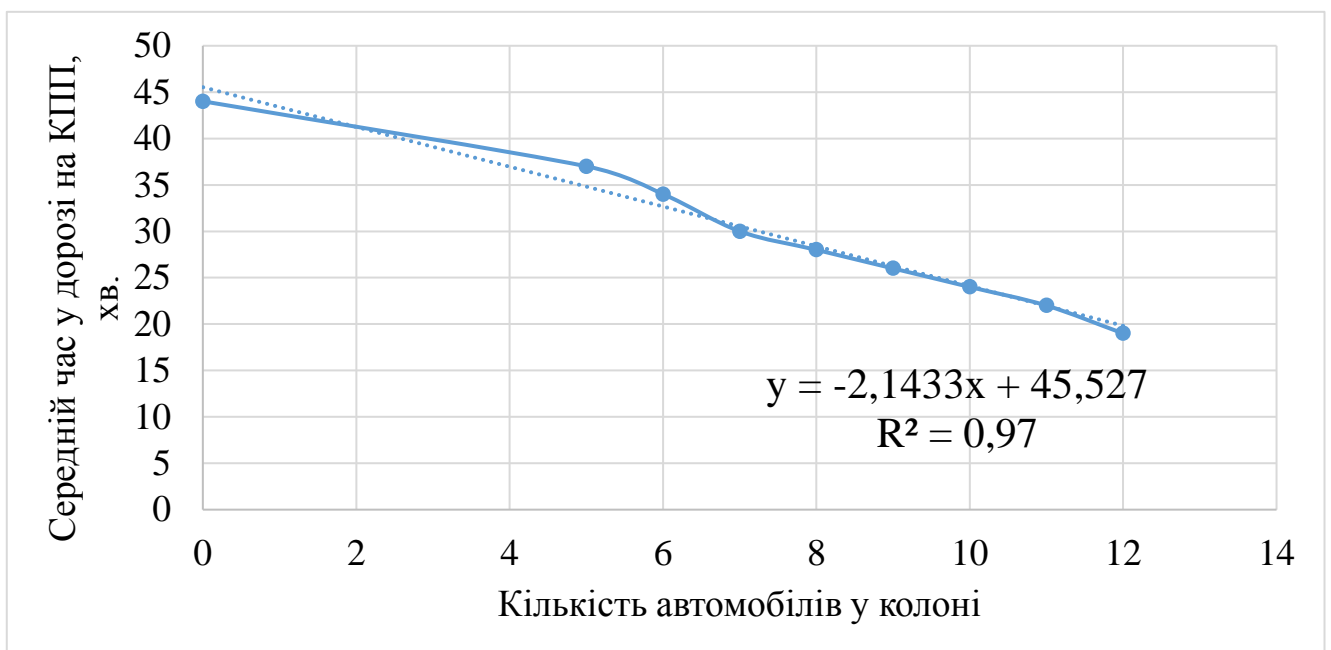


Рис.3.8. Залежність середнього часу у дорозі ТЗ на КПП від кількості вантажних автомобілів у колоні

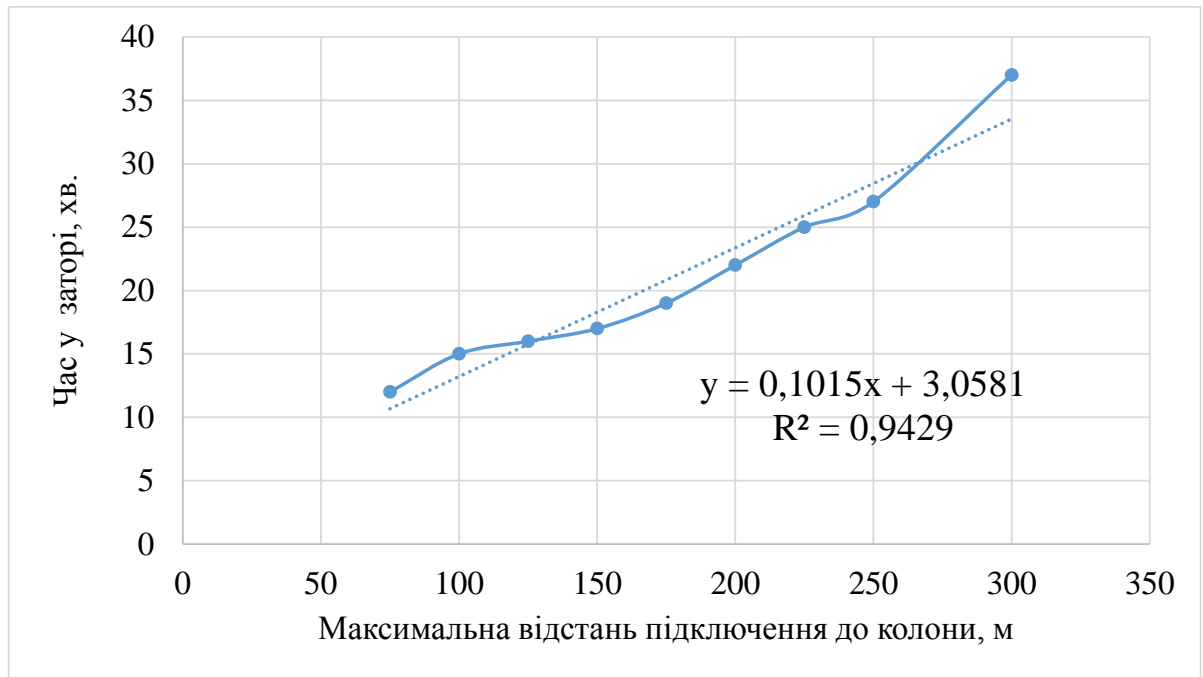


Рис.3.9. Залежність часу у загорі ТЗ від максимальної відстані підключення до колони

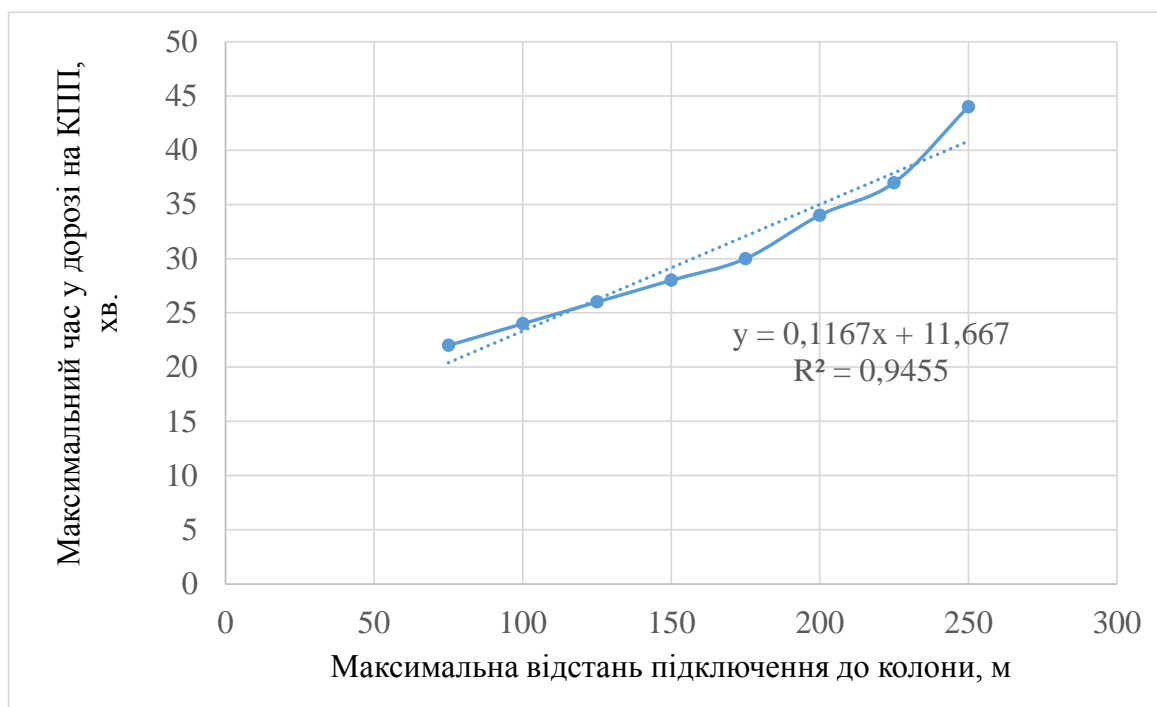


Рис.3.10. Залежність середнього часу у дорозі ТЗ на КПП від максимальної відстані підключення до колони

3.4. Висновки до розділу 3

1. Моделювання за допомогою програмного забезпечення PTV Vissim існуючого стану організації руху та технологічної схеми (розділ 2) на міжнародному пункті пропуску через кордон Краківець дозволило визначити такі вузькі місця:

на прикордонній ділянці на виїзд утворюється черга з вантажних АТЗ, при заїзді на МПП зі сторони селища Краківець довжина черги транспортних засобів становить 2,1 км;

на в'їзді в Україну вантажні автомобілі проходять сканування вантажу, рухаючись заднім ходом у спеціально відведене приміщення. Процес заїзду заднім ходом з відповідним маневруванням займає додатковий час, що негативно впливає на тривалість операцій прикордонного контролю вантажних автомобілів;

середня кількість транспортних засобів, які проходять прикордонно-митний контроль за годину у пункті пропуску – на виїзд з України становить 4 одиниці, а на в'їзд – 10 одиниць;

середній час у заторі на виїзд з України становить 37 хв., на в'їзд — 29 хв.;

середній час у дорозі на пункті пропуску на в'їзд в Україну – 46 хв., на виїзд з України – 41 хв.;

збільшення затримки на виїзд відбувається через процеси, що проходять поза межами контрольно-пропускного пункту, тому рух у колоні пропонується використовувати для вантажних автомобілів, які виїжджають з України.

2. Для моделювання різних варіантів руху у колоні використані комбінації таких параметрів: максимальна кількість вантажних автомобілів у колоні варіюється від 5 до 12, максимальна бажана швидкість у колоні – від 80 до 60 км/год, максимальна відстань, на якій вантажний автомобіль може приєднатися до колони, становить від 250 до 75 м, час розриву – 0,6 с, а мінімальна відстань видимості – від 2,0 до 2,7 м.

3. Час перебування у заторі та середній час у дорозі на контрольно-пропускному пункті Краківець лінійно зменшуються в залежності від збільшення кількості вантажних автомобілів у колоні. Час перебування у заторі та середній час у дорозі на контрольно-пропускному пункті також лінійно зростають зі збільшенням максимальної відстані, на якій вантажні автомобілі можуть приєднатися до колони.

4. Черга вантажних автомобілів на виїзді з України на під'їзді до контрольно-пропускного пункту зі сторони селища Краківець зменшується з 2,1 до 1,4 км при задіянні до 12 вантажних автомобілів у колоні.

5. Кількість задіяних вантажних автомобілів у колоні впливає лінійно на покращення/погіршення техніко-експлуатаційних показників дорожнього руху на під'їзді до пункту пропуску, цей показник немає екстремуму й обмежений спроможністю служби виклику колон.

ВИСНОВКИ

Роботу присвячено моделюванню системи руху у колоні вантажних автомобілів при проходженні міжнародного пункту пропуску через кордон в автомобільному сполученні.

1. Встановлено переваги формування руху у колоні, які варіюються залежно від рівня автоматизації вантажних автомобілів. Зокрема, експлуатаційні витрати вантажних автомобілів істотно знижуються у випадку, коли наступні вантажні автомобілі є повністю автоматизованими. Проведено огляд наукової літератури з питань координації колон вантажних автотранспортних засобів (КВАТЗ). Попри численні дослідження координації КВАТЗ під час формування колони на дорозі чи у вузлових пунктах, питання регулювання проходження міжнародних пунктів пропуску через кордон для автомобільного транспорту зі стохастичним прибуттям вантажних автомобілів не було належним чином досліджено.

2. Розроблена блок-схема технологічних операцій, які проходять транспортні засоби на виїзд з України та на в'їзд на міжнародному пункті пропуску через кордон (МПП) Краківець.

3. Розроблена математична модель координації КВАТЗ, які проходять МПП. Модель реалізована за допомогою програмного коду на мові Python та використана при моделюванні сценаріїв руху у колоні на МПП Краківець, розроблених у програмному забезпеченні PTV Vissim.

4. Розроблена мікро імітаційна модель існуючого стану організації руху на МПП Краківець у програмі PTV Vissim. Результати моделювання дозволили встановити, що на прикордонній ділянці на виїзд утворюється черга з вантажних автомобілів, при заїзді на МПП зі сторони селища Краківець довжина черги транспортних засобів становить 2,1 км.

5. Для моделювання різних сценаріїв руху у колоні вантажних автомобілів були використані комбінації наступних параметрів: максимальна кількість вантажних автомобілів у колоні коливається від 5 до 12, максимальна бажана швидкість у колоні варіюється в межах від 60 до 80 км/год, максимальна відстань, на якій вантажний автомобіль може приєднатися до колони, становить від 75 до 250 м, час розриву встановлено на рівні 0,6 с, а мінімальна відстань видимості складає від 2,0 до 2,7 м. Всього розроблено 8 сценаріїв руху у колоні.

6. Встановлені залежності кількості вантажних автомобілів у колоні від параметрів поведінкової моделі водія. Кількість вантажних автомобілів, задіяних у колоні, має лінійний вплив на поліпшення або погіршення техніко-експлуатаційних показників дорожнього руху на під'їзді до пункту пропуску. Даний показник не має екстремуму і обмежений спроможністю служби виклику колон.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Johansson, Alexander & Bai, Ting & Johansson, Karl & Mårtensson, Jonas. (2022). Platoon Cooperation Across Carriers: From System Architecture to Coordination. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. PP. 2-14. 10.1109/MITS.2022.3219997.
2. Електронне джерело: <https://www.acea.auto/fact/what-is-the-european-truck-platooning-challenge/>
3. Markus Maibach, Martin Peter, and Daniel Sutter. COMPETE Final Report, Annex 1: Analysis of operating cost in the EU and the US. 2006.
4. International Council on Clean Transportation. Barriers to the adoption of fuel-saving technologies in the trucking sector. 2017.
5. American Transport Research Institute. An Analysis of the Operational Costs of Trucking: 2019 Update. 2019.
6. Nicholas Shields. The trucking industry is split over whether platooning is still a viable technology – but the leading legacy player just abandoned it, Buisness insider, 2019.
7. Peloton. Peloton announces its vision for the trucking industry: Drivers lead, and technology follows, 2019.
8. Arturo Davila, Eduardo del Pozo, Enric Aramburu, and Alex Freixas. Environmental benefits of vehicle platooning. In Symposium on International Automotive Technology 2013, January 2013.
9. Richard Bishop, David Bevly, Luke Humphreys, Stephen Boyd, and Daniel Murray. Evaluation and testing of driver-assistive truck platooning phase 2 final results. Transportation Research Record, 2615(2615):11–18, 2017.

10. Fred Browand, John McArthur, and Charles Radovich. Fuel saving achieved in the field test of two tandem trucks. Technical report, University of Southern California, 2004.
11. Michael P. Lammert, Adam Duran, Jeremy Diez, Kevin Burton, and Alex Nicholson. Effect of platooning on fuel consumption of class 8 vehicles over a range of speeds, following distances, and mass. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 7(2014-01-2438):626–639, 2014.
12. Dick de Waard, Monique van der Huls, Marika Hoedemaeker, and Karel A. Brookhuis. Driver behavior in an emergency situation in the automated highway system. *Transportation human factors*, 1(1):67–82, 19.
13. Petros A. Ioannou and Cheng-Chen Chien. Autonomous intelligent cruise control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 42(4):657–672, Nov 1993.
14. Pedro B. Fernandes and Urbano J. Nunes. Platooning with IVC-enabled autonomous vehicles: Strategies to mitigate communication delays, improve safety and traffic flow. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(1):91–106, March 2012.
15. Vittorio Marzano, Fiore Tinessa, Chiara Fiori, Daniela Tocchi, Andrea Papola, Dario Aponte, Ennio Cascetta, and Fulvio Simonelli. Impacts of truck platooning on the multimodal freight transport market: An exploratory assessment on a case study in italy. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 163:100–125, 2022.
16. Kuo-Yun Liang, Jonas Mårtensson, and Karl H. Johansson. Heavy-duty vehicle platoon formation for fuel efficiency. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(4):1051–1061, April 2016.
17. Erik Larsson, Gustav Sennton, and Jeffrey Larson. The vehicle platooning problem: Computational complexity and heuristics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 60:258 – 277, 2015.

18. Sebastian van de Hoef, Karl H. Johansson, and Dimos V. Dimarogonas. Fuel efficient en route formation of truck platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(1):102–112, Jan 2018.
19. Mojtaba Abdolmaleki, Mehrdad Shahabi, Yafeng Yin, and Neda Masoud. Itinerary planning for cooperative truck platooning. *Transportation Research Part B: Methodological*, 153:91–110, 2021.
20. Xi Xiong, Junyi Sha, and Li Jin. Optimizing coordinated vehicle platooning: An analytical approach based on stochastic dynamic programming. *Transportation Research Part B: Methodological*, 150:482–502.
21. European Commission. Regulation No 561/2006 of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the harmonisation of certain social legislation relating to road transport and amending Council Regulations, 2006.
22. Abtin Nourmohammadzadeh and Sven Hartmann. The fuel-efficient platooning of heavy duty vehicles by mathematical programming and genetic algorithm. In *International Conference on Theory and Practice of Natural Computing*, pages 46–57. Springer, 20
23. Wei Zhang, Erik Jenelius, and Xiaoliang Ma. Freight transport platoon coordination and departure time scheduling under travel time uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 98:1 – 23, 2017.
24. Nils Boysen, Dirk Briskorn, and Stefan Schwerdfeger. The identical-path truck platooning problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 109:26 – 39, 2018.
25. Rune Larsen, Jeppe Rich, and Thomas K. Rasmussen. Hub-based truck platooning: Potentials and profitability. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 127:249 – 264, 2019
26. Abtin Nourmohammadzadeh and Sven Hartmann. Fuel-efficient truck platooning by a novel meta-heuristic inspired from ant colony optimisation. *Soft Computing*, 23(5):1439–1452, 2019.

27. Joachim Scholl, Nils Boysen, and Armin Scholl. E-platooning: Optimizing platoon formation for long-haul transportation with electric commercial vehicles. *European Journal of Operational Research*, 2022.
28. Nadia Pourmohammad-Zia, Frederik Schulte, Dimitris Souravlias, and Rudy R Negenborn. Platooning of automated ground vehicles to connect port and hinterland: A multi-objective optimization approach. In *International Conference on Computational Logistics*, pages 428–442. Springer, 2020.
29. Aviv Adler, David Miculescu, and Sertac Karaman. Optimal policies for platooning and ride sharing in autonomy-enabled transportation. In *2016 Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR)*, December 2016.
30. <https://www.kmu.gov.ua/npas/243610554>
31. <https://dpsu.gov.ua/ua/Tehnologichna-shema-propusku-osib-transportnih-zasobiv-ta-vantazhiv-cherez-derzhavniy-kordon-u-mizhnarodnomu-punkti-propusku-dlya-avtomobilnogo-spoluchennya-Krakivec/>
32. <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. Приклад вирішення задачі координації КВАТЗ на Python

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize
# Параметри задачі (припустимо, що вони визначені)
Delta_R = np.array([2.0, 3.0, 1.5]) # Вигода на кожному сегменті
Lambda = np.array([1.0, 1.2, 1.1]) # Штраф за час очікування на кожному сегменті
tau = np.array([5.0, 7.0, 3.0]) # Час у дорозі між хабами
t_max = 20.0 # Максимальний час завершення маршруту
# Кількість хабів
n_hubs = len(Delta_R)
# Цільова функція
def objective(w):
    return -np.sum(Delta_R - Lambda * w)
# Обмеження
def constraint1(w):
    t_k = 0.0 # Час прибуття на перший хаб
    times = [t_k + w[0]]
    for i in range(1, n_hubs):
        times.append(times[-1] + tau[i-1] + w[i])
    return t_max - (times[-1] + tau[-1])
# Обмеження для невід'ємності часу очікування
bounds = [(0, None) for _ in range(n_hubs)]
# Початкове припущення (початкові значення часів очікування)
w0 = np.zeros(n_hubs)
```

```
# Визначення обмежень
con1 = {'type': 'ineq', 'fun': constraint1}
# Запуск оптимізації
solution = minimize(objective, w0, method='SLSQP', bounds=bounds, constraints=[con1])
# Результати
if solution.success:
    optimal_w = solution.x
    optimal_value = -solution.fun
    print(f'Оптимальні часи очікування: {optimal_w}')
    print(f'Максимальне значення функції: {optimal_value}')
else:
    print('Оптимізація не вдалася.')
```