

АНОТАЦІЯ

Стецик Р. В. Прогнозування параметрів транспортного потоку на маршруті Львів-Тернопіль. – Магістерська кваліфікаційна робота. НУВМБ, кафедра «Автомобілів і тракторів». Дубляни, 2025. – 78 с.

Робота присвячена дослідженню проблеми інформаційного забезпечення автоматичного керування автомобілями на магістральних дорогах в літературних джерелах та на підприємствах. Проаналізовано відомі сучасні технології передачі даних до бортових систем керування автомобілів. Розглядається взаємодія транспортних засобів на автомобільній міжміській дорозі. Модель керування автомобілями є тут ідеалізованою, близькою до автоматизованої інтелектуальної транспортної системи 4-го покоління. Кожен автомобіль має бажану програму руху, незалежну від мотивів водія, яка обґрунтована за мінімальними витратами ресурсів і дотриманням бажаного розкладу. Різноманітність програм впливає на їх небажану зміну. Ставилась мета виявити залежність дійсної швидкості автомобіля від параметрів транспортного потоку. Основною задачею було виявити прямий параметр для зміни програми руху. Обґрунтовано використання імітаційних моделей на основі кліткових автоматів. Розроблено новий клітковий автомат, який є ковзним вікном з початком відліку, яким є автомобіль-спостерігач. Виконано приклад моделювання руху автомобіля на трасі міжнародного значення Е-471. На відрізку цієї траси довжиною 20 км, було змодельовано транспортні потоки з різною густиною і різним розподілом швидкостей. Виявлено квадратичні кореляційні залежності вимушеної зміни бажаної швидкості автомобіля-спостерігача від середньої зміни швидкостей автомобілів потоку. На основі отриманих залежностей було обґрунтовано вибір прямого діагностичного параметра транспортного потоку.

Ключові слова: транспортний потік, магістраль, клітковий автомат, ковзне вікно, відносна швидкість.

ABSTRACT

Stetsyk R. V. Forecasting traffic flow parameters on the Lviv-Ternopil route. – Master's qualification work. NUVMB, Department of "Automobiles and Tractors". Dublyany, 2025. PP. 78.

The work is devoted to the study of the problem of information support for automatic control of cars on highways in literary sources and at enterprises. Known modern technologies for data transmission to on-board vehicle control systems are analyzed. The interaction of vehicles on an intercity road is considered. The car control model here is idealized, close to the 4th generation automated intelligent transport system. Each car has a desired movement program, independent of the driver's motives, which is justified by minimal resource consumption and adherence to the desired schedule. The variety of programs affects their undesirable change. The goal was to identify the dependence of the actual speed of the car on the parameters of the traffic flow. The main task was to identify a direct parameter for changing the movement program. The use of simulation models based on cellular automata is justified. A new cellular automaton has been developed, which is a sliding window with a starting point, which is the observer car. An example of modeling the movement of a car on the international highway E-471 has been performed. On a 20 km long section of this highway, traffic flows with different densities and different speed distributions were simulated. Quadratic correlation dependences of the forced change in the desired speed of the observer car on the average change in the speeds of cars in the flow were revealed. Based on the obtained dependences, the choice of a direct diagnostic parameter of the traffic flow was justified.

Keywords: traffic flow, highway, cellular automaton, sliding window, relative speed.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Огляд відомих досліджень.....	10
1.2 Огляд методології імітаційного моделювання транспортного потоку ...	17
1.3 Висновки та формулювання задач дослідження	19
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	20
2.1 Модель системи обробки потоку інформації на магістральній дорозі ...	20
2.2 Теоретичні підстави для створення імітаційної моделі.....	29
2.3 Математичне моделювання профілів доріг	36
2.4 Виміряні дані про швидкість за допомогою GPS.....	43
3 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	51
3.1 Обґрунтування методики та алгоритму імітаційного експерименту	51
3.2 Підготовка масиву вхідних даних та імітаційне моделювання	59
3.3 Оцінювання показників якості програми руху на заданому магістральному маршруті	64
3.4 Виконання імітаційних експериментів.....	67
3.5 Результати імітаційного моделювання.....	70
3.6 Використання імітаційної моделі для прогнозування	71
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	75
ДОДАТКИ.....	1
Додаток А Залежності показників якості контролю швидкістю АТЗ на магістралі при різних наборах вхідних даних	2

ВСТУП

Сучасне суспільство характеризується неперервним збільшенням обсягів вантажних перевезень. При цьому зростання кількості транспортних засобів часто випереджає розвиток дорожньої мережі. У цих умовах завдання безпеки, надійності, якості автотранспортних перевезень – з одного боку, обґрунтування вибору програм руху автомобіля з метою забезпечити оптимальні витрати ресурсів при обмеженнях пропускної спроможності дороги – з іншого, надзвичайно ускладнюються. В зв'язку із складністю повного і вірогідного математичного опису транспортного потоку на магістралях з врахуванням його складу, розподілу швидкостей, кількості смуг та можливостей виконання маневрів останнім часом усе частіше застосовують імітаційні моделі. Вони створюються для вирішення широкого кола задач.

Основним завданням моїх досліджень є розробка алгоритмічного блоку для інформаційної транспортної системи, що дасть змогу здійснювати керування і оптимізацію руху автомобільних потоків в міжміських сполученнях.

Як показують відомі публікації, розподіл параметрів руху транспортних засобів є фактором, який впливає на можливість виконання бажаної програми руху конкретного транспортного засобу. Оскільки мова йде, конкретно, про прогнозування швидкості для конкретного учасника транспортного потоку, то є доцільним виявити залежність цих величин. Найбільш ефективним засобом дослідження учені вважають імітаційні експерименти.

Мета цих досліджень – розробити методику і отримати результати, які доводять об'єктивність застосування параметра відносної швидкості як ознаки для зміни швидкості конкретного транспортного засобу. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі задачі.

По-перше, вибрати новий підхід для імітаційного моделювання руху заданого транспортного засобу по магістралі при застосуванні комбінації методів кліткових автоматів та активного спостерігача. Для цього створюємо необхідний відповідний алгоритм і програмне забезпечення.

По-друге, виконати приклад моделювання на трасі міжміського сполучення довжиною понад 2000 м із різними вхідними параметрами. За результатами буде побудована залежність прогнозованого параметра від гіпотетичної ознаки.

По-третє, визначити перспективу застосування розробленої методики імітації магістрального руху для досліджень подібного напрямку.

Об'єктом дослідження є транспортний потік в межах системи “людина–автомобіль–середовище руху”.

Предметом дослідження є пропускна здатність двосмугової автомобільної доріги як елементу середовища руху.

Методи дослідження. У роботі використано системний підхід, методи системного аналізу, теорії інформації (для розробки моделі розрахунку пропускної здатності), методи математичної статистики, спеціальні імітаційні методи (для експериментальних досліджень закономірностей поведінки водіїв).

Наукова новизна отриманих результатів: отримано подальший розвиток теорії взаємодії водія з середовищем руху, який урахує вплив мотивації діяльності та інформаційних характеристик поля сприйняття водія на вибір швидкостей руху і дистанцій між автомобілями; встановлено зв'язок між інформаційними характеристиками середовища руху і величиною пропускної здатності автомобільної дороги.

Практичне значення отриманих результатів: розроблено алгоритм розрахунку пропускної здатності двосмугових автомобільних доріг з урахуванням закономірностей поведінки водія та організації руху транспортних потоків; запропоновано методику визначення практичної

пропускної здатності на існуючих автомобільних дорогах на основі аналізу варіабельності швидкостей руху.

Методики, що запропоновані в роботі, дозволяють підвищити точність визначення величини пропускної здатності в середньому на 12% у порівнянні з існуючими методами.

Приведені результати і методики можуть знайти широке практичне застосування при рішенні задач проектування та експлуатації доріг.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Огляд відомих досліджень

Більшість сучасних досліджень просуваються в напрямку створення інтелектуальних транспортних засобів (ІТЗ), які рухатимуться по інтелектуальних мережах. Відомі, наприклад, проекти автономних автомобілів і їх організованого руху в колонах [8]. Були виконані оцінки водієм дорожньо-транспортної обстановки і вибору ним швидкості. Доведено, що водій, як найбільш інерційна ланка системи ВАДС, робить такий вибір залежно від інформаційного поля, яке є не завжди сприятливе [7]. Усі дослідження по ІТЗ є цілком обґрунтованими, особливо тим фактором, що понад 70% усіх причин ДТП пов'язані із людським фактором [2].

Багато вчених переконані в тому, що обмеження обсягу рішень по керуванню транспортним засобом, які покладаються на водія, є більш перспективним напрямком, ніж дослідження психо-фізіологічних особливостей процесу прийняття ним рішень [8]. У зв'язку з цим при побудові моделі прогнозування режимів руху транспортного засобу потрібно відсторонитись від випадкових чинників, пов'язаних із суб'єктивним вибором оператора.

Чимало статей присвячено прогнозуванню швидкості руху автотранспортного засобу (АТЗ) на автомобільній магістралі [1,6,9,11,19]. Надання точних оцінок швидкості і її зв'язку з параметрами транспортного потоку є основними завданнями транспортного моделювання. Більш уважний погляд на природу цього завдання вказує на те, що швидкість є, по суті, результатом взаємодії автомобіля з іншими учасниками руху. Впродовж багатьох років існували різні підходи до моделювання для вирішення цієї проблеми. В цілому, моделювання транспортного потоку з метою розв'язання основних проблем його розвитку поділяють на три умовні рівні: макрорівень, мезорівень, мікрорівень [6].

Моделі макрорівня описують весь транспортний потік як єдине ціле, з

огляду на сукупність усіх транспортних засобів. Значущою характеристикою цієї моделі виступає інтенсивність руху. Цей тип моделі найбільш доцільно застосовувати при аналізі транспортної системи великого розміру, наприклад, магістральних і міжрегіональних дорожніх мереж. Якщо йдеться про оцінювання конкретного параметру, то макромоделі є непридатними для цього через завищену похибку [16]. У моделях проходження за лідером істотно припущення про наявність зв'язку між переміщенням веденого і головного автомобіля. У міру розвитку теорії в моделях цієї групи враховувався час реакції водіїв, досліджувався рух на багатосмугових дорогах, вивчалася стійкість руху. Цей клас моделей називають мікроскопічними. Для того, щоб мікроскопічні моделі відтворювали реальну картину взаємодії транспортних засобів їх постійно доповнюють дослідженнями щодо раціональної поведінки водіїв [5].

У моделюванні дорожнього руху історично склалося два основних підходи – детерміністичний і ймовірнісний (стохастичний). В основі детермінізованих моделей лежить функціональна залежність між окремими показниками, наприклад, швидкістю і дистанцією між автомобілями в потоці. В стохастичних моделях транспортний потік розглядається як ймовірнісний процес. У моделях проходження за лідером істотно припущення про наявність зв'язку між переміщенням веденого і головного автомобіля. У міру розвитку теорії в моделях цієї групи враховувався час реакції водіїв, досліджувався рух на многополосних дорогах, вивчалася стійкість руху [21]. Цей клас моделей називають мікроскопічними. В ймовірнісних моделях транспортний потік розглядається як результат взаємодії транспортних засобів на елементах транспортної мережі. У зв'язку з жорстким характером обмежень мережі і масовим характером руху в транспортному потоці складаються чіткі закономірності формування черг, інтервалів, завантажень по смугах дороги тощо. Ці закономірності носять істотно стохастический характер [32].

Активізація досліджень транспортних потоків може відбутись, якщо чітко описати вплив кожного конкретного транспортного засобу на увесь транспортний потік [3]. Людське водіння включає в себе час реакції, затримки і людські помилки, які негативно впливають на транспортний потік. Одним із способів усунення людських помилок і затримок у наступному транспортному засобі є заміна водія людини комп'ютерною системою управління і датчиками [7]. Тому останнім часом з'являються роботи, метою яких є розробка автономних інтелектуальних систем круїз-контролю (АІКК) для автоматичного керування транспортним засобом, вивчення їх впливу на транспортний потік і порівняння його продуктивності з типом моделей водіїв людини. Недоліки більшості таких система є те, що вони не обмінюються інформацією з іншими транспортними засобами і не співпрацюють з іншими системами. Все ж, такий круїз-контроль не схильний до коливань і "облягаючих" ефектів у транспортному потоці. Усунення ефекту "slinky" досягається за допомогою правила розділення на відстані безпеки, яке пропорційно швидкості транспортного засобу (постійний проміжок часу) і відповідним чином розробляє систему управління. Виявлено, що продуктивність системи АІКК є вищою, ніж у моделей людських водіїв. Він має більш швидку та кращу перехідну реакцію, що призводить до набагато більш плавного та швидкого трафіку. Комп'ютерне моделювання використовується для вивчення продуктивності запропонованої системи АІКК та аналізування наступних транспортних засобів в одній смузі, без проходження, під ручним і автоматичним управлінням. Крім того, було змодельовано декілька надзвичайних ситуацій, які включають аварійні зупинки та випадки ввімкнення. Результати моделювання демонструють ефективність системи АІКК та її потенційно сприятливий вплив на транспортний потік [27].

Основним напрямком розвитку транспорту в останні роки стало широке розгортання і впровадження передових інформаційних технологій, телекомунікаційних технологій і комп'ютерних технологій в операціях і

управлінні транспортними системами. Колективно ці ініціативи відомі як інтелектуальні транспортні системи (ІТС), або іноді як передова транспортна телематика [11].

Для досліджень швидкості, затримок і черг вчені використовували радіолокаційні обстеження, відеозйомки, плаваючі автомобілі. Візуальні спостереження при дослідженнях майже не використовуються [21].

Великі зусилля були зроблені, як на національному, так і на міжнародному рівні, виділені на дослідження моделей прогнозування швидкості [17]. На відміну від попередніх досліджень, для вимірювання швидкості тепер застосовують супутникові навігаційні системи GPS, які дають достатньо позитивний результат у вимірюванні швидкостей і нагромадженні даних [11].

Основний вплив на зміну умов та безпеки руху мають дорожні умови, інтенсивність і склад руху. Причому, саме ці показники формують характер інформаційного завантаження водія. Кількість інформації може бути охарактеризована величинами максимальної ентропії H_m , поточної ентропії HT і абсолютної організації Q поля сприйняття водія.

Ентропія (інформаційна) – міра хаотичності інформації, невизначеність появи будь-якого символу алфавіту. За відсутності інформаційних втрат ентропія чисельно дорівнює кількості інформації на символ переданого повідомлення [10].

Ентропія характеризує міру невизначеності сукупності подій, що складають повну групу. Інформаційна ентропія для незалежних випадкових подій x з n можливими станами (номер стану i змінюється від 1 до n) розраховується за формулою Шеннона:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p(i) \log_2 p(i) \quad (1.1)$$

де $p(i)$ – ймовірність появи i -ї події з повної групи подій n .

Співвідношення між ентропією й абсолютною організацією (коефіцієнт стохастичності G) може бути основою для оцінки умов і безпеки руху.

Позначимо через G коефіцієнт стохастичності, що дорівнює

$$G = \frac{I_{\infty}}{I_{\infty} - I}, \quad (1.2)$$

де I_{∞} – реальна кількість інформації, біт;

I – надлишкова інформація, біт.

Інформаційні показники поля сприйняття водія тісно пов'язані між собою [16].

У багатьох працях також вказується, що відносна швидкість руху інших учасників потоку відіграє велику роль в інформаційному забезпеченні водія. Рівень психічної напруги водія при сприйнятті інформації залежить від двох факторів: цінності і кількості інформації. Кількість інформації залежить в основному від швидкості й інтенсивності руху. Найбільш цінною інформацією є та, котра в більшому ступеню впливає на прийняття водієм рішень, зв'язаних із забезпеченням безпеки руху [16].

Дослідження, описане в праці [6] показало, що дані GPS, що передаються за допомогою стільникових технологій з цих транспортних засобів, можуть забезпечити більшу частину інформації про продуктивність об'єкта, яку бажають дорожні агентства. Однак отримання достатньої кількості цих даних економічно ефективним способом буде важко.

Третім джерелом даних ІТС, які були досліджені, була розгалужена система спостереження та контролю автостради WSDOT. Вихідні дані кожного з ІТС-пристроїв, які можуть бути проаналізовані, представили різні зображення (варіанти) виконання вантажних потоків для тієї ж ділянки проїзної частини. Крім того, дані ІТС часто охоплюють різні (і не суміжні) сегменти дорожнього полотна та системи, або географічні райони. Результатом такого широкого розмаїття було завдання інтеграції, яке набагато складніше, ніж спочатку очікувалося. В цілому, дослідження виявило, що інтеграція даних з усього спектру пристроїв ІТС потенційно пропонує як більш повний, так і більш точний загальний опис вантажних і транспортних потоків [9].

В окремих проектах, описаних в літературі, досліджено процес перетворення сигналів від бортових транспондерів автопоїздів у значущі дані для опису продуктивності автостради [8]. Більш конкретно, дослідницьке завдання було таке. Потрібно було визначити, чи можна використовувати електронні транспондери вантажних автомобілів (також відомі як теги), щоб описати, чи збільшується час руху вантажівки за рахунок перевантаження автостради, а не просто зосередитися на тому, як визначити середній час подорожі вантажних автомобілів [7].

У роботі [13] розглянуто теоретичні підходи щодо класифікації швидкості руху, її взаємозв'язок з іншими первинними показниками транспортного потоку, а також чинники, які впливають на швидкісні режими окремих транспортних засобів у транспортному потоці. Особливу увагу присвячено дослідженням миттєвих швидкостей на прямолінійних ділянках вулично-дорожньої мережі, як однієї з основних ознак, які характеризують умови безпеки руху [1].

Як відомо, швидкість є цільовою функцією дорожнього руху [3,6,7]. Оцінка ступеня зручності поїздки на транспортному засобі пов'язана зі швидкістю руху, або з оберненою до нею величиною – тривалістю їздки [2,7]. Окрім того, забезпечення певних швидкісних режимів впливає на продуктивність роботи вантажного та пасажирського транспорту зокрема та ефективність функціонування транспортної системи загалом. Швидкість пов'язана з економічністю, безпекою та якістю обслуговування. Швидкість руху окремих автомобілів, та швидкісні параметри усього транспортного потоку залежать від інтенсивності руху, дорожньо-планувальних чинників, кліматичних умов, психофізіологічних особливостей водія тощо. За можливості водії рухаються зі швидкостями, які, на їх думку, є найбільш оптимальними для даного виду поїздки [2]. Суб'єктивний чинник приводить до того, що поняття «бажана швидкість» стало занадто розмитим, щоб його можна було описати на основі техніко-організаційних факторів. В реальних потоках розподіл швидкостей є досить значним за дисперсією, і залежить від

їх щільності. Оскільки тут однорідність транспортного потоку практично не досягається та й досягти однакової величини швидкості досить важко навіть для однакових за типом АТЗ, відповідно, виникає і складність в розробленні таких схем організації руху та засобів її регулювання, які б задовольняли абсолютну більшість учасників руху. Проте, наблизитись до розв'язання цієї проблеми можна завдяки постійному моніторингу швидкісних режимів і вивченню чинників, які значною мірою їх визначають.

Ефективним і інформативним способом моделювання руху сукупності транспортних засобів по магістралі є кліткові автомати [9]. На основі підходу мікромоделювання розроблено цілий ряд таких моделей, які дістали назву транспортні кліткові автомати [10], що дозволяють відслідковувати динаміку як окремо взятого автомобіля, так і потоку в цілому і отримувати вихідні дані для оцінки швидкості руху, швидкості і часу сполучення, часу простоїв в пробках.

Основна мета даного дослідження полягає в тому, щоб скористатися передовими чисельними та інтелектуальними інструментами для прогнозування швидкості автомобіля за допомогою часових рядів. Зрозуміло, що невизначеність, спричинена тимчасовою поведінкою водія, а також різними зовнішніми перешкодами на дорозі впливатимуть на швидкість автомобіля, а отже, і на вимоги до потужності автомобіля. Прогноз майбутніх потреб у електроенергії може бути використаний системами керування трансмісії автомобіля для значного покращення економії палива та показників викидів. Тому інженерам-проектувальникам систем і автомобільним промисловцям важливо розробити ефективні чисельні інструменти для подолання ризику непередбачуваності, пов'язаного з профілем швидкості автомобіля на дорогах. У дослідженні [4] автори пропонують інтелектуальний інструмент під назвою еволюційна машина, що найшвидше навчається (E-LLM) для прогнозування послідовності швидкості автомобіля. Щоб отримати практичну оцінку ефективності E-LLM, автори використовують дані водіння, зібрані на міських дорогах Сан-Франциско приватним автомобілем Honda

Insight. Концепція аналізу часових рядів ковзного вікна (SWTS) використовується для підготовки бази даних для процесу прогнозування швидкості.

Для оцінки продуктивності відомих методик було використано ряд добре відомих підходів, таких як авторегресивний (AR) метод, нейронна мережа зворотного поширення (BPNN), еволюційна машина екстремального навчання (E-ELM), машина екстремального навчання (ELM), та нейронної мережі радіальної базисної функції (RBFNN). Далі продуктивність методів-конкурентів порівнюється з точки зору середньоквадратичної помилки (MSE), середньоквадратичної помилки (RMSE), середньої абсолютної процентної помилки (MAPE), середньої абсолютної процентної помилки (MDAPE) і абсолютної частки дисперсії (R^2) метрики. Завдяки вичерпному порівняльному дослідженню автори помітили, що E-LLM є потужним інструментом для прогнозування профілів швидкості транспортних засобів [3].

Результати поточного дослідження можуть бути корисними для інженерів автомобільної промисловості, які шукали швидкі, точні та недорогі інструменти, здатні передбачати швидкість АТЗ до певної точки наперед, відомої як прогнозний горизонт (W), який може бути використаний для проектування ефективних прогнозних контролерів для трансмісії та силових агрегатів [1].

1.2 Огляд методології імітаційного моделювання транспортного потоку

Існує багато різних систем імітаційного моделювання транспортних мереж. Серед них такі системи, як AIMSUN, PA-RAMICS, AUTOBAHN, IHSDM, INTEGRATION, PLANSIM-T, FLEXSYT-II, TRANSIMS, SimTraffic 6, VISSIM, MITSIM та ін [16]. В розглянутих мною статтях авторами проаналізовані системи імітаційного моделювання транспортного потоку, і доведена необхідність розробки системи моделювання дорожнього руху як розподіленої системи. Така система моделювання дозволить моделювати

транспортні мережі великих міст з великою кількістю автомобілів, а також скоротити фінансові витрати на забезпечення роботи системи. В системі існує можливість моделювання вибору маршруту водієм до початку і під час поїздки. Наприклад, AIMSUN включає чотири різних алгоритми моделювання динамічного вибору маршруту, редактор функції підрахунку вартості проїзду і опцію для визначення вартості проїзду, виходячи з інформації про попередні маршрути. Різні водії будуть використовувати різні критерії вибору маршруту: від постійного вибору того ж самого маршруту до зміни маршруту відповідно до умов руху. В статті [17] відмічено, що моделі поведінки транспортних засобів в системі AIMSUN визначаються функціями від декількох параметрів, що дозволяє моделювати рух різних типів транспортних засобів (автомобілів, автобусів, вантажівок і т.д.), які потім можуть бути об'єднані в класи.

У своїй роботі я вирішив зупинитись на виборі методики кліткових автоматів. Клітковий автомат є надзвичайно спрощеною програмою для моделювання складних транспортних систем, де швидкість роботи є більш важливою, ніж точність моделі. У клітковому автоматі простір і час поділяються на дискретні клітини і кроки. Обмін клітин здійснюється тільки транспортованими одиницями з сусідніми клітинами безпосередньо протягом одного етапу часу. Модель кліткового автомата визначається правилами, які контролюють ці обміни [17]. У статті [18] описано абсолютно нову концепцію принципу кліткового автомата для моделювання транспортного потоку. Ця модель використовує орієнтовану на час модель автомобіля. Ця модель відповідає реальному поведінці водіння більш точно, ніж модель, наприклад, від Nagel і Schreckenberg. Зберігаються властивості дискретного часу та простору. Також процес оновлення може бути виконаний для кожного транспортного засобу незалежно один від одного. Випробування показали, що ця модель досягає досить гарної відповідності спостережуваному реальному транспортному потоку [19]. Клітковий автомат, як правило, застосовується для моделювання транспортних потоків. Ступінь його відповідності з

реальністю залежить від застосовуваної моделі автомобіля. Нова концепція моделі поєднує в собі реалістичне моделювання з швидкою обчислювальною продуктивністю.

Моделі трафіку, засновані на кліткових автоматах, обчислювально ефективні через їх простоту в описі складних транспортних моделей і їх здатності легко реалізуватися для паралельних обчислень. З іншого боку, інші мікроскопічні моделі, такі як моделі автомобілів, що слідує за комп'ютером, є більш дорогими, але вони мають більш реалістичні поведінки водія та детальні характеристики автомобіля. У роботі [22] пропонується гібрид між цими двома категоріями, що визначає модель трафіку на основі безперервних кліткових автоматів [18].

1.3 Висновки та формулювання задач дослідження

Для того, щоб забезпечити створення прогресивних ІТЗ в сучасних транспортних мережах, потрібно мати доступ до поточної та архівної інформації про транспортні потоки, щоб здійснити прогнозування. Оскільки більшість рішень на дорогах водії АТЗ приймають суб'єктивно, то процес точного прогнозування з допомогою аналітичних моделей є сильно ускладнений, подекуди неможливий. Тому у цій магістерській роботі я пропоную застосовувати імітаційне моделювання, щоб визначити найбільш інформативну ознаку стану автомобільного потоку на магістралі і за нею встановити параметри відносної швидкості окремих транспортних засобів.

Найбільш придатною в цих умовах є методика кліткових автоматів. Вона має переваги в тому, що не знеособлює можливі діє водіїв, з одного боку, а використовує розподіл швидкостей по смугах – з іншого.

Методика імітаційного моделювання з допомогою кліткових автоматів потребує адаптації до особливостей мети даного дослідження в моїй роботі, через що планується удосконалити відповідні відомі алгоритми.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Модель системи обробки потоку інформації на магістральній дорозі

Зараз відомі такі системи керування магістральними транспортними потоками, об'єктами яких є стаціонарні дорожні засоби, тобто зовнішні по відношенню до сукупності транспортних засобів [6]. Усіх їх можна розділити на чотири групи. Перша стосується змінного в часі призначення пріоритетних смуг руху, відкриття резервних, або заборон міняти смугу. У технологіях, що стосуються цих систем, використовують сенсори швидкості руху, або камери відеоспостереження, але так, чи інакше, ознаками для керування є швидкість автотransпортних засобів (АТЗ). Недоліками їх є те, що нема чіткого обґрунтування місця розташування сенсорів та актуаторів, отже система є неадекватною реальним транспортним ситуаціям.

Друга група об'єднує способи і засоби керування вхідними, чи вихідними транспортними потоками на заданій ділянці автомагістралі. Це здійснюють обмеженням доступу на магістраль, переключення потоку на альтернативний напрям тощо. Нажаль, поки що ці заходи не дають практичних результатів, оскільки керуються суб'єктивними ознаками надання пріоритетів та керування.

Третя група систем „зовнішнього” керування стосується обмеження швидкості руху автомобілів в потоці. Так, якщо по різних смугах в одному напрямку рухаються автомобілі з різними швидкостями, то це викликає необхідність маневрів, які спричинюють затори і затримки. Якщо обмежити швидкість „швидких” автомобілів, прирівнюючи їх до швидкості „повільних”, то потік стає однорідним за швидкістю і не викликає об'єктивних причин для виконання обгонів та змін смуги руху. Однак, досі невідомо, чи такий спосіб керування не підвищує сумарні затримки за рахунок зниження бажаних швидкостей „швидких” АТЗ. Цей недолік притаманний усім трьом названим групам систем. Крім цього – вони не усувають три відомі причини виникнення затримок і заторів: а) нерівномірність швидкостей автомобілів у

потоці; б) виконання маневрів (часто з причини (а)); в) прискорення та гальмування окремих автомобілів в потоці [2].

З метою усунути суб'єктивні чинники в безпеці дорожнього руху розробляють системи „внутрішнього” автоматичного керування транспортним засобом. Адже людина, як найбільш інерційна ланка в системі „водій-автомобіль-дорога-середовище” повинна, на думку розробників різноманітних навігаційних систем, круїз-контролю та інших інтелектуальних систем, бути звільненою від потреби виконувати миттєві дії [3]. Проте, цілком позитивно вплинути на транспортні умови на магістралях такі системи не можуть. А якщо на автомобільних магістралях утворюються затори, то вони зовсім втрачають свою ефективність. Крім цього, поки що системи „внутрішнього” керування є надто дорогими. Систему VDC, наприклад, встановлюють досі лише на автомобілях представницького класу.

Останнім часом усе частіше з'являються публікації, у яких дослідники торкаються питань комунікабельності АТЗ [13]. Під цим терміном розуміють властивість, що визначає можливість встановлення інформаційного зв'язку між бортовими системами автоматизованого керування супутніх транспортних засобів, а також із стаціонарними дорожніми об'єктами. Ця властивість реалізується використанням пристроїв збору і передавання сигналів від первинних перетворювачів відстаней, відеозображень, елементів радіозв'язку малої дальності. Потрібно визнати, що якість оперативного керування, а саме точність, а також функціональні можливості таких пристроїв зростають [3]. Однак, поки що немає даних щодо ефективності комплексного використання різних носіїв інформації в одній автоматизованій системі.

Критерієм якості оперативного керування транспортними потоками вважають чисельну міру відхилень фактичних значень контрольованих параметрів від оптимальної програми руху, за умови виконання енергетичних, ресурсних обмежень, що діють в межах прогнозованого часового інтервалу []. В магістральних автомобільних перевезеннях швидкість є головним

параметром програми руху. Її сталість є ознакою мінімальних енергетичних витрат транспортного процесу і вдало спланованого транспортного процесу. Для відомих дорожніх умов та для фіксованого транспортного завдання вантажного автомобіля можна назвати числове значення бажаної швидкості, яке відповідає вільному рухові і є далеко не максимальним при відомому навантаженні [5]. В реальних транспортних умовах це значення реалізоване часто далеко за межами допустимих відхилень, через погану поінформованість, а, отже – через неспроможність виробляти адекватні рішення водіїв. Характерно, що чим менший розмір інформаційного поля АТЗ, тим більшими є сумарні прискорення на заданому маршруті [23].

Розглянемо автомобільну магістраль між деякими перерізами l_1 та l_2 . Якщо для кожного i -го АТЗ, що рухається між цими перерізами, відома бажана програма руху, тобто залежність бажаної середньої швидкості від переміщення x – $V_i^{\delta}(x)$, то прийняті критерії ефективності керування транспортними магістральними потоками набувають вигляду таких функцій:

- сумарні затримки n АТЗ

$$\sum_{i=1}^n \left(\int_{l_1}^{l_2} |V_i(x) - V_i^{\delta}(x)| dx \right) \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

- міра рівномірності руху n АТЗ:

$$\sum_{i=1}^n \int_{l_1}^{l_2} |j_i(x)| dx \rightarrow \min, \quad (2.2)$$

де n залежить від вибраного інтервалу магістралі $[l_1; l_2]$;

$V_i(x)$ – вимушена середня швидкість i -го АТЗ;

$j_i(x)$ – прискорення/сповільнення i -го АТЗ при виконанні маневрів.

Якщо використовувати стратегію тільки „зовнішнього” керування, то виконуватиметься критерій (2.1), тобто потік стане рівномірнішим за швидкостями окремих АТЗ. Проте бажані програми руху певної частини

автомобілів не дотримуються. Таким чином, критерій (2.1) не реалізовується. Якщо функцію керування потоком покласти лише на „внутрішні” автомобільні бортові системи, які не взаємодіють, то спостерігатиметься протилежна ситуація: автомобілі будуть ближчими кожен до своєї бажаної програми, намагаючись досягнути критерію (2.1). Однак, якщо ці програми істотно різняться, то в потоці не уникнути маневрів прискорення, зміни смуги руху, сповільнення, гальмування. В результаті критерій (2.2) ігнорується, на магістралі і надалі створюватимуться аварійні ситуації, буде мати місце перевитрата енергоресурсів та інші негативні наслідки.

Очевидно, що така суперечність може бути розв’язана, якщо сформулювати об’єктивні умови і обґрунтувати напрямки реалізації комплексної системи керування транспортним потоком, що є метою цих досліджень.

Передусім було прийнято припущення, що у транспортному потоці автомобілі рухаються лише за об’єктивно обґрунтованою програмою руху. Якщо інші суб’єктивні причини відкинути, то виникнення прискорень/сповільнень можна виявити, розглянувши взаємодію лише двох АТЗ: того, для якого встановлено систему автоматизованого керування режимом руху – A_1 та того, який йому передус – A_2 і має таку ж систему (рис. 2.1).

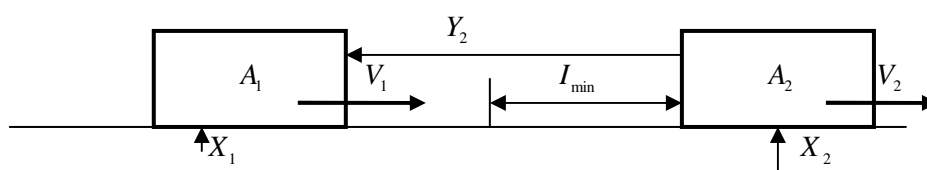


Рисунок 2.1 – Схема взаємодії транспортних засобів A_1 і A_2 на магістралі: X_1 , X_2 – вектори первинних сигналів, що надходять, відповідно, до A_1 та A_2 ; Y_2 – вектор вторинних сигналів, що надходять від A_2 до A_1 ; $I_{\min}$ – обмеження на безпечний інтервал руху

Між цими автомобілями може бути встановлений головний параметр взаємодії – інтервал I , мінімальне значення $I_{\min}$ якого вибрано з умов безпеки руху, та можливості виконання обгону. У деяких дослідженнях доведено суперечний традиційним поглядам факт, згідно з яким інтервал $I_{\min}$ не є функцією абсолютної швидкості автомобіля [9]. Нами було прийнято цю тезу.

Прискорений рух A_1 виникає на магістральних дорогах у двох варіантах. Перший варіант можна описати такими нерівностями:

$$I > I_{\min}, V_1 < V_1^{\delta} \approx V_2, \quad (2.3)$$

де I – поточний інтервал між A_1 та A_2 ;

V_{A_1} – поточна швидкість автомобіля A_1 ;

V_1^{δ} – бажана швидкість цього ж автомобіля; V_2 – швидкість автомобіля лідера A_2 .

Співвідношення (2.3) відповідають ситуації, коли автомобіль A_1 наздоганяє A_2 і доводить свою поточну швидкість до бажаної, але є обмеженим резерв часу для такого маневру по інтервалу $\Delta I = I - I_{\min}$. Незважаючи на простоту й типовість такої ситуації, вона є досить складною, якщо намагатися її спрогнозувати. Адже, крім того, що необхідно знати випадкові функції $V_1(x)$, $V_2(x)$ для невідомих дорожніх умов, конечно перевірити, чи вибрано адекватне значення прискорення:

$$j_1 = \frac{\int_0^{I-I_{\min}} (V_1^{\delta} - V_1(x)) dx}{\Delta t}, \quad (2.4)$$

яке є можливим по безпечному гальмівному шляху. У виразі (2.4) часовий інтервал Δt є також випадковою величиною.

Другий варіант прискорення описується співвідношеннями:

$$I \approx I_{\min}, V_1 \leq V_1^{\delta} > V_2, \quad (2.5)$$

що відповідає ситуації, коли для автомобіля A_1 визріла потреба і є можливість для обгону. При цьому V_1 має досягнути деякої величини $V_1^{обг.}$, яка гарантує безпечність маневру. Знову ж таки, і тут потрібно перевірити, чи можна досягнути швидкості $V_1^{обг.}$ з умов динамічних властивостей автомобіля та зчеплення шин з дорогою, стан поверхні якої на заданому інтервалі є невідомим.

Сповільнення автомобіля є необхідним елементом програми руху і деякі дослідники стверджують, що чим більша його інтенсивність, тим енергетично більш ощадним є режим руху АТЗ [23]. Однак, це діє в сенсі уже виконаної програми руху. При необхідності перейти на нижчу швидкість, коли кінця руху не досягнуто, інтенсивне гальмування – це перевитрата енергії в гальмівній системі. Тому тут йдеться про мінімальне сповільнення, як небажаний, але необхідний елемент руху. Воно також можливе за двох варіантів. Перший варіант сповільнення описується співвідношеннями:

$$I \geq I_{\min}, V_1 \geq V_1^{\delta} < V_2. \quad (2.6)$$

Якщо бажана швидкість досягнута, нема змісту і/або можливості рухатися з більшою швидкістю V_1 , то, вочевидь, буде застосоване гальмування, і по можливості – за рахунок сил зовнішнього опору руху (рух накатом).

Другий варіант гальмування – вимушений:

$$I \approx I_{\min}, V_1 \geq V_1^{\delta} < V_2, \quad (2.7)$$

Тут досягнуто обмеження по інтервалу руху і нема можливості для обгону.

Таким чином, після аналізу чотирьох випадків прискорення/сповільнення, було розроблено алгоритм прогнозування параметрів транспортного потоку залежно від таких функцій:

збурення – інтервалу між автомобілями – $I(t)$;

задаючої – бажаної програми руху $V_1^{\delta}(t)$;

відхилення – оцінки власної швидкості $V_1(t)$.

Функція мети – прискорення, або сповільнення автомобіля $j_i(t)$ набуває вигляду:

$$j_i(t) = F(I, V_i^{\delta}, V_i, t), \quad i = 1 \dots K \quad (2.8)$$

де F – нелінійна, логічно-екстремально-адаптивна функція.

На основі цієї функції розроблено три моделі автоматизованої системи керування транспортними потоками. Передбачалось, що система повинна розробити прогноз власного прискорення/сповільнення $j_i(t)$, водночас мінімізуючи його за виразом (2.2), а також дотримуватись наперед передбаченої програми руху, адаптуючи її до реальних транспортних умов, що склались.

Безпосередньо отримати функції $V_i(t)$, $I(t)$ у жодній моделі з достатньою мірою точності не видається можливим, натомість можна скористатись доступними для вимірювання сигналами, з допомогою яких – перейти до шуканих. Більшість первинних сигналів у транспортному потоці також мають велику похибку вимірювання і передачі, тому повідомлення, які вони несуть – бувають суперечними, що вносить невизначеність у процес автоматизованого керування. Це стосується, наприклад, майже усіх способів вимірювання швидкості та інтервалів між рухомими об'єктами. Брак інформації для вироблення рішення можуть компенсувати такі повідомлення, які, не зважаючи на чималу похибку кожного з них зокрема, в сукупності створюють більшу ентропію [8]. У зв'язку з цим, дослідження проводились у три стадії: перша – побудова та аналіз функціональної моделі руху автомобілів в транспортному потоці та аналіз залежностей його параметрів, друга – вибір множини первинних сигналів і синтез алгоритму керування на основі цих залежностей; третя – оцінювання ймовірної похибки автоматичного керування та коригування початкових моделей. Дослідження привели до трьох принципових варіантів систем.

Варіант перший (рис. 2.2) – бортова автоматизована система (БАСК), об'єктом керування якої є окремий автомобіль A , до якого надходять зовнішні сигнали про відстані до рухомих та нерухомих перешкод руху – $I(t)$, і який виробляє власні сигнали щодо частоти обертання кожного колеса $w(t)$ та щодо розподілу навантаження на кожну вісь $R_z(t)$.

На основі цих вхідних сигналів виробляються оцінки:

- а) коефіцієнта зчеплення шин з дорогою φ – відповідно до частот обертання ведених та ведучих коліс $w_1 - w_2$;
- б) сумарного коефіцієнта дорожнього опору ψ ;
- в) з використанням (а) і (б) – оцінки поточного значення та прогнозу власної швидкості $V(t)$.

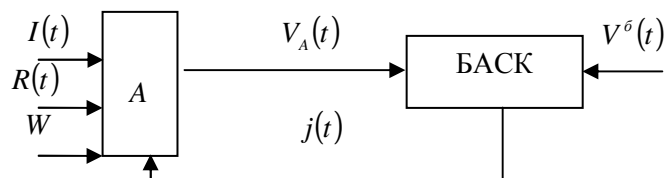


Рисунок 2.2 – Схема бортової автоматизованої системи керування одиночним автомобілем у транспортному потоці: $I(t)$ – зовнішній сигнал від перешкод (суміжних автомобілів); $R_z(t)$ – матриця сигналів тензометричної системи щодо розподілу навантаження на осі; $w(t)$ – матриця сигналів від колісних сенсорів частоти обертання

БАСК має задану програму руху з можливістю додатково налагоджувати її, якщо сумарні затримки сягнули межі некерованості. На основі функцій $V(t)$ і $V^o(t)$ приймається рішення про вибір наступного режиму руху (сповільнення/ прискорення/ рівномірний). Схема алгоритму бортової автоматизованої системи керування за першим варіантом наведена на рис.2.3.

Потрібно відмітити, що така система має досить значні первинні похибки вимірювання і оцінювання параметрів Δ_1 . Такі похибки викликані недосконалістю способів вимірювання і невизначеностями функціональних

моделей – систем рівнянь динаміки розгону (2.7) та сповільнення (2.8) автомобіля на горизонтальній дорозі з удосконаленим покриттям.

$$\begin{cases} m_a j + R_{z1} f_1 + R_{z2} f_2 = 0 \\ m_a \cdot j \cdot h - m_a g \cdot b + R_{z2} l + P_k d_2 = 0, \\ m_a \cdot j \cdot h + m_a g \cdot a + R_{z1} l + P_k d_2 = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\begin{cases} m_a j + R_{z1} f_1 + R_{z2} f_2 - P_{z1} - P_{z2} = 0 \\ m_a \cdot j \cdot h - m_a g \cdot b + R_{z2} l - P_{z1} d_1 - P_{z2} d_2 = 0, \\ m_a \cdot j \cdot h + m_a g \cdot a + R_{z1} l - P_{z1} d_1 - P_{z2} d_2 = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

де m_a – повна маса автомобіля;

R_{z1}, R_{z2} – реакції, відповідно, передніх та задніх коліс;

f_1, f_2 – коефіцієнти опору кочення передніх та задніх коліс;

h, a, b – координати центра мас, відповідно, висота, відстань до задньої, відстань до передньої осі;

l – база автомобіля;

d_2 – динамічний діаметр ведучого колеса;

P_k – дотична сила на цьому колесі.

Як бачимо, з рівняння (2.7) у найбільш загальному випадку, залишаються невідомими такі параметри як P_k, f_1, f_2, d_2 . Серед невідомих тут: P_z, f_1, f_2, d_1, d_2 , а також гальмівні сили (не важливо, чи гальмування відбувається основною, чи допоміжною гальмівною системою) P_{z1}, P_{z2} . Систематичні похибки тут спричинені такими припущеннями:

- 1) $f_1 = f_2$, що лише при однаковій еластичності та стані коліс є допустимим;
- 2) $\varphi_1 = \varphi_2$, що не перевищує похибки у 5% лише при швидкості АТЗ до 50 км/год.;
- 3) $d_1 = d_{1\text{статичн.}}$, що досягає 15-17% при магістральних швидкостях;
- 4) $Y_1(t)$ – неперервний сигнал, на який впливає відносна швидкість двох автомобілів.

2.2 Теоретичні підстави для створення імітаційної моделі

Відомі розв'язки завдання створення універсального моделюючого програмного засобу, яке дозволило б досліджувати різні питання, пов'язані із зміною пропускнуої спроможності магістралі залежно від значної кількості параметрів автомобілів і алгоритмів їх взаємодії. Завдання ускладнюється необхідністю створення повноцінної, простої і, водночас, ефективної системи обгону на багатосмуговій трасі. Такий метод дозволяє значно спростити роботу з об'єктами і системою в цілому, передбачити багато параметрів і властивості об'єктів, а в перспективі з його допомогою можна обробляти не тільки автомобільні, але і будь-які інші потоки. Основний недолік його полягає в тому, що навіть в початкові дані закладено суб'єктивні тлумачення явищ дорожнього руху, які в багатьох випадках заперечені новими результатами досліджень. Це, насамперед, – розуміння динамічного габариту, який досі узалежнюють від швидкості руху АТЗ. Відомі експериментальні дослідження, які цілком спростовують це твердження [6]. Інше допущення робить невизначеними процеси вибору режимів руху у заданих дорожніх умовах. Стверджується, що максимальна швидкість автомобілів є головним критерієм вільного транспортного потоку. При цьому не беруться до уваги початкові умови і об'єктивна кінцева мета руху транспортних засобів, існування оптимальної за витратами матеріальних та енергетичних ресурсів програми руху [4,5]. Використовуючи нові дані, можна вживати термін „бажана швидкість” АТЗ, яка відрізняється від максимальної в заданих дорожніх умовах і залежить від транспортного завдання, паливної характеристики, технічного стану, інформаційного забезпечення транспортного засобу.

Відомо про методику імітаційного моделювання транспортного потоку, у якій на основі кліткових автоматів вперше використано метод активного спостерігача (АС) [3]. З допомогою цієї моделі встановлена залежність середнього прискорення АС від протяжності інформаційного поля вздовж магістралі. Було встановлено, що розмір інформаційного поля попереду АС –

R_s має суттєвий вплив на підвищення рівномірності руху в діапазоні від 50 до 180 м. Це характерно для усіх розподілів бажаних швидкостей $\bar{u}_j$, що розглядались. При $R_s < 50$ м зміни в інтенсивності руху є більш вагомими для вибору ефективних режимів, ніж доступна інформація. Невелике інформаційне поле не може вплинути на використання автомобілем раціональних програм руху через невеликий запас часу для прийняття рішення. Якщо інформаційне поле автомобіля зростає вперед понад 180 м, то це також не суттєво впливає вироблення більш ефективних рішень, оскільки допустимий запас часу на подолання вірогідних затримок вичерпано. Розмір інформаційного поля є вагомим фактором підвищення ефективності транспортного процесу в діапазоні 50-180 м при значеннях середньої швидкості транспортного потоку 18..26 м/с і середньоквадратичному відхиленні 5,6 м/с. Сумарні прискорення/сповільнення автомобільних транспортних засобів, які спричиняють додаткові витрати енергії та знижують безпеку руху, можна зменшити у розглянутому транспортному потоці, якщо привести інформаційне забезпечення екіпажу АТЗ у відповідність до його транспортного завдання.

Використовуючи імітаційну модель транспортного потоку на основі кліткових автоматів і методу активного спостерігача було прийнято низку допущень, які у певній мірі знижують адекватність моделі [3]. Ці допущення, зокрема не дають змоги з'ясувати, яким має бути потік інформації про транспортні умови руху для того, щоб забезпечити найбільш ощадні режими руху при умові вчасного виконання транспортного завдання. Щоб побудувати адекватну імітаційну модель, потрібно врахувати декілька сучасних тенденцій в дослідженнях транспортних потоків [3]:

1. Необхідність високоточного моделювання поведінки системи, що вимагає комплексного застосування, як складних макромоделей транспортних потоків, так і детальної розробки мікромоделей, які що враховують раціональні правила дій водіїв і технічні параметри автомобілів.

2. Відсутність випадкових збурень в програмі руху кожного автомобіля. Вплив зовнішніх факторів розглядають як зло, оскільки він є джерелом флуктуацій.

3. Завдання оптимізації транспортних потоків розподілене географічно, проте має свою топологію, яка пов'язана із взаємодією транспортних вузлів. Така топологія визначає розподіл бажаних швидкостей.

4. Вимоги, що пред'являються до рішення, потребують врахування багатьох критеріїв, які можуть мінятися залежно від поточної ситуації на дорогах.

За основу для вирішення поставленої задачі приймалась імітаційна модель АС на основі кліткових автоматів Неймана [3]. Її модифікована схема подана на рис.2.3. На схемі показано АС, відносно якого виробляються усі рішення про вибір програми руху – сукупності режимів розгону, рівномірного переміщення, руху накатом, гальмування. Координати переднього габариту АС, а також відносна швидкість дорівнює нулеві. Отже, система рухається з абсолютною швидкістю АС. Координати автомобілів x_{sj}^i , x_{dj}^i – переднього і заднього габаритів вимірюються відносно АС. Це стосується як прямої (зліва-направо) так і зворотної смуг. Масиви координат та інших параметрів автомобілів зустрічної смуги мають індекс z . У моделі також визначаються: Z_j^i – дистанція j -го автомобіля до того, що попереднього; Z_{jj}^i – дистанція між будь-якими двома автомобілями однієї смуги; y_j^i – дистанція до найближчого зустрічного автомобіля. Усі ці параметри визначаються для тих об'єктів, які розташовані в полі „видимості” АС – $R_s + R_d$. У кожен i -й крок моделювання ситуація в цьому полі може змінюватись.

Допущення, прийняті в моделі. 1) Габарити автомобілів задано законом випадкового розподілу, вид і параметри якого не змінюються вздовж заданої магістральної ділянки. 2) Мінімальна дистанція до попереднього автомобіля $Z_{\min}$ є постійною, не залежить від характеристики водіїв та вибраних ними

швидкостей руху, а лише від технічних можливостей здійснити маневр автомобілем (обгін, гальмування).

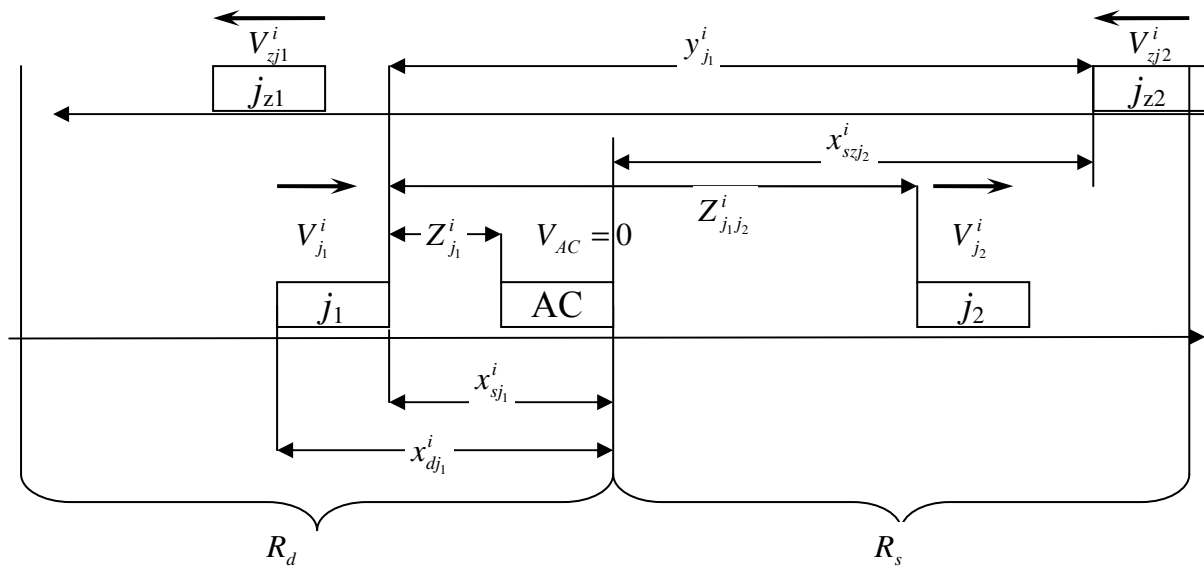


Рисунок 2.3 – Ілюстрація імітаційної моделі

3) Усі автомобілі мають бажані швидкості u_j , які обґрунтовано за критерієм мінімальних експлуатаційних витрат. 4) Абсолютні бажані швидкості автомобілів задано законом випадкового розподілу. Параметри і вид цього закону не змінюються впродовж моделювання. 5) Середня кількість автомобілів в зоні інформаційної „видимості” є постійною на усій магістральній ділянці. 6) АС має інформацію про координати і швидкості автомобілів в зоні інформаційної „видимості”. 7) Такт є достатньо малим інтервалом часу, таким, що впродовж його тривалості не відбувається жодної події, але визрівають умови для вироблення і прийняття рішення. 8) Маневри автомобілів зустрічної смуги не перешкоджають руху АС. Для усунення її невідповідності сучасним вимогам до імітаційної моделі запропоновано такі зміни.

1. Конкретизовано умови прийняття рішень. Якщо дистанція Z_j^{i+1} до попереднього АТЗ наступного кроку є меншою, ніж $Z_{\min}$, то потрібно оцінити можливість виконати обгін, або ж пригальмувати до швидкості попередника. Обгін виконується, якщо: а) відстань до зустрічного АТЗ можна подолати з максимальною швидкістю без зіткнення; б) за попередником, або за

декількома попередниками є доступна хоча б одна вільна ділянка дороги для завершення маневру; в) ділянка до автомобіля, який є наступником і також виконує обгін, є не меншою, ніж допустима. В кожному випадку перевіряється умова виконання обгону з швидкістю, максимально близькою до бажаної програми руху, або з мінімальним прискоренням (рис.2.4).

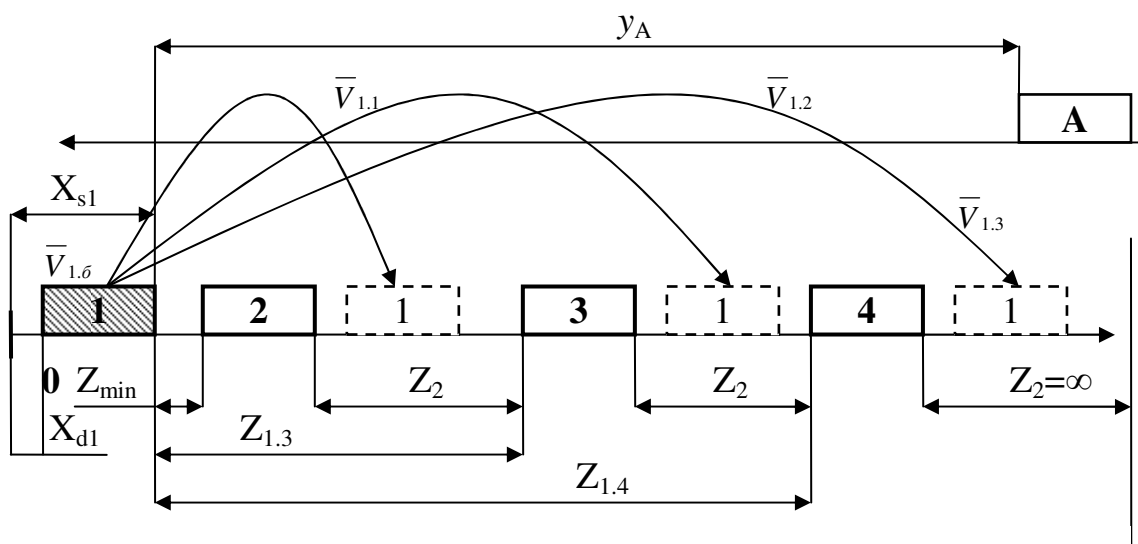


Рисунок 2.4 – Ілюстрація умов виконання обгону

Якщо обгін на деякій дистанції виконати не вдається, то автомобіль пригальмовує до швидкості попередника і рухається з нею до настання умов обгону. Якщо інформації про умови виконання маневру є недостатньо, то маневр не виконується.

2. Враховано, що коли прийнято рішення, що j -й автомобіль має змінити швидкість (розігнатись, або пригальмувати) за декілька модельних кроків уперед: $\tau_i, \tau_{i+1}, \dots, \tau_{i+n}$, то він це робить за наперед відомою оптимальною програмою руху для заданих умов – допустимого максимального часу –

$T_{d,\max} = \sum_{k=i}^{i+n} \tau_k$ і переміщення $Z_{j,j1}$, яка характерна мінімальними витратами енергії для цього автомобіля.

3. Прийнято, що габарити автомобілів, які оснащені бажаними інформаційними системами, не є динамічними, тобто не залежать від швидкості руху автомобіля, а лише від умов безперешкодного виконання маневру (обгону).

4. Показано, що на вибір програми руху впливають такі змінні параметри: (а) дискретність в часі наданої інформації, (б) розмір збереженого „архіву” інформації стосовно зміни швидкостей на попередніх кроках моделювання.

Узагальнену блок-схему відомого алгоритму подано на рис. 2.5. Його було застосовано для таких умов: рух по непересічній ділянці магістральної дороги з нерозділеними смугами довжиною 20 км. Дистанція інформаційної „видимості” – 180 м, яку обґрунтовано з попередніх досліджень; параметри розподілу габаритних розмірів автомобілів на ділянці: середнє значення габаритної довжини – 5 м, середньоквадратичне відхилення – 1,6 м, середня кількість автомобілів на ділянці „видимості” – 5 ± 1 на кожній смузі; розподіл бажаних швидкостей АТЗ – нормальний з параметрами: $\bar{u}_0 = 19$ м/с, $\sigma_u = 2$ м/с.

Імітаційне моделювання за відомою моделлю виконувалось за розробленим алгоритмом і комп'ютерною програмою, у якій передбачались змінний крок моделювання Δt і параметр глибини прогнозування ситуації на інформаційно „видимій” ділянці – k . Ці два параметри впливають на вибрану програму руху (рис. 2.6).

Це можна пояснити на такому прикладі. Нехай є відомі допустимі для обгону дистанції Z_2, Z_3, Z_4 , якщо змодельовати ситуацію на $k=1$ крок уперед (див. рис. 2.2). Оптимальна програма руху при цьому – розгін-рух з постійною швидкістю-рух накатом-гальмування, – характеризується найвищою середньою швидкістю руху, бо високою є міра невизначеності про подальші можливості виконати бажані маневри. За паливною характеристикою такий режим є найменш ощадним [4].

Якщо ситуацію спрогнозувати $k=2$ кроки вперед, то допустимих дистанцій для обгону буде дві: Z_2, Z_3 . Проте і середня швидкість його виконання повинна бути знижена. З іншого боку це приводить до ускладнень у виконанні транспортного завдання (відхилення від бажаної швидкості). Прогнозування на 3 кроки дає ще менший дозволений час і дистанцію для

виконання маневрів, хоча це можна зробити з більшою ефективністю (рис.2.6).

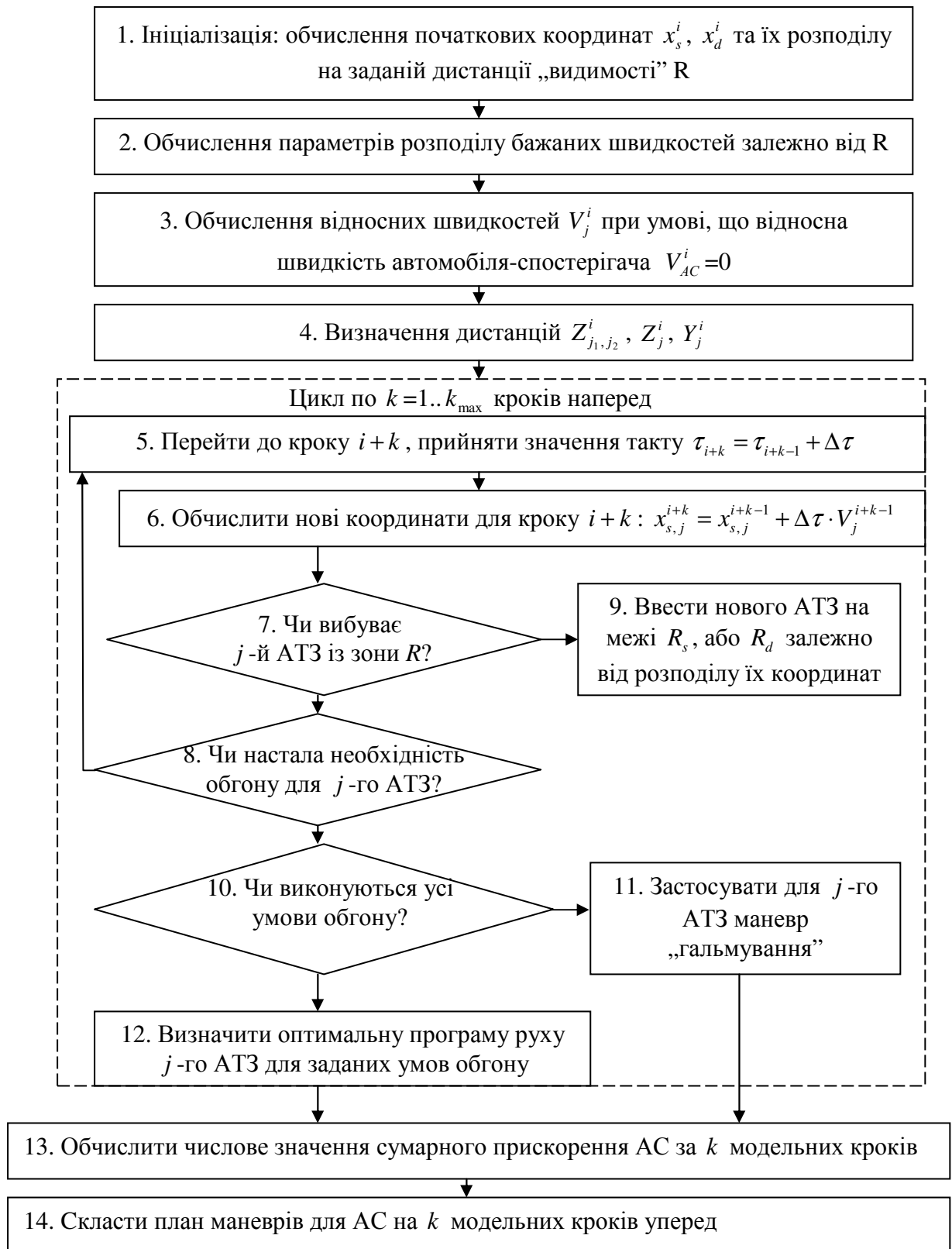


Рисунок 2.5 – Блок-схема алгоритму імітаційного моделювання

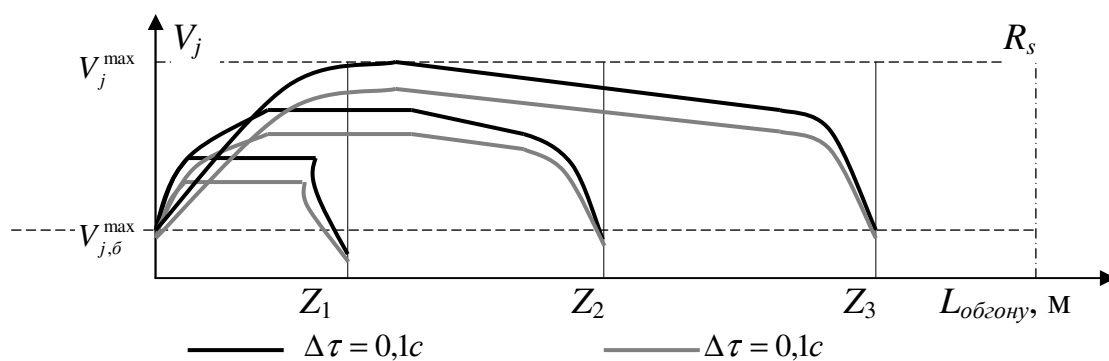


Рисунок 2.6 – Залежність програми обгону від обсягу інформації і дистанції

Якщо дискретність моделювання $\Delta\tau$ зменшити, то резерв часу на виконання обгону збільшиться і швидкість його виконання може бути наближена до бажаної, а це робить вибраний режим ощадливішим.

Результати, отримані в ході попередніх досліджень, дають змогу використати імітаційну модель такого виду для вирішення двох типів завдання, які є актуальніші на даний момент: створення програми-диспетчера для дороги і створення автопілота для окремого автомобіля на магістральних перевезеннях.

2.3 Математичне моделювання профілів доріг

2.3.1 Види моделей системи ВАДС. Система «водій – автомобіль – дорога – середовище» (ВАДС) працює завдяки динамічним параметрам дорожньої інфраструктури та умов навколишнього середовища, характеристики та процеси, психофізіологічний стан водіїв і постійний системний моніторинг процесів, що змінюються. Основним завданням такої системи моніторингу є попередження дорожньо-транспортних подій (ДТП) та зменшення тяжкості їх наслідків. Як відомо, дорожньо-транспортна пригода – це складний механізм взаємодії підсистем «Транспортний засіб–транспортний засіб», «Транспортний засіб–дорога», «Транспортний засіб–пішохід»,

«Транспортний засіб–навколишнє середовище». Обставини, причини та фактори ДТП досліджуються на світовому експертному рівні.

Таблиця 2.1 – Методи дослідження транспортних потоків

Метод	Характеристичні параметри	Параметри аналізу ВАДС
Метод коефіцієнта безпеки	Максимальна швидкість руху на аналізованому відрізку автомобільної дороги – $V_{\max}$ початкова швидкість автомобіля – V_{initial}	Інтенсивність руху. Ширина плечей до плечей і ширина плечей. Чітке бачення на відстані (план і профіль). Поздовжній профіль. Радіус кривої в поперечному перерізі дороги (на довгому підйомі)
Факторний метод аварійності	Фактори часткової аварійності – K_i	Результати статистичного аналізу ДТП. Інтенсивність руху. Ширина плечей до плечей і ширина плечей. Кількість смуг руху. Чітке бачення на відстані (план і профіль). Поздовжня оцінка. Чітке бачення (план і профіль). Вертикальні вигини (вигляд у плані). Розділення сорту. Стан дорожнього покриття.
Метод ідентифікації чорних плям	Абсолютна і відносна кількість ДТП	Інтенсивність руху. Результати ДТП з травмованими.

У сфері дорожнього будівництва, експлуатації автомобільних доріг і реконструкції необхідно враховувати систему параметричних характеристик об'єктів та умов їх існування:

– геометрія об'єктів дорожнього середовища (GREF); – умови транспортування та експлуатації (ТРОС); – техніко-експлуатаційні умови (ТехОК); – характеристики об'єктів дорожньої інфраструктури (CRIF).

Отримання інформації про GREF, TrOC, TechOC, CRIF можливо за допомогою діагностичних та обчислювальних методів отримання та обробки параметричних характеристик.

Стандарт ISO 8608:2016 [22] полегшує компіляцію та порівняння вимірних даних вертикального профілю дороги. У ньому вказується, які вимірювання потрібно повідомляти, але не те, як ці вимірювання проводити. Стандарт описує профіль дороги через спектральну густину потужності (PSD) вертикального зсуву дороги.

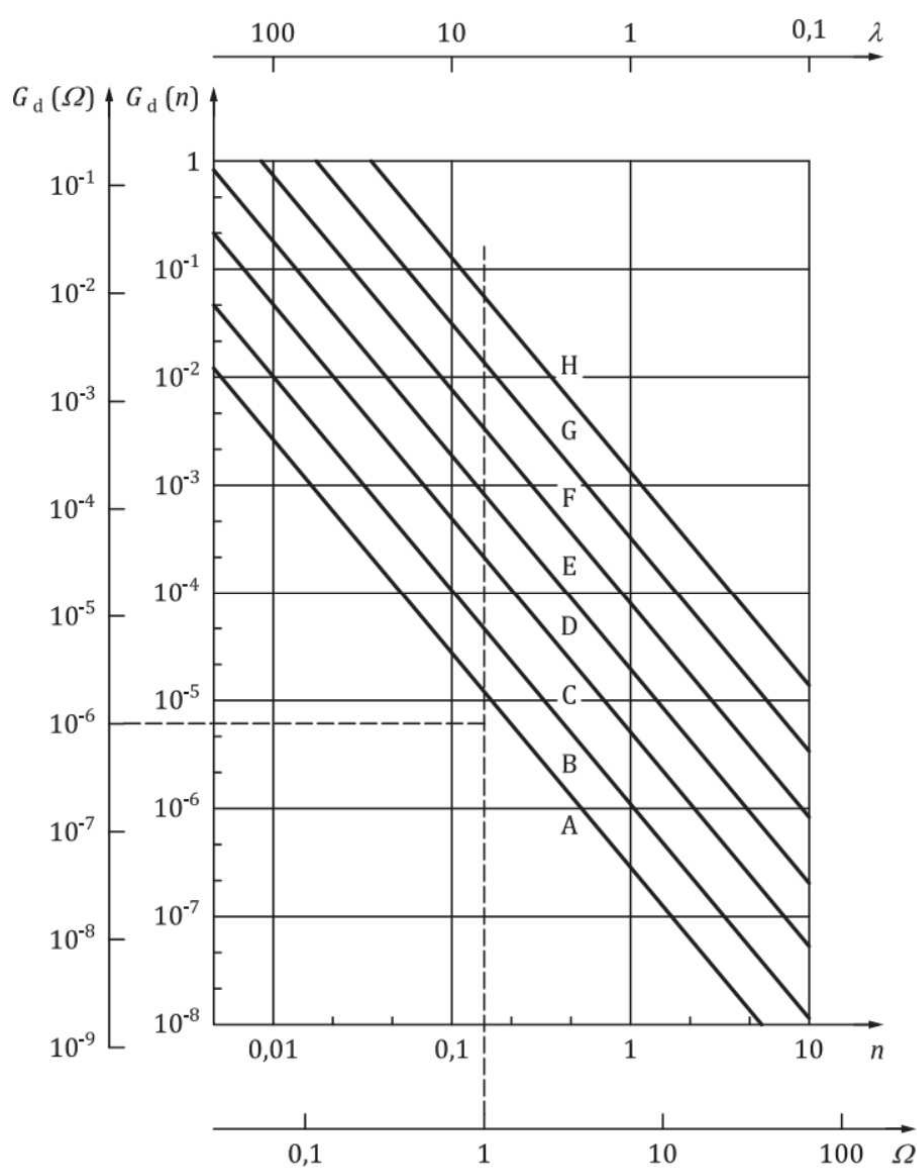


Рисунок 2.7 – Класифікація доріг ISO [22]

2.4.2. Представлення спектральної щільності потужності (PSD). Найважливішим параметром, який слід враховувати для аналізу дорожніх умов, є нерівність поверхні. Нерівність поверхні являє собою нерівності вздовж поздовжнього напрямку висоти поверхні дороги. Нерівність дороги включає зведений спектр даних про висоту поверхні з різними довжинами хвиль, а також амплітудами. Інженери випробували багато індикаторів шорсткості, найвідомішим з яких є Міжнародний індекс шорсткості (IRI). Для інженерного аналізу загальнодоступних даних шорсткості з її фундаментальними показниками недостатньо. Тому інженери вдалися до альтернативних методів для вказівки критерію жорсткості. Одним із таких методів є представлення спектральної щільності потужності (PSD) даних профілю дороги, яке здатне надавати інформацію, корисну для динамічного дизайну та аналізу автомобіля.

2.4.3. Концепція спектральної густини потужності (PSD). Представлення спектральної густини потужності (PSD) базується на принципі, згідно з яким будь-який випадковий профіль шорсткості може бути сконструйований математично шляхом підсумовування ряду синусоїдальних кривих із різними довжинами хвиль і амплітудами. Щоб підвищити точність таких зображень, можна об'єднати більше синусоїдальних кривих. У цьому підході було застосовано перетворення Фур'є для обчислення синусоїдальних кривих, що становлять профілі шорсткості. Вибіркові точки, взяті з даних профілю шорсткості, розкладаються на серію синусоїдальних функцій з дискретними частотами. Перетворення Фур'є можна налаштувати так, щоб показати розподіл дисперсії профілю за сукупністю синусоїдальних функцій, що становлять. У представленні PSD, PSD висоти профілю дороги проти хвильового числа. З графіка, зображеного на малюнку 1, можна зрозуміти, що PSD збільшує просторову частоту/хвильове число. Це пов'язано з тим, що менші хвильові числа призводять до більших довжин хвиль, що призводить до більших амплітуд. Ця тенденція є однаковою для майже всіх типів профілів доріг. Це дозволило дослідникам накладати прямі лінії на PSD

графіків висот і таким чином класифікувати дороги за різною нерівністю. Область під графіком дає різницю профілю дороги, що означає той факт, що чим вище встановлена лінія, тим вище нерівність дороги.

2.4.4. Відображення даних профілю дороги. Процедура, якої слід дотримуватися для характеристики та класифікації профілів доріг, наведена в ISO 8608:2016 [22]. Існує два методи представлення даних профілю дороги в термінах PSD, з яких PSD зміщення є кращим: 1) DisplacementPSD; 2) AccelerationPSD. Загальна форма підігнаної PSD задана формулою:

$$\begin{aligned} G_d(n) &= G_d(n_0) \frac{n^{-\sum w_i}}{n_0} \\ G_d(\Omega) &= G_d(\Omega_0) \frac{\Omega^{-\sum w_i}}{\Omega_0} \end{aligned} \quad (2.9)$$

де G_d представляє PSD зміщення,

n – представляє просторову частоту;

Ω – являє собою кутову просторову частоту;

n_0 – представляє еталонну просторову частоту 0,1 циклу/м,

Ω_0 – представляє кутову просторову частоту 1 рад/м,

w – представляє експоненту встановленого PSD.

Zhangetal [Ошибка! Источник ссылки не найден.] запропонував метод певної області для вирішення нестационарної випадкової вібрації, спричиненої транспортними засобами, і запропонував лінійний фільтр для PSD сигналу профілю дороги $z_R(t)$ для транспортного засобу, що рухається з постійною швидкістю V , визначеною рівнянням:

$$\frac{d}{dt} z_R(t) = -\alpha V z_R(t) + w(t). \quad (2.10)$$

Значення α є унікальним для кожного типу дороги, а $w(t)$ являє собою процес білого шуму.

2.4.5. Моделювання профілів дорог. Різні профілі доріг можна змоделювати за допомогою рівняння 2 [24] [23]. Значення дисперсії, середнє

значення представлення PSD і значення α наведені в таблиці 2.1. Для імітації діаграми профілю дороги було створено модель SIMULINK. Швидкість транспортного засобу варіюється від 40 км/год., 60 км/год. і 80 км/год. Профіль дороги був створений для всіх п'яти доріг класів А, В, С, D, Е. Дороги були класифіковані відповідно до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Класифікація доріг

Тип дороги	Варіація	PSD середнє	α
А (дуже гладка)	2	1	0.127
В (гладка)	4	4	0.127
С (середня)	8	16	0.127
Д (рапата)	16	64	0.127
Е (дуже рапата)	32	256	0.127

На рисунку 2.8 представлено висоту профілю дороги різних типів доріг для швидкості автомобіля 40 км/год. На рис.2.9 представлено висоту профілю дороги різних типів доріг для швидкості автомобіля 60 км/год. На рисунку 2.10 представлено висоту профілю дороги різних типів доріг для швидкості автомобіля 80 км/год. На рис. 2.11 представлено висоту профілю дороги різних типів доріг для швидкості автомобіля 100 км/год.

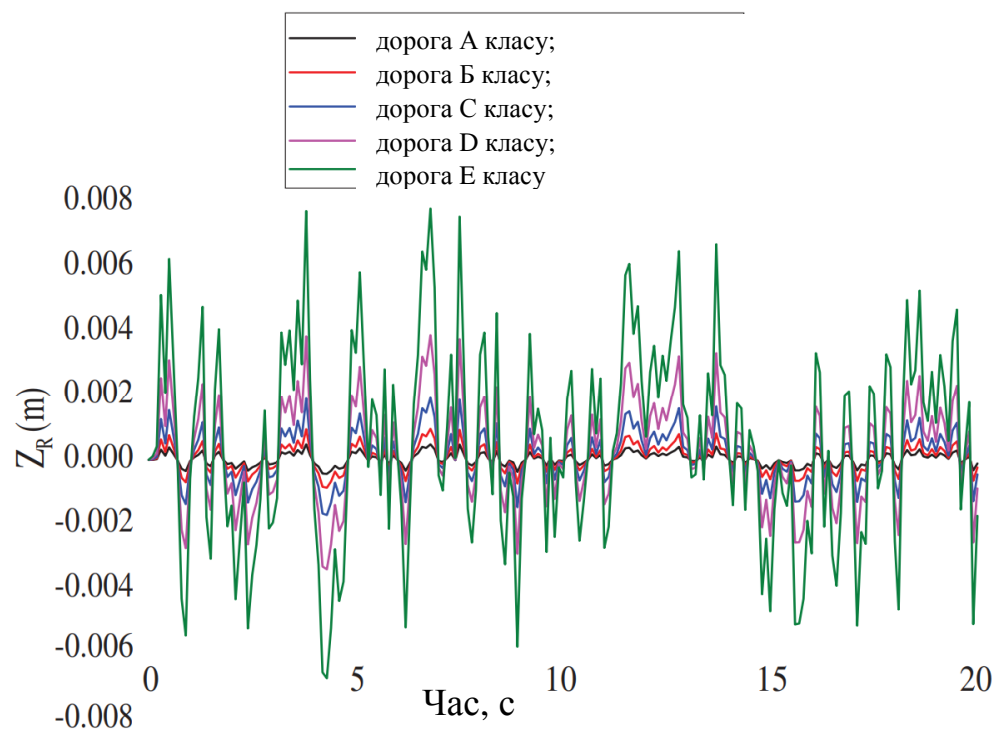


Рисунок 2.8 – Профілі доріг для швидкості автомобіля 40 км/год

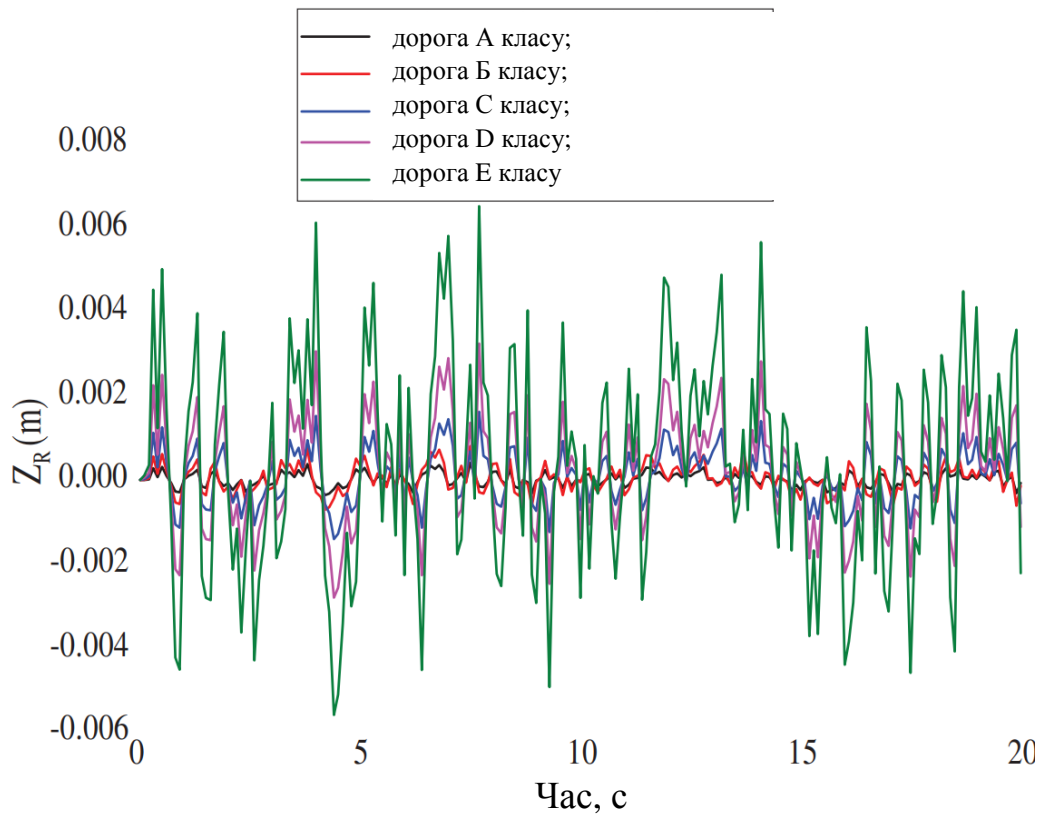


Рисунок 2.9 – Профілі доріг для швидкості автомобіля 60 км/год

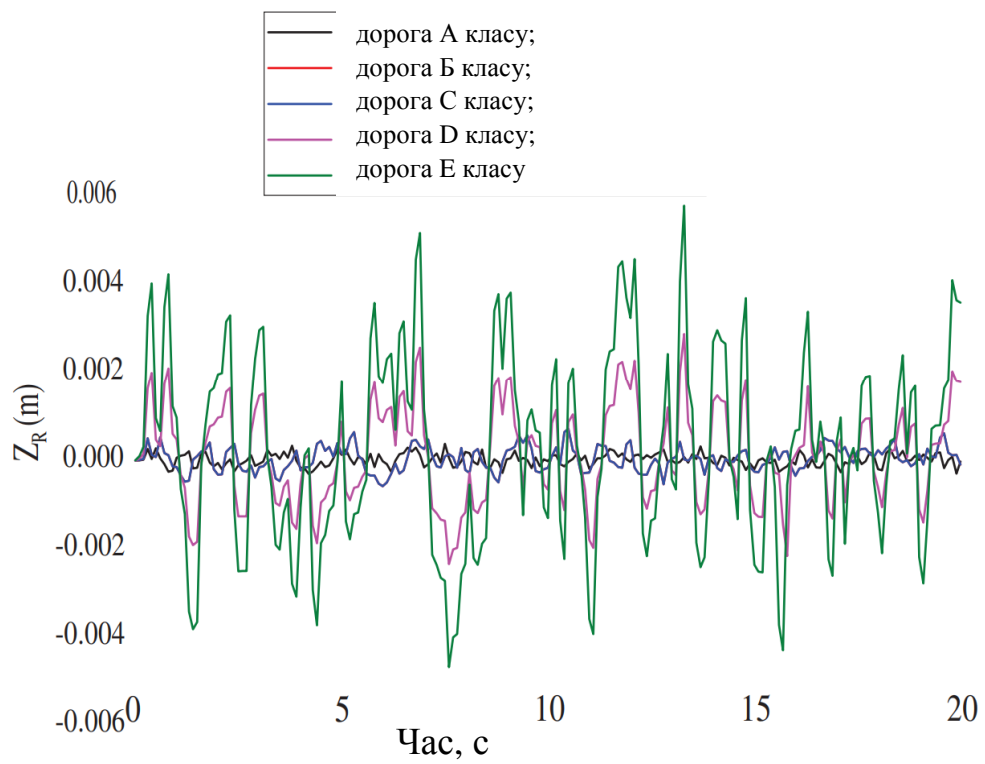


Рисунок 2.10 – Профілі доріг для швидкості автомобіля 80 км/год

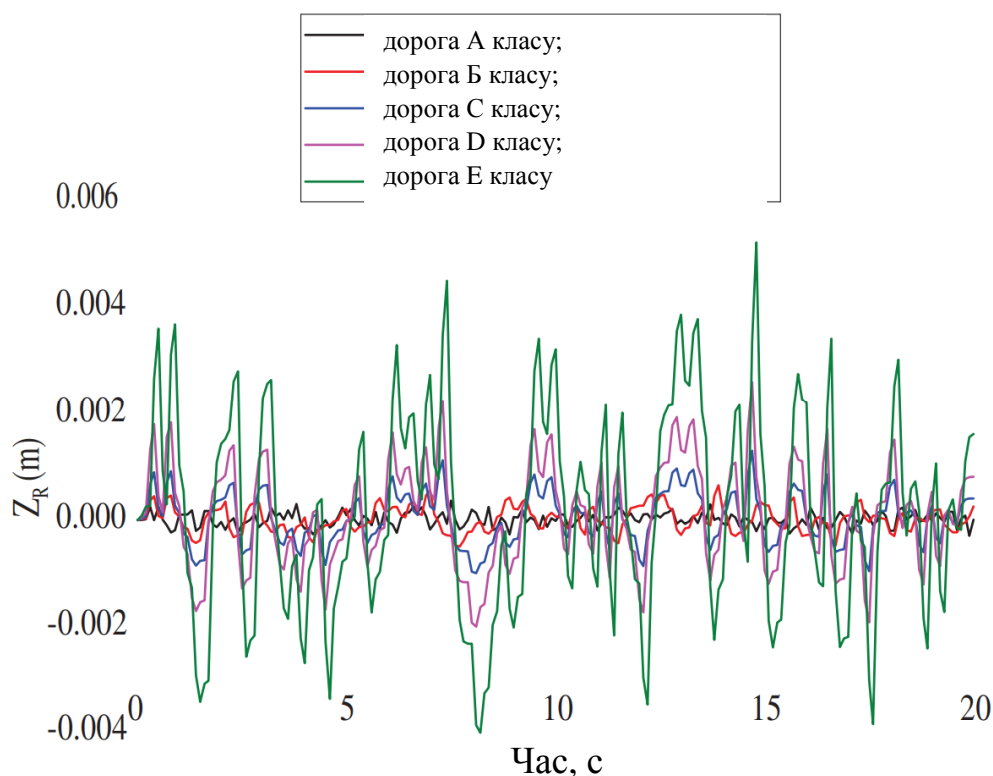


Рисунок 2.11 – Профілі доріг для швидкості автомобіля 100 км/год.

2.4 Виміряні дані про швидкість за допомогою GPS

NPRA оснастило 440 службових транспортних засобів інформативною системою інтелектуальної адаптації швидкості (ISA) та реєстратором швидкості протягом періоду з квітня 2024 року по квітень 2025 року. Інформаційна ISA визначається SINTEF [28] як система, яка сигналізує водієві, якщо він/ вона збирається перевищити обмеження швидкості, не взявши керування транспортним засобом. Швидкість і місцезнаходження автомобіля збиралися за допомогою GPS-приймачів і постійного моніторингу до кінця 2025 року [24]. Дані були надані SINTEF, який відфільтрував і обробив їх у базу даних, що містить 245 мільйонів точок даних із 119 транспортних засобів і 130000 поїздок. Для використання в подібних дослідженнях перші та останні три кілометри кожної поїздки видалялися на додаток до інформації про транспортні засоби на номерних знаках. Це для видалення конфіденційної інформації, яка може ідентифікувати драйвера.

Базу даних ISA далі розділили на дві групи:

1. Система ISA неактивна: містить дані про швидкість, записані, коли система ISA не була активна та не подала жодного сигналу водієві при перевищенні обмеження швидкості. Ця база даних стала основою для розробки швидкісної моделі, яка в цьому дослідженні називається швидкісною моделлю SINTEF.

2. Система ISA активна: містить дані про швидкість, записані, коли система ISA була активна, і водієві подавався сигнал про перевищення обмеження швидкості. Швидкості з цієї частини бази даних використовувалися в цьому дослідженні під час порівняння прогнозованої швидкості з виміряною.

Ділянка Львів – Тернопіль є європейською автострадою, і на цій ділянці обмеження швидкості становить 80 км/год, за винятком двох зон обмеження швидкості 60 км/год. Дані про швидкість для 36 записаних поїздок були знайдені в базі даних ISA в напрямку, який використовувався в цьому дослідженні. Викиди у вигляді низьких швидкостей або зупинених транспортних засобів під впливом навколишнього середовища виникли в наборі даних, як показано на рис. 2.12. Їх було видалено з набору даних або змінено, щоб забезпечити виміряні швидкості в ситуації вільного потоку. Це зменшило стандартне відхилення набору даних від $S = 8,71$ км/год до $S = 8,37$ км/год.

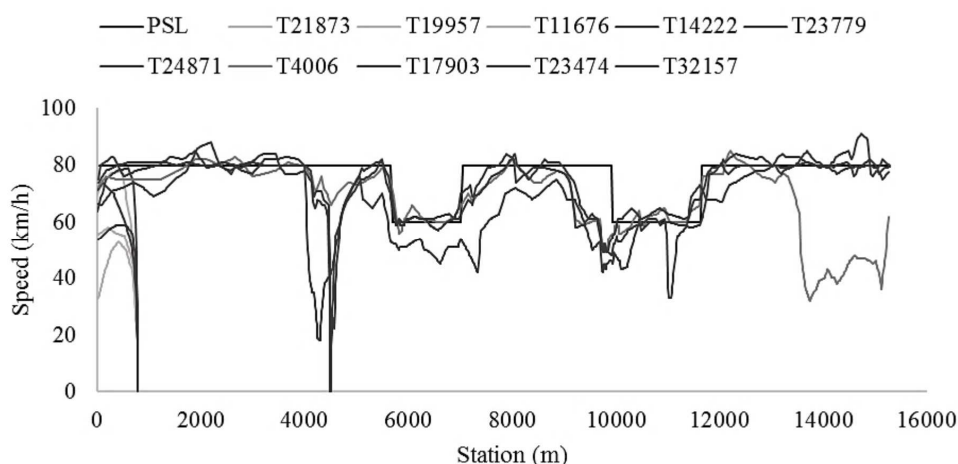


Рис. 2.12. Вихідні швидкості видалені або змінені

Щоб мати можливість порівняти вимірні профілі швидкості з прогнозованими профілями швидкості, набори даних були усереднені в межах 25-метрових ділянок вздовж дороги та представлені кожні 12,5 м. Ця довжина ділянки пов'язана з принципом розрахунку в рамках процедури SINTEF, пов'язаної з ухилом, і в цьому дослідженні розглядалася як зручна. Оригінальне середнє значення виміряного профілю швидкості, що містить викиди, та змінене середнє значення виміряного профілю швидкості з видаленими викидами показано на рисунку 2.13. Змінений профіль швидкості використовувався в подальшому аналізі. Швидкісну модель EFFEKT розроблено на основі множинного регресійного аналізу записаних швидкостей на ділянках вздовж вибраних доріг в період 2023–2024 рр. Використані ділянки дороги мали довжину 3–5 км і однорідний геометричний стандарт та інтенсивність руху. Поточна базова модель швидкості, розроблена в основному для прогнозування швидкості.

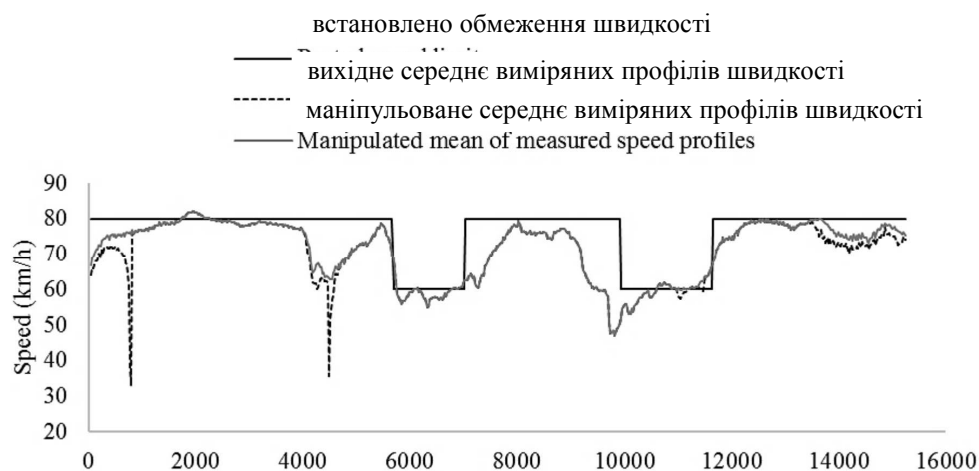


Рис. 2.13. Вихідне та змінене середнє значення виміряного профілю швидкості та розміщеного обмеження швидкості вздовж E39

Процедура EFFEKT розділяє дорогу на підділянки в точках, що характеризуються зміною обмеження швидкості та/або зміною знака вертикального схилу. Середня швидкість вільного потоку розраховується для кожної підділянки, що призводить до прогнозованого профілю швидкості вздовж усієї дороги. Для двосмугової дороги з обмеженням швидкості 80

км/год., або нижче для прогнозування швидкості використовується стандартна функція лінійної регресії, представлена рівнянням.

$$V = 143,1 \cdot \text{HKF} + 80,4 \cdot \text{SF} + 1,75 \cdot \text{Bd} - 155,6 \quad (2.10)$$

де SF – Розрахований коефіцієнт ухилу (SF), що коригує швидкість для обмежень щодо вертикального ухилу, S (%) уздовж підсекції;

HKF – розрахований коефіцієнт горизонтальної кривої (HKF), що коригує швидкість на обмеження щодо горизонтальних кривих R (м) уздовж підділянки.

Bd – Перерахована ширина тротуару (Bd) з поправкою на швидкість для обмежень щодо ширини дороги, RW (м) уздовж підділянки.

Спільний ефект як горизонтальної кривизни, так і нахилу враховується шляхом порівняння HKF і SF для кожної підсекції. Якщо $\text{HKF} < \text{SF}$, тоді $\text{SF}=1$, що означає, що в таких ситуаціях не потрібно робити поправку на нахил.

Модель швидкості SINTEF розроблено на основі множинного регресійного аналізу швидкостей, зібраних пристроями GPS у системі інтелектуальної адаптації швидкості (ISA). Розробка швидкісної моделі детально описана у витягу з неопублікованого звіту проекту SINTEF 102007265-4 [16].

Рівняння 2.10 може передбачити швидкість на елементах дороги, які називаються точками або сегментами, для різних ситуацій, визначених конкретними функціями лінійної регресії $U(x_d, x_s, x_f, x_k)$. Стандартна функція лінійної регресії, що містить оцінені коефіцієнти (β_x) і змінні, далі вводиться як експонента в рівнянні 2.11.

Коефіцієнт $C(x_g)$ визначає розрахункову опорну швидкість для кожної ситуації. У цьому дослідженні для забезпечення розрахунків середньої швидкості вільного потоку використовується скоригований коефіцієнт $C_k(x_g)$.

$$\text{Швидкість} = C(x_g) \cdot e_{U(x_d, x_s, x_f, x_k)}$$

Для двосмугової дороги та обмеження швидкості 70, 80 або 90 км/год лінійна функція $U(x_d, x_s, x_f, x_k)$ обчислюється за рівнянням 2.3.

$$\begin{aligned} U(x_d, x_s, x_f, x_k) = & \beta_d (x_d - 8.0) \\ & + \beta_s x_s + \beta_f x_f \\ & + \beta_k x_k + \beta_{sk} x_s x_k \\ & + \beta_{fk} x_f x_k + \beta_{kk} x_k^2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Для двосмугової дороги та обмеження швидкості 50 або 60 км/год лінійна функція $U(x_d, x_s, x_f, x_k)$ обчислюється за рівнянням 2.5.

$$\begin{aligned} U(x_d, x_s, x_f, x_k) = & \beta_s x_s + \beta_f x_f \\ & + \beta_k x_k + \beta_{sk} x_s x_k \\ & + \beta_{fk} x_f x_k + \beta_{kk} x_k^2 \\ & + \beta_{fk} x_f x_k + \beta_{kk} x_k^2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Необхідні вхідні параметри для моделі швидкості EFFEKT і SINTEF перераховані в таблиці 2.3, на додаток до параметрів, які використовуються в модулі поведінки водія. Прогнозовані профілі швидкості, отримані безпосередньо з обох моделей швидкості, можна розглядати як профілі швидкості, дозволені процедурою моделі в кожній точці вздовж дороги для даної вхідної геометрії. Щоб покращити вигляд профілів швидкості на переходах, що характеризуються зміною будь-якого геометричного параметра складної траси, профілі швидкості обробляються модулем поведінки водія, який оцінює необхідне прискорення або уповільнення для досягнення зміни швидкості між P_i та $P_i +$ видимий діапазон уздовж профілю швидкості. Якщо це значення перевищує максимально дозволене значення прискорення, воно буде скориговано, і нові відповідні швидкості будуть розраховані за допомогою інтегрованої поліноміальної функції. Таким чином, профілі швидкості стають більш плавними та більш схожими на фактичні профілі швидкості з поля.

Прогнозований профіль швидкості з моделі швидкості EFFEKT показаний чорною пунктирною лінією на рис. 2.13. Загалом прогнозований профіль швидкості відповідає обмеженню швидкості ближче, ніж виміряна швидкість. Чіткі винятки можна побачити навколо станції 4000 м, станції 10000 м і станції 12000 м, і їх потрібно інтерпретувати разом із шириною дороги на рис. 2.14. Навколо цих станцій ширина дороги змінюється до 1 м, і ця зміна, здається, впливає як на вимірний, так і на прогнозований профіль швидкості.

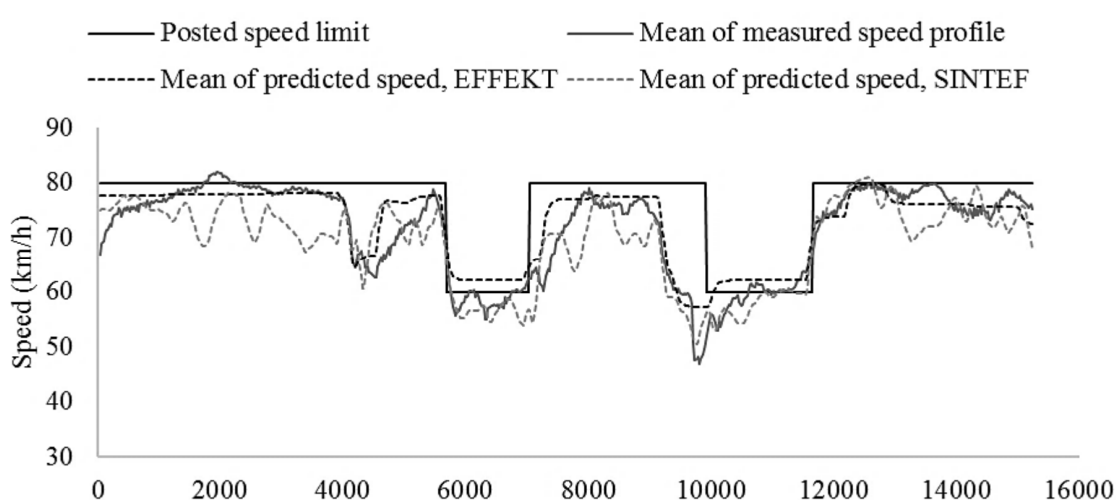


Рисунок 2.13 – Порівняння вимірних і прогнозованих профілів швидкості за моделлю швидкості EFFEKT і SINTEF

Прогнозований профіль швидкості за моделлю швидкості SINTEF показано сірою пунктирною лінією на рис. 2.13. Прогнозований профіль швидкості відповідає обмеженню швидкості, коли ця зміна. У зонах з різними обмеженнями швидкості прогнозований профіль швидкості слідує за вимірним профілем швидкості ближче, ніж обмеження швидкості. Часті зміни вздовж прогнозованого профілю швидкості, які видно разом із геометрією на малюнку 2.13, вказують на те, що модель швидкості SINTEF є чутливою до змін кривизни, а в деяких випадках – надто чутливою.

На рисунку 2.14 показаний графік кореляції між вимірними та прогнозованими даними швидкості з моделі швидкості EFFEKT і SINTEF, а

також вказано тісний зв'язок між прогнозованим і вимірним профілями швидкості. Значення R^2 для прогнозу EFFEKT стверджує, що 88% варіацій у прогнозованих профілях швидкості можна пояснити варіаціями в межах вимірних профілів швидкості. Точки, як правило, слідує за лінією регресії, але здаються більш сконцентрованими навколо значень швидкості 60 км/год і 80 км/год, створюючи горизонтальні кроки. Такі кроки вказують на те, що модель не дуже точна, і їх можна інтерпретувати у зв'язку зі здатністю моделей відображати зміни в геометрії, які спричинили зміну швидкості поля.

Ці зміни або не реєструються, або спрощуються моделлю таким чином, що вона не вносить змін у прогнозований профіль швидкості.

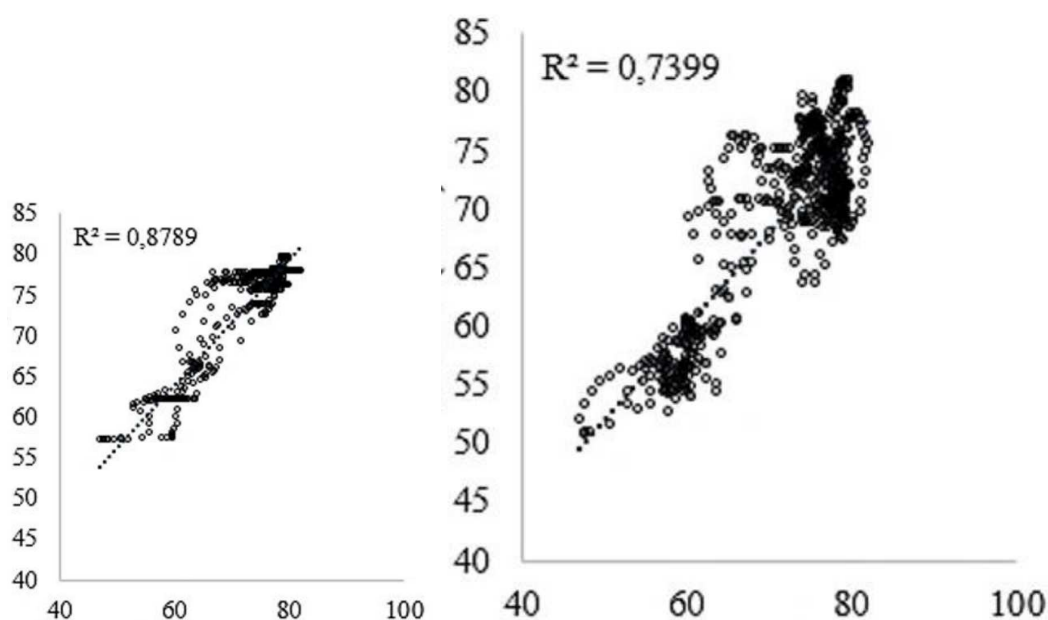


Рисунок 2.15 – Кореляційний графік із середньою вимірною швидкістю та середньою прогнозованою швидкістю

Значення R^2 для прогнозу SINTEF стверджує, що 74% варіацій у прогнозованих профілях швидкості можна пояснити варіаціями в межах вимірних профілів швидкості. Точки, як правило, йдуть за лінією регресії, але більше зосереджені навколо значень швидкості 60 км/год і 80 км/год. Здається, що переважання точок розташоване нижче лінії регресії, що означає, що модель передбачила нижчі швидкості з даної геометрії, ніж ті, які

фактично утримуються через такі області в полі. Це також можна підтвердити на рисунку 2.15, який показує, що сіра пунктирна лінія, загалом, лежить нижче лінії, що представляє вимірний профіль швидкості, за деякими винятками.

3 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Обґрунтування методики та алгоритму імітаційного експерименту

Удосконалена мною імітаційна модель є модифікованим клітковим автоматом з двох-направленим рухом АТЗ. Від класичних відомих моделей ми перейняли основні принципи її застосування [18]:

1) локальність правил: на новий стан клітини можуть вплинути тільки елементи її оточення і, можливо, вона сама;

2) однорідність системи: жодна область решітки не може відрізнитися від іншої через які-небудь особливості правил; введено також крайові умови на початковий кінцевий та стани моделі;

3) скінченність множини можливих станів клітки – це умова, яка необхідна, щоб для отримання нового стану клітки, виконати кінцеве число операцій;

4) одночасний перехід в новий стан для всіх клітин – допустимі значення у всіх клітинах змінюються одноразово, в кінці ітерації, а не по мірі обчислення [18].

Крім традиційних, застосовано й нові припущення і правила моделювання, які спрощують можливість досягнення мети дослідження. У нашому варіанті клітковий автомат є двовимірною сіткою, висота якої відповідає кількості смуг руху на магістралі (у тому числі – зустрічних), а довжина – це «інформаційне поле» автомобіля-спостерігача (АС), тобто скінченна стала кількість клітинок позаду АС і скінченна стала кількість клітинок попереду АС. Таке поле обумовлене застосуванням приладів для оцінювання дорожньо-транспортної ситуації. На практиці його можна реалізувати використанням радарів, лідарів, інфрачервоних сенсорів, та інших засобів, якими може бути оснащений АС [25]. За допомогою таких приладів можна оцінити наявність і відносні координати інших учасників дорожнього руху, які рухаються як попутньо з АС, так і по зустрічних смугах. При цьому застосована двохвимірна система координат, в якій АС є початком відліку.

Кожна клітинка автомата може бути зайнятою об'єктом транспортного потоку, або вільною, за виключенням початкової, яка є зайнятою завжди. Швидкість руху АС має максимально відповідати його бажаній програмі руху $V_{0,d}(x)$, де $0 \leq x \leq L$ – абсолютна координата клітинки відліку; L – довжина двовимірної сітки. Однак, вона може бути вимушено змінена під впливом маневрів, які виконують інші учасники потоку. Кількість непорожніх клітинок автомату залежить від наперед заданої щільності транспортного потоку, а також від розміру «інформаційного поля»: кількості клітинок позаду – R_b і кількості клітинок попереду – R_f від АС.

АТЗ відображені в автоматі залежно від їх динамічних габаритів у вигляді певної кількості заповнених клітинок. Якщо довжину однієї клітинки автомата вибрати 10 м, а час однієї ітерації – 0,1 с, то переміщення об'єкта на одну клітинку відповідає зміні швидкості відносно АС на 1 м/с. Довжина переміщення, яке має бути відображене цим імітаційним моделюванням, є у декілька десятків разів більшою, ніж довжина інформаційного поля $R_b + R_f$. Основний інтерес цих досліджень представляє визначення відносних швидкостей і відносних переміщень. У зв'язку з цим, без суттєвого зниження точності, усі АТЗ, які є беруть участь в транспортному потоці, тут розглядаються як однокліткові, двохкліткові, або максимально – трикліткові об'єкти, що відповідає динамічним габаритам АТЗ, відповідно, 10, 20 та 30 м. На магістральних міжміських дорогах ці габарити вимірюються реально в інтервалі від 7,5 до 27 ± 2 м. Наше припущення не знижує адекватності моделі у зв'язку з масштабами моделювання. Сучасні системи спостереження, наприклад, на основі лідарів здатні «бачити» транспортну ситуацію на відстані близько 300-400 м. Як свідчать дослідження, це є не межею їх можливостей, і слід очікувати більшої дистанції [25]. Крім того ці засоби стають більш доступними і вже монтуються на ІТС 4-го покоління. Таким чином, якщо за розмір однієї клітинки автомата взяти величину 10 м, то сам автомат може складатись з, приблизно, 30 клітинок вперед і стільки ж – позаду АС. Якщо учасником потоку є автомобілі з меншим статичним

габаритом, то вони володіють, як правило вищою динамікою. Отже їх динамічний габарит можна прирівняти, без суттєвої втрати точності, до розміру однієї-трьох клітинок автомата в масштабі. Похибка такого припущення є тим меншою, чим більша довжина траси, яка моделюється. Так при пробігу в 20000 м розмір клітинки становить 0,05%. Це означає, що АТЗ, який здійснює такий пробіг, буде відображений автоматом за 2000 ітерацій. Все це стосується АТЗ, які відображені однією, двома, чи трьома клітинками. Прийнято також, що висота клітинки відповідає ширині однієї смуги траси. Заповнена клітинка означає, що смуга повністю зайнята АТЗ у даному перерізі.

Автоматом фіксується відносна швидкість переміщення АТЗ. Її числове значення залежить від швидкості АС:

$$V_{r,i} = V_i - V_0, \quad i = 1 \dots N_c \quad (3.1)$$

де V_i – абсолютна швидкість i -го АТЗ, м/с;

V_0 – абсолютна швидкість АС, м/с; N_c – кількість учасників трафіку, які рухаються попутно з АС.

Для зустрічних АТЗ, швидкість визначається з виразу:

$$V_{r,y} = V_y + V_0, \quad y = 1 \dots N_a \quad (3.2)$$

де V_y – абсолютна швидкість зустрічного АТЗ, м/с;

N_a – кількість об'єктів потоку, які рухаються по зустрічних смугах відносно АС.

Обчислена за виразом (3.1) відносна швидкість i -го АТЗ може бути від'ємною величиною, якщо її абсолютне значення є меншим, ніж V_0 . Отже, переміщення заповнених клітинок в інформаційному полі може бути праворуч, якщо бажана швидкість АТЗ є вищою, ніж бажана швидкість АС, або ліворуч, якщо вона є меншою. Один крок моделювання кліткового автомату – це дискретний час, що відповідає 0,1 с. Таким чином, переміщення заповненої клітинки праворуч, або ліворуч на одну позицію відповідає зміні

положення за 1 с на 10 м. Спарені, або потроєні клітинки переміщаються одночасно.

Якщо внаслідок моделювання виявиться, що i -а клітинка повинна переміститись за межі R_b або R_f , то це означає, i -й АТЗ зникає з інформаційного поля АС. Новий, або декілька нових об'єктів, які мають випадкові швидкості генеруються у протилежному до його зникнення боці інформаційного поля для того, щоб підтримати задану щільність потоку, отже і чистоту експерименту. Якщо клітинка зникає ліворуч, поза межі R_b , то нова заповнена клітинка з такими ж габаритами, виникає біля правої межі інформаційного поля і матиме випадкову швидкість $V_i \leq V_0$. Якщо ж клітинка i зникає праворуч, поза межі R_f , то нова заповнена клітинка виникає ліворуч, і матиме випадкову швидкість $V_i \geq V_0$. Таким чином, в інформаційному полі підтримується, від кроку до кроку, стала кількість заповнених клітинок. Подібним чином виникають і зникають з інформаційного поля клітинки на інших попутних і зустрічних смугах кліткового автомату.

Кожна заповнена клітинка, або сукупність клітинок на кожній ітерації характеризується такими величинами:

$X_{step.i}$ – поточна координата відносно АС;

$\Delta X_{step.i}$ – зміна поточної координати відносно АС;

$V_{step.i}$ – абсолютна швидкість;

$V_{step.r.i}$ – відносна швидкість;

$V_{d.i}$ – бажана швидкість, яка обумовлена раціональним режимом руху в заданих дорожніх умовах і умовою дотримання розкладу транспортного процесу;

$\Delta V_{step.i}$ – відхилення від бажаної швидкості;

$j_{max.i}$ – максимальне допустиме прискорення / сповільнення, обумовлене безпекою руху і динамічними характеристиками автомобіля.

У цих позначеннях $step=0...S$ – номер ітерації, тобто дискретного інтервалу часу моделювання, $i=0..N_c$ – номер об'єкта, який рухається попутньо з АС, $i=1..N_a$ – номер об'єкта на зустрічній смузі автомата.

Правила переходу заповнених клітинок залежать від подій, які обов'язково відбуваються з АТЗ, якщо склались відповідні умови. Кількість таких подій – скінченна, однак, щонайменше 5. Нами обґрунтовано послідовність реалізації цих подій для усіх клітинок, виходячи з їх пріоритету та з умов безпеки руху.

1. *Гальмування*. На нульовому кроці автомата усі АТЗ, які перебувають в рамках інформаційного поля мають однакову поточну швидкість і розташовані рівновіддалено один від одного. Однак бажана швидкість гурту автомобілів є випадковою величиною, що характеризується законом розподілу Ерланга, або експотенційним, залежно від категорії дороги [17]. Ті клітинки, які розташовані праворуч від інших, і мають бажану швидкість, яка є менша, є меншою за бажану швидкість АС, мають бути переміщені ліворуч на таку кількість клітинок, яка відповідає різниці

$$\Delta X_{step,i} = V_0 - V_i, \quad (3.3)$$

але не більшій, ніж максимальне допустиме сповільнення $j_{max,i}$.

Переміщення ліворуч має виконуватись незалежно від того, чи є вільні клітинки зліва для цього. Таке правило впливає з того, що автомобілі-лідери завжди мають пріоритет на дорозі, однак вони є обмежені в інтенсивності гальмування. Тому, виконуючи процедуру гальмування, ми вимушені рекурсивно переміщати ліворуч усі заповнені клітинки, які стоять на шляху i -ї. Цю процедуру, виходячи з особливостей обчислення переміщень (3.3), потрібно виконувати за порядком координат справа-наліво. Оскільки процедура є досить складною і її моделювання відрізняється від відомих в галузі кліткових автоматів, то наводимо псевдокод процедури, яка виконується для кожної клітинки, яка має $\Delta V_{step,i} < 0$.

```
procedure CheckBracking;
```

```
begin
```

01 занулення початкового масиву ΔX

//перевірка на максимальне сповільнення

02 if $(-\Delta V_{step,i} \leq j_{max})$ then

03 $j_{max} := \Delta V_{step,i}$

04 else $j_{max} := j_{y,max}$;

//якщо умова максимального сповільнення виконана, то об'єкт, який рухається ліворуч відносно АС, переміщається на одну позицію ліворуч:

05 if $j_{max} < 0$ then

06 for $z:=1$ to $(-j_{max})$ do

07 begin

08 $X_{step,z} := X_{step,z} - 1$;

09 $\Delta X_z := \Delta X_z - 1$;

10 $V_{step,z} := V_{step,z} - 1$;

end;

//якщо координата переміщеної клітинки є зайнята об'єктом z , то цей об'єкт також потрібно перемістити на клітинку ліворуч. Для цього елемент масиву ΔX_z зменшують на 1. Виконується перегляд усіх таких клітинок справа-наліво:

11 for $z:= N_c$ downto 0 do

12 begin

13 if $((X_{step,z} = X_{step,i}) \text{ and } (i \neq z))$ then

14 $\Delta X_i := \Delta X_i - 1$

end;

end;

//для усіх об'єктів, які мають елементи масиву $\Delta X_z < 0$ виконують зміну їх поточної координати, швидкості і різниці швидкості на величину ΔX_i

15 for $i := N_c$ downto 0 do

16 if $((\Delta X_i < 0) \text{ and } (i \neq z))$ then

18 begin

19 $X_{step,i} := X_{step,i} + \Delta X_i$;

```

20       $V_{step.i} := V_{step.z};$ 
21       $\Delta V_{step.i} := V_{d.i} - V_{step.i};$ 
      end;
    end;
  end; // кінець процедури.

```

2. *Прискорення.* поточна швидкість i -го об'єкта менше бажаної, тобто $V_{step.i} < V_{d.i}$, то йому потрібно розігнатись до цієї швидкості з прискоренням, яке допустиме для такого маневру, але не перевищує значення $j_{max.i}$. Здійснити це можна, якщо попереду цього об'єкта є вільний простір. Після виконання прискорення об'єкт приймає таку швидкість залежно від того, досяг він бажаної, чи ні, і чи є перешкода для виконання подальшого відносного руху. Якщо вільних клітинок попереду об'єкта, який розганяється, немає, то розгін не відбувається. Якщо вільних клітинок є стільки, що $(V_{d.i} - V_{step.i}) \leq \Delta X_i$, де ΔX_i є кількість вільних клітинок, то об'єкт набуває швидкості, що дорівнює швидкості попередника. Якщо $(V_{d.i} - V_{step.i}) > \Delta X_i$, то об'єкт набуває бажаної швидкості. Псевдокод цієї процедури є таким:

```

Procedure Acceleration;
begin
  01 for  $i := N_c$  downto 0 do
  02   if  $\Delta V_{step.i} > 0$  then
  03     begin
      //виконується перевірка вільних клітинок попереду функцією
      CheckFreeCell:
  04       if  $CheckFreeCell(i) < j_{x.max}$  then
  05         acseleration:=  $CheckFreeCell(i)$ 
      //прискорення здійснюється на визначену кількість клітинок
      //якщо розгін не обмежено перешкодою попереду, то воно
      здійснюється на максимальному прискоренні
  06       else acseleration :=  $j_{x.max}$ ;

```

// координата, швидкість об'єкта збільшується на допустиму величину, а різниця бажаної і поточної швидкості зменшується на цю ж величину:

```
07       $X_{\text{step},i} := X_{\text{step},i} + \text{acseleration};$ 
08       $V_{\text{step},i} := V_{\text{step},i} + \text{acseleration};$ 
09       $\Delta V_{\text{step},i} := \Delta V_{\text{step},i} - \text{acseleration}$ 
      end;
```

end. //Кінець процедури

3. *Обгін, або зміна смуги руху.* Ці маневри моделюються в клітковому автоматі при наявності сприятливих умов і при відсутності обмежень. Обгін є допустимий при відсутності розділової суцільної лінії між смугами і якщо є хоча б одна смуга в кожному напрямку. Обгін заборонений, якщо рух відбувається автострадою. Правила виконання обгону в цьому автоматі є такими. Прискорення об'єкта не повинно перевищувати допустиме максимальне. Обгін розпочинається, якщо на зустрічній смузі, на безпечній відстані відсутній об'єкт, що наближається (нагадаємо, що швидкість зустрічного об'єкта у даному автоматі є приблизно вдвічі більшою, ніж абсолютна швидкість АС). Обгін виконується, якщо перед об'єктом-попередником є не менше двох вільних клітинок; перевірка наявності вільних клітин виконується аналогічно як і для процедури розгону; при дотриманні усіх зазначених вимог обгін виконується автоматично, незалежно від можливої поведінки водія; після виконання обгону об'єкт набуває швидкість, яка дорівнює його бажаній, або швидкості попередника; процедура зміни смуги руху, або ж вертикальне переміщення клітинки в автоматі відрізняється від обгону тим, що потрібно обчислити кількість вільних клітинок позаду об'єкта і при відсутності перешкоди здійснювати маневр.

4. *Переміщення зі сталою швидкістю вліво* здійснюється, якщо об'єкт вже має бажану швидкість, або поточну швидкість, яка є менша, ніж швидкість АС. У цьому випадку перевірка наявності вільних клітин не виконується. Переміщення вліво здійснюється на кількість клітин ($V_{\text{step},i} - V_{d,i}$). Усі об'єкти, які слідує за i -м об'єктом, переміщуються також ліворуч

на відповідну кількість клітин. Процедура виконується за аналогією з процедурою гальмування. Швидкість усіх переміщених ліворуч об'єктів дорівнює швидкості i -го.

5. Переміщення зі сталою швидкістю праворуч виконується, якщо $V_{step.i} > V_0$. Перед виконанням цього переміщення знаходять вільні клітини справа.

6. Корекція координат об'єктів відносно координат АС. Усі перераховані вище процедури 1-5 стосуються не тільки об'єктів, за якими ведеться спостереження, але й самого АС. Тому після їх виконання може бути ситуація, коли координата місцезнаходження АС а саме X_0 не дорівнює нулю і/або його швидкість відмінна від бажаної. В такому випадку інформаційне поле, тобто сам автомат потрібно переформатувати, змістивши його на величину $0 - X_0$ і перерахувати величину $\Delta V_0 = V_{0.i} - V_0$. Ця величина є функціоналом, який потрібно визначити після S кроків моделювання:

$$\Delta V_{0,\Sigma} = \sum_S \Delta V_{step.0} \quad (3.4)$$

В результаті корегування швидкості та координат АС деякі об'єкти автомата можуть виявитись поза межами інформаційного поля. Їх потрібно вилучити з наступного кроку моделювання і замінити введенням нових так, як про це було описано вище.

При переході до наступної ітерації передаються ті ж параметри керування і обчислюється числове значення функціонала:

$$\Delta V_{i,\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_c} \Delta V_{step.i} \quad (3.5)$$

Алгоритм імітаційного моделювання складається з вищеописаних процедур (рис. 1) і реалізований у середовищі алгоритмічної мови Delphi 10.2.

3.2 Підготовка масиву вхідних даних та імітаційне моделювання

Для виконання процесу ІМ було підготовлено початкові дані, які описують автомагістральну дорогу, на якій встановлено обмеження

швидкості. Аналог початкових даних стосується частини траси європейського автомобільного маршруту E-372 на ділянці маршруту Тернопіль – Львів станом на початок 2025 року. Максимальний транспортний потік становить 32 тис. автомобілів на добу. На більшості своєї довжини дорога має дві смуги руху, шириною 3,75 м, які не мають роздільної смуги. Немає кільцевих транспортних розв'язок. Натомість є дорожні споруди для обмеження максимальної швидкості перед пішими переходами. Максимальна швидкість на дорозі обмежена до 25 м/с.

Для характеристики профілю дорожніх умов було застосовано математичне сподівання $E(V_i)$ та стандартне відхилення швидкості $\sigma(V_i)$. Для моделювання траєкторії максимальних швидкостей по трафіку застосовано математичне сподівання швидкості $E(V_{\max})$ та стандартне відхилення $\sigma(V_{\max})$. Завдяки таким оцінкам отримана можливість впорядкувати вхідні дані, які отримані за генератором випадкових чисел за виразом (3.1). Початкові дані підготовлено для автостради довжиною $L_{\max}=125000$ м.

Найменша ділянка маршруту є $x=25$ м, що відповідає максимальній габаритній довжині вантажного автопоїзда з декількома причепами.

Таким чином, $L_{\max} = 5000x$. Горизонт прогнозування W змінювався в межах $10x \dots 5000x$. Дорожні умови приймалися сталими на усьому маршруті. Характеристики дорожніх умов: $E(V_i)=0,85$, $\sigma(V_{\max})=0,0012$. Застосовано 14 наборів початкових даних стосовно різних транспортних умов, які спостерігались на трасі Тернопіль-Львів. Характеристики подані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристика початкових даних

Показник	1	2	3	4	5	6	7
$E(V_{\max})$	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
$\sigma(V_{\max})$	0,0040	0,0033	0,0025	0,0016	0,0008	0,0004	0,0002
Показник	8	9	10	11	12	13	14
$E(V_{\max})$	0,70	0,75	0,75	0,75	0,75	0,85	0,85
$\sigma(V_{\max})$	0,0024	0,0020	0,0012	0,0004	0,0000	0,0012	0,0033

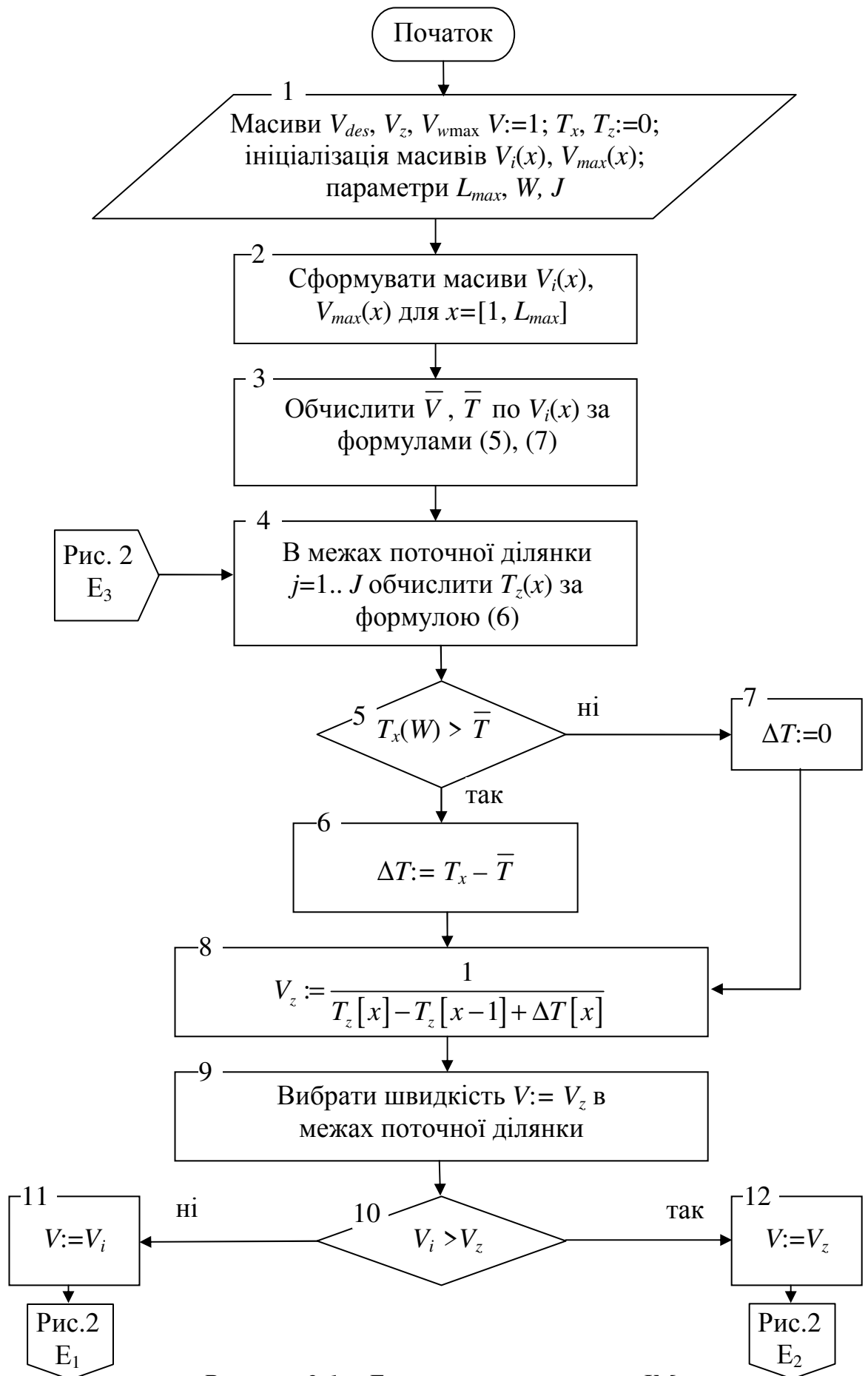


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму ІМ

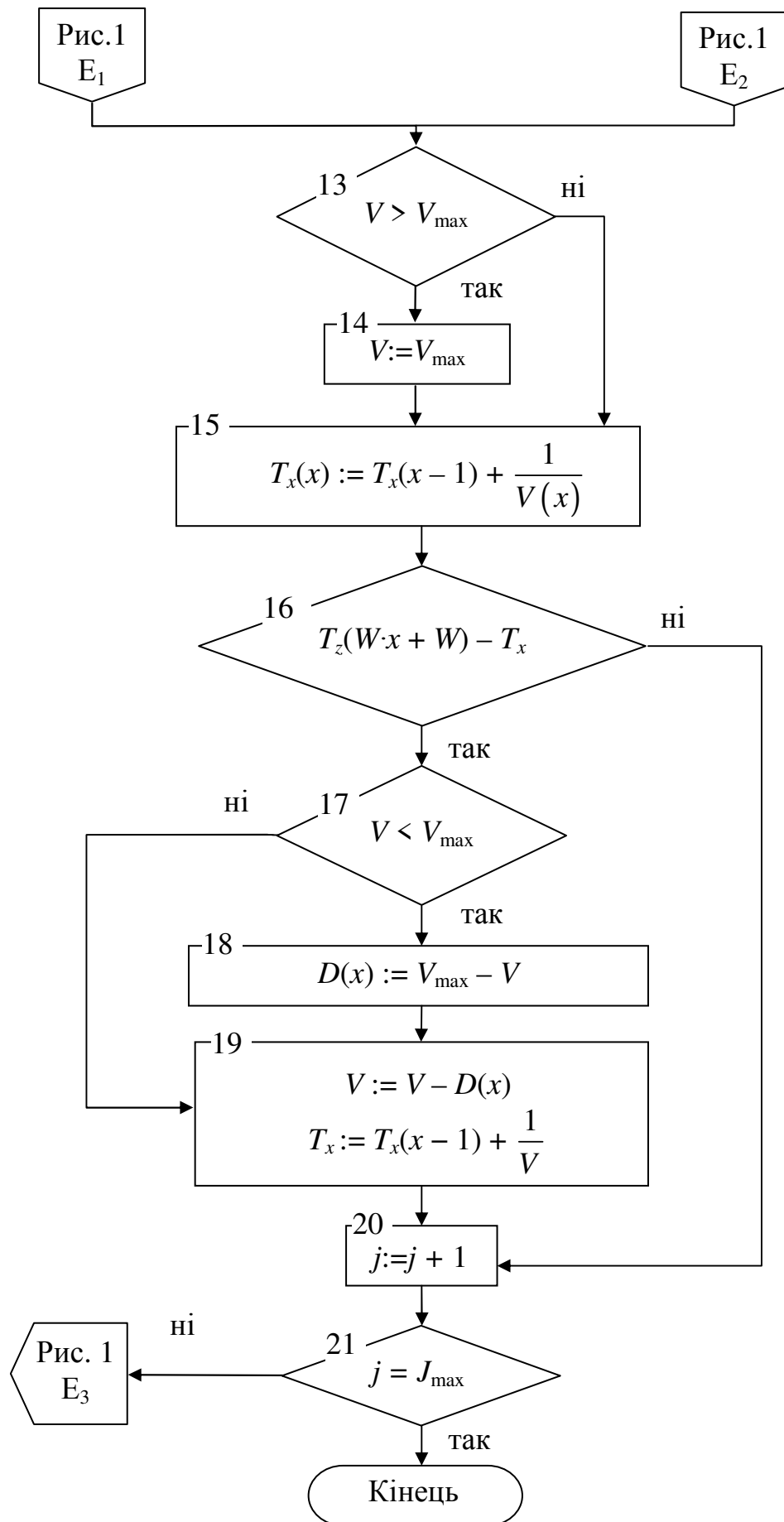


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму ІМ (продовження)

Приклад траєкторії швидкості для набору №13 подано на рис. 3.3.

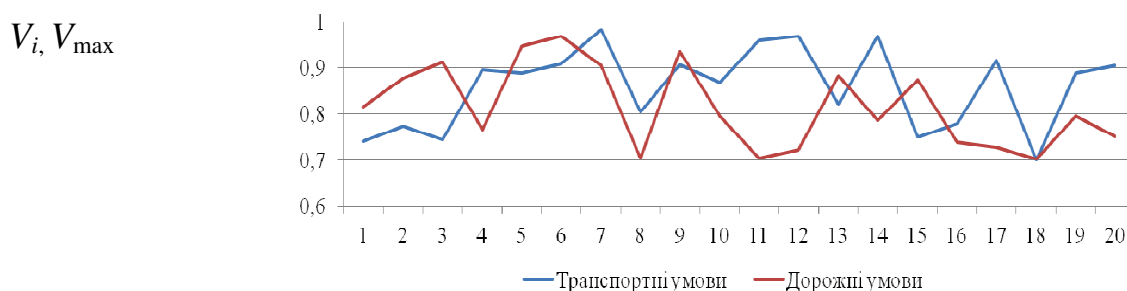


Рисунок 3.3 – Фрагмент профілю швидкості, обмеженого дорожніми й транспортними умовами

З поданого фрагменту вхідних даних видно, що швидкість АТЗ може змінюватись, враховуючи дорожні і транспортні умови в межах $V \in [0,7; 1,0]$ від $V_{a.\max}$. Абсолютна максимальна швидкість АТЗ прийнята $V_{a.\max} = 25$ м/с. Графік показує, що є такі ділянки, на яких швидкість V_i є обмеженням для V . Також є ділянки, на яких $V_{\max}$ є обмеженням для V . Це означає, що при виборі і корегуванні програми руху водій повинен керуватись трьома величинами: V_i , $V_{\max}$, V_z .

ІМ було двохстадійне. На першій стадії згенеровано масиви початкових даних $V_i(x)$ та $V_{\max}(x)$ за виразами (3.1) і (3.2). Масиви було перевірено на наявність помилково згенерованих даних, що не відповідають практичним даним, взятим з аналогу траси. На другій стадії застосовано розроблений алгоритм ІМ, для моделювання вибору швидкості АТЗ при використанні початкових даних і застосуванні прогнозування на дистанцію W . Горизонт прогнозування у кожному наборі вхідних даних змінювався циклічно. ІМ було виконане у середовищі алгоритмічної мови програмування Delphi на основі запропонованого алгоритму.

3.3 Оцінювання показників якості програми руху на заданому магістральному маршруті

Для оцінювання якості керування транспортним засобом при наявності динамічного прогнозу швидкості застосовано такі показники, як абсолютне сумарне відхилення від оптимальної програми DV по швидкості, та відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT по часу.

$$DV = \sum_{x=1}^{L_{\max}} \sqrt{(V(x) - V_i(x))^2}. \quad (3.6)$$

$$\Delta T = t(L_{\max}) - T_{\max}, \quad (3.7)$$

де $t(L_{\max})$ – тривалість проходження останньої ділянки маршруту.

В результаті ІМ було отримано залежності $DV(W)$, $\Delta T(W)$ (рис. 3.4-3.7).

Залежності $DV(W)$ на рис. 3.4, 3.5 подано для двох наборів даних: №2 і №12 (див. табл. 3.1). Набір №2 характеризується низьким значенням середньої швидкості (0,5), але відносно високою дисперсією (0,0033). Тобто потік даних про цей набір є інформаційно насиченим. Для цього набору потрібно багато інформації, бо транспортні умови тут є досить мінливими. Натомість, набір № 12 – це майже детерміновані умови руху, якщо не брати до уваги дорожні умови. Стандартне відхилення $\sigma(V_{\max})=0$, обмеження по швидкості має досить високе значення $V_{\max}=0,75$. Порівнюючи залежності на рис. 3.4 і 3.5, бачимо що відхилення від оптимальної програми з більшою дисперсією вхідних даних значно перевищує стабільні транспортні умови.

Залежності DV від W мають чітко виражений кусково-неперервний характер. Наявність стрибків графіків пояснюється не тільки кратністю значень горизонту планування W і довжини маршруту $L_{\max}$, а й тим, що залежність $DV(W)$ явище переходу кількості інформації в якість. Так, при збільшенні W поле змінних величин V також зростає, що дає змогу вибрати програму руху на дистанції W , що є ближчою до оптимальної $V_i(x)$.

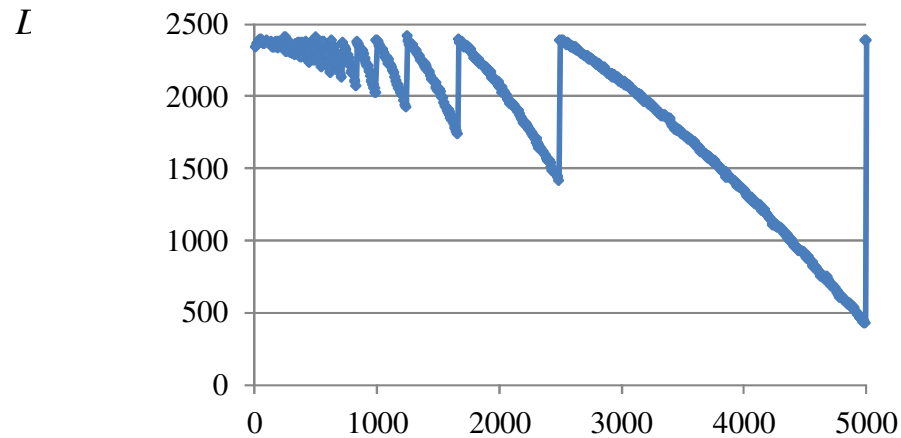


Рисунок 3.4 – Залежність сумарного відхилення DV програми від горизонту прогнозування W при $\sigma(V_{max})=0,0033$ і $E(V_{max})=0,5$

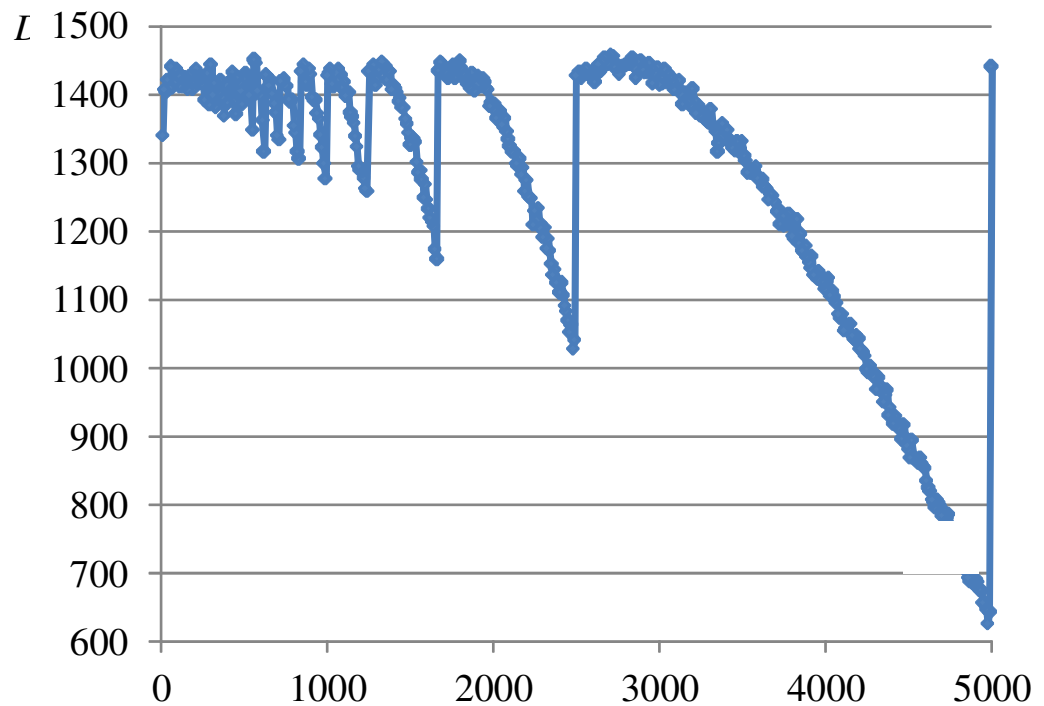


Рисунок 3.5 – Залежність сумарного відхилення від оптимальної програми DV від горизонту прогнозування W при $\sigma(V_{max})=0,000$ і $E(V_{max})=0,75$

Однак, зростання W знижує вірогідність потоку даних доти, поки отриманий обсяг інформації стосовно $V_{max}(x)$ вимушує прийняти взагалі

неадекватне рішення. Подальше зростання горизонту W обумовлює необхідність корекції контролю швидкості. Якість керування за показником DV покращується. Так відбувається до наступної якісної зміни. Таким чином, розриви функції $DV(W)$ пояснюються переростанням кількості інформації в якість, яка відбувається для визначених значень горизонту прогнозування.

Залежності $\Delta T(W)$ (рис. 3.6, 3.7) мають менш виразний монотонний вигляд. Однак стрибки значень цих залежностей відображається, приблизно, при тих самих значеннях W .

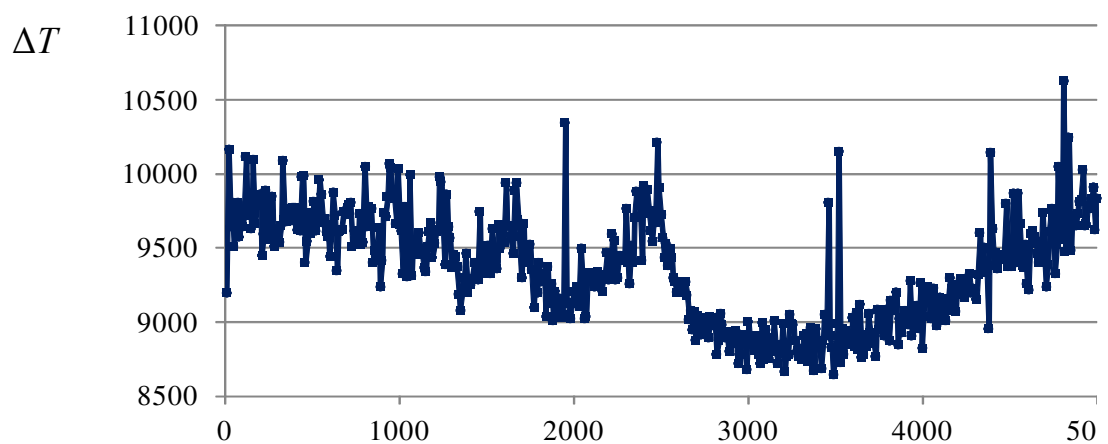


Рисунок 3.6 – Залежність сумарного відхилення оптимального розкладу від горизонту прогнозування W при $\sigma(V_{max})=0,0033$ і $E(V_{max})=0,5$

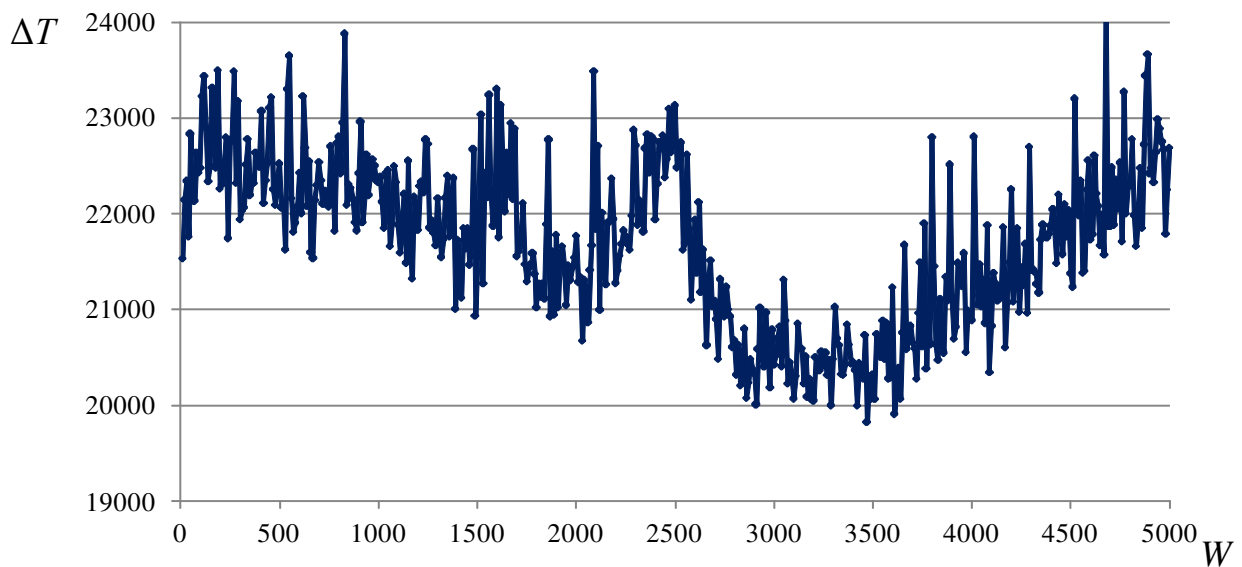


Рисунок 3.7 – Залежність сумарного відхилення оптимального розкладу від горизонту прогнозування W при $\sigma(V_{max})=0,0$ і $E(V_{max})=0,75$

Порівнюючи результати для різних вхідних наборів, бачимо, що дисперсія вхідних даних не впливає на якість процесу керування транспортним засобом за параметром ΔT так, як це робить математичне сподівання швидкості $V_{\max}$. На рис. 3.7 подано залежність, яка показує, що відхилення від оптимальної програми з $E(V_{\max})=0,85$ майже вдвічі перевищують результати, отримані при $E(V_{\max})=0,5$. Мінімальне значення стандартного відхилення майже не впливає на якість контролю процесу.

3.4 Виконання імітаційних експериментів

Розроблену методику і алгоритм моделювання транспортного потоку було застосовано на прикладі на автомобільній трасі Е-471 Тернопіль-Львів.

Початкові дані змінювались таким чином: задавались різні значення відносної швидкості автомобілів потоку від бажаної швидкості АС (табл. 3.8).

Таблиця 3.1 – Приклад рядів підготовлених початкових даних для щільності потоку 25 авто/км

№ п/п	$\bar{V}$	η_V	σ_V	Δx_{av}	ΔV_{av}	№ п/п	$\bar{V}$	η_V	σ_V	Δx_{av}	ΔV_{av}
1	25,000	0,000	0,0000	0,0000	-5,000	14	19,750	0,203	1,2383	1,0313	0,250
2	24,938	0,040	0,2500	0,1172	-4,938	15	19,250	0,208	1,2383	1,0313	0,750
3	24,625	0,081	0,6191	0,5156	-4,625	16	18,750	0,213	1,2383	1,0313	1,250
4	24,375	0,082	0,8062	0,7031	-4,375	17	18,250	0,219	1,2383	1,0313	1,750
5	24,063	0,125	0,9979	0,8203	-4,063	18	17,750	0,225	1,2383	1,0313	2,250
6	23,688	0,127	1,1383	0,9766	-3,688	19	17,250	0,232	1,2383	1,0313	2,750
7	23,250	0,172	1,2383	1,0313	-3,250	20	16,750	0,239	1,2383	1,0313	3,250
8	22,750	0,176	1,2383	1,0313	-2,750	21	16,313	0,184	1,1383	0,9766	3,688
9	22,250	0,180	1,2383	1,0313	-2,250	22	15,938	0,188	0,9979	0,8203	4,063
10	21,750	0,184	1,2383	1,0313	-1,750	23	15,625	0,128	0,8062	0,7031	4,375
11	21,250	0,188	1,2383	1,0313	-1,250	24	15,375	0,130	0,6191	0,5156	4,625
12	20,750	0,193	1,2383	1,0313	-0,750	25	15,188	0,066	0,4031	0,3047	4,813
13	20,250	0,198	1,2383	1,0313	-0,250	26	15,063	0,066	0,2500	0,1172	4,938

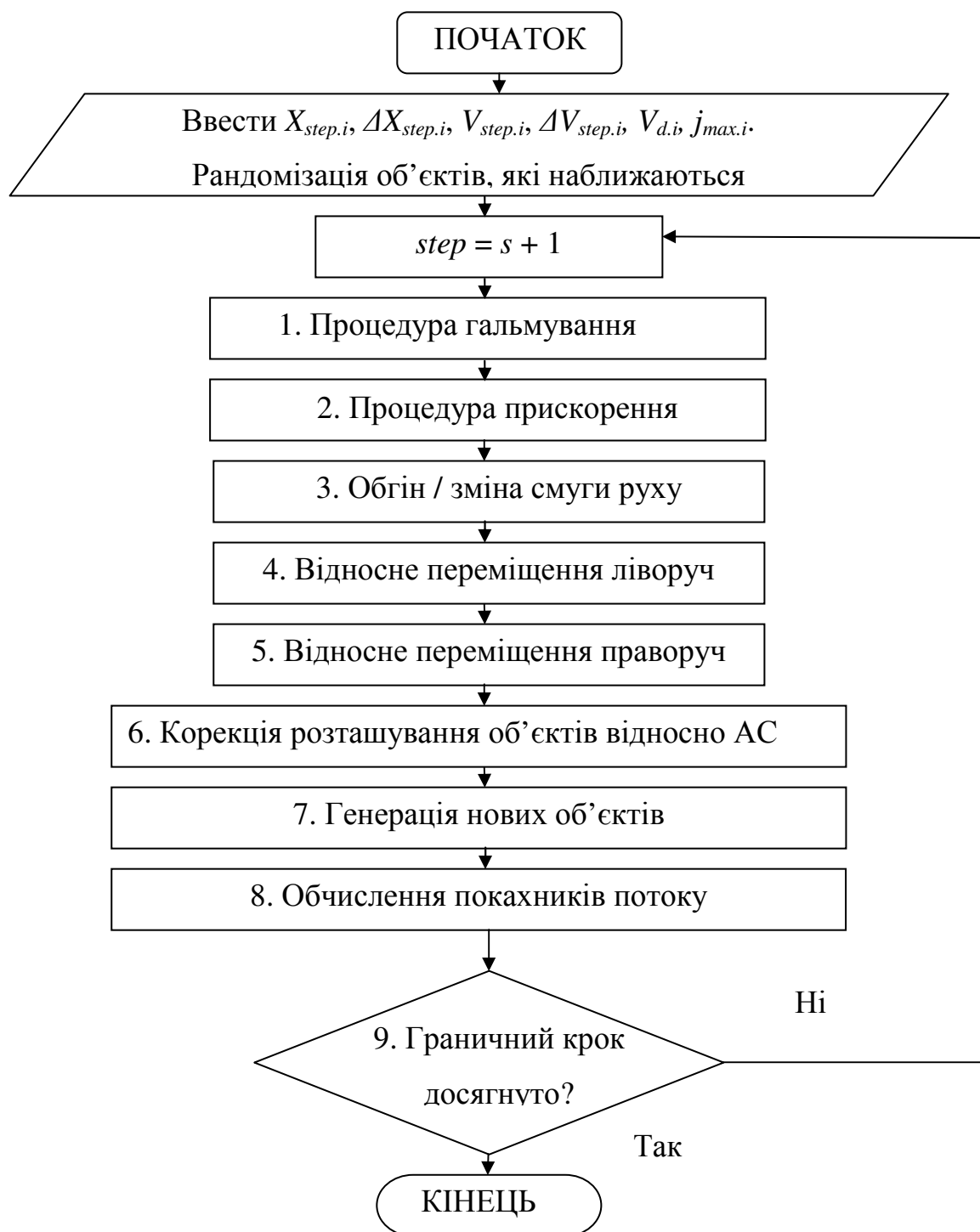


Рисунок 3.8 – Блок-схема алгоритму імітаційного моделювання транспортного потоку на двохсмуговій дорозі з дозволенним обгоном

При цьому для початкових даних введено оцінки:

1) коефіцієнт нерівномірності швидкостей:

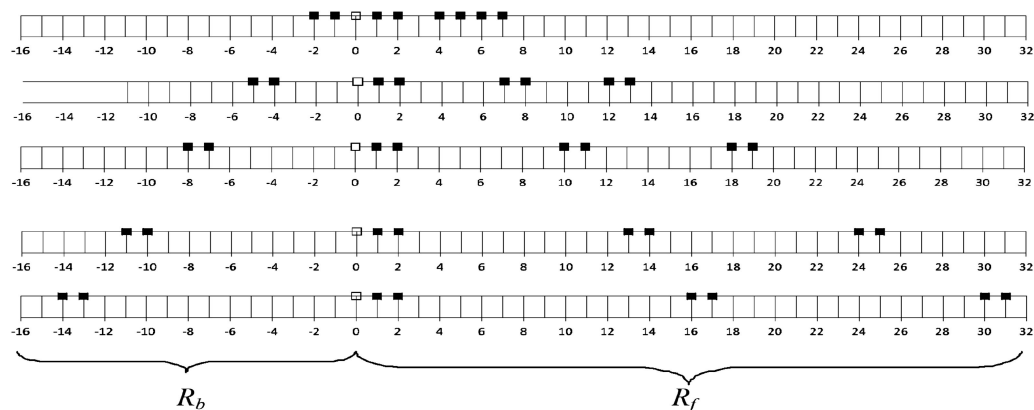
$$\eta_v = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\bar{V}}, \quad (3.8)$$

де $V_{\max}$, $V_{\min}$, $\bar{V}$ – швидкість об'єктів в полі автомата, відповідно, максимальна, мінімальна та середня; 2) середньоквадратичне відхилення швидкостей σ_V ; 3) середнє відхилення від математичного сподівання:

$$\Delta x_{av} = \frac{1}{N_c} \sum |x_i - \bar{x}|, \quad (3.9)$$

4) абсолютне відхилення середньої швидкості об'єктів від швидкості АС ΔV_{av} . Коли, наприклад, згідно з табл. 3.1, середнє значення швидкості потоку становить 20,25 м/с зі стандартним відхиленням 1,25 м/с, то при щільності потоку 16 автомобілів/км в інформаційному полі АС довжиною 480 м буде 8 автомобілів + АС, на попутній смузі і розподіл їх швидкостей буде таким: 20; 22; 21; 21; 20; 20; 19; 19; 18. Нижче, на рис. 3.2 наведено приклад п'яти ітерацій для цього варіанту початкових даних.

Інформаційне поле автомата є несиметричне: позаду воно становить 16 клітин (160 м), попереду – 32 клітини (320 м). З них видно, що початкова група автомобілів, які рухаються в кучній колоні через різницю швидкостей розпорошуються вздовж кліткового автомата і, зрештою, 4 з них виходять за межі оглядової доступності. Однак, наявність трьох автомобілів з швидкостями, нижчими, ніж бажана швидкість АС, а саме 19, 19, 18 м/с призводять до сукупних затримок АС на маршруті на 1 м/с на довжині 20 км.

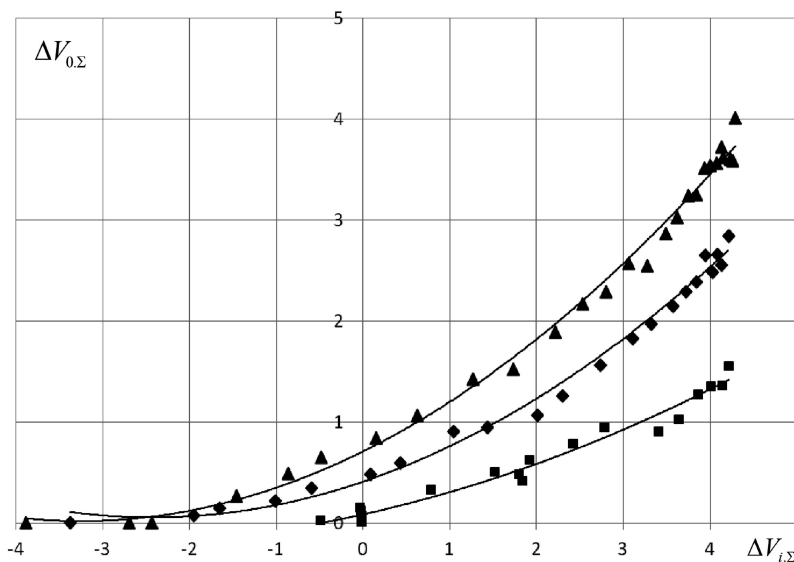


■ – ТЗ, об'єкт транспортного потоку

□ – автомобіль-спостерігач

Рисунок 3.9 – Схема п'яти кроків імітаційного моделювання кліткового автомату

Ці дані було введено в програму і отримано залежності середніх затримок автомобіля з бажаною швидкістю 20 м/с від відносної швидкості інших учасників транспортного потоку (рис. 3.10.).



- ▲ – щільність потоку 40 автомобілів / км
- ◆ – щільність потоку 28 автомобілів / км
- – щільність потоку 16 автомобілів / км

Рисунок 3.10 – Експериментальні результати моделювання зміни швидкості АС залежно від зміни параметрів потоку, та теоретична

3.5 Результати імітаційного моделювання

Отримані результати моделювання для різних аргументів ΔV_{av} приводять до зміни дійсної швидкості АС по відношенню до його запланованої швидкості. Якщо цю величину позначити як y , а ΔV_{av} – як x , то можна отримати такі рівняння регресії:

для щільності потоку 40 авто/км: $y = 0,06x^2 + 0,2917x + 0,4109$;

для щільності потоку 28 авто/км: $y = 0,0297x^2 + 0,1908x + 0,0869$;

для щільності потоку 16 авто/км: $y = 0,0653x^2 + 0,425x + 0,7113$.

Коефіцієнти рівняння регресії отримано з допомогою функції «тенденція» в електронних таблицях Excel, яка виконує побудову рівняння

регресії на основі емпіричних даних за методом найменших квадратів. Величина достовірності апроксимації емпіричних даних для усіх трьох залежностей є більша, ніж 0,97, що свідчить про хорошу узгодженість.

Адекватність імітаційної моделі не може бути підтверджена статистичними дослідженнями, оскільки сама методика спирається на логічних методах керування усіма АТЗ потоку, що характерно для автоматичних транспортних систем і зовсім не характерно для сучасних автострад, де рішення приймаються на основі, переважно, суб'єктивних висновків. З іншого боку, внаслідок надзвичайно простої конфігурації даної імітаційної моделі, характеристики руху трафіку руху не можуть бути описані нею із задовільним виконанням, тобто так, як було сформоване ідеальне його бачення. Модельований транспортний потік на автомагістралях, особливо на європейських автомагістралях, не може представляти реальні залежності швидкості та щільності потоку. Знаходимо такі нереальні риси, які характерні й для інших кліткових автоматів [18]:

1) прискорення і сповільнення виконуються з нереальною інтенсивністю, що пов'язано з психофізіологічними особливостями водіїв, особливо непрофесіоналів;

2) максимальне прискорення є більшим, ніж максимальне сповільнення, що насправді також залежить від стану дороги і уміння водія;

3) рішення про обгін/зміну смуги руху водіями не завжди приймається так однозначно, як це робить даний автомат;

4) моделювання багатосмугових автострад, а також наявність дорожніх розв'язок потребує додаткових правил імітації.

Однак, якщо взяти до уваги відомі залежності середньої швидкості транспортних засобів від щільності потоку односмугових автострад, то запропонована нами модель дає цілком адекватні їм результати [7].

3.6 Використання імітаційної моделі для прогнозування

Як видно з рис. 3.11, усі три залежності (це ж характерно і для щільності

потoku більшої величини) – це є параболи, частина графіку яких заходить за вертикаль вісь ординат. Ліва по відношенню до початку координат частина кожної залежності описує ті ситуації, коли АС має бажану швидкість, яка є менша, ніж середня швидкість потоку. Наявність «швидких» автомобілів в його інформаційному полі зумовлює незначні затримки впродовж руху по заданому відрізку траси. Наявність технічних засобів визначення відносної швидкості дає йому можливість дотримуватись запланованого розкладу руху. Однак, затримки стрімко зростають, коли середня швидкість потоку стає меншою, тобто коли у потоці з'являються «повільні» транспортні засоби, які вимушують змінити поточну швидкість усіх інших, у тому числі АС. Телеметричні засоби АС, у тому числі, засоби для визначення відносної швидкості автомобілів у потоці, засоби телекомунікації можуть бути використані для того, щоб скорегувати його власний розклад. Адже знаючи величину ΔV_{av} , при відомій щільності потоку, можна визначити прогноз бажаної швидкості на яку завгодно дистанцію маршруту.

ВИСНОВКИ

1. Для прогнозування параметрів транспортного потоку, де більшість рішень приймаються на основі суб'єктивних думок водіїв, найбільш доцільно застосовувати імітаційне моделювання, оскільки жодна з відомих методик аналітичного моделювання не приводить до задовільної точності.
2. Використання методу активного спостерігача виправдало себе в тому, що дало змогу врахувати прискорення/сповільнення транспортного засобу, детально змодельовати достатньо велику дистанцію магістралі без залучення розподілених засобів, а також позбутись несуттєвих маневрів на магістралі, які відбирають додаткові обчислювальні ресурси автомата.
3. Результати імітаційного моделювання показують вагомий вплив зміни швидкостей автомобілів на швидкість інших суб'єктів потоку. Вид залежності – квадратичний. Частина залежності відповідає від'ємним значенням аргумента. Це означає, що навіть при зниженні бажаної швидкості АС над середньою швидкістю потоку відбувається вплив «повільних» автомобілів на АС.
4. В інтелектуальних транспортних системах прогнозування швидкості руху транспортного засобу можна здійснювати за відносною швидкістю усіх автомобілів, які перебувають в його інформаційному полі.
5. Результати моделювання і експериментальні дослідження показують, що найбільш енергоощадною програмою руху транспортного засобу по прямолінійній горизонтальній автомагістралі є, коливний рух, який включає фази розгону і вільного кочення. Тривалість кожної з цих фаз залежить від сумарного дорожнього опору, та від потужнісно-вагових параметрів транспортного засобу і від циклового пробігу. Якщо горизонт достовірного прогнозування скорочується, то це не перешкоджає отримати мінімальні сумарні витрати енергії на сумарному заданому відтинку маршруту. Однак, при цьому знижуються комфортність та безпека руху, оскільки сумарне прискорення і сповільнення впродовж руху по даному відтинку зростає. При будь-якому горизонті прогнозування імпульсний

рух на горизонтальній прямолінійній дорозі дає більше заощадження енергоресурсів, ніж будь-яка програма руху на горбистій автомагістралі.

6. Якщо змінюються дорожні і транспортні умови руху, при цьому скорочується горизонт прогнозування, що спричиняє, в свою чергу, то витрати енергії на один і той ж відтинок автомагістралі зростають. Однак, при цьому більше використовується потенціал горбистої дороги. Енергетичні витрати циклів на дорозі з нерівномірним дорожнім опором у великій мірі залежить від початкової і кінцевої бажаної швидкостей. Різниця у витраті ресурсів може відрізнятись до 17%.
7. Розроблені енергоощадні цикли можуть використовуватись в управлінні важковаговим транспортним засобом при русі по автомагістралі, при умові взаємодії з телеметричними засобами. Обов'язковими умовами досягнення мінімально можливих енерговитрат для заданого важковагового транспортного засобу є мінімальний горизонт прогнозування дорожніх умов та відомих транспортних перешкод. Також енергетично оптимальні транспортні цикли повинні мати тісний зв'язок з потрібним розкладом руху, тобто моментами відправлення і прибуття з початкового і кінцевого пунктів маршруту і необхідними швидкостям в цих пунктах.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Hashchuk P. Optimal laws of gear shift in automotive transmissions / P. Hashchuk, R. Pelo. // Econtechmod. – 2018. – Vol. 7, № 2.– P. 59 – 69.
2. Danchuk V. An Improvement in Ant Algorithm Method for Optimizing a Transport Route with Regard to Traffic Flow / V. Danchuk, O. Bakulich, V. Svatko // Procedia Engineering/ – 2017. №187. – P. 425 - 434.
3. Requirements Review from EU projects. D2.1 of H2020 project ENSEMBLE / [D. Willemsen, , A. Schmeitz, M. Fusco, et al.]. – 2018. – 108. – Режим доступу : <https://platooningensemble.eu>.
4. Кульбашная Н. И. Разработка модели выбора скорости движения водителем с учетом дорожной обстановки / Н. И. Кульбашная, К. А. Сорока // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – 3/2 (81). – С. 22-29. – DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71489.
5. Методика зменшення невизначеності в задачах автотехнічної експертизи ДТП при ідентифікації дальності видимості дорожніх об'єктів в темну пору доби : монографія / В. П. Кужель, А. А. Кашканов, В. А. Кашканов. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 200 с.
6. Особливості формування методики застосування класифікації умов експлуатації транспортних засобів в інформаційних умовах ITS / Волков В. П., І. В. Грицук, Ю. В. Грицук, [та ін.] // Вісник Національного техн. ун-ту «Харківський політехнічний ін-т». – 2017. – № 14 (1236) – С. 10 – 20.
7. Hegyi A. Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures. TRAIL Thesis Series T2004/2, – The Netherlands TRAIL Research School 2004. – 232.
8. Technologies for Road Vehicle Automation / C. Englund, G. Meyer, S. Beiker (eds) [et al.] // Road Vehicle Automation 4. Lecture Notes in Mobility. – Springer, 2018. – 266. – Режим доступу : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-60934-8_15.

9. Процишин О. С. Дослідження миттєвих швидкостей руху у транспортному потоці / О. С. Процишин // Міжвузівський збірник "Наукові Нотатки". – Луцьк, 2014. – Вип. № 45. – С. 448 – 452.
10. Ioannou P. A. Autonomous Intelligent Cruise Control / Petros A. Ioannou, C. C. Chien // IEEE transactions on vehicular technology. – 1993. – vol. 42, N 4, – P. 657 – 672.
11. Сахно В. П. До визначення їзових циклів та поздовжніх профілів доріг / В. П. Сахно, К. С. Жаров // Автошляховик України. – 2012. – № 1 (225). – С. 7 – 11.
12. Коваленко Л. О. Аналіз умов та безпеки руху на автомобільних дорогах з урахуванням інформаційних показників дорожнього середовища / Л. О. Коваленко // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2013. – Вип. 88. – С. 294 – 301. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2013_88_34.
13. Карпінський Ю. О. Геоінформаційне забезпечення навігації наземного транспорту / Ю. О. Карпінський, А. А. Лященко, О. П. Дроздівський // Наука та інновації. – 2007. – Т. 3, № 1. – С. 43 – 57.
14. Srour F. J. Freight-specific data derived from Intelligent Transportation Systems / F. Jordan Srour, Diane Newton // Potential Uses in Planning Freight Improvement Projects. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board 1957. – 2006. – P. 66-74. – DOI: 10.3141/1957-10 66-74.
15. Freight Data from Intelligent Transportation System Devices / [Hallenbeck M., McCormack E., Nee J., Wright D.]. – WA-RD 566.1, Washington State Department of Transportation. – 2003. – 117. – Режим доступу: <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/566.1.pdf>.
16. Lashenyh A. Development of mathematical models for planning the duration of shunting operations / A. Lashenyh, S. Turpak, S. Gritcay, L. Vasileva, E. Ostrohlyad // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – No. 5/3 (83). – P. 40-46.

17. Wu N. Cellular automata for highway traffic flow simulation / Ning Wu, Werner Brilon // *Traffic and Mobility*. – 1999. – Режим доступу : http://homepage.rub.de/ning.wu/pdf/ca_14isttt.pdf.
18. Clarridgea A. Analysis of a cellular automata on model for car traffic with a slow-to-stop rule I / Adam Clarridgea, Kai Salomaab // *Proceedings of the 14th International Conference on Implementation and Application of Automata*. – 2009. – Режим доступу: http://homepage.rub.de/ning.wu/pdf/ca_14isttt.pdf.
19. Mozaffari L. Vehicle speed prediction via a sliding-window time series analysis and an evolutionary least learning machine / L. Mozaffari, A. Mozaffari, Nasser L. Azad // *A case study on San Francisco urban roads. Engineering Science and Technology*. – 2015. – P. 1 – 18. – Режим доступу : <http://dx.doi.org/10.1016>.
20. Young K. Intelligent speed adaptation: A review / K. Young, M. Regan // *Proceedings of the Australasian Road Safety Research Policing and Education Conference*, 2002. – P. 445-450. – Режим доступу : <https://pdfs.semanticscholar.org>.
21. Іванов В. О. Розподілена система імітаційного моделювання дорожнього руху / В. О. Іванов // *Вісник Національного технічного ун-ту України Київський політехн. ін-т. Інформатика, управління та обчислювальна техніка*. – 2008. – № 48. – С. 41-45.
22. Englund C. Enabling Technologies for Road Vehicle Automation / C. Englund, G. Meyer, S. Beiker (eds.) // *Road Vehicle Automation 4. Lecture Notes in Mobility*. – 2018. – 266 p. Режим доступу : https://doi.org/10.1007/978-3-319-60934-8_15.
23. Pelo R., et al. Optimization of Vehicle Speed Forecasting Horizont on the Intercity Highway. 2020. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 3.3. (105). P 57-68.
24. Kashinath S. A., Mostafa S. A., Mustapha A., Mahdin H., Lim D., Mahmoud M. A., Yang T. J. Review of data fusion methods for real-time and multi-sensor traffic flow analysis. *IEEE Access*. 2021. Vol.9. P. 51258-51276.

25. Beenish H., et al. A Novel Markov Model-Based Traffic Density Estimation Technique for Intelligent Transportation System. *Sensors*. 2023. Vol. 23.2 P.768.
26. Rajabi M., et al. The development of BPR models in smart cities using loop detectors and license plate recognition technologies: A case study. *Journal of Future Sustainability*. 2023. Vol. 3.2. P. 75-84.
27. Tsugawa S., Jeschke S., Shladover Se. A review of truck platooning projects for energy savings. *IEEE Trans Intell Vehicles*. 2016. Vol. 1(1). P. 68-77.
28. Johannesson L., et al. Predictive energy management of hybrid long-haul trucks. *Control Engineering Practice*. 2015. Vol. 41. P. 83-97.
29. Guanetti J., Kim Y., Borrelli F. Control of connected and automated vehicles: State of the art and future challenges. *Annual reviews in control*. 2018. Vol. 45. P. 18-40.
30. Wang J., Yash V. P., Zhihao J. Learning-Based Modeling of Human-Autonomous Vehicle Interaction for Enhancing Safety in Mixed-Vehicle Platooning Control. arXiv preprint arXiv: 2303.09452. 2023.
31. Lin Yuan, John McPhee, Nasser L. Azad. Comparison of deep reinforcement learning and model predictive control for adaptive cruise control. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2020. Vol. 6.2. P. 221-231.
32. Wang Zhongyu, et al. Lane-based vehicular speed characteristics analysis for freeway work zones using aerial videos. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2021. Vol. 48.3. P. 274-283.
33. Dai X., Nagahara M. Platooning control of drones with real-time deep learning object detection. *Advanced Robotics*. 2023. Vol. 37.3. P. 220-225.

ДОДАТКИ

**Додаток А Залежності показників якості контролю швидкістю АТЗ на
магістралі при різних наборах вхідних даних**

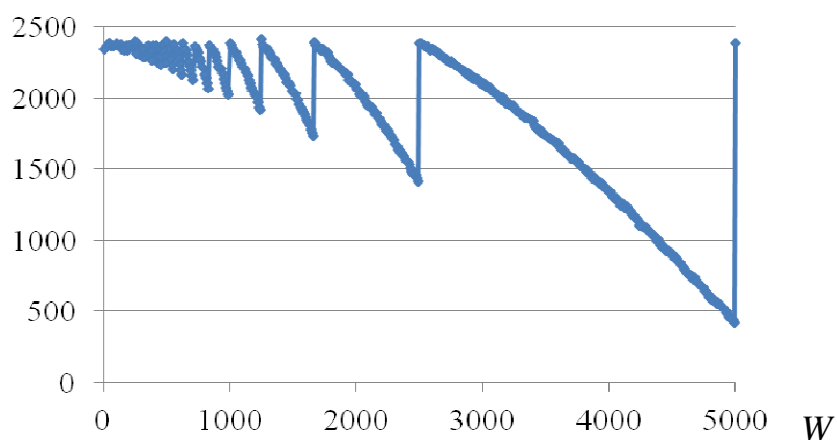


Рисунок – А.1 Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми DV від розміру горизонту прогнозування W при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,004V_{max}$

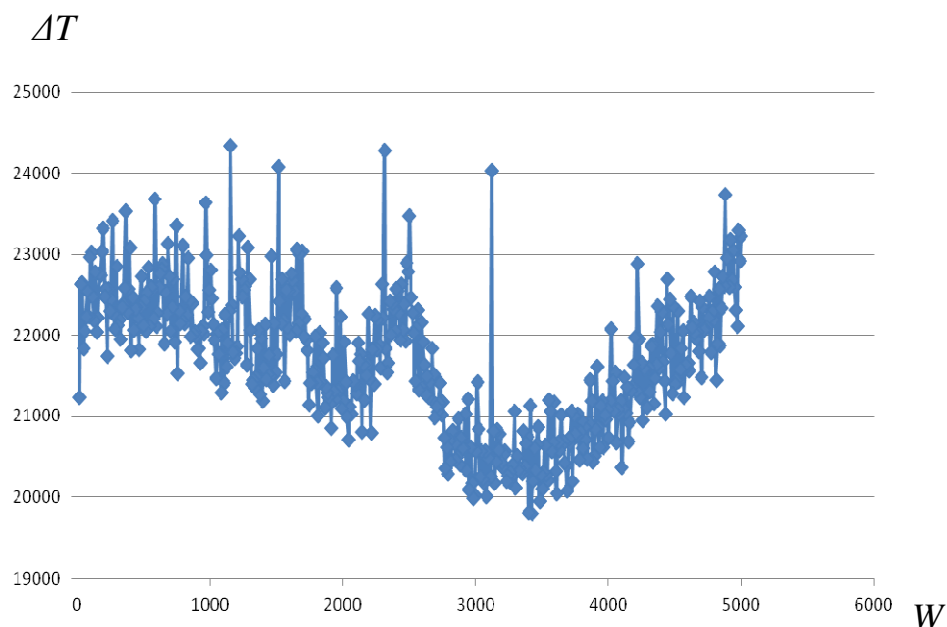


Рисунок А.2 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми DV відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування W при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,004V_{max}$

DV

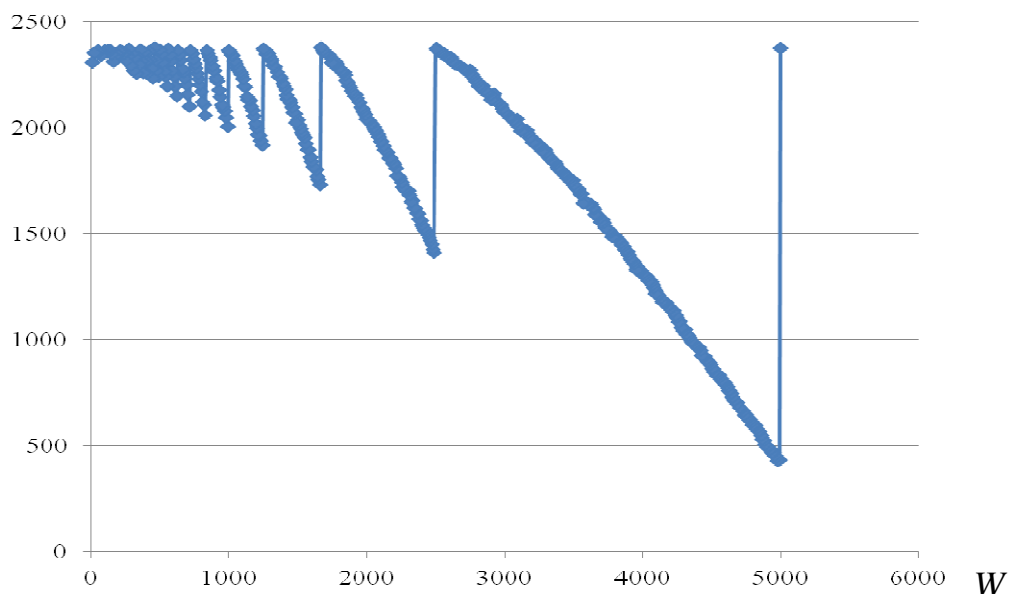


Рисунок А.3 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми DV від розміру горизонту прогнозування W при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0033V_{max}$

ΔT

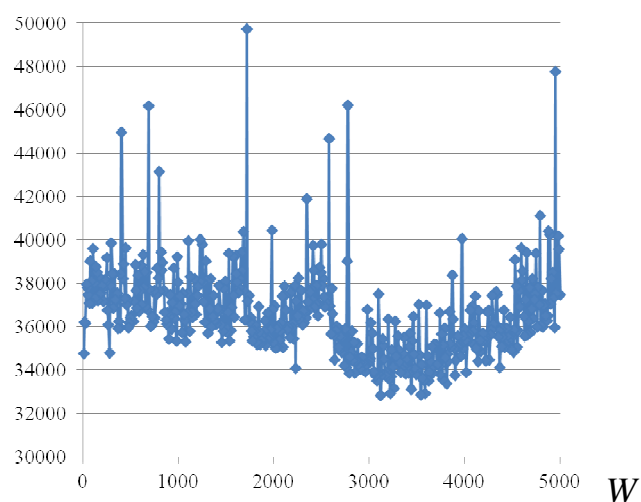


Рисунок А.4 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми DV відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування W при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0033V_{max}$