

## Оптимізація горизонту прогнозування швидкості транспортного засобу на міжміській магістралі

М. С. Оліскевич, Р. А. Пельо, І. І. Прокудіна, В. Є. Силенко,  
О. І. Сороківський, О. В. Заяц

*Досліджується рух автомобіля в магістральному транспортному потоці на міжміських маршрутах. Рух має бути енергоощадним, безпечним і уможливити дотримання бажаного розкладу. Розроблена методика аналізу вхідного потоку даних на основі імітаційної моделі. Запропонований алгоритм імітаційного моделювання базується на використанні доступних інформаційних ресурсів керування автомобілем. Керування рухом пов'язане з вибором швидкості при відомих дорожніх і транспортних обмеженнях. Представлений алгоритм дає змогу зважити доцільність використання кожної з можливостей збільшення швидкості, впродовж прогнозованого горизонту. Зміст алгоритму полягає в оптимальному перерозподілі ресурсів часу. Показниками якості контролю є абсолютні відхилення від оптимальної енергоощадної програми вільного руху і від запланованого розкладу руху. Виконано моделювання руху вантажного автопоїзда на міжміській магістралі Е-371. Виявлено, що загальний обсяг інформації зростає при збільшенні дистанції сканованого трафіку. Однак частка достовірної інформації при цьому зменшується. З'ясовано, що залежність показників якості контролю руху транспортного засобу від розміру горизонту прогнозування є кусково-неперервною. На кожній неперервній ділянці залежність має екстремальне значення горизонту, при якому відхилення від оптимальної програми є мінімальним. Отримані результати можна застосувати в сучасних інтелектуальних транспортних системах. Результати досліджень дають змогу розробляти і дотримуватись оптимальних довготермінових програм руху на магістральних дорогах. При цьому розв'язується проблема керування великими потоками даних. Користуючись розробленою методикою, великі об'єми інформації для прогнозування можна подавати частинами, з обґрунтованою періодичністю*

*Ключові слова: інтелектуальні транспортні системи, прогнозування швидкості, аналіз потоку даних, оптимальна програма руху, магістральні перевезення*

### 1. Вступ

Сучасні засоби телекомунікації, які застосовуються в інтелектуальних транспортних системах (ІТС), надають інформацію про рух автомобілів як у містах, так на міжміських дорогах. Така послуга вважається однією з найбільш затребуваних в сучасності [1]. Завдяки телеметричним засобам реалізовується можливість точно спланувати маршрут, визначити час подорожі, спрогнозувати затримки транспортного потоку, а також виконати необхідні управлінські розпорядження щодо взаємодії парку автомобілів на мережі. У виробленні рішень закладається необхідний критерій оцінки запланованих дій та ймовірність дося-

гнення його рівня. Головні показники високої ефективності ІТС – точність і достовірність наданої інформації. З іншого боку, сучасне інформаційне забезпечення є високовартісним. Наприклад, вартість інсталяції відео-детекторів на магістралях (найбільш популярніші засоби в ІТС) коштувало в 2012–2016 рр. у різних країнах від \$45 тис. до \$75 тис. на один км дороги [2]. Крім того, дорогим є і обслуговування їх підтримуючих інформаційних систем.

Точність наданої інформації на даний час залежить не тільки від похибки отриманих сигналів. Так, наприклад, похибка GPS навігатора у 2–3 % є цілком задовільною і допустимою для того, щоб прийняти рішення про вибір програми руху. Тут під програмою руху розуміємо зміну швидкості залежно від прогнозованих дорожніх і транспортних умов. Якщо розглянути міжміські поїздки автомобілів по магістральній мережі, то програма руху тут може тривати декілька годин і природно за цей час умови руху змінюються досить динамічно. Оперативної інформації про транспортні та дорожні умови є недостатньо, коли йдеться про довготермінове планування. У зв'язку з цим оптимальні програми руху дуже рідко виконуються. Натомість заплановані розклади руху зриваються, терміни доставки вантажів і пасажирів значно перевищують об'єктивно досяжні.

На даний час ідея запровадження інтелектуальних транспортних систем в Європі та в Америці вважається дуже перспективною. Однак її стримує високий рівень капіталовкладень, який, до того ж, не має гарантованого повернення коштів. Мова йде про невизначеність стосовно ефективності отриманої інформації на автомагістралях. Тому обґрунтування потужності інформаційних потоків, які сприймає водій, або автоматизована бортова система керування транспортним засобом, є задачею, яка допомагає розв'язати актуальну науково-прикладну проблему впровадження ІТС.

## **2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми дослідження**

У публікації [1] представлені аналітичні моделі та методи оцінки потоку інформації, засновані на технології сприйняття мобільних даних, які надходять від АТЗ. Мета дослідження полягала в отриманні рішення з низькими витратами на впровадження ІТС. Запропоновані аналітичні моделі використовуються для аналізу взаємозв'язку між інформацією про рух (трафіком, щільністю та швидкістю руху) та кількістю сигналів стільникових мереж. Інформацію про трафік можна оцінити на основі запропонованих аналітичних моделей даних про транспортний засіб стільникового зв'язку (Cellular Floating Vehicle Data (CFVD)). Крім того, пропонується метод прогнозування швидкості руху АТЗ, заснований на алгоритмі нейронної мережі зворотного поширення (Back Propagation Neural Network (BPNN)). Запропоновані моделі дають змогу досить ретельно проаналізувати вхідні дані та передбачити майбутню швидкість руху автомобіля для учасників дорожнього руху. Однак представлені дослідження стосуються лише короткотермінового прогнозування. Крім того, засобами прогнозування мають бути оснащені як АТЗ та інші суб'єкти дорожнього руху, так і об'єкти транспортної інфраструктури. Результати досліджень і методика може бути корисною в межах міських ІТС.

Засоби збирання інформації про дорожній рух відрізняються принципами генерування сигналів. Однак застосування жодного з відомих засобів без інтегрованої системи не відповідає вимогам точності та просторово-часової ємності інформаційного потоку. Наприклад, дані відеокамер (як сенсорів відстані) є цілком задовільні для оцінювання щільності потоку [2]. Однак відео-сенсори, зазвичай, недоступні там, де вони є потрібні. Утворення «мертвих зон» нівелює усі попередньо вироблені прогнози. Крім того, більшість існуючих сенсорів виявлення руху є точковими сенсорами. Такі сенсори можуть генерувати тільки ту кількість АТЗ, які перебувають в одній зоні спостереження (контурі). Використання більшої кількості контурів дає змогу встановити прискорення/сповільнення об'єктів, а сенсори на автомобілях-спостерігачах уможливають опис дорожніх і транспортних умов на великих дистанціях магістралей.

У роботі [3] вказується, що для високої ефективності управління трафіком потрібен контроль середньої швидкості й щільності потоку для великого просторового і часового охоплення. Однак на даний час поле середньої швидкості потоку оцінюють гармонічним середнім значенням на основі вибіркового вибіркового вимірювань. Це не забезпечує необхідної точності прогнозування. Оцінка щільності повинна враховувати динаміку стану потоку в часі і просторі. Це означає, що слід використовувати модельний підхід. На основі моделі потоку треба брати до уваги оновлену інформацію на фіксованих стадіях транспортного циклу та інформацію з зондуючих АТЗ. У роботі [4] було виконано огляд методів, засобів і відповідних аналітичних моделей для короткотермінового прогнозування швидкості АТЗ. Головною проблемою використання переважної більшості відомих моделей було названо велику варіативність потоку вхідних даних. Було вказано, що прогнозування на основі модельно-орієнтованого програмування поступається в ефективності, у порівнянні з програмуванням на основі даних. Однак в якості вхідних величин пропонується застосовувати стандартні статистичні оцінки потоку, обчислені за фіксований проміжок часу. Таке он-лайн прогнозування є суперечним. Адже статистична оцінка є тим точнішою, чим більшого об'єму даних вона стосується. З іншого боку, чим більший період збору даних, тим менше часу залишається на вироблення і прийняття управлінських рішень. Також у даній роботі не обґрунтовано вибору горизонту прогнозування.

В дослідженні [5] показано, що обмеження, які накладаються на вибір швидкості АТЗ, залежать від умов руху. Виконано класифікацію умов. Також зроблено аналіз об'єктів дорожнього руху, які можуть бути джерелами повідомлень про обмеження дорожніх і транспортних умов. Проте, матеріал досліджень не охоплює задач, пов'язаних з обґрунтуванням ефективності застосування отриманої інформації.

Здебільшого усі нові інформаційні технології на транспорті базуються на взаємній «комунікації» між учасниками дорожнього руху, а також з нерухомими дорожніми об'єктами. Адже саме завдяки обміну інформацією отримана можливість покращити вірогідність та точність прогнозування. В роботі [6] представлені приклади, де застосовується методика оцінювання швидкості АТЗ в потоці, розроблена для «змішаного» сценарію руху. Потік складається як із

«незалежних», так і «зв'язаних» АТЗ. Однак автором використано лише ті результати вимірювання середньої швидкості, які можна було б отримати від сенсорів підключених до ІТС автомобілів. У роботі для випадку одиночних незв'язаних потоків даних було використано дані мікроскопічної симуляційної моделі нового покоління (Next Generation Simulation (NGSIM)). Було виконано перевірку здатності оцінювати стан руху на основі сукупної інформації, отриманої від АТЗ. Враховано різні швидкості переміщення підключених транспортних засобів.

У дослідженні [7] пропонується система Eco-Approach and Departure (EAD) на основі прогнозування в режимі реального часу, яка дає змогу водієві проїхати через сигнальне перехрестя безпечним та екологічним способом у міському транспорті. Алгоритм EAD може забезпечити плавну та енергетично ефективну траєкторію швидкості, враховуючи попередній потік та черги на перехрестях. Результати чисельного моделювання показують, що EAD здатна економити від 4 % енергії і більше. Враховуючи особливості магістрального трафіку, технології прогнозування швидкості, слід очікувати, що застосування подібної технології заощадить не менше енергетичних ресурсів також і у міжміському сполученні. Однак для його застосування потрібно оцінити бажаний об'єм необхідної інформації для керування програмою руху в межах виділеного горизонту прогнозування.

У дослідженні [8] використовується довша ділянка автомобільної дороги з внутрішніми заторами. Було виконано завдання перевірити здатність запропонованої схеми оцінювання трафіку для створення відповідних оцінок для зміни умов руху на великій ділянці магістралі. В обох випадках результати виявились задовільними, якщо говорити про переваги «комунікації» АТЗ. Однак моделі, що базуються на NSIM характеризуються, насправді, великими прискореннями/сповільненнями. У фазових траєкторіях, за даними NSIM, ці похибки не були помічені раніше.

У роботі [9] розглядається застосування неперервних умовних випадкових полів (Continuous Conditional Random Fields (CCRF)) для прогнозування руху. CCRF – це є ймовірнісний підхід, що складається з прогнозів дорожнього руху. Прогнози, в свою чергу, базуються на просторових та часових кореляціях даних про трафік. Окрім підвищення точності прогнозування, ймовірнісний підхід надає інформацію про рівень невизначеності прогнозування. Більше того, інформацію про відносну важливість конкретних прогнозних та просторово-часових кореляцій можна легко отримати з моделі. CCRF є відмово-стійким і може забезпечити прогнози, навіть якщо деякі спостереження відсутні. Однак модель CCRF не придатна для прогнозування рідкісних подій на магістралі, таких як затори, аварії, природні катаклізми. Точність моделі із збільшенням горизонту прогнозування знижується експоненційно. Вплив розміру горизонту прогнозування на якість прогнозу за CCRF залишається невідомою.

У дослідженні [10] було представлено онлайн-систему прогнозування тривалості руху на дорозі, яка використовує систему інтеграції транспортної інфраструктури (Vehicle Infrastructure Integration (VII)). Це є інтегрований симулятор трафіку з використанням середовища PARAMICS (Paramics Microsimulation Australia). Було проведено експериментальне дослідження на

мережі автострад в США. Ефективність оцінюваної VII системи є задовільною. Однак точність моделі VII суттєво залежить від частки транспортних засобів, оснащених засобами передачі даних. Усі названі переваги моделі стрімко зменшуються, коли частка АТЗ з підтримкою VII наближається до значень, що перевищують 25 %. Є висока ймовірність, що мережа зв'язку, на якій базується використання системи, стане перевантаженою через збільшення потоку даних.

Переваги технології транспортних засобів, які взаємодіють (Connected Vehicles, CV), є загально визнаними на даний час [10, 11]. CV представляють, так звану, V2I-комунікацію, включаючи покращену безпеку, підвищену екологічну стійкість, підвищення мобільності тощо. Однак ці технології є ще не готовими для впровадження, бо потребують чималих інвестицій. В дослідженні [10] показано, що інвестиції та менеджмент, необхідні для досягнення потенціалу технологій CV, відстають. Поки що більш реальною вважається технологія комунікації Vehicle-to-Vehicle (V2V) [11]. Хоча автовиробники починають витрачати ресурси на технологію V2V, вони, очевидно, не хочуть залежати від державних установ. Нинішня транспортна інфраструктура, у тому числі міжнародні транспортні коридори, не готові взаємодіяти з підключеними транспортними засобами. Інвестицій на державному та місцевому рівнях бракує навіть в таких розвинених країнах, як США.

У роботах [12, 13] було виконано спроби оцінити вплив горизонту прогнозування на точність прогнозу, але у цих працях розглядалися горизонти тривалістю від 15 до 60 хв. руху. Можливість комунікації між АТЗ для збільшення горизонту прогнозування при цьому не враховано в жодній з відомих праць. Горизонт прогнозування у даному розумінні – це є різниця часу від останнього спостережуваного значення швидкості до моменту, відносно якого виконується прогнозування. Враховуючи діапазон дозволених швидкостей АТЗ, просторовий горизонт прогнозування вимірюється в межах 12–90 км. Це є достатньо для планування багатьох маршрутів. Однак, про вплив дистанції на точність прогнозування і ефективність прийнятих рішень в ІТС у наведених публікаціях не вказано. У дослідженні [13] горизонти прогнозування поділено на короткотермінові (до 15 хвилин), середньострокові (30–45 хвилин), та довгострокові (до 60 хвилин). Така класифікація є умовною. Вказані дослідження є корисними для умов міського трафіку. В умовах міжміських перевезень, коли виконання транспортного завдання займає до 10 годин, а транспортні й дорожні умови не є такими мінливими, представлені результати є малоприматними. Крім того, відсутні рекомендації про різницю в технологіях реалізації наведених чотирьох категоріях прогнозів.

У дослідженнях сучасних ІТС [14, 15] використано найновіші програми управління швидкістю автомобіля, які часто називають програмами інтелектуальної адаптації швидкості (Intellectual Speed Adaptation (ISA)). ISA контролює поточну швидкість АТЗ, порівнює швидкість із встановленою зовнішньою швидкістю потоку, та застосовує коригування (наприклад, надає поради водієві та/або керує максимальною швидкістю). Переважно, бажана швидкість встановлюється просторово, на основі дорожніх і географічних умов. Найкраща реалізація ISA, є такою, де максимальна швидкість АТЗ ніколи не перевищує обме-

ження швидкості для даних умов. Однак планомірно вибирати програму руху, враховуючи найбільш ощадні умови, з допомогою ISA неможливо. Адже непередбачені затримки потоку не компенсуються при цьому резервами часу, які можуть бути виявлені довготерміновим прогнозуванням.

Відомо, що витрата палива та викиди транспортних засобів є безпосередньо пов'язані із програмою руху автомобіля [16]. Надійне та точне попереднє прогнозування стану на дорозі АТЗ має важливе значення для ефективного застосування стратегії ощадного керування, особливо в умовах перевантаженої магістралі.

Використовуючи найновіші технології ІТС, можна покращити дотримання графіку руху на заданому маршруті за допомогою програм управління швидкістю автомобіля. Так, у роботі [17] представлена розробка нового алгоритму, який використовує наявні межі зміни швидкості та інформацію про дорожні умови для розробки оптимальної фазової траєкторії швидкості на горизонті прогнозування. Однак чіткого обмеження по виконанню розкладу руху дослідники не сформували. Розроблений алгоритм пропонує оптимальні транспортні цикли, не враховуючи того, що вздовж магістралі такі цикли можуть мати різноманітну довжину та структуру [18]. Тому поданий алгоритм не цілком підходить для автостради.

Нові підходи до керування швидкістю АТЗ приводять до формування нових вимог функцій круїз-контролю. У роботі [19] розглянуто основні та важливі аспекти новітніх систем адаптивного круїз-контролю взаємодії (Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC). Проаналізовано різні протоколи маршрутизації, які підтримують вимоги до передачі даних між АТЗ. Щоб бути доступною на автошляхах, система управління повинна відображати зміну трафіку в реальному часі. Таким чином, у роботі також обговорюються проблеми, з якими стикаються існуючі модулі управління CACC, коли йдеться приблизно ідеальне керування. Завдання дослідників були, в основному, зосереджені на двох аспектах: комунікації транспортних засобів та людських факторах та їхньому впливі на конструкцію контролера CACC. Подані результати сприятимуть розвитку системи CACC. Але запропоновані є недостатньо близькі до реальної динаміки дорожнього руху. Необхідно провести більш всебічні дослідження з інтегрованими комунікаціями, людськими факторами та методами управління, зрозуміти та проаналізувати більш практичні ситуації керування АТЗ. Це можливо реалізувати за допомогою симуляції.

Придатні для автомагістралей засоби спостереження за транспортними засобами детально описані в роботі [20]. Це є нові розумні бездротові сенсори для моніторингу руху. Разом з сенсорами були розроблені, інтегровані та перевірені на предмет ефективності алгоритми оцінки швидкості та пройденого шляху, класифікації та синхронізації часу подорожі. Кілька польових досліджень, проведених на автомобільних та міських дорогах для різних сценаріїв та за різних умов руху, призвели до точності виявлення 99,98 %, точності оцінки швидкості 97,11 % та точності класифікації транспортних засобів на основі довжини – 97 %. Однак у роботі відсутні дані стосовно впливу горизонту прогнозування на отримані оцінки швидкостей. Також немає рекомендацій про можливість за-

стосуванні сенсорів і відповідних алгоритмів в системі круїз-контролю на між-міських маршрутах.

Вплив показників структури мережі, напрямку маршруту й дорожніх умов на визначення фактичної щільності потоку на транспортній мережі досліджено в роботі [21]. Однак результати подані лише для мережі в статичному стані, при якому відсутній вплив змінних транспортних та дорожніх умов.

Методи, які мають в основі використання нейронних мереж, пропонують сьогодні хороші рішення для прогнозування параметрів дорожнього руху в режимі реального часу. Однак деякі конкретні форми поведінки суб'єктів магістрального трафіку можуть бути проаналізовані лише за допомогою великих обсягів вхідних даних, – тренажерів. Для ретельного аналізу потрібне впровадження гібридних підходів та з'єднання предикторів [22]. Представлений в публікації [23] аналіз методів дав деяке розуміння короткотермінового прогнозування дорожнього руху в режимі реального часу, який може бути використаний для розробки нових підходів керування швидкістю АТЗ.

Проблема поєднання різних потоків даних в ІТС часто зустрічається в керуванні трафіком. Таку проблему було частково розв'язано в роботі [24]. ІТС інтегрує інформацію з різних джерел та онлайн-сенсорів, виявляє конфлікти, та розробляє рішення щодо маршрутизації АТЗ. Таким чином, ІТС сприяє зменшенню споживання палива транспортними засобами та пов'язаним з цим викидами шкідливих речовин в атмосферу. Використано формування неструктурованих потоків даних у структурні формування. Таким чином, запропоновано компактну модель з кластеризацією та глибокою нейрон-нечіткою класифікацією для оцінювання дорожнього руху. Однак для її налагодження і тренування також потрібні великі масиви даних, які є динамічними. Сучасні системи збору даних не спроможні такі масиви даних сприйняти і обробляти.

Прогнозування швидкості АТЗ суттєво впливає і на ефективність управління витратами енергії в гібридних автомобілях. З цією метою розроблено новий підхід прогнозування швидкості, що використовує концепцію ланцюга нейронної мережі (Chaining Neural Network, CNN) [25]. CNN може бути використаний як основа для еквівалентної стратегії мінімізації споживання енергоресурсів. Модель дорожньої мережі побудовано у середовищі VISSIM (PTV UK Ltd.), передбачаючи, що сучасні комунікації V2V (автомобіль–автомобіль) та V2I (автомобіль–об'єкт інфраструктури) доступні для кожного транспортного засобу в режимі реального часу. Однак, в роботі вжито ліміт комунікації – 200 метрів. Такий ліміт був прийнятий через застосування виділеної комунікації короткого діапазону (DSRC – Dedicated short-range communications, виділений зв'язок ближньої дії), що наявний у сучасних технологіях V2I. Методика розроблена для міської мережі, де транспортні умови змінюються стрибкоподібно й нелінійне і не може бути застосована для магістралі.

У роботі [26] автори припускають, що запропонована ними модель множинних нейронних мереж (Multiply Neural Network, MNN) краща, ніж одинарна модель (Artificial Neural Networks, ANN) для багатоступеневого прогнозування. MNN поєднує короткочасні та довгострокові нейронні мережі для розміщення широкого спектру прогнозів, які відрізняються горизонт. Запропонована мо-

дель MNN поступово сприймає прогнози своїх попередників у часовому ланцюзі. При цьому горизонт прогнозування швидкості збільшується. Однак помилка прогнозування залишається сталою.

Залежності витрати палива від швидкості руху автомобіля і дорожніх умов проаналізовано та уточнено в статті [27]. Автори показали, що для заданих дорожніх умов існує оптимальне значення швидкості, при якому витрата палива є мінімальною. З цим твердженням можна також погодитись, взявши до уваги відомі розробки енергоощадних транспортних циклів [18]. Однак такі твердження сприймаються для миттєвих швидкостей при відсутності вимушеного гальмування/прискорення. Крім того, коли дорожні умови змінюються, то об'єктивно виникають перехідні режими. Тому при плануванні програми руху слід застосовувати середні за цикл швидкості.

З виконаного аналізу літературних даних випливає, що проблема підвищення ефективності прогнозування швидкості АТЗ у транспортному потоці стримує подальші розробки і впровадження інтелектуальних систем контролю руху автомобілів, зокрема, на магістралях. Більшість аспектів ІТС при прогнозуванні залишаються нерозв'язаними. Зокрема, невирішеним є питання забезпечення точності прогнозування великих масивів даних для довготермінових прогнозів. Недосконалою є також методологія обробки потоку даних на магістральних маршрутах, а наявна інформація застосовується неефективно. Контроль за швидкістю транспортних засобів дає змогу заощадити від не менше 4 % витрат енергоресурсів в умовах міського трафіку. На міжміському сполученні заощадження може бути ще більшим, враховуючи тривалість руху та інтенсивність транспортних потоків. Це стосується як автомобілів з вуглеводневими двигунами, так і електромобілів. Проте, розуміння бажаної швидкості АТЗ в потоці при умовах дотримання розкладу руху не сформовано чітко до цього часу. Також відсутні методи обґрунтування вибору програми руху при відомих дорожніх і транспортних умовах. Для підвищення точності прогнозування застосовуються системи комунікації суб'єктів дорожнього руху типу V2V, V2I. Для аналізу потоків даних найбільш успішними є методи, що керуються параметрами потоків даних. Широке застосування у прогнозуванні швидкості знайшли нейронні мережі, а також їх модифікації, – ланцюги нейронних мереж. Однак літературні джерела, у яких б містилося обґрунтування горизонту прогнозування і методи використання оперативних даних з цього горизонту, відсутні.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою дослідження було встановити вплив горизонту прогнозування швидкості на показники виконання ощадної програми руху.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі задачі дослідження:

- обґрунтувати методіку та відповідний алгоритм розрахунку ощадної програми руху АТЗ по заданому міжміському маршруті при умові дотримання найшвидшого розкладу руху в заданих дорожніх і транспортних умовах;
- виконати імітаційне моделювання руху АТЗ при різних періодах прогнозування і характеристиках трафіку на автомагістралях;



– побудувати залежність показників якості дотримання економних режимів руху від періоду прогнозування і обґрунтувати оптимальні значення горизонту прогнозування швидкості АТЗ.

#### 4. Обґрунтування методики та алгоритму розрахунку економної програми руху АТЗ

Розглядався рух АТЗ по дорогах міжміського маршруту. Задано початковий і кінцевий пункти маршруту. Відома довжина поїздки  $L_{\max}$ . Поточна швидкість  $V$  АТЗ змінюється залежно від дорожніх і транспортних умов. Припускалось, що дорожні умови, тобто рельєф, план і профіль траси, стан дорожнього покриття, є відомі. Такі умови для заданого АТЗ можна описати програмою вільного руху,  $V_i(x)$  – швидкістю, що змінюється по довжині маршруту  $x=[1, L_{\max}]$ . Оптимальною назвемо програму руху, яка забезпечує найбільшу паливну економність при умові відсутності перешкод, які спричиняють затримки, затори та інші вимушені зміни швидкості. Враховуючи відомі дослідження, можна стверджувати, що будь-яке відхилення від  $V_i(x)$  (збільшення, або зменшення швидкості) приводять до збільшення витрат енергоресурсів [27]. При цьому існує обмеження максимальної абсолютної швидкості  $V_{a.\max}$ , таке, що  $V(x) \leq V_{a.\max}$  для АТЗ заданого класу. Розглядалась програма руху, яка складається з відносного коефіцієнту швидкості  $V_i(x) = V(x)/V_{a.\max}$ . Отже,  $0 < V_i(x) \leq 1$ . Надалі під  $V_i(x)$  розумітимемо відносну швидкість, взяту як частку від максимальної швидкості  $V_{a.\max}$  для даного АТЗ. У зв'язку з цим, усі величини, які включені в подальший розгляд, є відносними і, відповідно, безрозмірними. Шлях маршруту можна поділити на достатньо малі ділянки  $x_i$  такі, на яких швидкість  $V(x) \geq 0$  вважається сталою, без суттєвого погіршення точності розрахунку. Кожна ділянка  $x_i$  є найменшою одиницею вимірювання відстані, яку проїхав АТЗ. Таким чином, оптимальна програма руху – це множина дискретних значень  $V_i(x)$ , при  $0 < x \leq L_{\max}$ . За програмою  $V_i(x)$  розраховуються моменти часу оптимального розкладу руху транспортного засобу  $0 < t_i < T_x$ , де  $T_x$  – оптимальний час прибуття в кінцевий пункт маршруту. Орієнтуючись на цей розклад, вибираємо час відправлення з початкового пункту маршруту, щоб саме вчасно прибути в кінцевий пункт. У зв'язку з тим, що на автостраді виникають ситуації, при яких потрібно пригальмувати, то, при умові наявності відповідної інформації, водій, або бортова система автоматичного керування знижує швидкість до деякого значення  $V_{\max}(x)$  на ділянці  $x$ . Такими ситуаціями є збільшення щільності транспортного потоку, підвищення аварійної небезпеки внаслідок погодних, природничих чи інших умов. Таким чином, швидкість  $V_{\max}(x)$  є обмеженням у застосуванні оптимальної програми руху і дотримання відповідного графіка, якщо  $V_{\max}(x) < V_i(x)$ . Враховуючи мету досліджень, швидкість  $V_{\max}(x)$  прийнято основним параметром, що характеризує транспортні умови на магістралі. Однак виконання розкладу руху по заданому маршруту можна забезпечити, якщо передбачити  $V_{\max}(x)$  на деяку дистанцію маршруту  $W$ , яку назвемо горизонтом прогнозування. У зв'язку з тим, що усі дистанції вимірюються в одиницях  $x$ , то  $W$  є також відносною безрозмірною величиною. При наявності інформації про  $V_{\max}(x)$  можна виявити ті ділянки маршруту, на яких  $V_{\max}(x) > V_i(x)$ . На таких ді-

лянках швидкість можна збільшити від оптимальної  $V_i(x)$  до максимальної  $V_{\max}(x)$ . Це є певним ресурсом часу, який можна використати, відхилившись від оптимальної програми, але дотримуючись розкладу. Зроблено припущення, що чим більший горизонт прогнозування  $W$ , тим більше є можливостей дотриматись оптимальної програми по швидкості  $V_i(x)$ . Адже, якщо поділити увесь шлях маршруту  $L_{\max}$  на ділянки розміром  $W$ , то можна отримати загальну кількість ділянок, на кожній з яких водій отримує одне інформаційне повідомлення:

$$J = \left\lceil \frac{L_{\max}}{W} \right\rceil. \quad (1)$$

З (1) зрозуміло, що, чим більший горизонт прогнозування  $W$ , тим менше оперативних інформаційних повідомлень надійде водієві, отже прийняті рішення на кожній  $j$ -й ділянці маршруту важче змінити.

Зауважимо, що на даний час засоби прогнозування транспортних умов на автошляхах ще не досягли такого рівня, щоб давати цілком вірогідну і точну інформацію на довготерміновий період (не менше, як на 60 хвилин) [2]. Водночас, щільність потоку впродовж деякого інтервалу часу  $\Delta t$  може стрімко змінюватись. У попередніх дослідженнях доведено, що стандартне відхилення прогнозованої щільності транспортного потоку нелінійно залежить від горизонту прогнозування. Однак вплив розміру горизонту прогнозування  $W$  на можливість виконати оптимальну програму руху  $V_i(x)$ , при дотриманні заданого розкладу  $t_x(x)$ , не досліджувались.

Зміст задачі дослідження є таким. На заданій автомагістралі з характеристиками  $V_i(x)$  потрібно вибрати таку множину значень середніх швидкостей  $V(x)$  на ділянках  $x=1, 2, \dots, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, \dots, L_{\max}$ , для яких

$$\sum_{x=1}^{L_{\max}} (|V_i(x) - V(x)|) \rightarrow \min, \quad (2)$$

при умові, що АТЗ прибуде у кінцевий пункт маршруту не пізніше запланованого часу  $T_x = t_x(L_{\max})$ .

Вибір швидкостей здійснюється в межах одної дистанції  $W$ . Вибір потрібно здійснювати з врахуванням дозволених максимальних швидкостей  $V_{\max}(x)$ , які є відомими тільки на ділянці горизонту прогнозування  $W$ . При цьому дійсна інформація про обмеження швидкостей може бути спотворена.

Задача у такому формулюванні відомими точними, або евристичними методами не може бути розв'язана [28]. Для вирішення поставленої задачі, а також для дослідження впливу горизонту прогнозування на вибір швидкості розроблено і застосовано методику й відповідний алгоритм імітаційного моделювання (ІМ). Зміст його полягає у тому, що на основі випадково згенерованих масивів даних про дорожні і транспортні умови виконується вибір програми руху в межах  $W$ . Вибір проводиться за наперед встановленими детерміновани-

ми правилами. Змінними в моделюванні є розмір горизонту прогнозування  $i$ , відповідно, кількість ділянок  $J$ .

Початковими масивами вхідних даних ІМ є масив оптимальних швидкостей  $V_i(x)$ , масив максимальних по обмеженню транспортних умов швидкостей  $V_{\max}(x)$  на кожній з ділянок  $J$ . Ці масиви попередньо було отримано з використанням генератора випадкових чисел за виразами:

$$V_i(x) = (V_{i.\min} + (V_{i.\max} - V_{i.\min}) \cdot \text{Random}), \quad (3)$$

$$V_{\max}(x) = (R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \cdot \text{Random}), \quad (4)$$

де  $V_{i.\min}$ ,  $V_{i.\max}$  – мінімально і максимально можлива швидкість АТЗ, згідно з оптимальною програмою руху;  $\text{Random}$  – випадкове число  $[0; 1]$ , отримане генератором випадкових чисел [29];  $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$  – мінімальне і, відповідно, максимальне можливе значення обмеження на швидкість АТЗ через параметри трафіку.

Крім  $V_i(x)$  і  $V_{\max}(x)$  використовуються додаткові змінні та масиви, а саме  $V_{w.\max}(x)$  це є масив обмежень по максимальній швидкості, який сформовано в результаті рандомізації по дистанції  $W$ . Якщо в ІМ масив  $V_{\max}(x)$  вважається наперед невідомим, однак інформація про цей масив є невизначеною, то масив даних  $V_{w.\max}(x)$  для водія є відомим, але тільки на горизонт планування  $W$ . Масив  $V_{w.\max}(x)$  обчислюємо за виразом:

$$V_{w.\max}(x) = V_{\max}(x) \cdot (1 - \text{random}(W)/W), \quad (5)$$

де  $\text{random}(W)$  – випадкове число на інтервалі  $[0; W]$ .

Відповідно до виразу (5) точність визначення  $V_{w.\max}(x)$  зменшується зі зростанням  $W$ .

Також додатковими параметрами ІМ є:

–  $\bar{V}$  – середня швидкість на маршруті за програмою  $V_i(x)$ :

$$\bar{V} = \frac{\sum_{x=0}^{L_{\max}} V_i(x)}{L_{\max}}; \quad (6)$$

–  $T_z(x)$  – запланований час проїзду ділянки  $x$ , який визначається тільки в межах горизонту прогнозування  $W$  за формулою:

$$T_z(x) = T_z(x-1) + \frac{1}{\min(\bar{V}, V_{\max}(x))}; \quad (7)$$

- $V_z(x)$  – запланована швидкість на ділянці  $x$ , яка визначається тільки в межах горизонту прогнозування  $W$ ;
- $\bar{T}(x)$  – середній плановий час проходження ділянки  $x$  маршруту, визначається за середньою швидкістю  $\bar{V}$ :

$$\bar{T}(x) = \frac{x}{\bar{V}}. \quad (8)$$

Зміст методики ІМ полягає у тому, що дійсна програма керування  $V(x)$  планується що циклу, при зміні ділянок  $x$  в межах  $(x_{i+w}-x_i)=W$ . На довжині такого циклу здійснюється вибір швидкості  $V(x)$  в рамках програм  $V_{w.\max}(x)$  і  $V_i(x)$ . При цьому дозволене відхилення  $V(x) > V_i(x)$ , або  $V(x) < V_i(x)$ , якщо це вимушено транспортними умовами, однак заборонене відхилення  $V(x) > V_{w.\max}(x)$ . Оскільки програма  $V_{w.\max}(x)$  є апроксимована за змістом відносно дійсних обмежень швидкості  $V_{\max}(x)$ , то в кінці кожного циклу виконується корекція програми  $V(x)$  на наступний цикл, на основі бажаної швидкості, яка мала б бути досяжною в кінці прогнозованої дистанції. Середня бажана швидкість на дистанції  $W$  визначається за виразом:

$$V_{des} = \frac{W}{T_z(W \cdot x + W) - T_x(W \cdot x)}, \quad (9)$$

де  $T_z(W \cdot x + W)$  – плановий час проїзду кінцевої ділянки горизонту прогнозування  $W$ , який обчислено за виразом (7);  $T_x(W \cdot x)$  – фактичний час приїзду на початок дистанції з врахуванням відхилень від оптимальної програми  $V_i(x)$ , та запізнь по розкладу.

Коригування розкладу виконується шляхом пошуку ймовірних резервів часу за рахунок відхилень від швидкості:

$$D(x) = V_{w.\max}(x) - V(x). \quad (10)$$

Знайдена множина значень  $D(x)$  сортується в спадному порядку. Після цього, використовуючи принцип і алгоритм Джонсона [30], вибираються спочатку ті ділянки, де резерв збільшення швидкості є мінімальним і для них встановлюється вища, ніж запланована, швидкість  $V(x) := V_{w.\max}(x)$ . Далі перевіряється досяжність запланованого алгоритму і, якщо час проходження кінцевої ділянки дистанції відповідає розкладу, то корекція завершується. В іншому випадку вибирається наступний наявний резерв вимушеного збільшення швидкості. Таким чином відбувається динамічне наближення до оптимального розв'язання задачі вибору програми руху. Як свідчать результати досліджень, алгоритм Джонсона забезпечує апроксимовану оптимізацію [31]. Блок-схема алгоритму ІМ подана на рис. 1, 2.

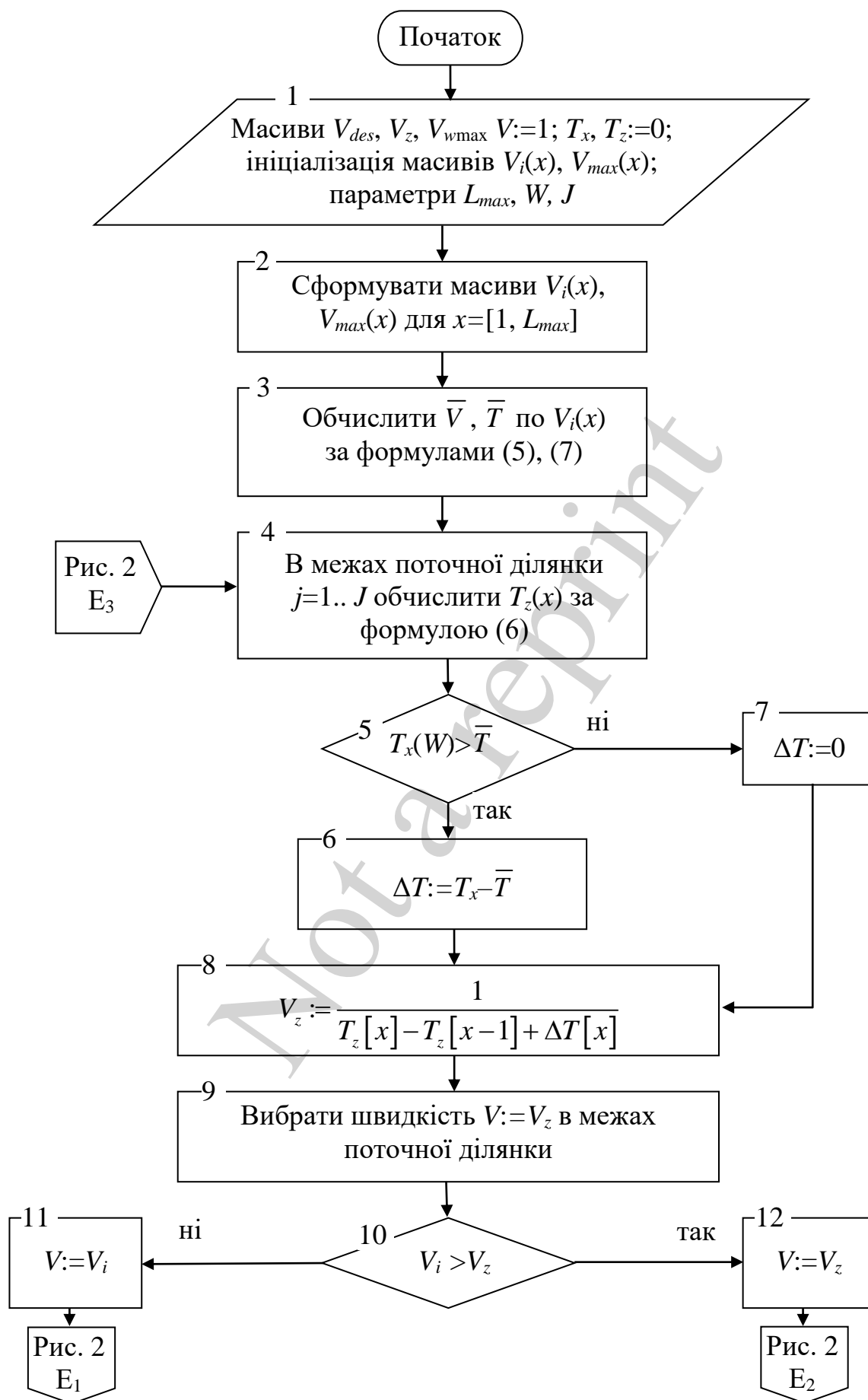


Рис. 1. Блок-схема алгоритму ІМ (початок)

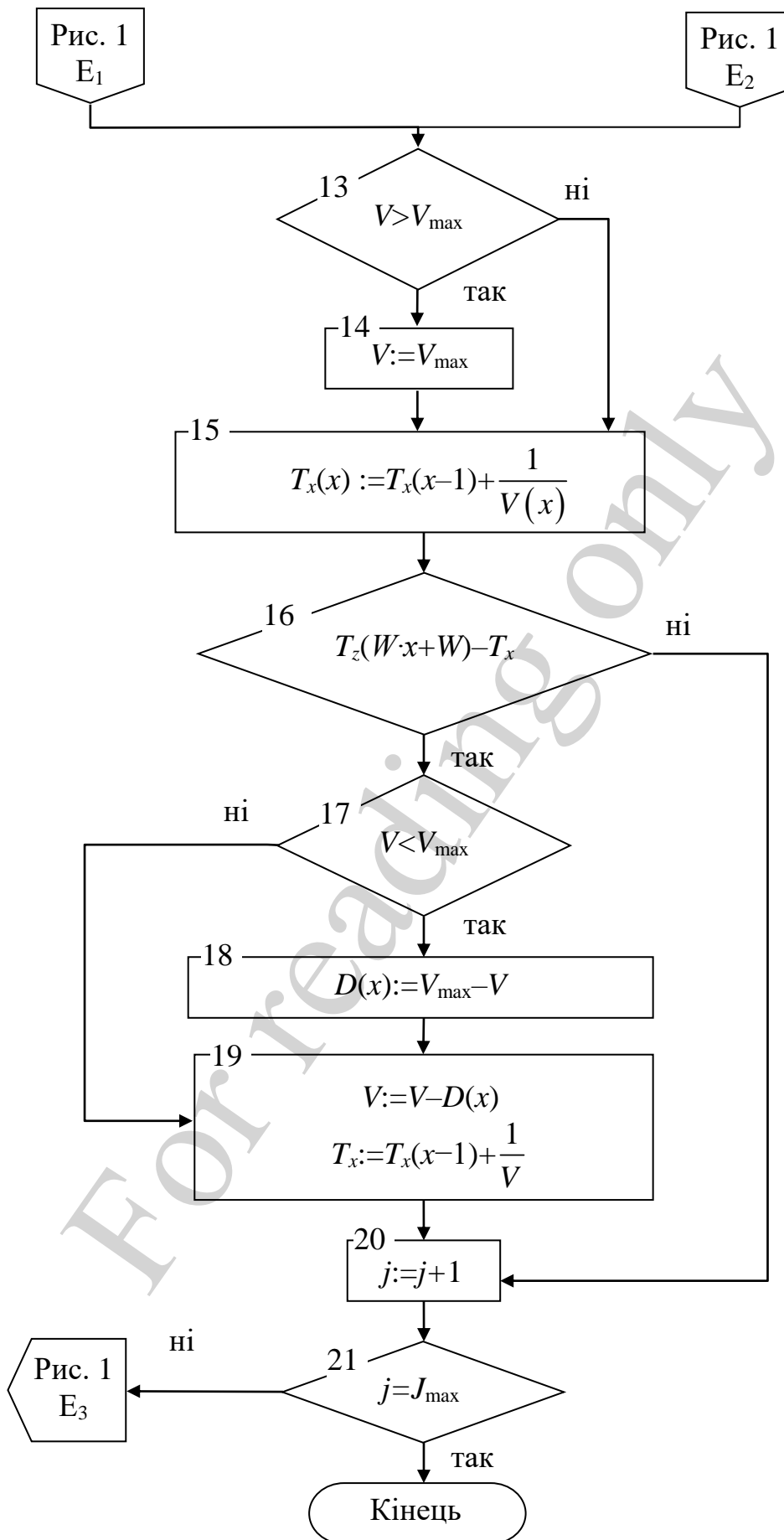


Рис. 2. Блок-схема алгоритму ІМ (продовження)

## 5. Підготовка масиву вхідних даних та імітаційне моделювання

Для виконання процесу ІМ було підготовлено початкові дані, які описують автомагістральну дорогу, з обмеженнями швидкості. Аналог початкових даних стосується частини траси європейського автомобільного маршруту Е-372 на ділянці маршруту Тернопіль – Львів (Україна) станом на початок 2020 року. Початкові дані розділено на дорожні й транспортні умови. Початковий пункт маршруту – автозаправна станція, вул. Львівська, 36, м. Тернопіль. Кінцевий пункт маршруту – станція ТІР в смт. Малехів, Львівської області. 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 і в населених пунктах. Максимальна швидкість на дорозі обмежена до 25 м/с. Розглядався автопоїзд у складі автомобіля-тягача DAF XF 105, об'єм двигуна 12,9 л з напівпричепом Cogel Cargo SN 24, повна маса автопоїзда – 38400 кг. Для заданих дорожніх умов обчислено тяговошвидкісні характеристики автопоїзда і визначено оцінні режими вільного, рівномірного руху для характерних ділянок траси Е-372. Дані наведено для погодних умов: середньодобова температура повітря – +19 °С, швидкість вітру – не більше 10 м/с, без опадів. Середня розрахункова швидкість вільного руху для даного маршруту становить 21,3 м/с. Для характеристики профілю дорожніх умов було застосовано математичне сподівання  $E(V_i)$  та стандартне відхилення швидкості  $\sigma(V_i)$ . Швидкість – це найважливіший похідний показник серед транспортно-експлуатаційних показників автомобільних доріг. Оскільки швидкість АТЗ – випадкова величина, то для оцінювання способу отримання інформації про неї, необхідно знати величини  $E(V_i)$  і  $\sigma(V_i)$ . Очевидно, що  $E(V_i)$  та  $\sigma(V_i)$  також є випадковими величинами, які, до того ж, залежать від  $L_{\max}$ . Однак дисперсія цих оцінок є набагато меншою, ніж дисперсія процесу  $V_i(t)$ , тому знання оцінок  $E(V_i)$  і  $\sigma(V_i)$  є достатнім для характеристики дорожніх умов. Відносні характеристики траси маршруту, згідно з приведеними початковими даними, дано для типових 12 ділянок. Кожна ділянка представляє одну категорію дороги згідно з ДБН В.2.3-4:2015. Завдяки таким оцінкам отримана можливість впорядкувати вхідні дані, які отримані за генератором випадкових чисел за виразом (3). Початкові дані підготовлено для автостради довжиною  $L_{\max}=125000$  м. Для досліджень приймалися відносні величини. Довжина пройденого шляху маршруту вимірювалась кількістю найменших ділянок маршруту. Довжину найменшої ділянки прийнято  $x=25$  м. Прийнята величина впливає з того, що при максимальному прискоренні/сповільненні вантажного автопоїзда на автомагістралі, на вищих передачах, яке не перевищує значення  $0,4$  м/с<sup>2</sup>, його швидкість змінюється в межах 3 %. Це означає, що в межах дистанції  $x=25$  м швидкість АТЗ можна вважати сталою. Для ІМ таке перетворення дає змогу застосувати дискретний масив вхідних даних. Таким чином,  $L_{\max}=5000x$ . Горизонт прогнозування  $W$  змінювався в межах  $10x \dots 5000x$ . Найменший горизонт  $10x$  може бути забезпечений інформацією, яка отримана оперативним візуальним спостереженням водія. Дорожні умови приймалися сталими при зміні транспортних умов. Розрахункові значення середніх енергоощадних швидкостей вільного руху, відповідно до дорожніх умов подано в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика ділянок маршруту Львів–Тернопіль

| № ділянки | Відстань від початкового пункту, м | Довжина ділянки, м | Середня швидкість автопоїзда, м/с | Відносні одиниці швидкості |                       |
|-----------|------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------|
|           |                                    |                    |                                   | математичне сподівання     | стандартне відхилення |
| 1         | 0                                  | 4400               | 21,0                              | 0,837                      | 0,019796              |
| 2         | 4400                               | 12400              | 22,5                              | 0,876                      | 0,019357              |
| 3         | 16800                              | 2600               | 12,5                              | 0,534                      | 0,043717              |
| 4         | 19400                              | 9500               | 22,5                              | 0,901                      | 0,028936              |
| 5         | 28900                              | 5400               | 14,0                              | 0,526                      | 0,029262              |
| 6         | 34300                              | 8000               | 22,3                              | 0,892                      | 0,028927              |
| 7         | 42300                              | 3700               | 12,1                              | 0,484                      | 0,040526              |
| 8         | 46000                              | 11500              | 22,5                              | 0,893                      | 0,030205              |
| 9         | 57500                              | 44500              | 23,2                              | 0,922                      | 0,020113              |
| 10        | 102000                             | 10000              | 19,5                              | 0,782                      | 0,022139              |
| 11        | 112000                             | 9000               | 24,8                              | 0,992                      | 0,022753              |
| 12        | 121000                             | 4000               | 19,5                              | 0,782                      | 0,019596              |

Застосовано 14 наборів початкових даних стосовно різних транспортних умов, які спостерігались на трасі Тернопіль–Львів. Характеристики подані в табл. 2. Дані вибрано з тахограм вантажних автопоїздів, які виконували даний маршрут. Профілі швидкості  $V_{\max}$  не мають характерних ділянок.

Таблиця 2

Характеристика початкових даних

|                    |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Показник           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      |
| $E(V_{\max})$      | 0,8    | 0,8    | 0,8    | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,7    |
| $\sigma(V_{\max})$ | 0,0032 | 0,0024 | 0,0016 | 0,0008 | 0,0004 | 0,0041 | 0,0031 |
| Показник           | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     |
| $E(V_{\max})$      | 0,70   | 0,7    | 0,7    | 0,6    | 0,6    | 0,6    | 0,6    |
| $\sigma(V_{\max})$ | 0,0024 | 0,0016 | 0,0008 | 0,0032 | 0,0024 | 0,0016 | 0,0008 |

Приклад траєкторії швидкостей для набору початкових даних № 1 подано на рис. 3.

З поданого фрагменту вхідних даних видно, що швидкість АТЗ може змінюватись, враховуючи дорожні і транспортні умови в межах  $V \in [0,45; 1,0]$  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 швидкості вантажного автопоїзда  $V$ . Це, наприклад, є ділянки 3, 5, 7. Для ділянки № 3 середня енергоощадна швидкість вантажного АТЗ  $V_i=0,54$  (13,5 м/с), а обмеження по транспортних умовах –  $V_{\max}=0,896$ . Таке співвідношення швидкостей пов'язане із незадовільними дорожніми умовами. Також є ділянки, на яких  $V_{\max}$  є обмеженням для  $V$ . Для прикладу, це є ділянки  $x=2, 4, 8$  та інші. Це означає,



що при виборі і корегуванні програми руху водій повинен керуватись трьома величинами:  $V_i$ ,  $V_{\max}$ ,  $V_z$ .

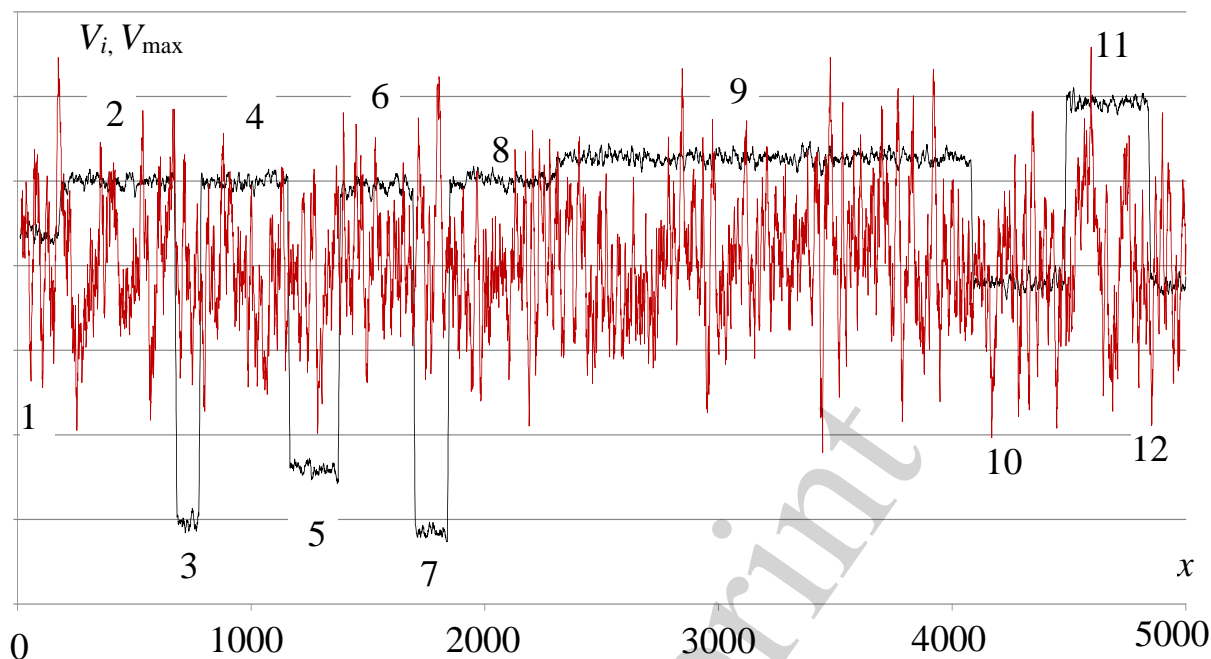


Рис. 3. Осцилограми профілю швидкостей на маршруті Тернопіль–Львів, обмеженого дорожніми й транспортними умовами: чорного кольору – обмеження по дорожніх умовах  $V_i$ ; червоного кольору – обмеження по транспортних умовах  $V_{\max}$  (лінійно фільтровані по 10 точках ряди); 1–12 – № ділянки

ІМ було двохстадійне. На першій стадії згенеровано масиви початкових даних  $V_i(x)$  та  $V_{\max}(x)$  за виразами (3) і (4). 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.

## 6. 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 (11), та відхилення від запланованого розкладу поїздки  $\Delta T$  по часу (12).

$$DV = \sum_{x=1}^{L_{\max}} \sqrt{(V(x) - V_i(x))^2}. \quad (11)$$

$$\Delta T = t(L_{\max}) - T_{\max}, \quad (12)$$

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

В результаті ІМ було отримано залежності  $DV(W)$ ,  $\Delta T(W)$  (рис. 4, 5). Залежності  $DV(W)$  на рис. 4 подано для набору даних: № 1 (табл. 1).

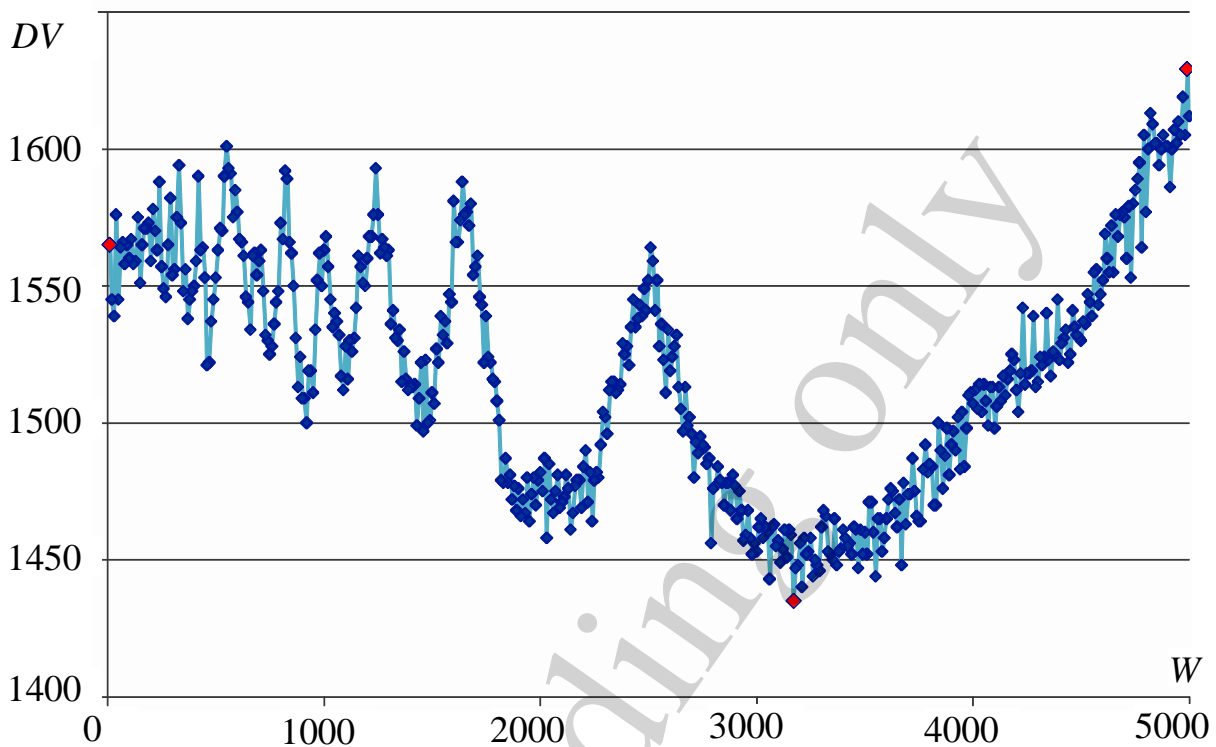


Рис. 4. Залежність сумарного відхилення програми  $DV$  від горизонту прогнозування  $W$  при  $E(V_{\max})=0,8$  і  $\sigma(V_{\max})=0,0032$

Набір № 1 характеризується високим значенням рівня середньої швидкості ( $V_{\max}=0,8$ ) і відносно невисокою дисперсією ( $\sigma=0,0032$ ). Залежності  $DV(W)$  для наборів даних № 2–№ 14 мають подібні характерні ознаки. Вид залежностей  $DV(W)$  наборів № 1–№ 14 не відрізняються принципово. Результати моделювання – часові ряди. Лінії трендів усі залежностей  $DV(W)$  мають кусково-неперервний характер. Інтервали між стрибками в залежностях збільшуються із зростанням  $W$ . При значеннях  $W < 1000$  монотонність лінії тренду відсутня. Межі кожної неперервної ділянки відповідають числовим значенням аргумента  $W$ , які є кратними довжині маршруту  $L_{\max}$ . Кожна ділянка залежності  $DV(W)$  може бути описана параболічною залежністю і має мінімум  $DV_{\min}$ .

Залежність  $\Delta T(W)$  (рис. 5), а також усі залежності для наборів вхідних даних № 2–№ 14 є також часовими рядами.

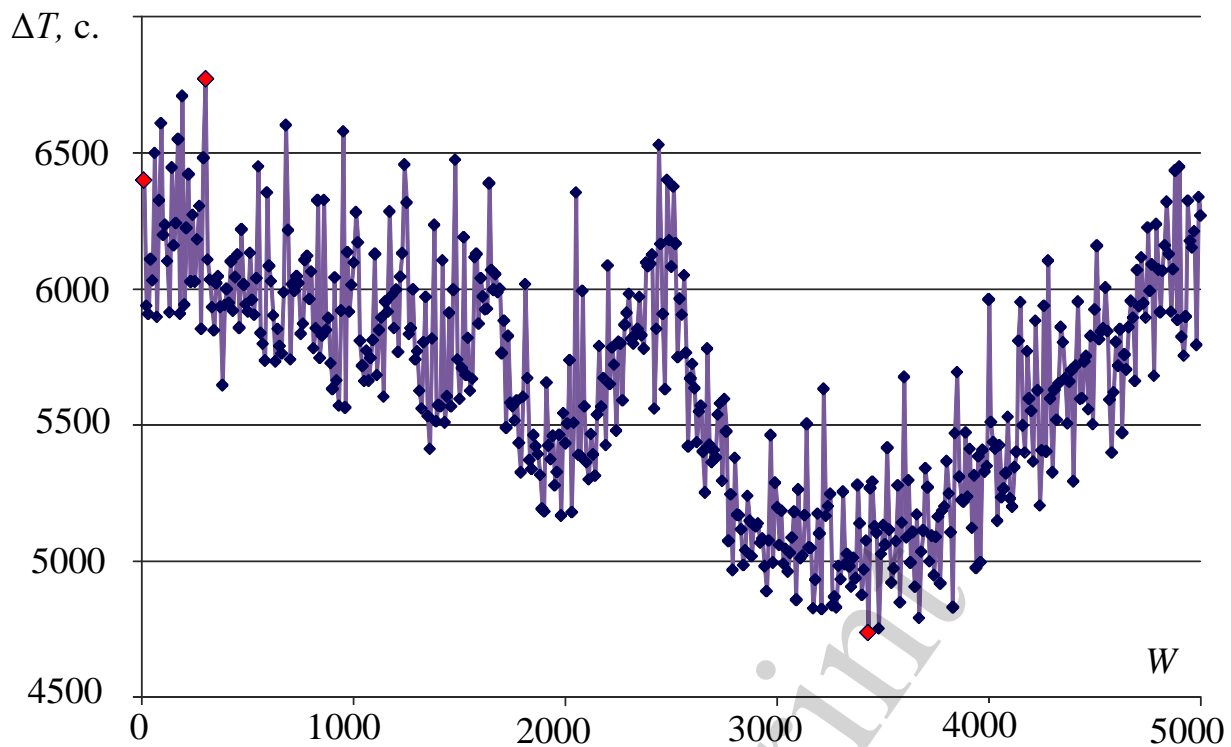


Рис. 5. Залежність сумарного відхилення оптимального розкладу від горизонту прогнозування  $W$  при  $\sigma(V_{\max})=0,0012$  і  $E(V_{\max})=0,85$

Для будь-якої залежності  $\Delta T(W)$ , згідно із вхідним набором даних, характерні ті ж ознаки, що й для  $DV(W)$ . Екстремуми залежностей  $\Delta T(W)$  відображаються, приблизно, при тих самих значеннях  $W$ , що й для залежностей  $DV(W)$ . Це ж стосується глобальних оптимальних значень  $W$  для  $\Delta T(W)$  і для  $DV(W)$  для будь-яких  $\sigma(V_{\max})$  і  $E(V_{\max})$ . Наприклад, найменше сумарне відхилення від запланованого розкладу  $\Delta T_{\min}=4735$  с для  $\sigma(V_{\max})=0,0033$  і  $E(V_{\max})=0,8$  (набір № 1) спостерігається при  $W=3430$ . А найменше значення  $DV_{\min}=1435$  – при  $W=3480$ .

На кожній з отриманих залежностей  $DV(W)$  і  $\Delta T(W)$  можна відмітити такі характерні крапки (червоні крапки): глобальні мінімальні значення показників  $DV_{\min}$ ,  $\Delta T_{\min}$ ; глобальні максимальні значення показників  $DV_{\max}$ ,  $\Delta T_{\max}$ ; числове значення показника, яке відповідає мінімальному горизонту прогнозування  $W_{\min}=10$  (250 м). Елемент часового ряду при  $W_{\min}$  відображає той випадок, коли водій, виконуючи транспортне завдання, не керується жодним зовнішнім прогнозом стосовно обмежень по швидкості, а вибирає швидкість, яка максимально наближена до обмеження по транспортних умовах  $V_{\max}$ . У такому випадку водій не дотримується ні критерію максимальної економності, ні критерію точного виконання розкладу. Як видно з рис. 4, 5, числові значення оцінок  $DV$  і  $\Delta T$  при  $W_{\min}$  становлять суттєву різницю з мінімальними оцінками.

Для кожного змодельованого значення  $W$  було отримано розклад руху, який базується на вибраній швидкості з альтернативних  $V_i$  та  $V_z$ , при обмеженні  $V < V_{\max}$ . Фрагмент оптимального розкладу для набору вхідних даних № 1 подано на рис. 6.

Дійсний час=10779 с  
 Запланований час=5957 с  
 Середня дійсна відносна швидкість 0.46  
 Середня відносна швидкість по дорожніх обмеженнях 0.84  
 Середня відносна швидкість по транспортних обмеженнях 0.69  
 Сумарне відхилення від програми руху 1450  
 Сумарне відхилення від розкладу руху 4822 с  
 Кількість ділянок 2  
 Горизонт прогнозування 3170  
 St\_dev\_Vi =0.0017 Stdev\_Vmax=0.0041  
 Viaver =0.865 Vmaxaver=0.805  
 \*\*\*\*\*  

| x    | Vi   | Vmax | Vz   | V    | Vdev  | Tx       |
|------|------|------|------|------|-------|----------|
| 1    | 0.83 | 0.94 | 0.84 | 0.84 | -0.01 | 1.19     |
| 2    | 0.85 | 1.01 | 0.84 | 0.85 | 0.00  | 2.37     |
| 3    | 0.82 | 0.52 | 0.52 | 0.52 | 0.30  | 4.30     |
| 4    | 0.81 | 0.66 | 0.66 | 0.66 | 0.15  | 5.82     |
| 5    | 0.84 | 1.04 | 0.84 | 0.84 | 0.00  | 7.01     |
| 6    | 0.83 | 1.14 | 0.84 | 0.84 | -0.01 | 8.20     |
| 7    | 0.86 | 1.25 | 0.84 | 0.86 | 0.00  | 9.36     |
| 8    | 0.82 | 1.02 | 0.84 | 0.84 | -0.02 | 10.55    |
| 9    | 0.83 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.06  | 11.84    |
| 10   | 0.84 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.19  | 13.38    |
| ...  |      |      |      |      |       |          |
| 4995 | 0.75 | 0.83 | 0.45 | 0.45 | 0.30  | 10769.30 |
| 4996 | 0.80 | 0.91 | 0.75 | 0.75 | 0.06  | 10770.64 |
| 4997 | 0.81 | 0.94 | 0.62 | 0.62 | 0.19  | 10772.25 |
| 4998 | 0.80 | 0.48 | 0.29 | 0.29 | 0.51  | 10775.72 |
| 4999 | 0.80 | 1.01 | 0.84 | 0.84 | -0.04 | 10776.92 |
| 5000 | 0.80 | 0.54 | 0.39 | 0.39 | 0.41  | 10779.45 |

Рис. 6. Фрагмент роздруку оптимального розкладу руху

Транспортні умови змінювались при ІМ за математичним сподіванням швидкості і його стандартним відхиленням. При цьому, завдяки генератору випадкових чисел, було отримано вхідні послідовності даних, подані в табл. 2. Масиви вхідних даних відрізняються математичним сподіванням, яке набувало числових значень  $E(V_{max})$ : 0,8, 0,7, 0,6. Середньоквадратичне відхилення числових значень масивів  $\sigma(V_{max})$  становить: 0,0041, 0,0032, 0,0024, 0,0016, 0,0008, 0,0004. Числове значення  $\sigma(V_{max}) < 0,0004$  – практично неможливе, оскільки воно означає, що транспортні умови на маршруті не змінюються, що на даній трасі не спостерігалось. Числове значення  $\sigma(V_{max}) > 0,0041$  за даними тахокарт на даній автомобільній магістралі не було виявлено. В межах отриманих діапазонів даних було побудовано гістограми залежностей  $DV_{min}(\sigma, E)$  (рис. 7) і  $\Delta T_{min}(\sigma, E)$  (рис. 8).

Усі емпіричні залежності є зростаючими на заданій області визначення. На рис. 8 помітно більш стрімке зростання залежностей  $\Delta T_{min}(\sigma)$ , ніж  $DV_{min}(\sigma)$ . Також помітний більш вагомий вплив математичного сподівання  $E(V_{max})$  на параметри якості керування, ніж стандартного відхилення  $\sigma(V_{max})$ .

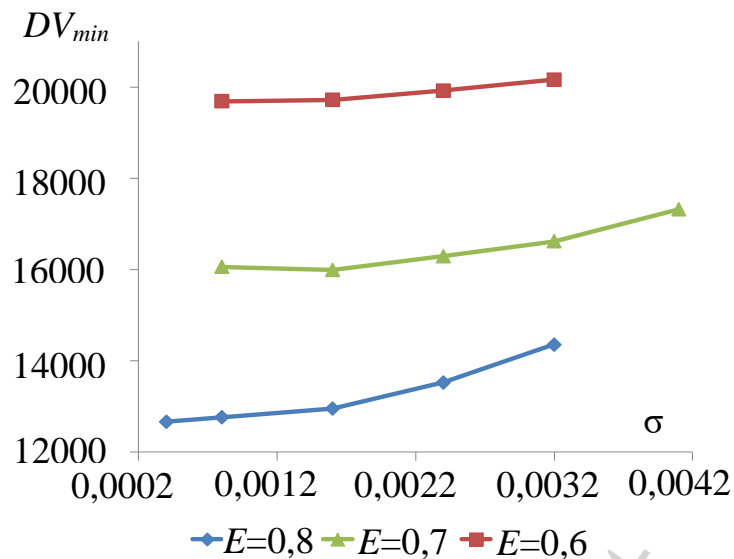


Рис. 7. Емпірична залежність мінімального сумарного відхилення від оптимальної програми руху при різних транспортних обмеженнях

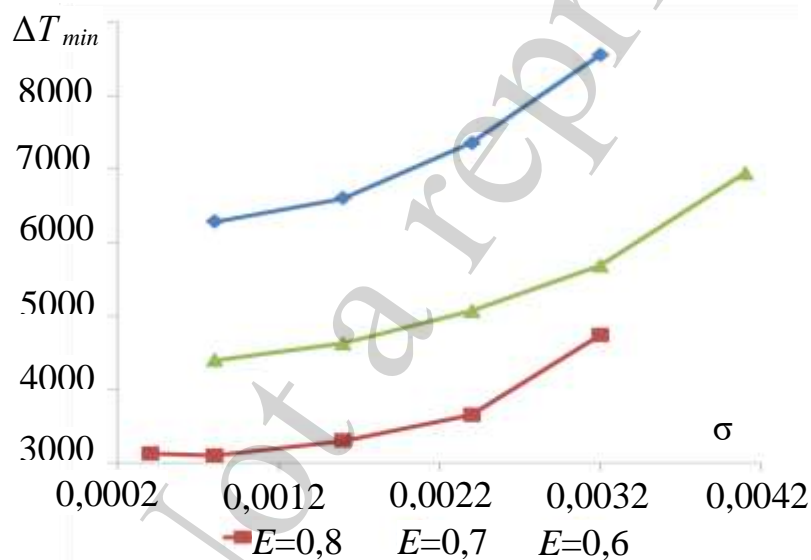


Рис. 8. Емпірична залежність мінімального сумарного відхилення від оптимального розкладу руху при різних транспортних обмеженнях

## 7. Обговорення результатів моделювання процесу прогнозування та вибору швидкості

Головним результатом застосування ІМ є виявлення закономірностей процесу оптимального керування АТЗ з використанням довготермінових прогнозів швидкості, в умовах міжміських перевезень. Алгоритм ІМ, що відображений блок-схемою на рис. 1, 2, базується на використанні інформаційних ресурсів керування автомобілем, які є доступні водієві. Так, згідно з блоками 9–12 алгоритму, на кожному дискретному кроці процесу керування перед водієм постає вибір швидкості між  $V_i$ ,  $V_z$  і  $V_{max}$ . З трьох значень потрібно вибрати найменшу швидкість. Згідно з рис. 3, 6, для конкретного транспортного засобу існують такі стани,

коли оптимальна програма руху і графік руху не виконуються через дорожні, або транспортні обмеження. Наприклад, на початку горизонту прогнозування,  $x=10$  є інформація про те, що кроці  $x=8$  (рис. 6) у зв'язку з транспортними умовами поточною швидкістю АТЗ доцільно збільшити на 0,02 одиниці. Таке збільшення приведе до реалізації бажаного розкладу руху загалом, що виражено часом прибуття точно за графіком, або з мінімальними відхиленнями від графіку в кінці маршруту. Однак при цьому відбудеться відхилення від оптимальної за енергоощадністю програми на 0,02 одиниці. Тому в звичайних умовах водій мало ймовірно збільшить швидкість, якщо він застосовує критерій ошадної їздки. Представлений алгоритм дає змогу зважити доцільність використання вказаної можливості збільшення швидкості, враховуючи усі можливі ситуації впродовж прогнозованого горизонту  $W$ . З рис. 6 видно, що таких ситуацій є на маршруті достатньо. Зміст алгоритму, фактично, полягає в оптимальному перерозподілі відомих ресурсів зміни швидкості з метою отримати мінімальні значення критеріїв (11), (12). На відміну відомих розподільчих алгоритмів, даний алгоритм використовує евристичний принцип оптимізації Джонсона: оптимальне рішення досягається при використанні спочатку найменших за обсягом ресурсів – до найбільших. Крім цього, в алгоритмі застосовано процедуру коригування швидкості відносно запланованого розкладу по мірі отримання додаткової інформації. Таким чином вдалось досягнути зменшення відхилень як від оптимальної енергоощадної програми, так і від запланованого розкладу руху, у порівнянні з традиційним оперативним керуванням АТЗ без довготермінового прогнозу. На рис. 4, 5 червоною крапкою скраю ліворуч показано той випадок, коли  $W=10$ , тобто водій використовує інформацію про дорожні і транспортні умови у межах візуального огляду (приблизно 250 м). Для вхідного набору даних № 1 це приводить до затримок у виконанні транспортного завдання на 6400 с і сумарного відхилення від оптимальної швидкості на 1565 одиниць. При збільшенні горизонту прогнозування до, 80 км сумарне відхилення від розкладу зменшується до 4735 с, тобто скорочується, приблизно, на 1665 с, що становить 27,9 % від тривалості запланованого циклу. Відхилення від оптимальної швидкості скорочується на 121 одиницю, тобто 7,2 % від випадку  $W=10$ . Однак такий результат можна отримати при найбільш сприятливих обставинах, тобто коли водій вибрав правильне рішення стосовно швидкості. При відсутності інформації можуть проявитись несприятливі обставини. На рис. 4, 5 це є точка, яка відображає максимальне відхилення від умов руху, зумовлене випадковим характером трафіку. У цьому випадку сумарні відхилення від оптимальної програми можуть сягати 1629 одиниць, а від оптимального розкладу – на 6771 с що, відповідно, на 118 одиниць швидкості й на 2036 с більше, ніж очікувана якість керування. При зменшенні математичного сподівання середньої швидкості трафіку, і збільшенні її стандартного відхилення, згідно із залежностями на рис. 7, 8, різниця між керуванням з довготерміновим прогнозом і керуванням на основі візуальної оперативної інформації будуть ще більшими. Адже водій транспортного засобу має намір рухатись по маршруту з середньою швидкістю  $V_{z,2} > V_{z,1}$ , де індекси 1 і 2 відповідають умовам руху, для яких, відповідно,  $E_2(V_{\max}) < E_1(V_{\max})$ . Проте, мінливість транспортних умов приводить до більших затримок, які, згідно з алгоритмом на рис. 1, 2, приведе до збільшення  $DV$  і  $\Delta T$ .

Однак застосування алгоритму планування оптимального руху має обмеження стосовно обсягу інформації, яку доцільно використовувати водієві при виконанні запланованої поїздки. Враховуючи відхилення прогнозування, які відображені у величині  $\sigma(V_{\max})$ , швидкість руху АТЗ може суттєво відрізнятись від запланованої. Так, при наборі вхідних даних № 1  $E(V_{\max})=0,8$ , а  $\sigma(V_{\max})=0,0032$  на одному кроці очікувана швидкість може змінюватись в межах  $0,8 \pm 0,064$  одиниць. В абсолютних одиницях це становить  $20 \pm 1,6$  м/с. Якщо горизонт прогнозування зростає, наприклад до  $W=2500$  (62,5 км), то наприкінці періоду прогнозування очікувана швидкість варіює в межах  $0,8 \pm 0,132$  одиниці  $20 \pm 3,3$  м/с. Таке відхилення вносить невизначеність у програму руху, внаслідок чого водій не буде здатен забезпечити оптимальну програму руху. Тому має відбутись корекція програми на основі надходження чергової інформації. Цим можна пояснити екстремальний характер часових рядів показників якості керування АТЗ при зміні горизонту прогнозування. Екстремум кожного отриманого часового ряду пояснюється суперечністю таких факторів. З одного боку, чим довший прогноз трафіку виконано, тим раціональніші рішення можуть бути прийняті. З іншого боку, розмитість вхідних даних зростає разом із збільшенням  $W$ . Таким чином, на рис. 4, 5 можна відмітити ті значення горизонту прогнозування, які відповідають найповнішому використанню інформації при довготерміновому прогнозуванні. На рисунках – це мінімальні відносно  $DV$  і  $\Delta T$  віддалі. Якщо взяти до уваги залежності на рис. 7, 8, то горизонт прогнозування потрібно також коректувати відносно статистичної оцінки параметрів трафіку. Зі збільшенням математичного сподівання середньої швидкості автомобілів у магістральному потоці зростають вимоги до точності визначення прогнозів, має бути меншим стандартне відхилення.

Результати ІМ вибору швидкості руху АТЗ відкривають нові можливості для впровадження ІТС на автомагістральних дорогах. Це проявляється у виявлених явищах прийому і використання інформаційних потоків. На відміну від відомих технологій навігації автомобільного транспорту, а також ІТС, застосування запропонованої методики і алгоритму дає змогу розробляти і дотримуватись оптимальних програм руху не тільки оперативно, але й довготерміново. При цьому розв'язується проблема керування великими потоками даних. Користуючись розробленою методикою, інформацію для прогнозування можна подавати частинами, з обгрунтованою періодичністю.

Отримані результати стосуються лише міжміських магістральних доріг і їх можна рекомендувати для транспортних потоків, середня швидкість автомобілів в яких має стандартне відхилення, не більше 8 % від очікуваного.

Разом з цим, не досліджено деякі аспекти отриманих закономірностей, які потрібно продовжити в майбутніх дослідженнях. По-перше, потрібно з'ясувати механізм дотримання програми керування АТЗ за динамічними показниками, під якими розуміється прискорення/сповільнення на маршруті. Адже при невеликих довжинах маршруту розмір ділянки  $x$ , на якому приймалась сталою середня швидкість, похибки оптимального контролю будуть значними. По-друге, майбутні дослідження систем круїз-контролю вимагатимуть інтегрованого підходу до технологій прийому, передачі даних, комунікації суб'єктів трафіку і вибору керуючих дій.

## 8. Висновки

1. У запропонованій методиці і алгоритмі керування АТЗ на міжміській магістральній дорозі показана можливість дотримуватись оптимальної за енергоощадністю руху за рахунок використання довготермінового прогнозування обмежень швидкості. При прогнозуванні параметрів транспортного потоку на відстані понад 75 км на заданому маршруті можна скоротити сумарні відхилення від оптимальної швидкості на 7,2 % в порівнянні з оперативним контролем трафіку в межах видимості водія. Затримки часу можна скоротити від 27 %.

2. При обґрунтуванні горизонту прогнозування швидкості автомобіля в поточці потрібно вибирати оптимальну відстань маршруту, яка пов'язана з розсіюванням очікуваної швидкості, а також із загальною довжиною маршруту. На дослідженому маршруті по трасі Е-372 Тернопіль – Львів доцільний горизонт прогнозування може становити одну з трьох величин: 35,5, 50, або 79 км при очікуваній швидкості 20 м/с і її стандартному відхиленню 0,0825 м/с. Менші горизонти прогнозування для дотримання оптимальної швидкості в заданих умовах є недоцільні, оскільки малі горизонти не забезпечують більшої якості рішення, ніж коли вони можуть прийматись водієм при візуальному спостереженні оперативної обстановки. Якщо математичне сподівання швидкості зростає, а стандартне відхилення зменшується, то відповідні горизонти прогнозування потрібно збільшити.

## Література

1. Lai, W.-K., Kuo, T.-H., Chen, C.-H. (2016). Vehicle Speed Estimation and Forecasting Methods Based on Cellular Floating Vehicle Data. *Applied Sciences*, 6 (2), 47. doi: <https://doi.org/10.3390/app6020047>
2. Balid, W., Tafish, H., Refai, H. H. (2018). Intelligent Vehicle Counting and Classification Sensor for Real-Time Traffic Surveillance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19 (6), 1784–1794. doi: <https://doi.org/10.1109/tits.2017.2741507>
3. Qiu, T. Z., Lu, X.-Y., Chow, A. H. F., Shladover, S. E. (2010). Estimation of Freeway Traffic Density with Loop Detector and Probe Vehicle Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2178 (1), 21–29. doi: <https://doi.org/10.3141/2178-03>
4. Zhou, Y., Ravey, A., Péra, M.-C. (2019). A survey on driving prediction techniques for predictive energy management of plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 412, 480–495. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.11.085>
5. Волков, В. П., Грицук, І. В., Матейчик, В. П., Грицук, Ю. В., Волков, Ю. В. (2018). Особливості визначення швидкісних характеристик транспортного засобу в умовах експлуатації. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2, 38–43.
6. He, Z. (2017). Research based on high-fidelity NGSIM vehicle trajectory datasets: A review. doi: <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.11429.60643/1>
7. Ye, F., Hao, P., Qi, X., Wu, G., Boriboonsomsin, K., Barth, M. J. (2019). Prediction-Based Eco-Approach and Departure at Signalized Intersections With Speed Forecasting on Preceding Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20 (4), 1378–1389. doi: <https://doi.org/10.1109/tits.2018.2856809>



8. Coifman, B., Li, L. (2017). A critical evaluation of the Next Generation Simulation (NGSIM) vehicle trajectory dataset. *Transportation Research Part B: Methodological*, 105, 362–377. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.09.018>
9. Djuric, N., Radosavljevic, V., Coric, V., Vucetic, S. (2011). Travel Speed Forecasting by Means of Continuous Conditional Random Fields. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2263 (1), 131–139. doi: <https://doi.org/10.3141/2263-15>
10. Ma, Y., Chowdhury, M., Sadek, A., Jeihani, M. (2012). Integrated Traffic and Communication Performance Evaluation of an Intelligent Vehicle Infrastructure Integration (VII) System for Online Travel-Time Prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13 (3), 1369–1382. doi: <https://doi.org/10.1109/tits.2012.2198644>
11. Khan, S. M., Chowdhury, M., Morris, E. A., Deka, L. (2019). Synergizing Roadway Infrastructure Investment with Digital Infrastructure for Infrastructure-Based Connected Vehicle Applications: Review of Current Status and Future Directions. *Journal of Infrastructure Systems*, 25 (4), 03119001. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000507](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000507)
12. Li, L., Qu, X., Zhang, J., Wang, Y., Ran, B. (2019). Traffic speed prediction for intelligent transportation system based on a deep feature fusion model. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23 (6), 605–616. doi: <https://doi.org/10.1080/15472450.2019.1583965>
13. Roncoli, C., Bekiaris-Liberis, N., Papageorgiou, M. (2016). Use of Speed Measurements for Highway Traffic State Estimation: Case Studies on NGSIM Data and Highway A20, Netherlands. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2559 (1), 90–100. doi: <https://doi.org/10.3141/2559-11>
14. Liu, Z., Tan, H., Kuang, X., Hao, H., Zhao, F. (2019). The Negative Impact of Vehicular Intelligence on Energy Consumption. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 1–11. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/1521928>
15. Zhu, L., Holden, J., Wood, E., Gender, J. (2017). Green routing fuel saving opportunity assessment: A case study using large-scale real-world travel data. *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. doi: <https://doi.org/10.1109/ivs.2017.7995882>
16. Мокін, Б. І. (2007). Математичні моделі руху транспортних засобів, оптимальні за критерієм мінімуму витрат енергії, з урахуванням рельєфу. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 3, 28–33.
17. Barik, B., Krishna Bhat, P., Oncken, J., Chen, B., Orlando, J., Robinette, D. (2018). Optimal velocity prediction for fuel economy improvement of connected vehicles. *IET Intelligent Transport Systems*, 12 (10), 1329–1335. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5110>
18. Stotsko, Z., Oliskevych, M. (2017). Vehicle driving cycle optimisation on the highway. *Transport Problems*, 11 (2), 123–131. doi: <https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.2.12>
19. Dey, K. C., Yan, L., Wang, X., Wang, Y., Shen, H., Chowdhury, M. et. al. (2016). A Review of Communication, Driver Characteristics, and Controls Aspects of Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC). *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17 (2), 491–509. doi: <https://doi.org/10.1109/tits.2015.2483063>

20. Balid, W., Tafish, H., Refai, H. H. (2018). Intelligent Vehicle Counting and Classification Sensor for Real-Time Traffic Surveillance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19 (6), 1784–1794. doi: <https://doi.org/10.1109/tits.2017.2741507>
21. Prokudin, G., Chupaylenko, O., Dudnik, O., Dudnik, A., Omarov, D. (2016). Improvement of the methods for determining optimal characteristics of transportation networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (3 (84)), 54–61. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85211>
22. Hofmockel, J., Masino, J., Thumm, J., Sax, E., Gauterin, F. (2018). Multiple vehicle fusion for a robust road condition estimation based on vehicle sensors and data mining. *Cogent Engineering*, 5 (1). doi: <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1449428>
23. Do, L. N. N., Vu, H. L., Vo, B. Q., Liu, Z., Phung, D. (2019). An effective spatial-temporal attention based neural network for traffic flow prediction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 108, 12–28. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.09.008>
24. Sumit, S. H., Akhter, S. (2018). C-means clustering and deep-neuro-fuzzy classification for road weight measurement in traffic management system. *Soft Computing*, 23 (12), 4329–4340. doi: <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3086-0>
25. Zhang, F., Xi, J., Langari, R. (2017). Real-Time Energy Management Strategy Based on Velocity Forecasts Using V2V and V2I Communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18 (2), 416–430. doi: <https://doi.org/10.1109/tits.2016.2580318>
26. Fotouhi, A., Montazeri, M., Jannatipour, M. (2011). Vehicle's velocity time series prediction using neural network. *International Journal of Automotive Engineering*, 1 (1), 21–28.
27. Філіппов, В. В., Смірнова, Н. В., Леонтьєв, Д. М. (2015). Обґрунтування залежності витрати пального від дорожніх умов. *Автошляховик України*, 1-2, 46–49.
28. Chao, Q., Bi, H., Li, W., Mao, T., Wang, Z., Lin, M. C., Deng, Z. (2019). A Survey on Visual Traffic Simulation: Models, Evaluations, and Applications in Autonomous Driving. *Computer Graphics Forum*, 39 (1), 287–308. doi: <https://doi.org/10.1111/cgf.13803>
29. Johnson, A. P., Chakraborty, R. S., Mukhopadhyay, D. (2017). An Improved DCM-Based Tunable True Random Number Generator for Xilinx FPGA. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 64 (4), 452–456. doi: <https://doi.org/10.1109/tcsii.2016.2566262>
30. Delorme, M., Iori, M., Martello, S. (2016). Bin packing and cutting stock problems: Mathematical models and exact algorithms. *European Journal of Operational Research*, 255 (1), 1–20. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.030>
31. Prokudin, G., Chupaylenko, O., Dudnik, O., Prokudin, O., Dudnik, A., Svatko, V. (2018). Application of information technologies for the optimization of itinerary when delivering cargo by automobile transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (3 (92)), 51–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.128907>