

УДК 656.11:004.942

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174255

Розроблення методики прогнозування швидкості автомобіля в інтелектуальній магістральній транспортній системі

Г. С. Прокудін, М. С. Оліскевич, О. А. Чупайленко, О. С. Дудник

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. Кількість об'єктів в полі поповнюється періодично і є сталою. Усі клітинки зліва і справа початку відліку автомата утворюють інформаційне поле, або загальну довжину автомата. Висота автомата залежить від виду магістралі, яка моделюється. Правила переміщення об'єктів в сітці автомата на кожній ітерації є скінченні, сталі й подібні до автомата Шрекенберга, за виключенням рандомізації, яка в цій моделі зводиться до мінімуму. Такий автомат відображає відносні швидкості автомобілів потоку відносно спостерігача, а також має можливість відтворювати прискорення. На кожній ітерації обчислюється зміна швидкостей автомобілів потоку. Алгоритм імітації запрограмовано на Делфі. Виконано приклад моделювання руху автомобіля на трасі міжнародного значення E-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. Ступінь узгодження теоретичної залежності з емпіричними даними є дуже високий. На основі отриманих залежностей було обґрунтовано вибір прямого діагностичного параметра транспортного потоку

Ключові слова: транспортний потік, магістраль, клітковий автомат, ковзне вікно, відносна швидкість, інтелектуальна транспортна система

1. Вступ

У зв'язку з тим, що обсяги перевезення вантажів в останні роки стрімко зростають, кількість вантажних автомобілів й автопоїздів, та їх середня швидкість руху постійно збільшуються. Це приводить і до негативних наслідків, таких як ускладнення дорожнього руху, погіршення екологічної ситуації довкола транспортної мережі, підвищення кількості випадків аварій на дорогах, у тому

числі – з летальними наслідками. Удосконалення мережі доріг не завжди вирішує ці проблеми. Фахівці з керування транспортом вважають більш дієвими заходи із застосування інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Саме ці системи спроможні упорядкувати рух транспортних засобів (ТЗ). Це запобігає інцидентам на дорогах, забезпечує рух автомобілів з найбільш ощадними режимами, та зменшує затримки доставки вантажів у містах і у міжміському сполученні. Дуже важливим елементом ІТС є засоби прогнозування швидкості ТЗ. Відомо, що її вибір залежить від дорожніх і транспортних умов, якщо відкинути суб'єктивний фактор. Дорожні умови є, як правило, визначеними, а інформація про них є доступною впродовж, щонайменше, тривалості виконання одного транспортного циклу. Наприклад, через он-лайн сервіс водій може збудувати найкоротший маршрут між заданими пунктами по бажаних дорогах, дізнатись оперативно про технічний стан доріг, метеорологічні умови, про параметри траси, якою буде рухатись у міжміському сполученні. На основі цього можна розрахувати оптимальну програму руху, яка забезпечує мінімальні витрати ресурсів і вчасне виконання транспортного завдання [1]. Однак поки що ніхто не передбачав щільність транспортних потоків на магістралях з потрібною точністю, а також не розраховував взаємний вплив учасників потоку на вимушену середню швидкість. Тому на практиці час для прибуття у пункт призначення резервують, а транспортний процес планують з часовими вікнами [2]. Однак транспортні умови є більш динамічними, залежать від великої кількості суб'єктивних чинників, погано піддаються передбачуванню. У зв'язку з цим для прогнозування швидкості ТЗ на магістральній дорозі потрібно мати декілька вторинних ознак транспортного потоку, які функціонально залежать від зміни швидкості будь-якого ТЗ. У цьому дослідженні експериментально обґрунтовано такий параметр, який може служити ознакою для прогнозування швидкості вибраного автомобіля. Але при цьому розглядалися перспективи розвитку ІТС на транспортних мережах, завдяки саме яким таке прогнозування стане можливим. Застосовувати теоретичні залежності в умовах спонтанного прийняття рішення учасниками магістрального трафіку немає сенсу.

Експерименти, а саме імітаційне моделювання, є найбільш ефективними засобами таких досліджень. В окремих випадках – це єдиний спосіб визначити і спрогнозувати транспортні умови на магістралі. Тому розроблення методики імітаційного моделювання є актуальною задачею в процесі розвитку інформаційних транспортних систем.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Більшість сучасних досліджень, які спрямовані на створення інтелектуальних ТЗ, що рухаються в інтелектуальних транспортних мережах. Відомі, наприклад, проекти автономних автомобілів і їх організованого руху в колонах [3]. Однак оптимальні програми руху автомобілів залишились поза увагою в зв'язку з тим, що метою створення цих ІТС було лише підвищення безпеки на дорозі. Аналогічні дослідження, які стосувались оцінки водієм дорожньо-транспортної обстановки і вибору ним швидкості виконані в роботі [4]. Проте, такий напрям удосконалення ІТС не можна вважати перспективним, адже в вже

в роботі [5] доведено, що водій, як найбільш інерційна ланка схеми керування системою «водій-автомобіль-дорога-середовище» (ВАДС), робить такий вибір залежно від інформаційного поля, яке є не завжди сприятливе. Усі дослідження по ІТС є цілком обґрунтованими, особливо тим, що понад 70 % усіх причин ДТП пов'язані із людським фактором [5]. У роботах [3, 6] наводяться докази того, що обмеження обсягу рішень по керуванню ТЗ, які покладаються на водія, є більш перспективним напрямком, ніж дослідження фізіологічних особливостей процесу прийняття ним рішень. У зв'язку з цим при побудові моделі прогнозування режимів руху ТЗ потрібно відсторонитись від випадкових чинників, пов'язаних із суб'єктивним вибором оператора.

Аналіз досліджень, присвячених прогнозуванню швидкості руху ТЗ на автомобільній магістралі, зроблено в роботах [7, 8]. 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, імітацію транспортного потоку з метою розв'язання основних проблем його розвитку поділяють на три умовні рівні: макрорівень, мезорівень і мікрорівень. Моделі макрорівня описують весь транспортний потік як єдине ціле, з огляду на сукупність усіх ТЗ. Значущою характеристикою цієї моделі виступає інтенсивність руху. Цей тип моделі найбільш доцільно застосовувати при аналізі транспортної системи великого розміру, наприклад, магістральних і міжрегіональних транспортних мереж. Однак, якщо йдеться про оцінювання конкретного параметру, то макромоделі є непридатними для цього через завищену похибку.

У моделях проходження за лідером, які досліджені в роботі [8], висловлено істотне припущення про наявність зв'язку між переміщенням веденого і ведучого автомобіля. По мірі розвитку теорії в моделях цієї групи враховувався час реакції водіїв, досліджувався рух на багатосмугових дорогах, вивчалася стійкість руху. Однак для того, щоб мікроскопічні моделі відтворювали реальну картину взаємодії транспортних засобів їх потрібно доповнити дослідженнями щодо раціональної поведінки водіїв, а це, як відмічалось, є безперспективним напрямом. Тому подальша активізація досліджень транспортних потоків може відбутись, якщо чітко описати вплив кожного конкретного ТЗ на увесь транспортний потік, як це показано на прикладі автоматизації дорожніх об'єктів в роботі [9]. Одним із способів усунення людських помилок і затримок у веденому ТЗ є заміна водія сенсорами і відповідною комп'ютерною системою управління. Тому останнім часом з'являються роботи, метою яких є розробка автономних систем інтелектуального круїз-контролю (AICCS). Зокрема, в роботі [10] запропоновано систему автоматичного керування транспортним засобом. Також було вивчено вплив системи на транспортний потік і виконано порівняння її властивостей з моделями поведінки людини як водія. Недоліками такого контролю є відсутність обміну інформацією різних ТЗ, а також взаємодії з іншими системами. Виявлено, що продуктивність системи AICCS є вищою, ніж у моделей поведінки водіїв. Для цього використано комп'ютерне імітаційне

моделювання. Крім того, було змодельоване декілька надзвичайних ситуацій, які включають аварійні зупинки та випадки вимкнення приводу. Результати моделювання демонструють ефективність AICCS та її потенційно сприятливий вплив на транспортний потік. Однак, для моделювання ширшого кола задач, таких як обґрунтування властивостей ІТС, описана імітаційна модель є непридатна, оскільки при цьому для неї потрібні великі обсяги даних.

Огляд відомих досліджень при створенні моделей прогнозування швидкості ТЗ виконано в роботі [11]. На відміну від попередніх досліджень, для вимірювання швидкості тепер застосовують супутникові навігаційні системи GPS, які дають достатньо позитивний результат в нагромадженні даних. Про велику перспективу такого застосування вказано і в роботі [12]. На підтвердження цього в [9] також наводяться факти, що візуальне спостереження зараз практично не використовується в дослідженнях. Відомо, що основний вплив на зміну умов та безпеки руху мають дорожні умови, інтенсивність і склад руху. Причому, саме ці показники формують характер інформаційного завантаження водія. Вказано було також, що інформаційні показники поля сприйняття водія тісно пов'язані між собою [12]. Це сильно ускладнює розроблення моделі ІТС, яка базується на моделі поведінці водія людини. Тому всі суб'єктивні фактори з імітаційної моделі потрібно усунути.

У праці [13] також вказується, що відносна швидкість руху інших учасників потоку відіграє велику роль в інформаційному забезпеченні водія. Встановлено, 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. Однак помилково було б вважати, що найбільш цінною інформацією є та, котра в більшому ступені впливає на прийняття водієм рішень лише стосовно безпеки руху. Не менш важливим є вибір енергоощадних режимів руху, особливо коли йдеться про перевезення вантажів великоваговими ТЗ.

Дослідження [14, 15] показують, що дані GPS, які передаються за допомогою стільникових технологій з ТЗ, можуть забезпечити більшу частину інформації про продуктивність об'єкта, яку бажають дорожні агентства. Однак отримання достатньої кількості цих даних економічно ефективним способом є важко, якщо не змінити спосіб оцінювання транспортних умов.

Ще одним джерелом даних для ІТС, які були досліджені, є розгалужена система спостереження та контролю автостради WSDOT (Washington State Department of Transportation). Вихідні дані кожного з ІТС-пристроїв, проаналізованих у цьому дослідженні, представили різні зображення (варіанти) виконання вантажних потоків для однієї і тієї ж ділянки проїзної частини [16]. 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 є 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. З іншого боку, інтеграція інформаційних

потоків в ІТС призводить до перевантаження системи і до надто громіздких баз даних, які неможливо оперативно опрацювати.

В проєкті [16] досліджено процес перетворення сигналів від бортових транспондерів автопоїздів у корисні дані для опису продуктивності автостради. Було визначено можливість використовувати електронні транспондери вантажних автомобілів (також відомі як теги). Мета застосування – описати, чи збільшується час руху вантажівки за рахунок перевантаження автостради. В результаті було відкинуто традиційний підхід до аналізу маршруту на основі контролю середнього часу подорожі. Однак теоретичного обґрунтування ці дослідження не мають. А зміни швидкості ТЗ фіксувались лише за абсолютним показником – щільністю транспортного потоку, чого може виявитись недостатньо.

Як відомо, швидкість є одним з основних параметрів дорожнього руху [17]. За можливості водії рухаються зі швидкостями, які, через це, є раціональними для даного виду поїздки. Проте, 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 і залежить від їх щільності. Однорідність транспортного потоку практично не досягається ніколи, та й досягти однакової величини швидкості досить важко навіть для однакових за типом ТЗ. Тому звідси і виникає складність в розробленні таких моделей і схем організації руху, 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. У роботі [7], наприклад, 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 ТЗ у транспортному потоці. Однак основну увагу присвячено дослідженням миттєвих швидкостей на прямолінійних ділянках вулично-дорожньої мережі населених пунктів. Це є однією з основних ознак, які характеризують умови безпеки руху в містах і не може бути застосовано для міжміських перевезень.

Ефективним і інформативним способом моделювання руху сукупності ТЗ по магістралі є кліткові автомати [17]. На основі підходу мікро-моделювання розроблено їх цілий ряд. Окремий клас їх називають транспортними клітковими автоматами (ТКА). ТКА 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 [18].

Дослідження [19] присвячені тому, щоб скористатися передовими чисельними та інтелектуальними інструментами для прогнозування швидкості ТЗ за допомогою часових рядів. Зрозуміло, що невизначеність, яка обумовлена тимчасовою поведінкою водія, а також різними зовнішніми збуреннями на дорозі, вплине на швидкість ТЗ. Тому важливо розробити технічні засоби для подолання ризику непередбачуваності, пов'язаної з профілем швидкості ТЗ на магістралях. У дослідженні автори пропонують інтелектуальний інструмент, що називається еволюційною машиною найменшого навчання (E-LLM) для прогнозування послідовності швидкості ТЗ. Щоб мати практичну оцінку ефективності E-

LLM, автори використовують дані водіння, зібрані на міських дорогах Сан-Франциско. Однак дані про використання E-LLM на автобанах відсутні, а запропонована методика придатна лише для довгострокового прогнозування швидкості.

Концепція аналізу часових рядів з ковзними вікнами (SWTS) використовується дослідниками для підготовки бази даних для процесу прогнозування швидкості [17]. Оцінити продуктивність запропонованої методики покликаний ряд відомих підходів, таких як метод авторегресії, нейронна мережа зворотного розповсюдження, еволюційна машина екстремального навчання, машина екстремального навчання, а також радіальна нейронна мережа базисної функції. Завдяки вичерпному порівняльному дослідженню автори зауважили, що E-LLM є потужним інструментом для прогнозування профілів швидкості транспортного засобу. Результати поточного дослідження можуть бути корисними для інженерів автомобільної промисловості. Актуальною є, в даному випадку, потреба у швидких, точних і недорогих інструментів, здатних прогнозувати швидкість ТЗ. Такий горизонт передбачення може бути використаний для розробки ефективних інтелектуальних контролерів силових агрегатів, як це зроблено, наприклад в [19]. Для оперативного контролю ТЗ в магістральному потоці він є занадто масштабним.

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 Cellular Automaton визначається правилами, які контролюють ці обміни.

У статті [17] описано абсолютно нову концепцію принципу кліткового автомата для моделювання транспортного потоку. Ця модель використовує орієнтовану на час модель автомобіля. Модель відповідає реальній поведінці водія більш точно, ніж відповідна Нагеля і Шрекенберга. Зберігаються властивості дискретного часу та простору. Також процес оновлення може бути виконаний для кожного ТЗ незалежно. Ця модель досягає досить гарної відповідності спостережуваному реальному транспортному потоку. Стаття показує, що ступінь відповідності з реальністю залежить від застосовуваної моделі автомобіля. Для різного за складом транспортного потоку вона може давати суттєві похибки.

Нова концепція моделі поєднує в собі реалістичне моделювання з швидкою обчислювальною продуктивністю [19]. Моделі трафіку, засновані на кліткових автоматах, є ефективні через їх простоту в описі складних транспортних моделей і їх здатності легко реалізуватися для паралельних обчислень. Проте, такі моделі потребують адаптації у кожному конкретному дослідженні. Інші мікроскопічні моделі, такі як моделі автомобілів, що слідує за лідером (ним виступає комп'ютер), є більш дорогими, але вони більш реалістичними, бо відображають поведінку водія та детальні характеристики автомобіля. У роботі [20] пропонується гібрид цих двох категорій, що визначає модель трафіку на основі безперервних клітинних автоматів. Даний підхід можна було б використати для імітації руху автомобіля в ІТС.

Існує багато різних систем імітаційного моделювання транспортних мереж. Серед них такі системи, як AIMSUN (Aimsun SLU, Іспанія), PA-RAMICS (Paramamics Microsimulation, Великобританія), AUTOBAHN (Z-Software, Німеччина), IHSDM (Turner-Fairbank Highway Research Center, США), INTEGRATION (M. Van Aerde and Assoc., Ltd., США), PLANSIM-T (Los Alamos National Laboratory, США), FLEXYT-II (Public Works and Water Management Transport Research Center, Нідерланди), TRANSIMS (Los Alamos National Laboratory, США), SimTraffic 6 (Trafficware, США), VISSIM (PTV System, Німеччина), MITSIM (MIT, США), та ін. [21, 22]. Авторами статті [23] зроблено огляд систем імітаційного моделювання руху, і доведена необхідність розробки системи моделювання дорожнього руху як розподіленої системи. Така система моделювання дозволить відображати 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 [24]. Найбільш досконалою вважають комп'ютерну систему AIMSUN, яка 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 [22] відмічено, що моделі поведінки ТЗ в системі AIMSUN визначаються функціями від декількох параметрів. Такий підхід дозволяє моделювати рух різних типів ТЗ (автомобілів, автобусів, вантажівок і т. д.), які можуть бути об'єднані в класи. Спільними недоліками усіх систем є необхідність зберігання і обробки великої кількості вхідних даних, яка нелінійно зростає при розширенні масштабів імітаційного моделювання, часових меж моделей, коли йдеться про великі магістральні транспортні мережі, а також залежність точності опису потоків від великої кількості випадкових факторів. Зрештою, не усі названі програмні засоби мають зв'язок з он-лайн потоком даних, а також у них не передбачено розвиток ІТС. Також, не менш вагомим недоліком є те, що усі програмні засоби, через методиками, які у них закладені, не можуть відобразити прискорення і сповільнення окремих суб'єктів транспортного потоку. Через це багато маневрів, які відтворюються системами, є мало реалістичними.

Отже, для розроблення і впровадження ІТС четвертого та наступних поколінь на магістралі потрібно володіти оперативними прогнозом швидкості на заданих ділянках транспортної мережі. Прогнозування швидкості конкретного ТЗ на основі дослідження вторинних ознак транспортного потоку, таких як щільність та відносна швидкість в попередніх дослідженнях не виконувалось. Натомість, у зв'язку із розробленням і впровадженням автономних транспортних систем на магістралях загострюється проблема підвищення точності прогнозування зростаючого обсягу параметрів транспортних потоків, які є надзвичайно мінливими в часі і просторі. Для того, щоб усунути ці дві завади розроблення ефективних ІТС, потрібно обґрунтувати модель взаємодії інтелектуального ТЗ з потоком. Також не існує однозначних висновків про вибір параметрів

контролю транспортного потоку на магістралі. Поки що традиційно використовуються щільність та інтенсивність, однак вони не мають відповідних засобів для точного вимірювання.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка методики і отримання результатів, які доводять необхідність вимірювання і застосування відносної швидкості, як ознаки для зміни режиму руху конкретного ТЗ в ІТС.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі задачі:

- розробити імітаційну модель відносного руху заданого ТЗ;
- виконати машинні експерименти для потоків різними щільністю і розподілом бажаних швидкостей;
- встановити зв'язок між відсноною швидкістю об'єктів потоку і зміною швидкості вибраного автомобіля-спостерігача.

4. Обґрунтування методики та алгоритму імітаційного експерименту

Імітаційна модель є модифікованим клітковим автоматом з двох-направленим рухом ТЗ. Від класичних відомих моделей перейнято основні принципи її застосування [18]:

- 1) локальність правил: на новий стан клітки можуть вплинути тільки елементи її оточення і, можливо, сама клітка;
- 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 кліток – допустимі значення у всіх клітках змінюються одноразово, в кінці ітерації, а не по мірі обчислення [19].

Крім традиційних, застосовано й нові припущення і правила моделювання, які спрощують можливість досягнення мети дослідження.

У цьому варіанті клітковий автомат є двовимірною сіткою. Висота сітки відповідає кількості смуг руху на магістралі (у тому числі – зустрічних). Довжина сітки – 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 [11]. За допомогою таких приладів можна оцінити наявність і відносні координати інших учасників дорожнього руху, які рухаються як попутно 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 сітка може бути

вимушено змінена під впливом маневрів, які виконують інші учасники потоку. Кількість не порожніх клітинок автомата 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.

ТЗ 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 ТЗ, які є беруть участь в транспортному потоці, тут розглядаються як однокліткові, двокліткові, або максимально – трикліткові об'єкти. Це відповідає динамічним габаритам ТЗ, 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 не є межею їх можливостей і слід очікувати більшої дистанції [11]. 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 такі об'єкти 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 ТЗ, який здійснює такий пробіг, буде відображений автоматом за 2000 ітерацій. Все це стосується ТЗ, які відображені однією, двома чи трьома клітинками. Прийнято також, що висота клітинки відповідає ширині однієї смуги траси. Заповнена клітинка означає, що смуга повністю зайнята ТЗ у даному перерізі.

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

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

де V_i – абсолютна швидкість i -го ТЗ, м/с; V_0 – абсолютна швидкість АС, м/с; N_c – кількість учасників трафіку, які рухаються попутно з АС.

Для зустрічних ТЗ, швидкість визначається з виразу:

$$V_{r,y} = V_y + V_0, \quad (2)$$

де V_y – абсолютна швидкість зустрічного ТЗ, м/с; N_a – кількість об'єктів потоку, які рухаються по зустрічних смугах відносно АС.

Обчислена за виразом (1) відносна швидкість i -го ТЗ 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 ТЗ є вищою, ніж бажана швидкість АС, або ліворуч, якщо бажана швидкість 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 переміщуються одночасно.

Якщо внаслідок моделювання виявиться, що i -а клітинка повинна переміститись за межі R_b або R_f , то це означає, i -й ТЗ 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 $step=0\dots S$ – номер ітерації, тобто дискретного інтервалу часу моделювання, $i=0..N_c$ – номер об'єкта, який рухається попутно 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 ТЗ, якщо склались відповідні умови. Кількість таких подій – скінченна, однак, щонайменше 5. Послідовність реалізації цих подій для усіх клітинок обґрунтовано, виходячи з їх пріоритету та з умов безпеки руху.

1. *Гальмування.* На нульовому кроці автомата усі ТЗ, 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 експоненційним, залежно від категорії дороги [9]. 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

$$\Delta X_{step.i} = V_0 - V_i, \quad (3)$$

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 такі ТЗ є обмежені в інтенсивності гальмування. Тому, виконуючи процедуру гальмування, потрібно вимушено рекурсивно переміщати ліворуч усі заповнені клітинки, які стоять на шляху i -ї. Цю процедуру, виходячи з особливостей обчислення переміщень (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; //процедура перевірки можливості гальмування
begin
01 занулення початкового масиву  $\Delta X$ 
//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 руха-
ється 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 ма-
сиву  $\Delta X_z$  зменшують на 1. Виконується перегляд усіх таких клітинок справа-
наліво:
11 for  $z := N_c$  downto 0 do
12 begin
13 if  $((X_{step,z} = X_{step,i})$  and  $(i < z))$  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  $((\Delta X_i < 0)$  and  $(i < z))$  then
18 begin
19  $X_{step,i} := X_{step,i} + \Delta X_i$ ;
20  $V_{step,i} := V_{step,i}$ ;
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, досягнена бажана, 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; //процедура прискорення
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 різ-
ниця бажаної і поточної швидкості зменшується на цю ж величину:
07  $X_{step,i} := X_{step,i} + acseleration$ ;
08  $V_{step,i} := V_{step,i} + acseleration$ ;
09  $\Delta V_{step,i} := \Delta V_{step,i} - acseleration$ 
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. При відсутності перешкоди потрібно 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 $(V_{step,i} - V_{d,i})$. Усі об'єкти, які слідують 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:

$$\Delta V_{0,\Sigma} = \sum_S \Delta V_{step,0}. \quad (4)$$

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.

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

$$\Delta V_{i.\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_c} \Delta V_{step.i} \quad (5)$$

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

5. Виконання експериментів для різних транспортних умов

Розроблену методику і алгоритм моделювання транспортного потоку було застосовано на прикладі на автомобільній трасі Е-471 Київ-Чоп. Магістраль має дві смуги, по одній в протилежному напрямі. Категорія дороги – 2. Щільність потоку змінюється на ній в межах 15...150 автомобілів/км. Склад потоку приймався: 100 % легкових автомобілів. Приймався експоненційний закон розподілу бажаних швидкостей ТЗ із такими параметрами розподілу, а саме: математичне сподівання: 16 м/с, стандартне відхилення – 3,5 м/с. Максимальне прискорення автомобілів – 5 м/с², максимальне сповільнення – 3 м/с². Розглядалась ділянка траси Е-471, а саме Стрий-Пісочне. Протяжність – 20 км. Дорога траси є прямолінійною, має сталий профіль в плані. Дозволена максимальна швидкість – 25 м/с. Тут практично відсутні перетини і примикання. Дійсна середня швидкість руху ТЗ по цьому маршруту згідно Google Map – 16,6 м/с.

Початкові дані змінювались таким чином: задавались різні значення відносної швидкості автомобілів потоку від бажаної швидкості АС (табл. 1).

При цьому для початкових даних введено оцінки:

1) коефіцієнт нерівномірності швидкостей:

$$\eta_v = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\bar{V}}, \quad (5)$$

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:

$$\Delta x_{av} = \frac{1}{N_c} \sum |x_i - \bar{x}|, \quad (6)$$

4) абсолютне відхилення середньої швидкості об'єктів від швидкості АС ΔV_{av} .

Візьмемо для розгляду, наприклад, згідно з табл. 1, середнє значення швидкості потоку 20,25 м/с зі стандартним відхиленням 1,25 м/с. При щільності потоку 16 автомобілів/км в інформаційному полі АС довжиною 480 м буде 8 автомобілів+АС+на попутній смузі. Розподіл їх швидкостей буде таким: 20; 22; 21; 21; 20; 20; 19; 19; 18. На рис. 2 наведено приклад п'яти ітерацій для цього варіанту початкових даних.

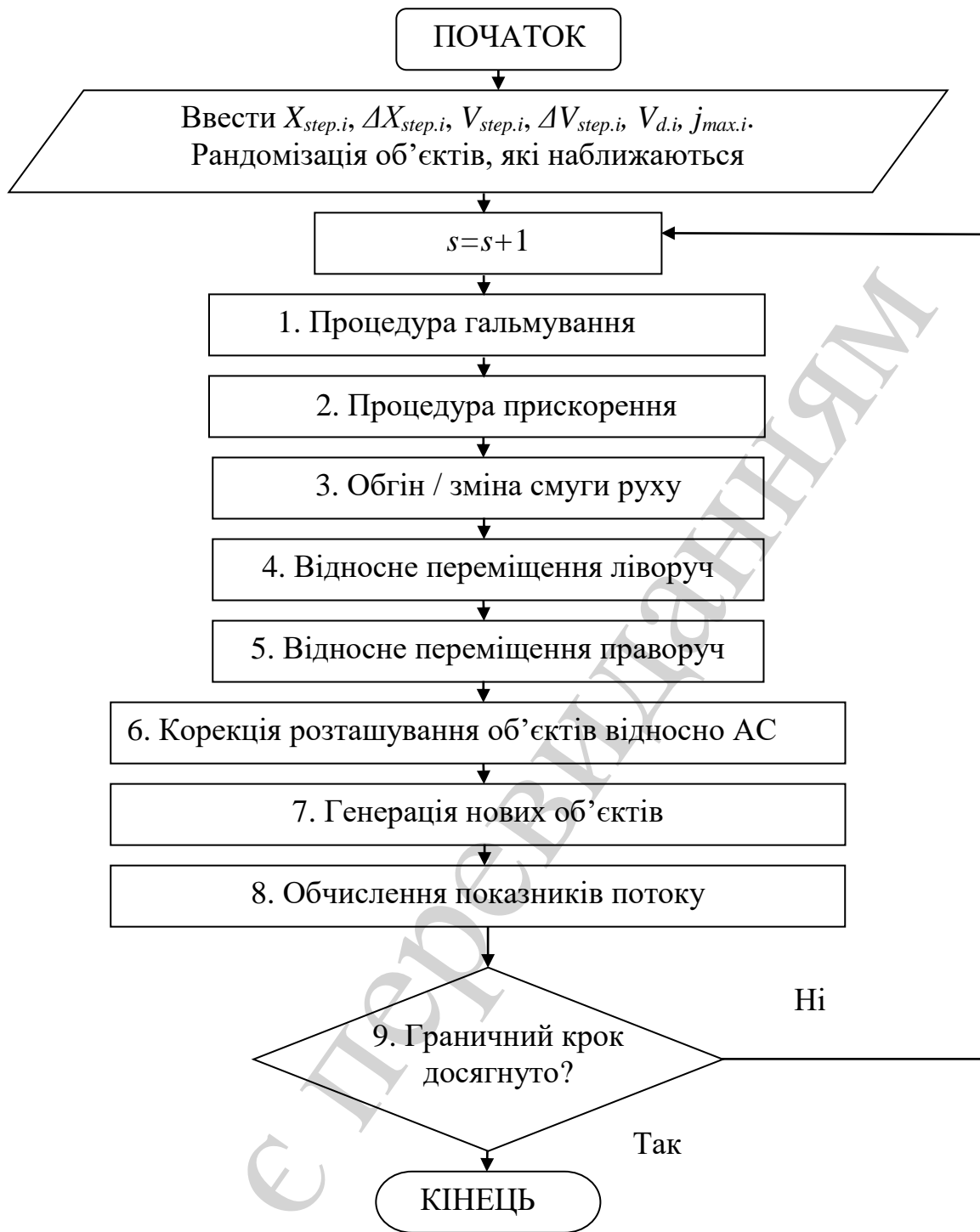


Рис. 1. Блок-схема алгоритму імітаційного моделювання транспортного потоку на двосмуговій дорозі з дозволеним обгоном

Таблиця 1

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

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

Інформаційне поле автомату є несиметричне: позаду воно становить 16 клітин (160 м), попереду – 32 клітини (320 м). Це означає, що початкова група автомобілів, які рухаються в кучній колоні через різницю швидкостей розпорошуються вздовж кліткового автомату 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.

Ці дані було введено в програму і отримано залежності середніх затримок автомобіля з бажаною швидкістю 20 м/с залежно від відносної швидкості інших учасників транспортного потоку (рис. 3).



Рис. 2. Схема п'яти кроків імітаційного моделювання кліткового автомату

6. Встановлення зв'язку між відносною швидкістю об'єктів потоку і зміною швидкості вибраного автомобіля-спостерігача

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:

$$y=0,00653x^2+0,425x+0,7113.$$

Коефіцієнти рівняння регресії отримано з допомогою функції «тенденція» в електронних таблицях Excel 2007, 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 теоретичної залежності та емпіричних даних. Отримані залежності відображені графічно на рис. 3.

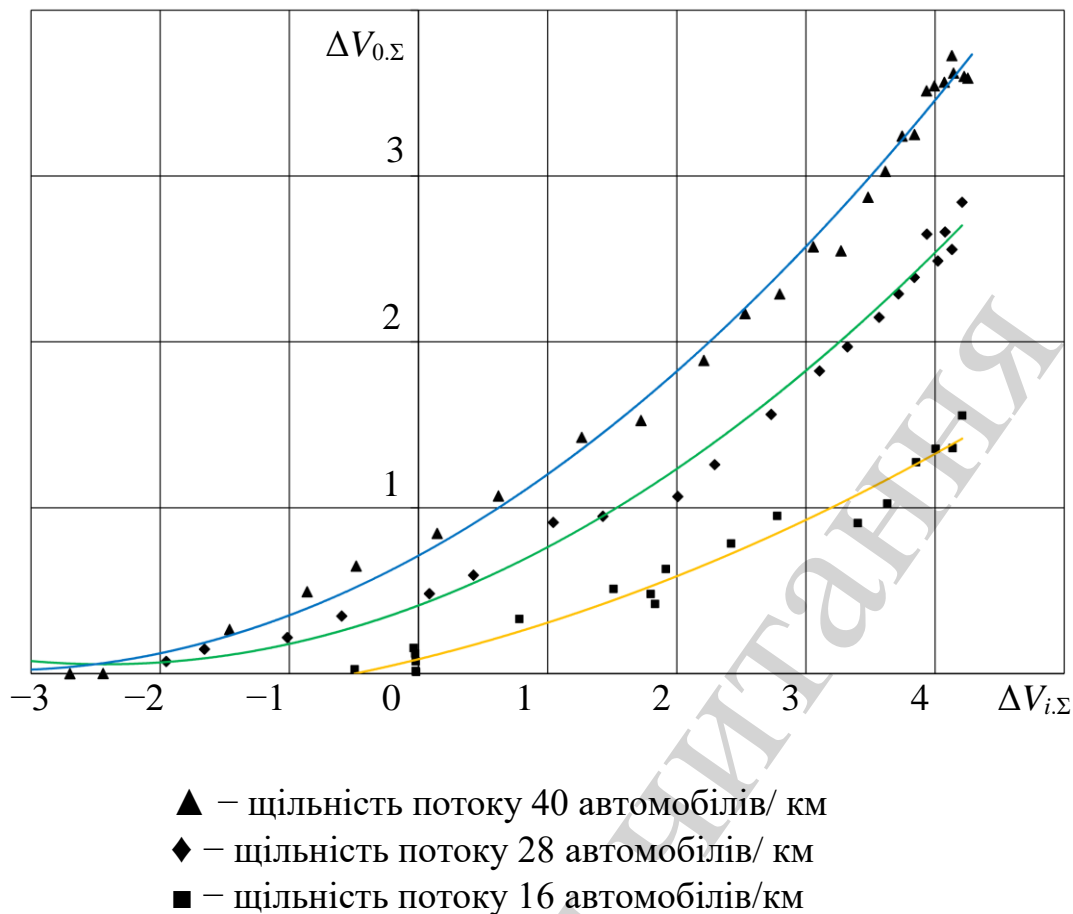


Рис. 3. Експериментальні результати моделювання зміни швидкості АС залежно від зміни параметрів потоку, та теоретична апроксимація

Усі залежності описуються параболою. Однак для щільності потоку 16 автомобілів/км, парабола асимптотично наближається до осі абсцис при значенні $\Delta V_{i,\Sigma} = -0,5$.

7. Обговорення результатів моделювання транспортних потоків на магістралі

Отримані в результаті імітаційного моделювання залежності $\Delta V_{0,\Sigma}$ від $\Delta V_{i,\Sigma}$ можна розділити на дві частини. Перша частина, для якої $\Delta V_{i,\Sigma} > 0$, і друга, для якої $\Delta V_{i,\Sigma} < 0$. Перша частина відображає ситуації, коли «швидкі» ТЗ транспортного потоку примушують АС збільшувати швидкість, щоб, зрештою, дотримуватись заданої бажаної середньої швидкості. Це відбувається тому, що АС повинен виконати обгін, або маневри, пов'язані зі зміною смуги руху. Однак, такі прискорення АС здійснюються тоді, коли сумарне збільшення швидкостей усіх i -х ТЗ, які перебувають в інформаційному полі АС, є більше, ніж 0,2, 0,45, 0,7 м/с для різних щільностей транспортного потоку. Чим більша щільність потоку, тим менший вплив прискорень інших учасників трафіку на АС.

Друга частина залежності (рис. 3) відображає ситуацію, коли АС має знижувати власну швидкість через вплив «повільних» автомобілів потоку. У цих ситуа-

ціях ТЗ потоку стримують АС в окремі моменти часу. Якщо щільність «повільних» ТЗ зростає, то це більше впливає на кількість вимушених прискорень АС.

Залежності на рис. 3 також мають таку властивість, що зі збільшенням щільності потоку їх характер усе більше стає нелінійним, особливо в зоні області значень $\Delta V_{i,\Sigma} < 0$. Залежність вимушеної зміни АС від впливу транспортного потоку можна адекватно описати отриманими рівняннями регресії.

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.

Проведені дослідження, однак, стосувались тих магістралей, які не мали примикань, розподілів, розширення, або звуження, вимушених зупинок транспортних потоків. Це обмеження може бути знято в подальшому, якщо застосувати двовимірні кліткові автомати. Суттєвим обмеженням для впровадження отриманих результатів є розуміння бажаної швидкості автомобілів в потоці і її розподіл. Для об'єктивності застосування цього терміну потрібно розширити рамки дослідження, залучивши сюди закономірності перебігу сукупності транспортних процесів, що відбуваються на магістралях.

8. Висновки

1. Використання методу активного спостерігача в імітаційній моделі магістрального трафіку дає змогу сприймати досить великі обсяги вхідних даних, оскільки відображає тільки динаміку ситуації довкола заданого інформаційного поля. Розроблена методика моделювання враховує усі прискорення/сповільнення ТЗ, детально відображає достатньо велику дистанцію магістралі без залучення розподілених засобів. Також з допомогою методики отримано можливість позбутись несуттєвих маневрів на магістралі, які відбирають додаткові обчислювальні ресурси автомата. Усі маневри об'єктів трафіку здійснюються згідно з методикою за принципом об'єктивної доцільності. Це відповідає концепції створення ІТС на магістралях.

2. Для імітаційного моделювання магістрального транспортного потоку достатньо використати дані спостережень від одного автомобіля. Транспортний засіб, який веде такі спостереження, має бути оснащений засобами вимірювання власної миттєвої швидкості, координат, відносної швидкості об'єктів потоку, оцінювання щільності потоку. Таких даних є достатньо, щоб виконати імітацію на магістралі довільної довжини. Виконане імітаційне моделювання на магістралі Е-471 розкриває можливість отримати відносні швидкості об'єктів при будь-якій щільності потоку на магістралі.

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 аргументу. Це означає, що навіть при зниженні бажаної швидкості АС над середньою швидкістю потоку відбувається вплив «повільних» автомобілів на АС. Отже, в ІТС прогнозування швидкості руху транспортного засобу можна здійснювати за відносною швидкістю усіх автомобілів, які перебувають в його інформаційному полі.

Література

1. Hашchuk, P., Pelo, R. (2018). Optimal laws of gear shift in automotive transmissions. *Econtechmod*, 7 (2), 59–69.
2. Danchuk, V., Bakulich, O., Svatko, V. (2017). An Improvement in ant Algorithm Method for Optimizing a Transport Route with Regard to Traffic Flow. *Procedia Engineering*, 187, 425–434. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.396>
3. Willemsen, D. et. al. (2018). Requirements Review from EU projects. D2.1 of H2020 project ENSEMBLE. URL: https://platooningensemble.eu/storage/uploads/documents/2019/02/11/ENSEMBLE-Deliverable-2.1-StateOfTheArt_EUProjects_disclaimer.pdf
4. Kulbashnaya, N., Soroka, K. (2016). Development of a model of a driver's choice of speed considering the road conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (2 (81)), 32–38. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71489>
5. Кужель, В. П., Кашканов, А. А., Кашканов, В. А. (2010). Методика зменшення невизначеності в задачах автотехнічної експертизи ДТП при ідентифікації дальності видимості дорожніх об'єктів в темну пору доби. Вінниця: ВНТУ, 200.
6. Волков, В. П., Грицук, І. В., Грицук, Ю. В., Шурко, Г. К., Волков, Ю. В. (2017). Особливості формування методики застосування класифікації умов експлуатації транспортних засобів в інформаційних умовах ITS. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Транспортне машинобудування, 14 (1236), 10–20.
7. Hegyi, A. (2004). Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures. TRAIL Thesis Series T2004/2. The Netherlands TRAIL Research School, 232.
8. Семенов, В. В. (2004). Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса. М., 44. URL: <http://spkurdyumov.ru/uploads/2013/08/Semenov.pdf>
9. Процишин, О. С. (2014). Дослідження миттєвих швидкостей руху у транспортному потоці. *Наукові нотатки*, 45, 448–452.
10. Ioannou, P. A., Chien, S. C. (1993). Autonomous intelligent cruise control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 42 (4), 657–672. doi: <https://doi.org/10.1109/25.260745>
11. Englund, C., Estrada, J., Jaaskelainen, J., Misener, J., Satyavolu, S., Serna, F., Sundararajan, S. (2017). Enabling Technologies for Road Vehicle Automation. *Lecture Notes in Mobility*, 177–185. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-60934-8_15
12. Сахно, В. П., Жаров, К. С. (2012). До визначення їздових циклів та поздовжніх профілів доріг. *Автошляховик України*, 1 (225), 7–11.

13. Коваленко, Л. О. (2013). Аналіз умов та безпеки руху на автомобільних дорогах з урахуванням інформаційних показників дорожнього середовища. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, 88, 294–301.
14. Карпінський, Ю. О., Лященко, А. А., Дроздівський, О. П. (2007). Геоінформаційне забезпечення навігації наземного транспорту. *Наука та інновації*, 3 (1), 43–57.
15. Srour, F., Newton, D. (2006). Freight-Specific Data Derived from Intelligent Transportation Systems: Potential Uses in Planning Freight Improvement Projects. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1957, 66–74. doi: <https://doi.org/10.3141/1957-10>
16. Hallenbeck, M., McCormack, E., Nee, J., Wright, D. (2003). Freight Data from Intelligent Transportation System Devices. WA-RD 566.1. Washington State Department of Transportation, 117. URL: <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/566.1.pdf>
17. Lashenyh, O., Turpak, S., Gritcay, S., Vasileva, L., Ostroglyad, E. (2016). Development of mathematical models for planning the duration of shunting operations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (3 (83)), 40–46. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80752>
18. Wu, N., Brilon, W. Cellular automata for highway traffic flow simulation. *Traffic and Mobility*. URL: http://homepage.rub.de/ning.wu/pdf/ca_14isttt.pdf
19. Clarridge, A., Salomaa, K. (2010). Analysis of a cellular automaton model for car traffic with a slow-to-stop rule. *Theoretical Computer Science*, 411 (38-39), 3507–3515. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2010.05.027>
20. Mozaffari, L., Mozaffari, A., Azad, N. L. (2015). Vehicle speed prediction via a sliding-window time series analysis and an evolutionary least learning machine: A case study on San Francisco urban roads. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18 (2), 150–162. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.11.002>
21. Young, K., Regan, M. (2002). Intelligent speed adaptation: A review. *Proceedings of the Australasian Road Safety Research Policing and Education Conference*, 445–450. URL: <https://acrs.org.au/files/arsrpe/RS020049.PDF>
22. Бекмагамбетов, М. М., Кочетков, А. В. Анализ современных программных средств транспортного моделирования. *Журнал автомобильных инженеров*, 6 (77), 25–34. URL: <http://www.aae-press.ru/f/77/25.pdf>
23. Захаров, Ю. И., Карнаух, Е. С. (2014). Основные современные инструменты имитационного моделирования транспортных потоков. *Вісник ПДАБА*, 1 (190), 46–51. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/download/39889/36019>
24. Іванов, В. О. (2008). Розподілена система імітаційного моделювання дорожнього руху. *Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка*, 48, 41–45.