



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 11 • № 1 • 2015 С. 84 – 90

УДК 681.518.3:528

ГІС як засіб ефективного управління транспортними потоками

В.І. Зацерковний^{1*}, О.В. Кобрін²

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка

²Національний авіаційний університет

У статті розглянута транспортна мережа, яка є ідеальним об'єктом для автоматизації і підвищення ефективності за допомогою геоінформаційних систем (ГІС). Перераховано транспортні проблеми, для вирішення яких створено базу математичних моделей транспортних потоків. Представлено засоби аналізу ГІС, які дозволяють будувати оптимальні маршрути на реальній ВДМ з її можливостями і обмеженнями, що дозволяє вирішити надзвичайно актуальну проблему для сучасної України — бурхливе зростання кількості автомобілів і перенасичення ВДМ транспортними засобами. Розглянуто інтелектуальні транспортні системи, які створюються та розвиваються на основі GPS, ГІС, сучасних засобів зв'язку і телекомунікацій.

ГИС КАК СРЕДСТВО ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ, Зацерковный В.И., Кобрин О.В. — В статье рассмотрена транспортная сеть, которая является идеальным объектом для автоматизации и повышения эффективности с помощью геоинформационных систем (ГИС). Перечислены транспортные проблемы, для решения которых создано много математических моделей транспортных потоков. Представлены средства анализа ГИС, которые позволяют строить оптимальные маршруты на реальной УДС с ее возможностями и ограничениями, позволяют решить чрезвычайно актуальную проблему для современной Украины — бурный рост количества автомобилей и перенасыщение УДС транспортными средствами. Рассмотрены интеллектуальные транспортные системы, которые создаются и развиваются на основе GPS, ГИС, современных средств связи и телекоммуникаций.

GIS AS A TOOL FOR THE EFFICIENT MANAGEMENT OF TRANSPORT STREAMS, by Zatserkovnyi V.I., Kobrin O.V. — The transport network, which is an ideal object for the automation and the increase of efficiency using geographic information systems (GIS), is considered. The transport problems, which have a lot of mathematical models of the traffic flow for their solution, are enumerated. GIS analysis tools that allow one to build optimal routes in the real road network with its capabilities and limitations are presented. They can solve the extremely important problem of modern Ukraine — the rapid increase of the number of cars and the glut of road network vehicles. The intelligent transport systems, which are created and developed on the basis of GPS, GIS, modern communications and telecommunications facilities, are considered.

Ключевые слова: транспортная система; улично-дорожная сеть (УДС); транспортно-навигационные ГИС; геоинформационные технологии (ГИТ); GPS-технологии; интеллектуальные транспортные системы (ИТС); детерминированный и стохастический подходы.

Key words: transport system; road network; transport navigation GIS; geographic information technology (GIT); GPS-technology; intelligent transport systems (ITS); deterministic and stochastic approach.

1. ВСТУП

Високий рівень автомобілізації (рис. 1), швидке зростання об'ємів перевезень і кількості транспортних засобів, з одного боку, сприяє зростанню економічного розвитку країни і її інтеграції в європейське співтовариство, а з іншого, має низку негативних наслідків, серед яких постійне зростання кількості дорожньо-транспортних пригод (ДТП), тяжкість наслідків яких цілком порівнянна з національним лихом; збільшення токсичних викидів; підвищення шумового навантаження; зростання заторів в “години пік”; великі втрати часу для учасників руху, зростання проблеми розміщення паркувальних місць, забезпечення задовільної якості дорожнього покриття та охорони навколишнього середовища тощо. В першу чергу вказані недоліки проявляються в місцях концентрації транспортних потоків на частинах мережі, функціонуючих в режимах, близьких до пропускної здатності. Як правило, це міста з високим рівнем автомобілізації.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для сучасного суспільства є характерним стрімке зростання кількості автотранспортних засобів, їх зосередження у великих містах з історично сформованою системою вулично-дорожньої мережі (ВДМ), що призводить до виникнення значних транспортних проблем. Найбільш суттєвими з них є: зниження швидкості сполучення, збільшення часу проїзду ділянок мережі, виникнення предзаторових та заторових ситуацій на ВДМ міста.

* Зацерковний Віталій Іванович; ✉ zvigis@mail.ru

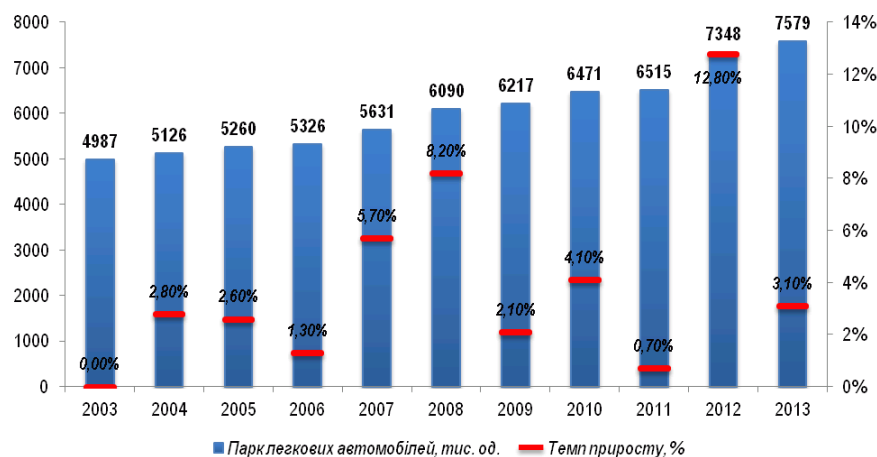


Рис. 1. Динаміка парку легкових автомобілів України, тис. од. (за даними Держкомстату України; оцінка Pro-Consulting)

Для управління транспортною системою та прийняття оптимальних рішень в галузі транспортного планування необхідні конкретні системні знання про існуючу транспортну ситуацію і можливі сценарії її розвитку.

Відсутність кількісного опису транспортних потоків сучасного міста значно ускладнює і без того непростий вибір між варіантами розвитку транспортної системи. Ліквідація різниці між бажаним і реальним результатом може бути досягнута за допомогою сучасних інструментів моделювання, планування єдиної транспортної моделі міста та оцінки наслідків прийнятих рішень.

3. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Розробки в сфері управління транспортними потоками ведуться як за кордоном, так і в Україні. Найбільш значущими працями в цій галузі є роботи науковців В.П. Поліщука, В.В. Сільянова, М.Я. Говорущенко, Є.В. Гаврилова, Б.М. Четверухіна, О.П. Алексеева, В.К. Долі, О.О. Бакуліч, Е.В. Нагорного. Серед іноземних авторів можна назвати С. Віка, Б. Леонарда, Д. Бойса, С. Левіна, С. Нобуакі, А. Мейї, А. Барбардоніса, С. Хейса та ін.

4. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Автомобільний транспорт є найзручнішим і найефективнішим видом транспорту, але збільшення чисельності транспортних засобів (ТЗ) призводить до постійного зростання інтенсивності дорожнього руху. Для ефективного функціонування цього виду транспорту необхідне оптимальне співвідношення рухомого складу, дорожніх умов і транспортних потоків. Основні проблеми функціонування пасажирського транспорту великого міста можна розділити на об'єктивні та суб'єктивні.

До об'єктивних проблем функціонування транспортної системи великого міста можна віднести наступні:

- зростання рівня автомобілізації населення, що веде до погіршення екологічної ситуації та порушення оптимального дорожнього руху;
- збільшення інтенсивності використання індивідуально транспорту, що впливає на зниження мобільності міського пасажирського транспорту, веде до зростання кількості транспортних заторів та негативно впливає на екологічну ситуацію міст;
- диспропорцію між рівнем автомобілізації і темпами дорожнього будівництва;
- містобудівні та планувальні проблеми розвитку міської території тощо.

До суб'єктивних проблеми можна віднести:

- недосконалість системи організації та управління розбудови дорожньо-транспортного комплексу;
- недосконалу законодавчу базу на місцевому та регіональному рівнях у галузі управління транспортною системою міста й регіону;
- недостатню інформаційну складову при прийнятті управлінських рішень;
- недостатнє фінансування розвитку дорожніх мереж та транспортної інфраструктури;
- не вирішеність майнових проблем і питань розмежування прав власності та управління об'єктами транспортної інфраструктури тощо.

Завдяки територіальному розподілу, транспортна мережа є ідеальним об'єктом для її автоматизації і підвищення ефективності за допомогою геоінформаційних систем (ГІС). Просторова складова слугує природною основою інтеграції задач управління транспортною інфраструктурою, оперативного управління навігацією, а також розрахункових задач. Причому різним видам транспорту притаманні свої специфічні задачі, які можуть набагато ефективніше використовуватись за допомогою ГІС. Наприклад, для

автодорожньої галузі це задачі планування (комплексний аналіз транспортного навантаження і стану дорожнього полотна), проектування (вибір оптимальних коридорів для прокладки нових трас), будівництва (відображення стану будівельних проектів і визначення пріоритетів), експлуатації (аналіз різних стратегій проведення ремонтних робіт і розподілу коштів, спільне відображення карт і будівельних креслень), моніторинг руху, збір статистики щодо функціонування дорожньої мережі, аналіз аварій.

Для сфери міського пасажирського транспорту це планування і аналіз маршрутної мережі, диспетчеризація, відстеження рухомого складу автотранспорту, ув'язка розкладу з іншими видами транспорту, паспортизація обладнання на зупинках і кінцевих пунктах, підтримка експлуатації систем енергозабезпечення, сигналізації і зв'язку, складання і аналіз звітів по ДТП, демографічний аналіз і реструктурування маршрутів.

Поєднання просторової і атрибутивної інформації дозволяє наочно подати взаємне розташування об'єктів транспортної і соціально-економічної інфраструктури. Геоінформаційні технології (ГІТ) дозволяють об'єднати на загальному генеральному плані дороги дані повітряного лазерного сканування, аерофотозйомки, тривимірні моделі об'єктів, інформацію про функціональні зони і технічні засоби регулювання руху.

Моніторинг стану дорожнього полотна і планування ремонтів — ще одна із сфер можливого широкого застосування ГІС. Інтеграція різнобічної інформації по дорожній мережі (види і якість покриття, транспортне навантаження, дати ремонтів) дозволяє будувати динамічні моделі її зносу і автоматизувати планування ремонтних робіт. В базі геоданих зручно зберігати відомості про дорожні знаки та іншу «придорожню» інформацію, прив'язану до координатної основи.

Транспортно-навігаційні ГІС є інформаційною базою для ефективного управління транспортними засобами будь-якого типу, розв'язку логістичних транспортних задач на міському, регіональному та державних рівнях, засобом для удосконалення організації дорожнього руху в межах міста, ефективного використання інфраструктури дорожнього руху, що надає можливість забезпечити безпосередніх учасників дорожнього руху та всі ланки управління транспортною системою необхідною оперативною та якісною просторово-часовою інформацією і, як наслідок, підвищити конкурентоспроможність галузі.

Засоби аналізу ГІС дозволяють будувати оптимальні маршрути на реальній ВДМ з її можливостями і обмеженнями (пропускна здатність вулиць, дозволені напрямки руху, повороти тощо), що дозволяє вирішити надзвичайно актуальну проблему для сучасної України — бурхливе зростання кількості автомобілів і перенасичення ВДМ транспортними засобами.

Побудова і оптимізація маршрутів для великих міст — надзвичайно актуальна задача, оскільки потрібно оптимізувати не окремий вид транспорту, а весь комплекс — метро, автобуси, трамваї, тролейбуси, електрички. Ця задача є надзвичайно складною з організаційної точки зору, оскільки вимагає узгоджених дій багатьох організацій. Вона є складною і з технічної точки зору, оскільки вимагає збору, систематизації і аналізу великого об'єму вихідних даних. Тому в сучасній інфраструктурі дорожнього руху дедалі важливішу роль відіграють ГІТ та GPS-технології, які уже сьогодні дають можливість забезпечити безпосередніх учасників дорожнього руху та всі ланки керування транспортними системами необхідною оперативною і якісною просторово-часовою інформацією. На основі GPS, ГІС, сучасних засобів зв'язку і телекомунікацій у розвинених країнах світу уже протягом декількох десятиріч створюються та розвиваються інтелектуальні транспортні системи (ІТС). Вони використовуються як засоби контролю і впливу на систему наземного транспорту, наприклад, менеджерів шляхом прямого керування (сигналами регулювання трафіку або опосередковано через оперативні повідомлення учасників руху про стан транспортних шляхів та їх завантаженість, у тому числі з використанням засобів мобільного зв'язку та Інтернет).

ГІС є оптимальною платформою для комплексних рішень у сфері транспорту [1]. В основі ГІС лежить концепція пошарової організації просторових даних: однотипні дані на земній поверхні групуються в шари (рис. 2).

Інструментарій просторового аналізу сучасних ГІС дозволяє не тільки прокладати маршрути по ВДМ, але й оцінювати ефективність цієї мережі, розраховувати «вузькі місця», планувати розвиток. Практично в будь-якому населеному пункті можна знайти приклади, коли довжина навіть самого близького до оптимального маршруту набагато перевищує геометрично найкоротшу відстань між пунктами відправлення і призначення. Причин декілька: низька зв'язність мережі, зумовлена перешкодами (залізниці, річки), і невдала організація руху. Результат — надмірне навантаження на всіх учасників дорожнього руху, пробки, шум, загазованість вулиць, прискорений знос дорожнього полотна.

Для вирішення перерахованих транспортних проблем створено багато математичних моделей транспортних потоків. Існуючий математичний апарат дозволяє промодельовувати різні параметри руху транспортних потоків і підходи до управління ними.

Можна виділити два основних підходи — *детермінований* і *ймовірнісний* (стохастичний).

В основі детермінованих моделей лежить функціональна залежність між окремими показниками,

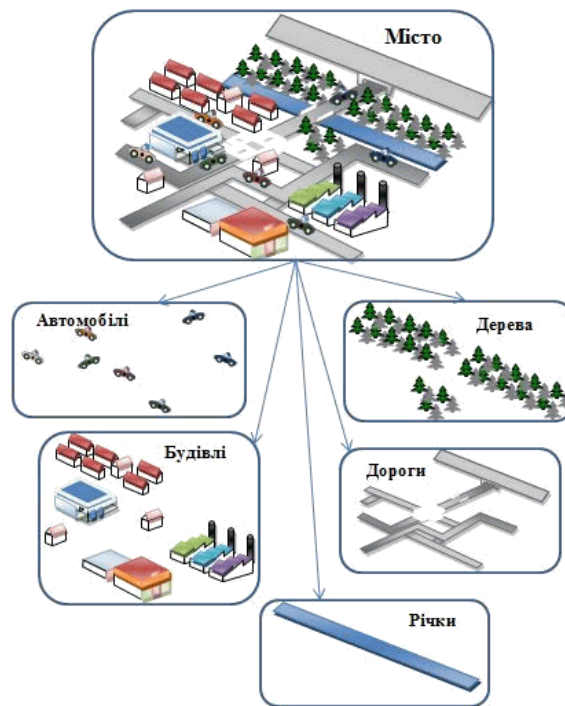


Рис. 2. Концепція пошарової організації просторових даних транспортної ГІС

наприклад, швидкістю і дистанцією між автомобілями в потоці. В стохастичних моделях транспортний потік розглядається як ймовірнісний процес з застосування відповідного математичного апарату [2].

Всі моделі транспортних потоків прийнято розбивати на три класи: моделі-аналоги, моделі проходження за лідером і ймовірнісні моделі.

У моделях-аналогах транспортний потік розглядається як рух транспортного засобу у фізичному потоці (гідро-і газодинамічні моделі). Цей клас моделей прийнято називати *макроскопічним*. У ньому розглядаються моделі ударних хвиль у транспортному потоці і гідродинамічні моделі першого і другого порядку.

У моделях проходження за лідером застосовується припущення про наявність зв'язку між переміщенням ведучого і веденого автомобіля. У моделях цієї групи враховується час реакції водіїв, детально досліджується рух на багаторядних дорогах, вивчається стійкість руху. Цей клас моделей називають *мікроскопічним*. До нього належать моделі руху за лідером, клітинні автомати (концепція клітинного автомата фон Неймана) тощо.

В ймовірнісних моделях транспортний потік розглядається як результат взаємодії окремих транспортних засобів на елементах транспортної мережі. У зв'язку з негнучким характером обмежень мережі і масовим характером руху у транспортному потоці виявляються чіткі закономірності формування черг, інтервалів, завантажень по смугах дороги тощо. Ці закономірності мають стохастичний характер [2].

Також, розглядаючи завдання управління транспортними потоками у містах, потрібно враховувати особливості міських доріг і режимів світлофорного управління.

З усієї кількості дорожньо-транспортних пригод (ДТП) 70% припадає на вулично-дорожню мережу (ВДМ) міста. В свою чергу, аналіз статистичних даних свідчить, що 75% ДТП в містах відбувається на перехрестях. Задача організації дорожнього руху (ОДР) на перехрестях полягає у визначенні оптимального рішення, яке забезпечило б вільний і безпечний взаємний перепуск потоків транспорту та пішоходів без зіткнень, заторів і за найбільш короткий час. Транспортні засоби та пішоходи рухаються без суттєвих затримок на перехресті (виникає саморегуляція руху внаслідок виконання правил дорожнього руху), але до певного ступеня завантаження головних та другорядних напрямів. З підвищенням інтенсивності транспортних і пішохідних потоків на перехрестях починають виникати конфліктні ситуації, що різко збільшують кількість ДТП. У зв'язку з цим виникає необхідність в управлінні потоками, що рухаються по ВДМ.

ВДМ значно відстає від розвитку рухомого складу в силу різниці витратних механізмів. Тому максимальне використання пропускної здатності існуючої ВДМ міст можливе тільки при раціональній організації дорожнього руху. Існуючі методи управління (здебільшого — програмні) не враховують нестационарності параметрів дорожнього руху, що природно впливають на якість світлофорного регулювання (СФР). У той же час існуючі критерії якості управління, такі як непродуктивні транспортні затримки, довжина черги перед "стоп"-лінією, кількість транспортних засобів у черзі також не враховують неста-

ціонарність потоків. Існуючі методики, що використовуються у практиці світлофорного регулювання базуються на поданні світлофорних об'єктів як систем масового обслуговування (СМО), що працюють у сталому режимі при усереднених характеристиках потоків. Експериментальні дослідження, навпроти, доводять, що характеристики ТП не є сталими у просторі і часі, що свідчить про їх нестаціонарну поведінку, врахування якої мусить покращити ситуацію.

Розглянемо декілька з них.

1. Метод цільового пошуку керуючих параметрів. Критерієм ефективності управління є значення транспортної затримки на перехресті. Математична інтерпретація даного способу управління описується формулою

$$\bar{t} = f(T_c, t_{o1}, t_{o2}) \rightarrow \min.$$

Розглянемо алгоритм розрахунку параметрів управління циклу регулювання на прикладі двохфазного світлофора.

Початкові умови:

$$T_c = t_{o1} + t_{p1} + t_{o2} + t_{p2},$$

де T_c — тривалість циклу світлофорного регулювання; $t_{o1}, t_{p1}, t_{o2}, t_{p2}$ — тривалості основних і проміжних тактів регулювання;

$$25 \leq T_c \leq 120,$$

$$T_p = t_{p1} + t_{p2} = \text{const},$$

де T_p — загальна тривалість проміжних тактів регулювання.

Тривалість другого основного такту t_{o2} буде однозначно залежати від тривалості першого основного такту t_{o1} , і навпаки, а саме:

$$t_{o2} = T_c - T_p - t_{o1}.$$

Метод цільового спрямованого пошуку керуючих параметрів має низку переваг:

- 1) при розрахунку використовується мінімум емпіричних залежностей, крім розрахунку значення транспортної затримки;
- 2) при машинному методі обробки вхідної інформації розрахунок керуючих параметрів здійснюється безперервно і за гранично короткі інтервали часу, достатні для своєчасного застосування оновлених значень;
- 3) розглянутий метод доцільно використовувати не тільки на локальному рівні управління (в межах одного перехрестя), але також і на рівні управління ділянкою вулично-дорожньої мережі району, магістралі і навіть міста [3].

2. Метод статичної оптимізації циклів світлофорного регулювання.

Система масового обслуговування.

Перехрестя, що має світлофорне регулювання, нескладно уявити як одноканальну (або багатоканальну) систему масового обслуговування (СМО) з необмеженим часом очікування, де:

- 1) інтенсивність заявок λ — інтенсивність руху транспортних засобів N , авт/с;
- 2) дисципліна черги: перший прийшов — перший обслуговується;
- 3) чіткий механізм обслуговування: при структурі циклу регулювання

$$T_c = t_{o1} + t_{p1} + t_{o2} + t_{p2} + \dots + t_{ok} + t_{pk},$$

інтенсивність обслуговування визначиться з формули

$$\mu = \frac{t_{oi}}{T_c t_{\text{обсл}}},$$

де $t_{\text{обсл}}$ — час обслуговування одного автомобіля, с; t_{oi} — тривалість дозвільного сигналу для i -го напрямку, с.

Стационарний режим функціонування даної системи масового обслуговування існує при $t \rightarrow \infty$ для будь-якого $n = 0, 1, 2, \dots$ і коли $\lambda < \mu$.

Система алгебраїчних рівнянь, що описує роботу даної СМО, має вигляд

$$\begin{cases} \lambda P_0 + \mu P_1 = 0, & n = 0, \\ \lambda P_{n-1} + \mu P_{n+1} - (\lambda - \mu) P_n, & n > 0, \end{cases}$$

де P_0 — ймовірність того, що перехрестя вільне для руху і заявок не надходить;

P_1 — ймовірність того, що перехрестя обслуговує один автомобіль, черги немає;

P_2 — ймовірність того, що перехрестя обслуговує один автомобіль, черга — один автомобіль;

P_n — ймовірність того, що перехрестя обслуговує один автомобіль, черга — $(n - 1)$ автомобілів.

Розв'язок даної системи рівнянь має вид:

$$P_n = (1 - v) \cdot v^n, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad \text{де } v = \frac{\lambda}{\mu} < 1.$$

Розв'язок задачі оптимізації циклів світлофорного регулювання зводиться до розв'язку задачі лінійного програмування.

Постановка завдання лінійного програмування. Обмеження, що накладаються на структуру циклу регулювання, наступні:

$$\begin{cases} t_{O1} > 7, \\ t_{O2} > 7, \\ t_{O1} > t_{\text{пінш1}}, \\ t_{O2} > t_{\text{пінш2}}, \\ t_{O1} + t_{O2} < 120 - T_p, \\ (1 - \lambda_1 t_{\text{обсл}}) t_{O1} - \lambda_1 t_{\text{обсл}} t_{O2} > \lambda_1 t_{\text{обсл}} T_c, \\ (1 - \lambda_2 t_{\text{обсл}}) t_{O2} - \lambda_2 t_{\text{обсл}} t_{O1} > \lambda_2 t_{\text{обсл}} T_c. \end{cases}$$

Останні дві нерівності враховують той факт, що інтенсивність обслуговування повинна бути менше інтенсивності руху.

Цільова функція — мінімальна середньозважена затримка на перехресті:

$$\frac{\frac{\lambda_1^2}{\mu_1^2 \left(1 - \frac{\lambda_1}{\mu_1}\right)} + \frac{\lambda_2^2}{\mu_2^2 \left(1 - \frac{\lambda_2}{\mu_2}\right)}}{\lambda_1 + \lambda_2} = \bar{t} \rightarrow \min.$$

Переваги:

- 1) більш ефективне використання пропускної здатності перетинання і зменшення середньої затримки;
- 2) можливість збору статистичних даних транспортного потоку з наступним аналізом;
- 3) можливість прогнозування подальшого розвитку транспортної ситуації [4].

3. Моделювання роботи світлофора з нечіткою логікою. У пропонованому нечіткому світлофорі час циклу залишається постійним, проте час його роботи в режимі зеленого світла повинен змінюватися в залежності від кількості машин, що під'їжджають до перехрестя.

Для роботи нечіткого світлофора на перехресті вулиць Північ–Південь (ПП) і Захід–Схід (ЗС) необхідно встановити 8 датчиків, які що фіксують проїзд повз них машини (рис. 3).

Світлофор використовує розбіжності показань чотирьох пар датчиків: $(d_1 - d_2)$, $(d_3 - d_4)$, $(d_5 - d_6)$, $(d_7 - d_8)$. Якщо для вулиці ПП горить зелене світло, машини проїжджають перехрестя і показання двох пар датчиків однакові: $d_1 = d_2$, $d_5 = d_6$, а отже, їх розбіжність дорівнює нулю. У той же час на вулиці ЗС перед світлофором зупиняються машини, які встигли проїхати тільки d_4 і d_7 .

У результаті можна розрахувати сумарну кількість автомобілів на цій вулиці:

$$(d_4 - d_3) + (d_7 - d_8) = (d_4 - 0) + (d_7 - 0) = d_4 + d_7.$$

Визначимо входи (фактори) і виходи (параметри) об'єкта дослідження.

Вхідні змінні:

- кількість машин на вулиці Північ–Південь (ПП) — n_{ns} ;
- кількість машин на вулиці Захід–Схід (ЗС) — n_{we} ;
- середня швидкість на вулиці ПП — v_{ns} ;
- середня швидкість на вулиці ЗС — v_{we} ;
- середня відстань до перехрестя ПП — l_{ns} ;
- середня відстань до перехрестя ЗС — l_{we} ;
- час зеленого світла на вулиці ПП — t_{ns} ;
- час зеленого світла на вулиці ЗС — t_{we} .

Для кожної змінної задаються логістичні терми, що відповідають певним діапазонам чітких значень. Оскільки сутність роботи світлофора полягає у зміні часу зеленого світла, в якості вихідного параметра пропонується використовувати величину цієї зміни.

Приклади моделювання дорожнього руху за допомогою ГІТ представлені на рис. 4.

5. ВИСНОВКИ

Застосування технологій ГІС дозволяє суттєво покращити рух на ВДМ, а використання ГІС, ГІТ та систем GPS дозволяє знизити втрати робочого часу і підвищити оборотність використання транспортних засобів.

Накопичення статистичної інформації про маршрути та режими руху дозволяє оптимізувати роботу диспетчерської служби. Постійний контроль підвищує дисципліну водіїв і знижує показники аварійності. Контроль місця розташування автотранспорту запобігає викраденню перевезених вантажів і матеріалів та підвищити рівень захисту автомобілів і спецтехніки від угону.

Контроль фактичних пробігів і витрати палива знижує експлуатаційні витрати. Знання реального місця розташування автотранспорту дозволяє ефективно керувати ним.

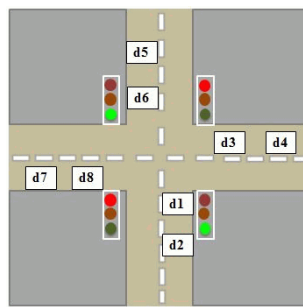
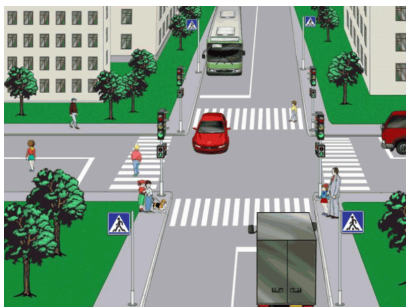


Рис. 3. Схема роботи нечіткого світлофора на перехресті вулиць

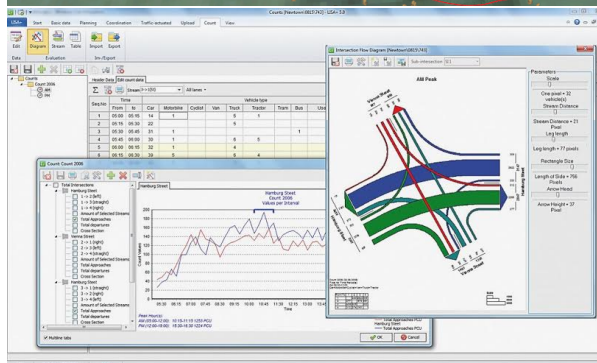
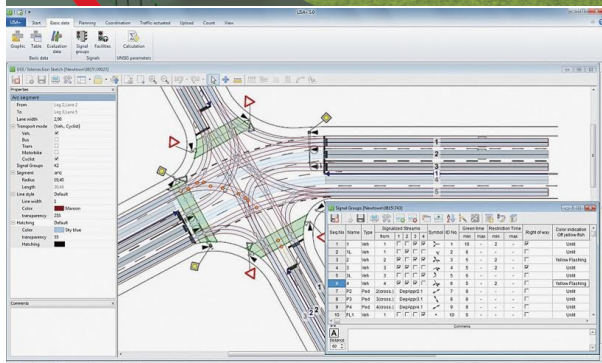


Рис. 4. Приклади моделювання дорожнього руху в ГІС

1. Зацерковний В.І., Бурачек В.Г., Железняк О.О., Терещенко А.О. ГІС і бази даних. — Ніжин: НДУ ім. М.Гоголя, 2014. — 492 с.
2. Гаврилов А.А. Моделирование дорожного движения. — М.: Транспорт, 1980. — 189 с.
3. Вытяжков Д.В. Целевой поиск управляющих параметров светофорной сигнализации в автоматизированной системе управления дорожным движением / Сборник научных трудов. Серия «Естественнонаучная». — №1 (7) СевКавГТУ. — Ставрополь, 2004.
4. Голуб Д.И. Метод статической оптимизации циклов светофорного регулирования // Сборник научных трудов Северо-Кавказского государственного технического университета. Серия «Экономика». — 2007. — № 5. — Режим доступа: <http://www.ncfu.ru>.
5. Вовк О.Л. Исследование трудноформализуемых алгоритмов нечёткого управления в системах управления объектами: Автореферат магистерской выпускной работы. — Донецк, 2002. — 19 с.

Надійшла до редакції 27.08.2015
Прийнята до друку 8.10.2015

ё