

УДК 004.942+656.052.1

Автоматизована система керування рухом транспортних засобів в межах міста

Д. Г. Богуто¹, В. І. Волинець², П. К. Ніколюк¹, П. П. Ніколюк³¹Донецький національний університет імені Василя Стуса, Україна²Вінницький інститут економіки Тернопільського національного економічного університету, Україна³Вінницький національний технічний університет, Україна

Представлена технологія такого інтелектуального регулювання руху транспорту у великому місті, при якій не будуть виникати затори. Пропонується рішення проблеми трафіку шляхом контролю регулювання транспортних потоків як на окремому перехресті, так і в межах всього мегаполісу. Вибір найоптимальнішого маршруту базується на моніторингу ситуації з трафіком в режимі постійного контролю і корекції маршруту кожного транспортного засобу, що замовляє маршрут центральному пункту керування трафіком (ЦПКТ).

Ключові слова: розумне перехрестя, п'єзокристалічний датчик, орієнтований мультиграф, імітаційне моделювання, GPS-навігатор.

Представлена технология такого интеллектуального регулирования движения транспорта в большом городе, при которой не будут возникать заторы. Предлагается решение проблемы трафика путем контроля регулирования транспортных потоков как на отдельном перекрестке, так и в пределах всего мегаполиса. Выбор оптимального маршрута базируется на мониторинге ситуации с трафиком в режиме постоянного контроля и коррекции маршрута каждого транспортного средства, заказывающего маршрут центральному пункту управления трафиком (ЦПУТ).

Ключевые слова: умный перекресток, пьезокристаллический датчик, ориентированный мультиграф, имитационное моделирование, GPS-навигатор.

The intellectual traffic regulation technology for a big city which prevents traffic jams is presented. The traffic problem is proposed to be solved by controlling the regulation of traffic flows at separate intersection as well as within an entire metropolis. The choice of the most optimal route is based on monitoring the traffic situation in the constant control mode and the route correction for each vehicle which requests the route from the central office of traffic management (COTM).

Keywords: clever intersection, piezocrystalline sensor, oriented multigraph, simulation modeling, GPS-navigator.

1. Постановка проблеми

Затори на дорогах – головний біль всіх мегаполісів світу. Вихід зі складної транспортної ситуації може бути вирішений шляхом використання мережі «розумних» світлофорів, що синхронно взаємодіють між собою. Припустимо, водій має намір проїхати по міському маршруту самим оптимальним способом, стартуючи із початкової точки і закінчуючи подорож в точці . Для кожної пари заявлених водієм точок комп'ютерна програма формує самий оптимальний варіант руху (маршрут), що постійно коригується (інакше функціонує в режимі «on-line») в залежності від дорожньої ситуації. Технологія, що пропонується, дозволяє синхронізувати потоки транспортних засобів (ТЗ) навіть у містах з

мільйонами автомобілів на вулицях. Це означає, що трафік у великих містах переходить на якісно новий рівень.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Першочерговою проблемою регулювання трафіку у мегаполісі є організація ефективної роботи кожного окремого перехрестя. Дійсно, саме на перетині доріг виникають затори. Тому стартово необхідно покращити проїзд місць, де сходяться міські дороги. В першу чергу необхідно реєструвати автомобілі, що перетинають перехрестя доріг. Для реєстрації проїзду ТЗ взагалі кажучи існує кілька способів, що базуються на використанні різних фізичних принципів [1]. Розглянемо та проаналізуємо деякі з них. Патент [2] розглядає відеореєстрацію потоку ТЗ, що не доцільно та малоефективно, тому що, наприклад, в темну пору доби чи під час сильних опадів такий спосіб реєстрації малоефективний. Крім того, відеосигнал може перебиватись високо габаритними ТЗ та має обмежену апертуру. Більш досконала система реєстрації трафіка описана в роботі [3]. Винахідники пропонують встановити на лініях між перехрестями датчики для реєстрації потоків ТЗ та для передачі даних на ЦПКТ всього міста. Автор роботи [4] пропонує спосіб регулювання, що полягає у включенні червоного світла на час відсутності ТЗ. Дуже цікавою є корисна модель, представлена в [5]. Даний винахід розглядає спосіб регуляції трафіку на перехресті з допомогою вмонтованих в полотно дороги індукційних котушок, що реєструють кожен автомобіль. Причому, реєструється не тільки загальне число ТЗ в одному напрямку проїзної частини дороги, а і окремі значення величин автомобілів по смугах руху. Подібна реалізація керування проїздом ТЗ через перехрестя викладена в роботі [6].

Дослідження [7] презентує технологію, що надає перевагу при проїзді перехрестя громадському транспорту (public transport) а також автомобілям спеціальних служб (emergency vehicles) – поліції, швидкої медичної допомоги і т.д. Технічно на ТЗ вказаної категорії встановлюються генератори інфрачервоних хвиль, які при під'їзді до перехрестя випромінюють спеціальний сигнал в напрямку контролера (traffic light controller), що керує світлофором та при отриманні сигналу від автомобілів зазначеного типу переводить світлофор у зелену фазу.

У відношенні регулювання руху через окреме перехрестя близькою до нашого дослідження є робота [8].

Прототипом першої стадії нашого дослідження є технологія ISBAK – Full Adaptive Traffic Management System [9], яка використовує дані, отримані з магнітних сенсорів, вмонтованих в полотно проїзної частини. При перетині автомобілем місця розташування сенсора дані зчитуються та передаються на ЦПКТ, де використовується програма оптимізації трафіка по всьому місту.

3. Формулювання мети статті

Метою даного дослідження являється розробка інтелектуальної системи, що складається з набору технічних і програмних засобів з метою забезпечення максимізації пропускної спроможності не тільки окремого перехрестя, а і оптимізації трафіку по всьому місту для кожного окремо взятого автомобіля. В

даній роботі пропонується особлива система реєстрації руху ТЗ, відмінна від існуючих. Суть її полягає в тому, що в полотно дороги на перехресті за стоп-лінією монтується п'єзокристаличні датчики, які фіксують число колісних пар, пропорційне числу ТЗ, що або в'їжджають на проїзну частину дороги між сусідніми перехрестями (так звані вхідні датчики) або в'їжджають на перехрестя – вихідні датчики. При цьому вхідні та вихідні датчики на сусідніх перехрестях працюють сумісно.

Усі перехрестя, оснащені описаною високонадійною системою збору інформації в плані завантаженості ТЗ, пов'язані між собою і фіксують дані щодо завантаженості перехрестя, змінюючи фази світлофорів на вимогу дорожнього трафіку. Пропонована технологія дозволить збільшити пропускну спроможність на дорогах шляхом щосекундного моніторингу динаміки руху ТЗ і відповідного коригування протяжності світлофорних фаз та пролонгації часу горіння зеленої (або червоної) фаз залежно від дорожньої обстановки.

Умовно пропоновану автоматизовану інтелектуальну систему регуляції дорожнього руху можна розділити на два етапи. На першому етапі здійснюється регулювання трафіку через одне перехрестя, що взаємодіє із сусіднім, а на другому – через все місто. Причому, саме другий етап являє собою принципове «ноу-хау». В цій роботі розглянемо перший етап, що тісно пов'язаний з другим.

4. Виклад основного матеріалу

Технічно рух через перехрестя організований наступним чином. На перетині доріг в полотно проїзної частини перпендикулярно до поздовжньої вісі дороги монтується п'єзокристаличні датчики [1], що реагують на тиск, спричинюваний автомобільною колісною парою. Відповідно електричний сигнал, спричинений стиском п'єзодатчика, поступає на вимірально-обчислювальний комплекс (ВОК), розташований в ЦПКТ. Таким чином відбувається реєстрація сигналів, що поступають з різних перехрестя міста. Спектр сигналів, отримуваних з кожного перехрестя, пропорційний числу автомобілів, які перетнули його в різних напрямках. Розглянемо детально перший етап регулювання трафіку. Виокремимо для прикладу хрестоподібне перехрестя і застосуємо до нього «розумну» технологію регулювання проїзду транспорту. Основний принцип світлофорного регулювання при цьому полягає в тому, щоб розподілити час світлофорного циклу, або іншими словами період перемикання світлофору, пропорційно до завантаженості ТЗ напрямків на перехресті. В окремих випадках необхідно пролонгувати час горіння зеленого світла в найбільш завантаженому напрямку. Схематично принцип дії «розумного» світлофора можна зрозуміти із рис. 1. Створена комп'ютерна програма, яка керує роботою світлофорів на перехресті з таким розрахунком, щоб функція інтенсивності проїзду ТЗ через перехрестя $I = I(t)$ досягала максимуму (t – час).

Взагалі період перемикання світлофору – це величина, що може складатися із таких складових

$$T = t_H^G + t_H^R + t^Y + t_V^G + t_V^R + t^P, \quad (1)$$

де t_H^G – час горіння зеленого світла у горизонтальному напрямку;

t_H^R – час горіння червоного світла у горизонтальному напрямку;

t^Y – час горіння жовтого світла;

t_V^G – час горіння зеленого світла у вертикальному напрямку;

t_V^R – час горіння червоного світла у вертикальному напрямку;

t^P – час горіння зеленого світла для пішоходів.

«Розумність» світлофору полягає в тому, що фази горіння зеленого світла пропорційні завантаженості напрямків – в нашому випадку це завантаженість горизонтального та вертикального напрямків (рис. 1). Тобто треба величини протяжності горіння зеленого світла у вертикальному та горизонтальному напрямках (t_V^G та t_V^R відповідно) розподілити пропорційно завантаженості ТЗ цих напрямків N_V та N_H . Тобто

$$\frac{t_V^G}{t_H^G} = \frac{N_V}{N_H}. \quad (2)$$

Такий перерозподіл дозволяє максимізувати функцію $I = I(\nu)$, де I – інтенсивність проїзду перехрестя, що залежить від частоти перемикання світлофора ν , а ν в свою чергу залежить від величини N – загального числа автомобілів, що перетинають перехрестя за період перемикання світлофору.

$$I(\nu(N)) = \frac{dN}{dt}, \quad (3)$$

де $N = N_V + N_H$.

Таким чином, система дозволяє значно покращити пропускну здатність перехрестя завдяки комп'ютерній програмі, що регулює режими роботи світлофорів в плані протяжності горіння різних фаз та їх пролонгації – останнє по необхідності. Причому пролонгація може стосуватись не тільки часу горіння зеленого світла, а також і часу горіння червоного світла. Останнє можливе, наприклад, коли певний напрямок на перехресті основної та другорядної доріг не завантажений зовсім – звичайно зі сторони другорядного напрямку, – тоді на цей напрямок має постійно горіти червоне світло; зелене включається лише у випадку появи на вказаному напрямку хоча б одного ТЗ.

Треба звернути увагу на ту обставину, що запропонована система регуляції дорожнього руху дуже просто імплементується в існуючу транспортну інфраструктуру та є досить економічною і володіє високим ступенем надійності. В даній розробці автори відмовились від відеокамер; наявність останніх, як було сказано, досить суттєво збільшує, з однієї сторони, вартість проекту, а з іншої, є досить ненадійною з точки зору збору інформації про транспортні потоки. В свою чергу, п'єзокристалічні датчики, вмонтовані в полотно дороги є дуже надійними, дешевими, вимагають дуже мало витрат на монтаж та під'єднання до існуючої мережі керування трафіком. Можна використовувати цілий спектр датчиків такого типу, наприклад, датчик дорожнього руху Roadtrax BL.[1]. Для монтування датчика потрібен лише невеликий розріз в полотні дороги та під'єднання виводу до існуючої мережі світлофорного регулювання.

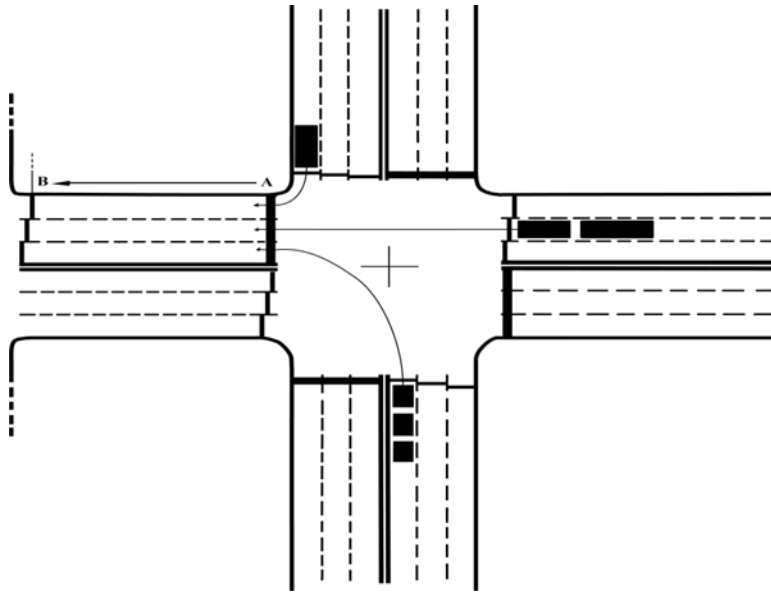


Рис.1. Перехрестя А, з'єднане з сусіднім перехрестям В. Чорними прямокутниками зображені ТЗ, маршрути яких пролягають в напрямку А → В. Показані також вхідні (чорна смужка, позначена літерою А) та вихідні датчики (три рядом розташовані смужки, позначені літерою В). Кожен вхідний та вихідний датчики з'єднані з ВОК (на рисунку зображений лише один такий сигнальний провід, що виходить від одного із датчиків В – це суцільна лінія, що переходить в пунктирну).

Кожне окреме перехрестя працює не автономно, а у тісній взаємодії із сусіднім регульованим перехрестям. Щоб показати таку взаємодію на рис.1 зображена ділянка дороги між сусідніми перехрестями. Вказана взаємодія здійснюється з допомогою вхідних та вихідних датчиків. Вхідний датчик зображений на рис. 1 у вигляді суцільної чорної смужки та позначений літерою А, вихідний – літерою В. Датчик А реєструє автомобілі, які в'їжджають на ділянку дороги АВ з трьох можливих напрямків перехрестя А. Вважатимемо, що кожна ділянка проїзної частини дороги складається із трьох смуг. На цих смугах автомобілі, що в'їхали зі сторони перехрестя А, розподіляються по смугах руху у відповідності з вибраним маршрутом. Тому вихідний датчик В складається власне з трьох датчиків – у випадку трьох смуг руху – з метою реєстрації ТЗ, що рухаються по різних трьох маршрутах. Кожен з цих датчиків реєструє автомобілі, точніше колісні пари ТЗ, що проїжджають перехрестя В. Нехай в межах періоду перемикання світлофора число колісних пар, що перетнули перехрестя В дорівнює відповідно n_a – число колісних пар, що перетнули перехрестя В, рухаючись на розворот та наліво – ці ТЗ реєструються датчиком, що примикає до осьової лінії проїзної частини; n_b – число колісних пар, що перетнули перехрестя В, рухаючись прямо – реєструються середнім датчиком і, нарешті, n_c – число колісних пар, що перетнули перехрестя В, рухаючись направо – реєструються датчиком, що примикає до краю проїзної частини (на

рис.1 пунктиром показано сигнальний вивід лише від цього датчика; проте всі датчики з'єднані з ВОК на ЦПКТ).

Розглянемо відношення $n_a/N_{AB}, n_b/N_{AB}, n_c/N_{AB}$. (тут N_{AB} – кількість автомобілів, що в межах циклу перемикання світлофору T в'їжджають на ділянку дороги в напрямку $A \rightarrow B$). Чим більше кожне з таких відношень, тим більшою є пропускна здатність перехрестя B у відповідному напрямку. При цьому має виконуватись умова

$$n_a + n_b + n_c \approx N_{AB}. \quad (4)$$

Крім того, для кожної проїзної частини комп'ютерна програма передбачає наявність накопичувача, що обліковує число автомобілів n_g , які залишаються на проїзній частині після закінчення фази зеленого світла (мова йде про автомобілі, які не встигли перетнути перехрестя). У випадку виконання співвідношення (4) та при умові невеликого числа на накопичувачі ($n_g \leq 5$) всі смуги проїзної частини ділянки дороги $A \rightarrow B$ є відкритими для трафіка.

Розглянемо тепер мультиплікати виду

$$(N_{AB}/n_a) \cdot l_{AB}, (N_{AB}/n_b) \cdot l_{AB}, (N_{AB}/n_c) \cdot l_{AB}, \quad (5)$$

де l_{AB} – довжина ділянки дороги між перехрестями A і B .

Комп'ютерна програма, що керує прокладанням маршрутів, зберігає в пам'яті саме набори таких величин. При прокладанні маршруту сума таких величин підлягає мінімізації. Для організації такого процесу розглянемо наступне. Транспортну мережу міста представимо у вигляді орієнтованого мультиграфа (рис.2). Нехай маємо справу із рухом ТЗ, що пролягає із точки S в точку F . Завдання полягає в тому щоб для кожної заявленої пари величин (S_i, F_i) прокласти найоптимальніший маршрут. Тобто

$$\sum_{h=1}^f (N_{A_h B_h} / n_h^B) l_{A_h B_h} \rightarrow \min \quad (6)$$

Тут h – індекс, що позначає смуги руху вздовж маршруту (іншими словами, ребра графа), що зчеплені між собою та утворюють нерозривну траєкторію, з'єднуючи початкову S_i та кінцеву F_i точки, заявлені водієм автомобіля i . Символ B (Band) символізує собою смугу руху проїзної частини дороги типу $A \rightarrow B$ одного напрямку (позначатимемо на проїзній частині одного напрямку смуги руху як a, b, c, d і т.д. – літерами латинського алфавіту, починаючи від смуги, що прилягає до осьової лінії). Символ f означає число смуг виду $A_h B_h$, які формують прокладений маршрут. Для кожної заявленої пари (S_i, F_i) програма формує із мультиплікат типу (5) нерозривний маршрут, що пов'язує між собою точки S_i та F_i . Цей маршрут для графа на рис. 2 може виглядати, наприклад, так:

$$(S \rightarrow 1)_c \rightarrow (1 \rightarrow 3)_a \rightarrow (3 \rightarrow 4)_b \rightarrow (4 \rightarrow F)_b \quad (7)$$

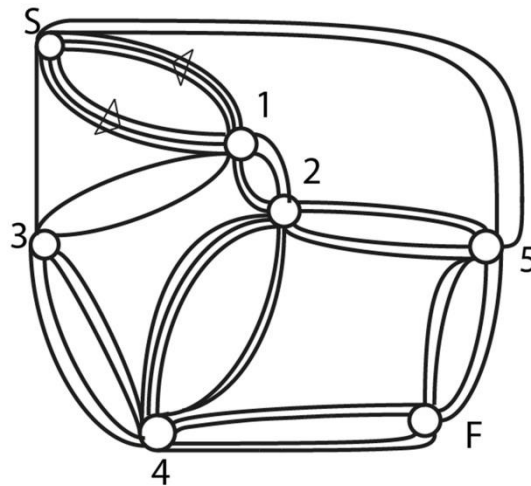


Рис.2. Орієнтований планарний мультиграф, що символізує собою частину транспортної мережі міста. Трикутниками показано напрямки смуг руху лише на окремій ділянці дороги. Точка S символізує собою точку старту ТЗ, а точка F відповідно точку закінчення маршруту.

Взагалі маршрутів подібного типу може бути сотні або тисячі – якщо говорити про транспортну мережу міста. Але треба знайти самий оптимальний нерозривний маршрут. Мовою теорії графів в даному разі маємо справу з орієнтованим простим ланцюгом [10,с.101]. Треба зауважити, що ситуація на маршруті, як і по всьому місту, змінюється щосекундно, але програма, володіючи даними щодо завантаженості смуг руху в режимі «on-line», постійно моніторить ситуацію по кожній парі, тобто проводить GPS-локацію кожного ТЗ та при необхідності адаптує (змінює) маршрут з метою виконання умови (6). При цьому GPS-навігатор задає положення кожного автомобіля на маршруті (GPS-локація), а водій автомобіля отримує голосову інформацію щодо руху по найбільш оптимальному маршруту до своєї кінцевої точки. Відмінність даної технології від відомих Google-карт [11] полягає в тому, що останні констатують наявність заторів на дорогах міста постфактум, а запропонований варіант коригує трафік-ситуацію в режимі реального часу таким чином, щоб жоден автомобіль не потрапив в затор. Очевидно, що при такій технології затори взагалі будуть відсутні. Встановлення такої інтелектуальної інфраструктури на перехрестях міста дозволить не лише поліпшити організацію руху на окремо взятому перетині проїжджих частин, але також і по всьому місту.

Дуже перспективним методом апробації даної технології є програма візуального імітаційного моделювання AnyLogic Profesional 7.3.7 [12], в якій представлено чотири імітаційні моделі, що регулюють дорожній трафік. Найбільш ефективною є модель Traffic Light Phases Optimization, що візуально імітує проїзд ТЗ через три сусідні перехрестя.

Взагалі автомобільні трафік-компанії приділяють велику увагу покращенню ситуації на дорогах і, особливо, на міських маршрутах. Виготовляються різноманітні пристрої та створюються технології з метою ефективно організації трафіку. Наприклад, компанії SICK AG та Sony Visual Imaging & Products [14]

розробляють найсучасніше устаткування для організації дорожнього руху. Проте найважливіше питання стосовно ефективного проїзду у мегаполісах є невирішеним: затори не тільки не зменшуються, а, навпаки, – збільшуються. Це свідчить про доцільність проведення досліджень та створення технологій, подібних до запропонованої.

ЛІТЕРАТУРА

1. Виглеб Г. Датчики /Виглеб Герхард. – М.: Мир, 2014. – 236 с.
2. Pat. CN103164966 China, Intelligent traffic signal lamp / Zhou Xiong; applicant Xi'an King Truck Electron Co.; publ. 24.09.2013.
3. Pat. CN104064049 USA, Intelligent traffic road capacity reporting system through short messages/ Lui Yonghua, Sun Jingyi; applicant Kunming University of Science and Technology; publ. 17.08.2014.
4. Pat. CN104504917 China, Intelligent traffic signal control device and method/Xu Xiude; publ. 14.06.2015.
5. Pat. CN204680208U China, Treat traffic lights that intelligence is switched over through vehicle proportion according to each crossing/Xia Zhongming; applicant Changshu friends connector technology Co., Ltd; publ. 30.09.2015.
6. Pat. CN105390002A China, Intelligent traffic light capable of alleviating congestion/ publ. 09.03.2016.
7. Cross.cz - Traffic Control - CROSS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.cross.cz/en/products-traffic-control
8. Lugong Wu, Xiaorong Zhang, Zhikai Shi. Intelligent Fuzzi Control for Crossroads Traffic Light/ Lugong Wu, Xiaorong Zhang, Zhikai Shi// An Second WRI Global Congress on Intelligent Systems. – 2010. – P.125-131.
9. ISBAK - Full Adaptive Traffic Management System (АТАК ... – YouTube) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.youtube.com/watch?v=Ge4rG8ER_C.
10. Основи дискретної математики/[Баранецький Я.О, Гнатів Б.В, Ільків В.С. та ін.]; під ред. О.І. Бобика. – Вид-во нац. у-ту «Львівська політехніка», ч.2. – 2005. – 159 с.
11. Google Maps 9.62.1 для Android [Електронний ресурс]. – Режим доступу: google-maps.ru.uptodown.com
12. AnyLogic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.anylogic.ru>.
13. Комов А.А. Разработка имитационной модели регулируемого перекрестка /Анатолий Комов //Техника и технология строительства. – №1(1). –2015. – С.34-41.
14. A to Z List of Road Traffic Contractors - Road Traffic Technology [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.roadtraffic-technology.com/contractors/.