

УДК 004.942(519.876.5)

С. В. СИРОТА**МОДЕЛЬ СИНХРОНІЗАЦІЇ РОБОТИ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ДОРОЖНЬОГО РУХУ НА ПЕРЕХРЕСТЯХ ТРАНСПОРТНОГО ВУЗЛА ДОВІЛЬНОЇ ТОПОЛОГІЇ НА БАЗІ РЕСУРСНОЇ МЕРЕЖІ**

Обґрунтовано використання ресурсної мережі для моделювання завантаженості регульованих перехресть в реальному часі. Запропонований підхід дозволяє досліджувати і порівнювати різноманітні модулі управління рухом на перехресті з метою оптимізації пропускної здатності транспортного вузла довільної топології, моделювати складні автотранспортні мережі великих міст з великою кількістю автомобілів. Розроблено дискретно-подієву модель перехрестя, та запропоновано структуру ресурсної мережі з допомогою, якої моделі перехресть поєднуються в модель дорожньої ділянки.

Ключові слова: ресурсні мережі, пропускна спроможність, адаптивні системи регулювання руху, транспортні потоки.

Вступ. Нагальною проблемою багатьох сучасних міст є оптимальне керування дорожнім рухом. Запобігання транспортних заторів зменшує кількість шкідливих викидів, підвищує безпеку руху та заощаджує час, який витрачає людина в транспорті і в результаті поліпшує якість життя в місті в цілому.

Необхідність впровадження автоматизованих систем керування дорожнім рухом сьогодні не викликає сумнівів. Основою таких систем є програмна модель транспортної системи реалізована з використанням спеціалізованих структур даних і дозволяє проводити аналіз здійсненності планів перевезень з виявленням «вузьких» місць в транспортно-логістичній системі з метою оптимізації планів перевезень в нормальному режимі та при проведенні масштабних заходів.

Зазвичай дорожній рух на регульованому перехресті в автоматичному режимі контролюється світлофором з фіксованим часом зміни сигналу або світлофором, режим перемикання якого змінюється в залежності від часу доби. В розвинутих країнах застосовуються адаптивні світлофори які автоматично відповідно до дорожньої ситуації змінюють час перемикання сигналу. Але перед тим як запровадити таку систему на реальному перехресті необхідно моделювання та дослідження її роботи і взаємодії з іншими перехрестями. Тому створення адекватних моделей транспортних вузлів є актуальною задачею.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Задача моделювання транспортних мереж є досить відомою задачею з 1736 року, часів Л. Ейлера та появи теорії графів [1]. Становлення поняття потокова мережа пов'язане з доведенням теореми про максимальний потік [2] та розробкою алгоритму Форда – Фалкерсона. Основи математичного моделювання закономірностей дорожнього руху були закладені на початку ХХ сторіччя. [3] Розгорнутий аналіз стратегій автома-

тизованого управління дорожнім рухом наведено в роботі [4]. Слід виділити підходи до моделювання транспортної мережі і моделювання роботи окремого перехрестя. Найпростішим варіантом є світлофор з фіксованим часом роботи кожного сигналу. Більш складним є той, тривалість сигналів якого встановлюється для певних проміжків доби, або навіть тижня. Такі ділянки руху поєднувались в системи пультового управління, роботу яких контролював диспетчер. Наступним етапом стало застосування адаптивних світлофорів, які мали датчики для відстеження транспортних засобів на в'їздах перехрестя і корегували час перемикання в залежності від їх показників. [5, 6]. Для моніторингу поточної ситуації на перехресті використовуються дані зі встановлених камер спостереження та різноманітні датчики, аналіз інформації з яких, дозволяє регулювати рух на перехресті в режимі реального часу із застосування нечіткої логіки [7] нейромережевого підходу та інших інтелектуальних методів.

Основним недоліком такого варіанту є неможливість автоматично адаптуватись до дорожньої ситуації на суміжних перехрестях і змінювати час перемикання сигналу відповідно до дорожньої ситуації на транспортному вузлі в цілому. Останнім часом було проведено ряд досліджень [8, 9] з метою порівняти ефективність застосування різноманітних методів керування адаптивним світлофором, результат яких показав доцільність побудови моделі транспортного вузла де адаптивні світлофори виступають в якості агентів.

Ціль та задачі дослідження. Метою даного дослідження є імітаційне моделювання транспортного вузла, що складається з декількох перехресть із адаптивними і фіксованими світлофорами для подальшої розробки методів оптимального керування його роботою. Модель повинна вирішувати питання підтримки прийняття

© С. В. Сирота. 2015

рішень при плануванні і оцінці ефективності заходів по зміні вулично-дорожньої мережі, забезпечувати порівняння варіантів схем організації дорожнього руху і планування заходів при проведенні робіт, пов'язаних з перекриттям ділянок доріг.

1. Задача полягає в об'єднанні модулів моделей перехрестя в потокову мережу. Стани мережі повинні обчислюватись в реальному часі.

2. Необхідно запропонувати поліноміально-обчислювану модель і оцінити її кількісні характеристики.

Застосування ресурсної мережі для моделювання транспортного вузла що складається з регульованих перехрестя. Загальна схема регульованого перехрестя запропонована в [8] приведена на рис. 1

При побудові його імітаційної моделі приймається, що кожний напрямок перехрестя («південь», «захід», «північ», «схід») має один вихід і 3 входи, сума входів складає вхід напрямку. Цифрами позначені фази світлофора, які дозволяють рух в певному напрямку. Протяжність фази вимірюється в кількості транспортних засобів, які можуть перетнути перехрестя в бажаному напрямку, тобто один такт моделі від-

повідає проїзду одного транспортного засобу (ТЗ) в дозволеному напрямку. Передбачається, що кількість ТЗ, що під'їхала на кожний вхід не перевищує довжини фази. Наприклад, стан входів перехрестя в початковий момент відповідає третьому рядку табл. 1.

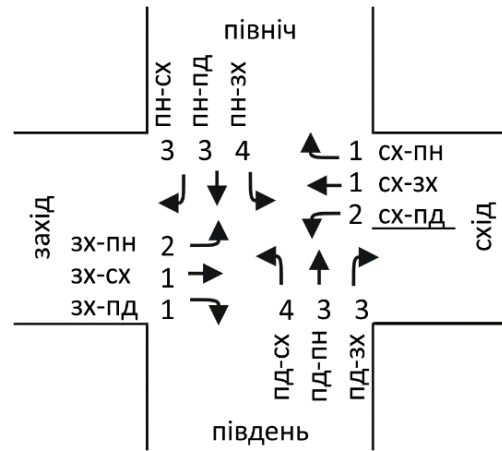


Рис. 1 – Схема регульованого перехрестя з 4 фазами руху

Таблиця 1 – Алгоритм розрахунку стану світлофора

фаза	тривалість	схід				захід				північ				південь			
		сх-пн	сх-зх	сх-пд	вих	зх-пн	зх-сх	зх-пд	вих	пн-сх	пн-пд	пн-зх	вих	пд-сх	пд-пн	пд-зх	вих
		1	3	4		3	6	4		2	3	1		0	3	2	
1	4	2	2	0	4	1	2	1	4	0	4	0	3	1	1	1	4
		0	1	4		4	4	1		2	7	1		1	4	3	
2	2	1	1	0	2	0	2	0	0	2	0	0	2	1	0	1	0
		1	2	2		2	6	1		4	7	1		2	4	4	
3	10	3	3	1	7	2	4	2	5	3	4	3	9	3	5	1	10
		4	5	3		4	10	3		0	1	4		5	0	0	
4	5	0	2	2	5	1	2	2	4	2	2	0		1	2	3	0
		4	7	5		5	12	5		2	3	0		1	2	3	

Протягом 1-ї фази, тривалість якої складає 4 такти в дозволеніх напрямках, на/з перехрестя в'їздить/виїздить кількість ТЗ вказана в четвертому рядку. Стан перехрестя на початок 2-ї фази, відображений у п'ятому рядку розраховується шляхом додавання значень початкового стану напрямків і кількості ТЗ, що під'їхали протягом фази, віднімання кількості ТЗ що проїхала в дозволеному напрямку. Таким чином описуються правила переходу станів перехрестя від одного до іншого. Для світлофора з фіксованим часом перемикавання тривалість кожної фази буде постійною, а для адаптивного буде тим або іншим чином змінюватись в залежності від стану входів. В [7, 8] розглядалася модель управління світлофором що використовує нечітку логіку. Функціональна схема моделі наведена на рис. 2. При цьому «Модуль керування фазами руху» є змінюваним.

Для поєднання моделей перехрестя в модель транспортного вузла пропонується використовувати ідею ресурсної мережі [10].

Ресурсна мережа – потокова модель, представлена орієнтованим зваженим графом, в якому будь-які дві вершини або несуміжні, або сполучені парою про-

тильно орієнтованих ребер. Ресурс розташовується у вершинах, що мають необмежену місткість, ваги ребер означають їх пропускну спроможність. У дискретні моменти часу вершини обмінюються ресурсами за наступними правилами.

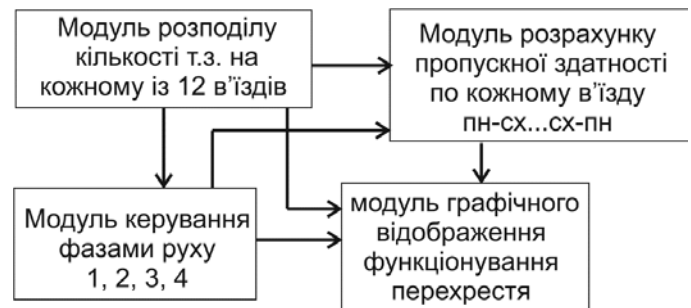


Рис. 2 – Модульна схема моделі регульованого перехрестя з 4 фазами руху

До вершин v_i приписані ресурси в розмірі $Q_i(k)$, які в дискретний момент часу t змінюються. Ребрам (v_i, v_j) приписані провідності r_{ij} . При кількості вершин

n загальний стан системи на k -му такті описується як $Q(k) = (Q_1(k), \dots, Q_n(k))$.

$R = \|\|r_{ij}\|\|_{n \times n}$ – матриця провідності мережі,
 $r_{sum} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij}$ – сумарна провідність мережі,
 $r_i^{in} = \sum_{j=1}^n r_{ji}$ – вхідна провідність вершини,
 $r_i^{out} = \sum_{j=1}^n r_{ij}$ – вихідна провідність вершини.

В такт $k+1$ вершина v_i в ребро, поєднуюче її з вершиною v_m , віддасть:

1. r_{im} одиниць ресурсу, якщо $q_i(t) > r_i^{out}$;
2. $\frac{r_{im}}{r_i^{out}} q_i(t)$, якщо $q_i(t) < r_i^{out}$.

Згідно правила 1 вершина віддає кількість ресурсу рівну її вихідній провідності. В другому випадку вона віддає увесь свій ресурс.

Ресурс, що виходить з вершини v_i по ребру (v_i, v_j) на такті k , приходить у вершину v_j на такті $k+1$. Відповідно, вважаємо, що цей ресурс на проміжку часу між k та $k+1$ знаходиться на ребрі (v_i, v_j) . (рис. 3).

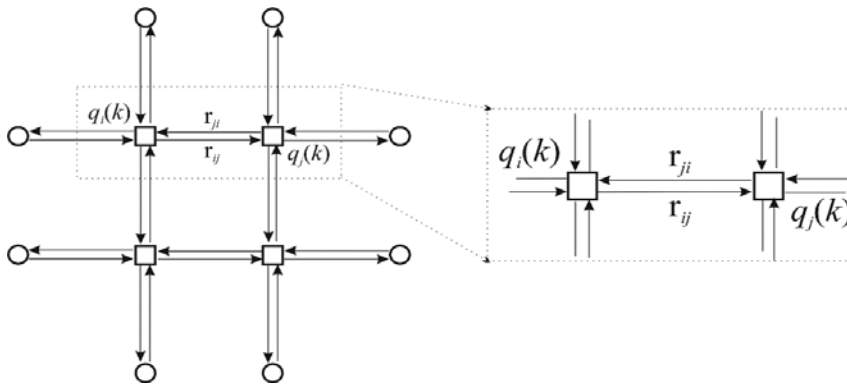


Рис. 3 – фрагмент ресурсної мережі для моделювання суміжних перехресть

Для імітаційного моделювання перехрестя пропонується використовувати ресурсну мережу з ребрами провідності $r_{ij} = 1$ так, що за кожен такт роботи від вершини до вершини може бути передано **одну** одиницю ресурсу, при цьому модифікувати правила роботи вершини ресурсної мережі відповідно до моделі перехрестя. Вершина віддає одиницю ресурсу в ребро, якщо одиниця є на відповідному виході. Стан перехрестя на кожному такті записується 18-мірним масивом. Кожен наступний такт розраховується за правилом таблиці 1, відповідно до поточної фази та її довжини. Як видно із рис. 3, перехрестя має чотири вхідні ребра і чотири вихідні, але кожен вхід мусить бути розподілений на 3 виходи. Як правило, існує статистика роботи перехрестя отримана за результатами імперичних спостережень. Нехай з імовірністю q транспортні засоби на в'їзді повертають праворуч, а з імовірністю p – ліворуч тоді $1-q-p$ – ймовірність того, що ТЗ рухатиметься прямо. Тоді можна використовувати генератор рівномірно розподіленої випадкової величини $x \in [0;1]$ і блок, який буде розподіляти одиницю вхідного ресурсу за правилом (рис. 4).

В схемі рис. 3 одиниця, що потрапила на певний вихід вершини, наступного такту потрапить на один із входів суміжної. Така ситуація не враховує відстань між перехрестями, тому вводиться спеціальний тип вершини

з одним вхідним ребром і одним вихідним, який відповідає вулиці довжини в «один такт». Така вершина має характеристику l і функціонує за принципом черги довжиною l . В чергу за кожен такт ставляться 0 або 1 і вилучаються згідно порядку надходження. Замість черги можуть служити l вершин з'єднаних послідовно. Для моделювання реальних ділянок дорожнього руху необхідно ввести термінальні, або крайові вершини які означають прибуття та виїзд ТЗ з досліджуваної ділянки.

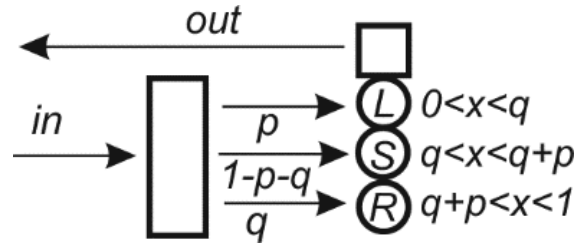


Рис. 4 – розподіл вхідного потоку ТЗ за напрямками руху на перехресті

Результати побудови моделі реальної дорожньої ділянки.

Для прикладу було взято ділянку центральної частини Манхетена (штат Нью-Йорк США) оскільки на ній всі перехрестя обладнані світлофорами і вулиці мають виражену вертикально-горизонтальну топологію. Приймаючи до уваги, те що вулиці в досліджуваному районі мають односторонній рух, граф містить по одному направленому ребру між кожним перехрестям і моделі перехресть мають менше дозволених напрямків (рис. 5).

Кількість транзитних вершин між перехрестями визначається за пропорціями карти, оскільки карта є масштабною.

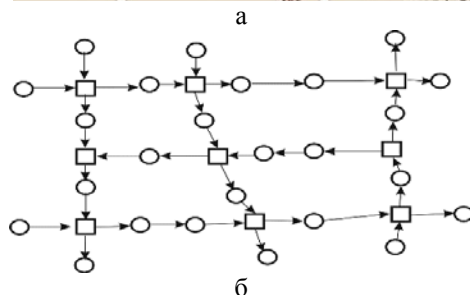
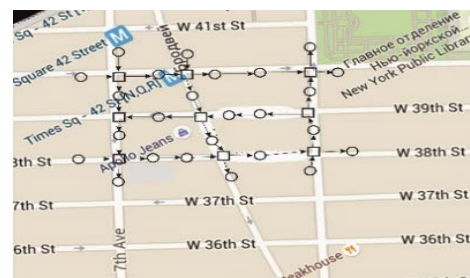


Рис. 5 – Модель ділянки дорожнього руху: а – карта, б – отриманий граф

Обговорення результатів, оцінка обчислювальної складності моделі. Побудована модель в сенсі комп'ютерного представлення являє собою вектор станів вершин ресурсної мережі. Сама мережа задається списком ребер. Граф мережі містить три типи вершин: перехрестя, транзитні і термінальні. Транзитні вершини не вимагають додаткового ресурсу, стан термінальних вершин обраховується окремим модулем, який регулює баланс кількості ТЗ на дорожній ділянці та відображає більш ймовірні напрямки в'їзду. Стан вершин, які відповідають перехрестям прораховується один раз при зміні фази, тобто раз на 2-10 тактів. Також кожного разу, коли перехрестя отримує на вхід одиницю ресурсу, необхідно викликати модуль розподілу вхідного потоку за напрямками перехрестя (рис. 4).

Припустимо, що модель містить N вершин, з яких M перехресть, на кожен вершину в середньому приходиться 2 вхідних ребра, тобто порядок росту кількості елементарних операцій на одному такті від кількості вершин складатиме $O(N)$. Це означає здатність моделі відображати транспортні системи великих міст.

В теперішній час відома достатня кількість різноманітних систем транспортного моделювання [11-14] які використовують дискретно-подієвий підхід. Такий підхід є більш ефективним з точки зору продуктивності системи моделювання, але вважався більш складним в розробці. Застосування ресурсної мережі вирішило дану проблему.

Висновки. В результаті проведених досліджень проаналізовані системи імітаційного моделювання транспортного руху, Застосовано ресурсномережевий підхід для дискретно-подієвого імітаційного моделювання автотранспортної системи.

Модулі моделей перехресть поєднано між собою з допомогою ресурсної мережі. Отримана модель є має $O(N)$ обчислювальну складність. Така система дозволить моделювати складні автотранспортні мережі великих міст з великою кількістю автомобілів, а також скоротити фінансові витрати на планування та організацію оптимального дорожнього руху міста.

Список літератури: 1. Боголюбов, А. Н. Математики. Механики. Биографический справочник [Текст] / А. Н. Боголюбов. – Киев: Наукова думка, 1983. – 639 с. 2. Vazirani, V. V. Introduction to LP-Duality [Text] / V. V. Vazirani // Approximation Algorithms. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2003. – P. 93–107. 3. Лобашов, О. О. Моделирование транспортных потоков в містах з урахуванням мережі паркування автомобільного транспорту [Текст] / О. О. Лобашов, О. В. Прасоленко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 1/5(43). – С. 8–9. 4. Papageorgiou, M. Review of road traffic control strategies [Text] / M. Papageorgiou, C. Diakaki, V. Dinopolou, A. Kotsialos, W. Yibing // Proceedings of the IEEE. – 2003. – Vol. 91, № 12. – P. 2043–2067. doi: 10.1109/JPROC.2003.819610 5. Pappis, C. P. A fuzzy logic controller for a traffic junction [Text] / C. P. Pappis, E. H. Mamdani // Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions. – 1977. – Vol. 7, № 10. – P. 707–717. 6. Niittymäki, J. Traffic signal control on similarity logic reasoning [Text] / J. Niittymäki, E. Turunen // Fuzzy Sets and Systems. – 2003. – № 133. – P. 109–131. 7. Balaji, P. G. Type-

2 fuzzy logic based urban traffic management [Text] / P. G. Balaji, D. Srinivasan // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2011. – Vol. 24, № 1. – P. 12–22. 8. Сырота, С. В. Модель адаптивной системы регулирования дорожного руху на перехресті з використанням нечіткої логіки [Текст]: зб. тез. доп. / С. В. Сырота, О. С. Душин // Съезда наук. конф. магистрантов та аспирантов "Прикладна математика та комп'ютеринг" (ПМК, 2014), Київ, 15-17 квіт. 2015 р. – К.: Просвіта, 2015. 9. Сырота, С. В. Модель синхронизации работы адаптивных систем регулирования дорожного руху на суміжних перехрестях [Текст] / С. В. Сырота, О. С. Душин // Материали 17-ї Міжнародної науково-технічної конференції "Системний аналіз та інформаційні технології" (SAIT 2015), Київ, 22-25 червня 2015 р. – К.: ННК "ІПСА" НТУУ "КПІ", 2015. – 304 с. 10. Кузнецов, О. П. Исследование эргодичности ресурсных сетей с произвольной проводимостью [Текст]: сб. тр. / О. П. Кузнецов, Л. Ю. Жилкова // Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2004, Киев, 14-16 мая 2010 г. – К.: Просвіта, 2010. – С. 106–112. 11. Голубков, А. С. Адаптивное управление дорожным движением на городском перекрестке на базе микроскопической дискретно-событийной модели транспортных потоков и оптоэлектронного метода контроля. [Электронный ресурс] / А. С. Голубков, В. А. Царев. — Режим доступа: \www/URL: <http://www.mallenom.ru/Docs/AdaptiveControl.pdf>. 12. Aimsun. The integrated transport modeling software [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://www.aimsun.com> 13. Quadstone Paramics. Traffic Simulation Solutions [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://www.paramiconline.com>. 14. SATURN Software Web Site [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://saturnsoftware.co.uk>.

Bibliography (transliterated): 1. Bogolubov, A. N. (1983). Matematiki. Mehaniki. Biograficheskij spravocnik. Kyiv: Naukova Dumka, 639.2. Vazirani, V. V. (2003). Introduction to LP-Duality. In Approximation Algorithms. Berlin, Heidelberg: Springer, 93–107.3. Lobashov, O., Prasolenko, O. (2012). The traffic modelling in cities taking into account the network of motor transport parking. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 1(5(43)), 8-9. Available: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/2568.4>. Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopolou, V., Kotsialos, A., Yibing, W. (2003). Review of road traffic control strategies. Proceedings of the IEEE, Vol. 91, № 12, 2043-2067. doi: 10.1109/JPROC.2003.819610.5. Pappis, C. P., Mamdani, E. H. (1977). A fuzzy logic controller for a traffic junction. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions, Vol. 7, № 10, 707–717.6. Niittymäki, J., Turunen, E. (2003). Traffic signal control on similarity logic reasoning. Fuzzy Sets and Systems, № 133, 109–131.7. Balaji, P. G., Srinivasan, D. (2011). Type-2 fuzzy logic based urban traffic management. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 24, № 1, 12–22.8. Сырота, С., Душин, О. (2015). Model' adaptivnoji systemy reguluvannya dorozhn'ogo ruhu na perekhrestii z vikoristanniam nechitkoji logiki. In VII International conference «PMC-2015», Vol. 7, Kyiv: Prosvita, 106–112.9. Сырота, С., Душин, О. (2015). Model' Sinhronizacii Roboty Adaptivnyh Sistem Reguluvannya Dorozhnogo Ruhu na Sumizhnyh Perehrestiah. Proceedings of 17-th International Scientific Conference SAIT 2015. ESC "IASA" NTUU "KPI", 304.10. Zhiliakova, L., Kuznetsov, O. (2010). Issledovanie Ergodichnosti Resursnyh Setej s Proizvolnoj Provodimostju. In X International conference «IAI 2010», Vol. 10, Kyiv: Prosvita, 106–112.11. Golubkov, A., Tsarev, V. (2015). Adaptivnoje Upravlenie Dorozhnym Dvizhenijem na Gorodskom Perekriostke na Baze Mikroskopicheskoi Diskretno-Sobyitnoj Modeli Transportnyh Potokov I Optoelektronogo Metoda Kontrolia. Available: <http://www.mallenom.ru/Docs/AdaptiveControl.pdf>. Last accessed: October 26, 2015.12. TSS-Transport Simulation Systems. (2015). Available: <http://www.aimsun.com>. Last accessed: October 26, 2015.13. Quadstone Paramics. Traffic Simulation Solutions. (2015). Available: <http://www.paramiconline.com>. Last accessed: October 26, 2015.14. SATURN Software Web Site. (2015). Available: <http://saturnsoftware.co.uk>. Last accessed: October 26, 2015.

Надійшла (received) 26.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сырота Сергій Вікторович – кандидат технічних наук. Факультет прикладної математики НТУУ «КПІ», доцент кафедри прикладної математики; пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056; e-mail: sergiy.syrot@gmail.com.

Сырота Сергей Викторович – кандидат технических наук. Факультет прикладной математики НТУУ «КПИ», доцент кафедры прикладной математики; пр. Победы, 37, м. Киев, 03056.

Sergiy Syrota – PhD. National Technical University of Ukraine "Kiev's Polytechnic Institution", associated professor of Applied Mathematic Department. 37, Peremohy ave. Kyiv, Ukraine 03056; tel.: 067-466-69-98