

УДК 004.94:517.977

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.6.7>

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ

Маринич І. А. – кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-9036-8532
Scopus-Author ID: 56468018300

Харламенко В. Ю. – кандидат технічних наук, старший викладач
кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-4008-5518
Scopus-Author ID: 56449063500

Стаття присвячена можливості керувати транспортними потоками за допомогою регульованого світлофора, який спрямовуватиме їх у потрібному напрямку, виходячи із завантаженості магістралей. Світлофори відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки дорожнього руху та зниженні кількості конфліктних ситуацій між різними учасниками транспорту. Вони сприяють регулюванню транспортних потоків, покращують організацію руху на перехрестях і забезпечують більш плавний та безпечний рух для водіїв і пішоходів. Основна функція світлофорів полягає в координації потоків транспорту і пішоходів шляхом надання чітких сигналів, які визначають, коли слід рухатися, а коли зупинитися, але їхня загальна мета залишається незмінною – забезпечення безпеки та упорядкованості дорожнього руху, але експериментувати з реальним світлофором уважасться неможливим, до того ж спосіб аналізу даних є трудомістким. Для розв'язання такої проблеми може застосовуватися моделювання. Метою роботи є розробка алгоритму адаптивного керування режимом роботи світлофора на основі моделі клітинних автоматів. Для цього необхідно було дослідити модель транспортного потоку для оптимізації роботи світлофорів та відповідні моделі, що дозволяють виконати багатокритеріальну оптимізацію. У процесі дослідження була побудована модель перехрестя на основі клітинного автомата. Запропоновано адаптивний алгоритм керування світлофором і визначено його оптимальні параметри. Оцінювалася ефективність класичного та адаптивного алгоритмів керування світлофором за різної кількості автомобілів. Як чисельні показники для порівняння використовувалися час, необхідний для повного розвантаження перехрестя, і час простою автомобілів. Розроблений алгоритм дозволяє скоротити час перебування автомобілів на перехресті, забезпечує збільшення пропускної здатності світлофору й відповідне зменшення впливу вихлопних газів на навколишнє середовище.

Ключові слова: алгоритм управління, критерії оптимізації, матриця станів, світлофор, теорія клітинних автоматів, транспортний потік.

Marynych I. A., Kharlamenko V. Yu. Modeling and investigation of transport flows using cellular automata

The article is devoted to the possibility of controlling traffic flows by means of a controllable traffic light that directs them in the required direction based on the congestion level of main roads. Traffic lights play a key role in ensuring road safety and reducing the number of conflict situations among different road users. They help regulate traffic flows, improve traffic organization at intersections, and provide smoother and safer movement for both drivers and pedestrians. The main function of traffic lights is to coordinate the movement of vehicles and pedestrians by providing clear signals indicating when to move and when to stop. Their overarching goal remains the same – to ensure safety and orderliness on the roads. However, experimenting with a real traffic light system is considered infeasible, and the data analysis process is rather labor-intensive. Modeling can be used to address this problem. The aim of this study is to develop an adaptive algorithm for controlling the operating mode of a traffic light based on a cellular automata model. To achieve this, it was necessary to investigate a traffic flow model to optimize

traffic light operation as well as corresponding models that enable multi-criteria optimization. In the course of the study, a cellular automaton-based intersection model was constructed. An adaptive traffic light control algorithm was proposed and its optimal parameters were determined. The effectiveness of both the classical and adaptive traffic light control algorithms was evaluated for different numbers of vehicles. The numerical indicators used for comparison were the time required to fully clear the intersection and the vehicle idle time. The developed algorithm helps reduce the time vehicles spend at an intersection, increases the throughput capacity of the traffic light, and correspondingly decreases the impact of exhaust fumes on the environment.

Key words: control algorithm, optimization criteria, state matrix, traffic light, cellular automata theory, traffic flow.

Вступ. Щороку автопарк транспортних засобів продовжує зростати, що призводить до збільшення заторів на дорогах. Однак причина цієї проблеми полягає не лише у зростанні кількості автомобілів, а й у поведінці самих водіїв. Ефективним вирішенням цієї ситуації може стати цифровізація управління транспортною інфраструктурою. У зв'язку з цим багато компаній активно працюють над створенням інтелектуальних транспортних засобів і «розумних» доріг [1]. Одним із можливих рішень є контроль транспортних потоків за допомогою адаптивних світлофорів, які здатні змінювати напрямок руху залежно від завантаженості автомагістралей. Однак експерименти з реальними світлофорами є технічно складними та ризикованими, а також вимагають значних ресурсів для аналізу даних. Для розв'язання цієї проблеми доцільно застосовувати методи моделювання, що дозволяють створити віртуальну модель руху та оптимізувати роботу світлофорів без ризику для реального трафіку.

Світлофори відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки дорожнього руху та зниженні кількості конфліктних ситуацій між різними учасниками транспорту [2]. Вони сприяють регулюванню транспортних потоків, покращують організацію руху на перехрестях і забезпечують більш плавний та безпечний рух для водіїв і пішоходів.

Мета роботи. Метою роботи є розроблення моделі транспортних потоків на основі теорії клітинних автоматів, зокрема перехрестя з двостороннім рухом, та застосування адаптивного алгоритму керування світлофором до цієї моделі, що підвищує пропускну здатність перехрестя.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перші клітинні автомати для моделювання доріг були використані в роботах Нагеля і Шрекенберга. Модель Нагеля-Шракенберга – це базова стохастична клітинно-автоматна модель для опису транспортних потоків, зокрема дорожнього руху і слугує одним із найпоширеніших підходів для дослідження динаміки потоків автомобілів на магістралях. Основна ідея моделі полягає у дискретизації часу та простору. Дорогу розглядають як послідовність клітин (комірок), де кожна клітина може бути вільною або зайнятою одним автомобілем. Завдяки простим і водночас гнучким правилам ця модель здатна відтворювати такі явища, як утворення заторів, фазові переходи між вільним та щільним рухом тощо. Данна модель часто використовується як основа для подальшого моделювання та вдосконалення алгоритмів керування транспортними потоками.

У [3] розглядалася єдина дорожня лінія (автомобілі рухалися в одному напрямку), дорога ділиться на L-клітин. Кожна клітинка має довжину 7,5 м, і в кожній клітинці може міститися автомобіль або залишатися порожньою. $x_i(t)$, $v_i(t)$ позначають положення і швидкість i -го вагона в момент часу t відповідно. Швидкість приймає ціле значення зі змінними від 0 до v_{max} , де v_{max} – максимальна швидкість руху транспортного засобу. $d_i(t)$ позначає відстань між i та $i+1$ вагоном.

Дана модель складається з 4 правил:

1. *Прискорення*. Якщо $v_i < v_{max}$, то швидкість i -го автомобіля збільшується на одиницю; якщо $v_i = v_{max}$, то швидкість не змінюється:

$$v_i(t+1) = \min(v_i(t) + 1, v_{max}) \quad (1)$$

2. *Гальмування* – якщо перед i -м автомобілем є перешкода, то швидкість дорівнює відстані до перешкоди:

$$v_i(t+1) = \min(v_i(t) + 1, d_i(t)) \quad (2)$$

3. *Випадкові збурення* – існує ймовірність p , при якій швидкість автомобіля зменшується на одиницю:

$$\text{if } e(t) < p \text{ then } v_i(t+1) = \max(v_i(t+1) - 1, 0) \quad (3)$$

4. *Рух автомобілів* – це зміна положення машини на полі клітинного автомату відповідно до знову розрахованої швидкості:

$$x_i(t+1) = v_i(t+1) + x_i(t) \quad (4)$$

У роботі [4] китайські дослідники проаналізували 3-є правило моделі Нагеля–Шракенберга і прийшли до висновку, що ймовірність p не повинна бути постійною, а залежати від поточної швидкості і відстані до наступного автомобіля. Пояснюється це тим, що якщо наступна машина знаходиться далеко, то ймовірність того, що водій зменшить швидкість, невелика. У роботі [5] автори доповнюють модель Нагеля–Шракенберга правилами, які дозволяють машинам переходити з однієї лінії на іншу. Робота [6] додає правила не тільки переходу автомобілів з лінії на лінію, а й правила обгону автомобілів. У роботі [7] розглядають застосування методу Монте-Карло для розрахунку затримок роботи світлофору. Однак більшість робіт, присвячених моделюванню транспортних потоків за допомогою клітинних автоматів, не описують перехрестя в своїх моделях. У даній роботі буде реалізована модель з двома смугами руху і регульованим перехрестям.

Виклад основного матеріалу. Використання клітинних автоматів передбачає наявність матриці (масиву) станів, зміна яких відбувається одночасно. Для моделювання перехрестя та руху автомобілів також були введені додаткові матриці напрямків і допустимих переміщень. Визначимо, де в матриці станів розміщені автомобілі, дорога, світлофор, а також ділянки, що не належать до дорожньої мережі й які назвемо «Стіна». На рис. 1,а показано сітку станів комірок. Відповідні стани: «стіна» (wall), «дорога» (road), «автомобілі» (car), «світлофор» (traffic light).

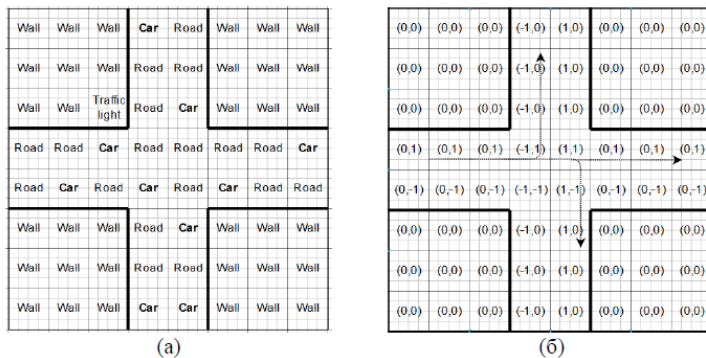


Рис. 1. Матриця станів комірок (а), матриця напрямків комірок (б)

Матриця напрямків (рис. 1,б) демонструє напрямок, у якому буде рухатися автомобіль. Перше число масиву відповідає переміщенню по вертикальній осі, а друге – по горизонтальній. Таким чином, додатне значення по горизонталі означає рух вправо, а додатне по вертикалі – вниз, тоді як від'ємні значення вказують на протилежні напрямки.

Матриця дозволених переміщень описує можливі на даний момент переміщення, які залежать від стану світлофора (рис. 2).

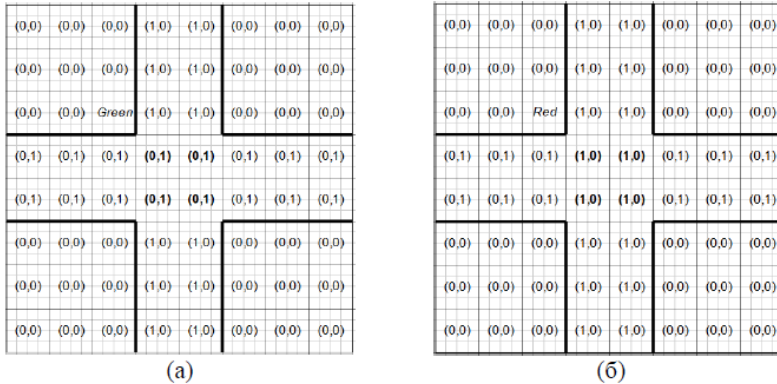


Рис. 2. Матриця дозволених переміщень для зеленого (а), для червоного (б) режимів роботи світлофора

Наприклад, коли горить «зелений» сигнал, дозволено лише рух по горизонтальній осі (0,1). У випадку «червоного» сигналу переміщення можливе тільки по вертикальній осі (1,0). Сигнал «жовтий» встановлює всі компоненти масиву дозволених переміщень всередині перехрестя як нульові (0,0), що означає заборону руху всередині перехрестя. На рис. 3 кожній клітинці, що містить автомобіль, призначимо швидкість, яка залежить від напрямку його руху.

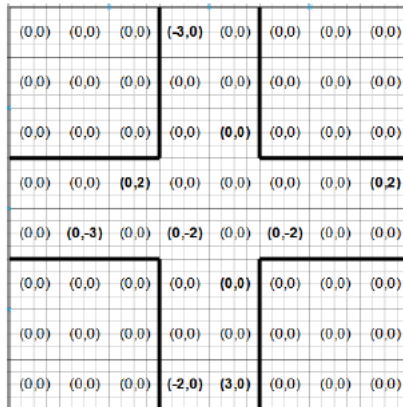


Рис. 3. Матриця швидкостей

Тут швидкість відповідає кількості клітин, на які автомобіль може переміститися по вертикальній та горизонтальній осях. У клітинках без автомобілів швидкості не задаються.

Перешкодою вважається автомобіль, що рухається в заданому напрямку, ділянка перехрестя при забороні руху по відповідній траєкторії, а також клітинки типу WALL. Визначення перешкод здійснюється шляхом огляду клітин, розташованих уздовж напрямку руху. Перехрестя стає перепоною, коли матриця дозволених переміщень для певного напрямку набуває нульового значення. Для горизонтального руху це можуть бути (1,0) або (0,0), а для вертикального – (0,1) або (0,0). У таких випадках перехрестя утворює перешкоду.

Оскільки кількість клітин обмежена, масив не зберігає безмежну кількість елементів. Тому, у разі відсутності перешкоди, відстань встановлюється як нескінченність і набуває максимально можливого цілого значення типу Integer. В цьому випадку автомобіль прискорюється до максимально дозволеної швидкості.

Основними правилами руху автомобілів є принципи моделі Нагеля-Шрекенберга. Згідно з цими принципами, автомобілі переміщуються в межах матриці станів. Рух автомобілів здійснюється шляхом зміни координатних значень у матриці станів. До координат матриці, які містять автомобілі, додається швидкість. Швидкість визначається за правилами Нагеля-Шрекенберга: автомобіль прискорюється (його швидкість збільшується на одиницю) до максимально заданого значення, якщо на шляху руху немає перешкод; автомобіль гальмує (швидкість встановлюється рівною відстані до перешкоди), якщо його поточна швидкість перевищує відстань до наступної перешкоди. У правилах Нагеля-Шрекенберга також передбачено випадок стохастичного гальмування: швидкість автомобіля зменшується на одиницю з певною ймовірністю, проте ми вважаємо за доцільне відмовитися від останнього правила про випадкові збурення, оскільки відстань між перехрестями в реальному місті недостатньо велика, щоб водій постійно гальмував. Таким чином, автомобіль переміщується всередині матриці станів. Нова матриця станів записується в іншу матрицю станів, щоб забезпечити одночасність переходів та уникнути ручного видалення попередніх станів.

Були розглянуті класичний та адаптивний алгоритми роботи, розглянемо більш детально саме другий.

Запропонований алгоритм враховує кількість автомобілів, що рухаються у напрямку до перехрестя, а також відстань кожного з них від перехрестя. Основні етапи роботи алгоритму наведені нижче.

1. На кожній ітерації клітинного автомата для вертикальних та горизонтальних напрямків обчислюються значення наступних функцій:

$$f_V(t) = \sum_i \left(\frac{1}{\text{distance}_{V_{oi}}(t)} \right)^p + \sum_i \left(\frac{1}{\text{distance}_{V_{1i}}(t)} \right)^p \quad (5)$$

$$f_H(t) = \sum_i \left(\frac{1}{\text{distance}_{H_{oi}}(t)} \right)^p + \sum_i \left(\frac{1}{\text{distance}_{H_{1i}}(t)} \right)^p \quad (6)$$

де:

$\text{distance}_{V_{oi}}(t)$ – відстань до перехрестя для першої смуги руху для i -го автомобіля, що рухається по вертикалі;

$\text{distance}_{V_{1i}}(t)$ – відстань до перехрестя для другої смуги руху для i -го автомобіля, що рухається по вертикалі;

$\text{distance}_{H_{oi}}(t)$ – відстань до перехрестя для першої смуги руху для i -го автомобіля, що рухається по горизонталі;

$\text{distance}_{H_{1i}}(t)$ – відстань до перехрестя для другої смуги руху для i -го автомобіля, що рухається по горизонталі;

$p > 0$ – степеневий параметр.

2. На наступному етапі визначається відношення обчислених функцій, після чого здійснюється зміна стану світлофора. Перемикання залежить від поточного стану світлофора. Так:

- Якщо поточний стан світлофора – RED і $\frac{f_H(t)}{f_V(t)} > k$, то відбувається перехід у стан RED_TO_GREEN, де k – інерційний параметр;
 - Якщо поточний стан світлофора – GREEN і $\frac{f_V(t)}{f_H(t)} > k$ то відбувається перехід у стан GREEN_TO_RED;
 - Якщо поточний стан світлофора – RED_TO_GREEN, то обробка станів відбувається так само, після того, як numberOfIterations перевищить тривалість даного стану, що визначається змінною time_yellow, стан світлофора перемикається в GREEN;
 - Якщо поточний стан світлофора – GREEN_TO_RED, обробка станів відбувається так само, після того, як numberOfIterations перевищить тривалість даного стану, що визначається змінною time_yellow, стан світлофора перемикається в RED.
- Для більшої наочності на рис. 4 представлена схема переходів між станами.

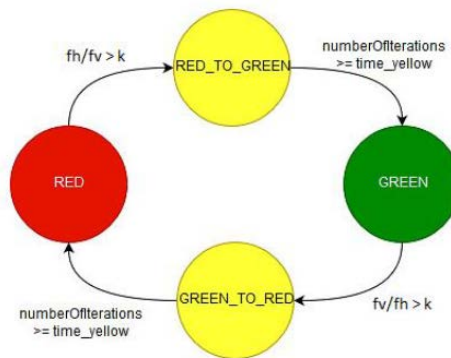


Рис. 4. Схема перемикання світлофора згідно алгоритму

Запропонований алгоритм включає два параметри, які можна вільно налаштувати: показник p та коефіцієнт k . Вибір цих параметрів впливає на тривалість, необхідну для зняття навантаження з перехрестя, а також на час простою автомобілів. Для оцінки ефективності цих параметрів використовуються два критерії: час простою автомобіля (період, протягом якого автомобіль перебуває у стані стоянки) та час розвантаження перехрестя (час, необхідний для того, щоб усі автомобілі покинули зону перехрестя). Завдання оптимізації полягає у мінімізації обох цих показників.

Розроблена модель передбачає випадкове розміщення автомобілів на різних ділянках дороги. Для досягнення більш точних результатів було проведено 20 експериментів для кожної заданої кількості автомобілів. У підсумку обчислювалося середнє арифметичне значення часу простою та часу розвантаження.

Підсумовуючи отримані дані, можна зробити висновок, що в діапазоні степеневого показника $p < 2$ та при коефіцієнті $k > 5$ як час простою, так і час розвантаження досягають найнижчих значень. Подальше збільшення значення k не спричинило покращення результатів: час простою та час розвантаження залишалися приблизно на однаковому рівні.

Рисунки 5–6 демонструють залежність середнього арифметичного часу розвантаження та середнього арифметичного часу простою від початкової кількості автомобілів при використанні адаптивного алгоритму з різними параметрами, а також класичного алгоритму управління світлофором.

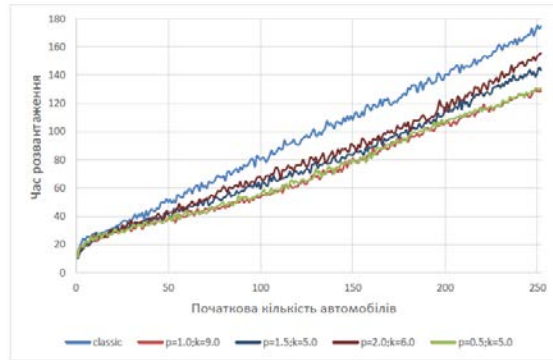


Рис. 5. Залежність часу навантаження від початкової кількості автомобілів

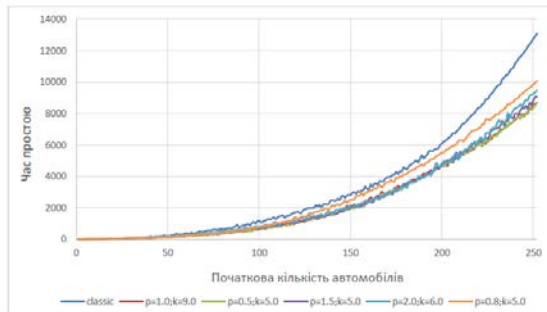


Рис. 6. Залежність часу простою від початкової кількості автомобілів

Розроблена модель транспортних потоків може вмещувати до 252 автомобілів. Таблиця 1 представляє порівняльні характеристики, де адаптивний алгоритм має параметри: $p = 0,5$ та $k = 5$. На основі цих даних можна зробити висновок про ефективність розробленого алгоритму: з ростом кількості автомобілів він працює більш ефективно.

Наприклад, при кількості автомобілів, що дорівнює 100, час розвантаження перехрестя зменшується на 30 ітерацій, а час простою – на 300 ітерацій порівняно з класичним алгоритмом. При кількості автомобілів 200 час розвантаження перехрестя скорочується на 40 ітерацій, а час простою – на 1600 ітерацій у порівнянні з класичним підходом.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика алгоритмів

Алгоритм	Кількість машин					
	50		150		250	
	Час простою	Час розвантаження	Час простою	Час розвантаження	Час простою	Час розвантаження
Класичний	50,15	218,2	108,3	2819,7	12759,1	174,9
Адаптивний	36,8	155,7	77,9	2016,9	8354,8	129,9
Різнця	13,3	62,5	30,4	802,8	4404,3	45

Таким чином, було доведено ефективність розробленого адаптивного алгоритму керування транспортними потоками.

Висновки. Була побудована модель транспортних потоків на основі клітинних автоматів, що описує двосторонній рух, перехрестя, що регулюється світлофором і до неї застосовано розроблений адаптивний алгоритм управління світлофорами. Розроблений алгоритм дозволяє скоротити час перебування автомобілів на перехресті та забезпечує збільшення пропускну здатності світлофору. Шляхом побудови тривимірних графіків були визначені найбільш оптимальні значення цих параметрів. Наприклад, для параметра потужності оптимальні значення знаходяться в діапазоні $(0, 2]$, а оптимальні значення інерційного параметра – в діапазоні $(5, \infty)$. При цих значеннях параметрів адаптивний алгоритм на 70% перевершує класичний алгоритм для даної моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. The INRIX global traffic scorecard. URL: <http://inrix.com/scorecard/> (дата звернення 05.10.2024).
2. Скульбеденко Н.А. Методика розрахунку пішохідних затримок при регулюванні пішохідних переходів. Вісник ВНТУ № 3 (39) 2009. с. 76-79.
3. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic. *J. Phys. I. France*. 1992. Vol. 2. pp. 2221-2229.
4. Yong Chen, Hong He, Ning Zhou. Traffic Flow Modeling and Simulation Based on A Novel Cellular Learning Automaton. *The International Conference of Intelligent Robotic and Control Engineering, IEEE*. 2018.
5. Chongyuan Tao, Jian Zhang. A Cellular Automata Simulation on Multi-lane Traffic Flow for Designing Effective Rules. *International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration, IEEE*. 2015.
6. Xiao-Fangyang, Jun-Feng Li. Study on the traffic flow under keep-right-except-to-pass rule based on cellular automata model. *International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), IEEE*. 2015.
7. Андронов Р.В., Леверенець Є.А. Розрахунок за методом Монте-Карло затримок транспортного засобу на ізольованому регульованому перехресті при його роботі при високих рівнях навантаження. *Вісник СумДГУ* 2017. № 1(60). С. 221-226.

REFERENCES:

1. The INRIX global traffic scorecard. URL: <http://inrix.com/scorecard/>
2. Skulbedenko N.A. (2009) Metodyka rozrakhunku pishokhidnykh zatrymok pry rehuliuванні pishokhidnykh perekhodiv. [Methodology for calculating pedestrian delays in the regulation of pedestrian crossings]. *Visnyk of VNTU [in Ukrainian]*.
3. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic. *J. Phys. I. France*. 1992. Vol. 2. pp. 2221-2229.
4. Yong Chen, Hong He, Ning Zhou. (2018) Traffic Flow Modeling and Simulation Based on A Novel Cellular Learning Automaton. *IEEE*.
5. Chongyuan Tao, Jian Zhang. (2015) A Cellular Automata Simulation on Multi-lane Traffic Flow for Designing Effective Rules. *IEEE*.
6. Xiao-Fangyang, Jun-Feng Li.(2015) Study on the traffic flow under keep-right-except-to-pass rule based on cellular automata model. *IEEE*.
7. Andronov, R. V., Leverenets, Ye. A. (2017) Rozrakhunok za metodom Monte-Karlo zatrymok transportnoho zasobu na izolovanomu rehulovanomu perekhrestі pry yoho roboti pry vysokykh rivniakh navantazhennia. [Calculation of vehicle delays at an isolated signalized intersection using the Monte Carlo method under high traffic load levels]. *Visnyk of SumDU [in Ukrainian]*.