

I. П. ГАМАЮН, С. В. ШАШКОВ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯМ СВІТЛОФОРА НА ПЕРЕХРЕСТІ МІСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ

Предметом дослідження є процес моделювання функціонування світлофора, що забезпечує адаптивне управління транспортними засобами на перехрестях міської транспортної мережі. В процесі функціонування міських транспортних мереж виникають такі явища, як затори транспортних засобів (ТЗ), які призводять до значних економічних втрат, погіршенню екології, фрустрації учасників дорожнього руху та інших видів негативних впливів. Затори часто виникають у вузлах міської транспортної мережі, які є перехрестями – місцями перетину, прилягання або розгалуження доріг міської мережі одного рівня. Однією з причин виникнення заторів є неефективне управління транспортними потоками на перехрестях, що забезпечується таким елементом перехрестя як світлофор. Функцію управління потоками світлофор реалізує за допомогою мікропроцесорного контролера, який згідно заданого алгоритму перемикає кольори світлофора, що відповідають фазам дозволу та заборони руху ТЗ за напрямками доріг перехрестя. В рамках існуючої транспортної мережі світлофори, що реалізують адаптивне управління за допомогою відповідних локальних контролерів, і створюваних на їх основі більш складних системних контролерів, що забезпечують врахування ситуації в зовнішньому середовищі, яке представлено декількома взаємопов'язаними перехрестями, в даний час є одним з найважливіших напрямків вирішення проблеми заторів.

У статті запропоновано математичну модель для побудови алгоритму функціонування мікропроцесорного контролера світлофора, що забезпечує оперативне та адекватне відображення ситуацій на перехрестях. До основних особливостей моделі належать оперативність реагування на зміну ситуацій на перехресті шляхом зміни тривалості зеленої фази світлофора у кожному циклі функціонування світлофора пропорційно довжині черги транспортних засобів у відповідному напрямку руху; адекватне відображення зовнішнього середовища декількома виразами закону Пуассона, що відрізняються різними значеннями параметра, кожен з яких відповідає певному добовому інтервалу функціонування світлофора; динаміка зміни дорожньої ситуації, що обумовлена зменшенням кількості транспортних засобів у черзі за рахунок проїзду перехрестя транспортними засобами у період зеленої фази світлофора, визначається на основі виразів, які визначають переміщення тіл при рівноприскореному та рівномірному русі, а також на основі диференціального рівняння динаміки руху транспортних засобів в одному ряду з урахуванням затримки, зумовленої реакцією водіїв.

Ключові слова: математична модель, світлофор, адаптивне управління, перехрестя, мікроконтролер, програмний засіб.

I. П. ГАМАЮН, С. В. ШАШКОВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ СВЕТОФОРА НА ПЕРЕКРЕСТКЕ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Предметом исследования является процесс моделирования функционирования светофора, обеспечивающего адаптивное управление транспортными средствами на перекрестках городской транспортной сети. В процессе функционирования городских транспортных сетей возникают такие явления, как пробки транспортных средств (ТС), которые приводят к значительным экономическим потерям, ухудшению экологии, фрустрации участников дорожного движения и других видов негативных воздействий. Пробки часто возникают в узлах городской транспортной сети, которые являются перекрестками – местами пересечения, примыкания или разветвления дорог городской сети одного уровня. Одной из причин возникновения заторов является неэффективное управление транспортными потоками на перекрестках, что обеспечивается таким элементом перекрестка как светофор. В рамках существующей транспортной сети светофоры, реализующие адаптивное управление с помощью соответствующих локальных контроллеров, и создаваемых на их основе более сложных системных контроллеров, обеспечивающих учет ситуации во внешней среде, которая представлена несколькими взаимосвязанными перекрестками, в настоящее время является одним из важнейших направлений решения проблемы пробок. Функцію управління потоками светофор реалізує с помощью мікропроцесорного контролера, який, согласно заданному алгоритму, переключает цвета светофора, соответствующие фазам разрешения и запрета движения ТС по направлениям дорог перекрестка.

В статье предлагается математическая модель для построения алгоритма функционирования микропроцессорного контролера светофора, который обеспечивает оперативное и адекватное отображение ситуаций на перекрестках. К основным особенностям модели относится оперативность реагирования на изменение ситуаций на перекрестке путем изменения продолжительности разрешительной фазы движения в каждом цикле функционирования светофора пропорционально длине очереди транспортных средств в соответствующем направлении движения; адекватное отображение внешней среды несколькими выражениями закона Пуассона, отличающимися различными значениями параметра, каждый из которых соответствует определенному суточному интервалу функционирования светофора; динамика изменения дорожной ситуации, обусловленная уменьшением числа транспортных средств в очереди за счет проезда перекрестка транспортными средствами в период зеленой фазы светофора, определяется на основе выражений, определяющих перемещение тел при равноускоренном и равномерном движении, а также на основе дифференциального уравнения динамики движения транспортных средств в одном ряду с учетом задержки, обусловленной реакцией водителей.

Ключевые слова: математическая модель, светофор, адаптивное управление, перекресток, микроконтроллер, программное средство.

I. P. GAMAYUN, S. V. SHASHKOV

MATHEMATICAL MODEL OF ADAPTIVE CONTROL OF THE FUNCTIONING OF A TRAFFIC LIGHT AT THE CROSSROADS OF A URBAN TRANSPORTATION NETWORK

The subject of the research is the process of modeling the functioning of a traffic light, providing adaptive control of vehicles at the intersections of the city transport network. In the process of functioning of urban transport networks, such phenomena as traffic jams occur, which lead to significant economic losses, environmental degradation, frustration of road users and other types of negative impacts. Traffic jams often occur at the nodes of the urban transport network, which are intersections - the places of intersection, abutment or branching of roads of the urban network of the same level. One of the causes of congestion is the ineffective management of traffic flows at intersections, which is provided by such an element of the intersection as a traffic light. Within the framework of the existing transport network, traffic lights that implement adaptive control with the help of appropriate local controllers, and more complex system controllers created on their basis, ensuring that the situation in the external environment is taken into account, which is represented by several interconnected intersections, is currently one of the most important directions for solving the problem of traffic jams. ... The traffic light flow control function is implemented using a microprocessor controller, which, according to a given

algorithm, switches the traffic light colors corresponding to the phases of allowing and prohibiting the movement of the vehicle in the directions of the intersection roads.

The article proposes a mathematical model for building an algorithm for the functioning of a microprocessor traffic light controller, which provides a prompt and adequate display of situations at intersections. The main features of the model include responsiveness to changes in situations at an intersection by changing the duration of the permissive phase of movement in each cycle of traffic light operation in proportion to the length of the queue of vehicles in the corresponding direction of travel; adequate display of the external environment by several expressions of Poisson's law, differing in different values of the parameter, each of which corresponds to a certain daily interval of traffic light functioning; the dynamics of changes in the traffic situation due to a decrease in the number of vehicles in the queue due to the passage of the intersection by vehicles during the green phase of the traffic light is determined on the basis of expressions that determine the movement of bodies with uniformly accelerated and uniform movement, as well as on the basis of the differential equation of the dynamics of movement of vehicles in one row taking into account the delay caused by the reaction of drivers.

Key words: mathematical model, traffic light, adaptive control, crossroads, microcontroller, software.

Вступ. В процесі функціонування міських транспортних мереж виникають такі явища, як затори транспортних засобів (ТЗ), які призводять до значних економічних втрат, погіршенню екології, фрустрації учасників дорожнього руху та інших видів негативних впливів.

Затори часто виникають у вузлах міської транспортної мережі, які є перехрестями – місцями перетину, прилягання або розгалуження доріг міської мережі одного рівня. Однією з причин виникнення заторів є неефективне управління транспортними потоками на перехрестях, що забезпечується таким елементом перехрестя як світлофор [1–2].

Функцію управління потоками світлофор реалізує за допомогою мікропроцесорного контролера, який згідно заданого алгоритму перемикає кольори світлофору, що відповідають фазам дозволу та заборони руху ТЗ за напрямками доріг перехрестя.

Згідно відомої класифікації виділяють локальні та системні контролери [3]. Локальні управляють без урахування ситуації на інших перехрестях. Системні контролери забезпечують управління з урахуванням ситуації на інших перехрестях. При цьому локальні контролери поділяються на такі, що реалізують управління з фіксованою тривалістю сигналів фаз дозволу та заборони руху у циклі роботи світлофору, а також на ті що реалізують адаптивне управління – коли тривалість фаз визначається в залежності від ситуації, яка склалась на перехресті (наприклад, в залежності від числа ТЗ в напрямках доріг перехрестя).

В рамках існуючої транспортної мережі світлофори, що реалізують адаптивне управління за допомогою відповідних локальних контролерів, і створюваних на їх основі більш складних системних контролерів, що забезпечують врахування ситуації в зовнішньому середовищі, яке представлено декількома взаємопов'язаними перехрестями, в даний час є одним з найважливіших напрямків вирішення проблеми заторів.

Для розробки алгоритмів функціонування контролерів, які реалізують адаптивне управління, використовується математична модель, яка віддзеркалює ситуації, що складаються на перехрестях, та динаміку їх змін. При виборі математичного апарату враховується, як зазвичай, характер процесів утворення ситуацій і динаміки їх змін. Оскільки фактор невідомості має істотне значення в процесах, що розглядаються, то в якості математичного апарату зазвичай використовують такі розділи теорії імовірності, як математична статистика, системи масово-

го обслуговування, а також нечітка математика. При цьому динаміка змін ситуації має обумовлюватися функціонуванням світлофорів спрямованим на зменшення заторів [4–6].

Задача дослідження. Розвиток направлення вирішення проблем заторів за допомогою світлофорів, які реалізують адаптивне управління, обумовлюється вдосконаленням математичних моделей, на основі яких розроблюються алгоритми функціонування світлофорів даного типу.

Вдосконалення передбачає збільшення оперативності реагування на виникаючі ситуації, а також збільшення адекватності відображення ситуацій і динаміки їх змін.

В статті запропоновано математичну модель, особливостями якої є оперативне реагування на зміну ситуацій на перехресті шляхом зміни значень довжини фази дозволу руху в кожному циклі його функціонування пропорційно значенням довжини черги ТЗ в кожному напрямку перехрестя; адекватне відображення зовнішнього середовища, невизначеність стану якого визначається декількома виразами закону Пуасона, що відрізняються значеннями параметрів, кожен з яких відповідає певному добовому інтервалу функціонування світлофору, що дозволяє більш чітко виразити умови стаціонарності; динаміка зміни дорожньої ситуації, яка обумовлена зменшенням числа ТЗ в черзі за рахунок проїзду перехрестя ТЗ у період зеленої фази світлофору визначається на основі виразів які визначають переміщення тіл при рівноприскореному та рівномірному русі, а також на основі диференційного рівняння динаміки руху ТЗ в одному ряду з урахуванням затримки обумовленою реакцією водіїв.

Математична модель. Об'єктом моделювання є перехрестя, прикладом якого є перехрестя, зображене на рис. 1 з напрямками руху А, В, С, D. Квадратами на рис. 1 позначаються умовні сигнали світлофору, що регулюють рух на перехресті.

Зафарбований квадрат відповідає зеленій фазі світлофору. Незафарбований квадрат відповідає червоної фазі світлофору.

В моделі використовуються наступні позначення числа ТЗ в черзі перед перехрестям: N_A , N_B , N_C , N_D . По кожному з даних напрямків значення N_A , N_B , N_C , N_D визначають довжину черги в заданих напрямках перед світлофором.

Затор обумовлюється довжиною черги. Чим більша довжина черги, тим більше часу ТЗ проведе

перед перехрестям. Тому для здолання затору необхідно передбачити можливість скорочення довжини черги, починаючи з напрямку (напрямків) з максимальним значенням довжини черги.

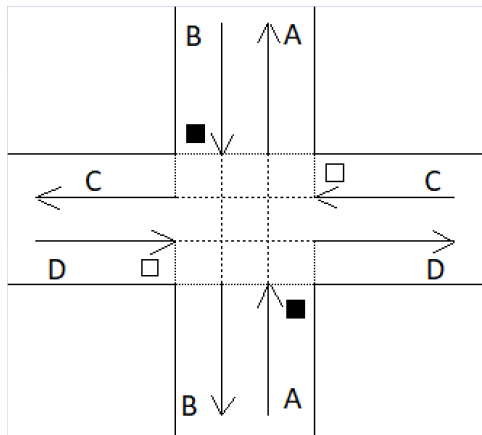


Рис. 1. Перехрестя з напрямками руху А, В, С, D

Така можливість може бути надана, якщо збільшити тривалість зеленої фази світлофора у напрямку з максимальною довжиною черги пропорційно значенню довжини цієї черги. При цьому світлофор у циклі свого функціонування продовжує обслуговувати всі інші напрямки перехрестя, призначаючи час зеленої фази для них пропорційно значенням довжини черги в цих напрямках.

Вид перехрестя, зображений на рисунку 1, передбачає одночасний проїзд перехрестя ТЗ на зеленій сигналі світлофора з двох напрямків: А і В або С і D. Тому визначення тривалості зеленої фази світлофора залежить від значень довжини черги, що представляють собою кожену пару напрямків: $N_{AB} = \max\{N_A, N_B\}$, $N_{CD} = \max\{N_C, N_D\}$.

Часові інтервали тривалості зелених фаз світлофора у напрямках АВ і CD позначаються як T_{AB} , T_{CD} .

Якщо через T позначити значення часового інтервалу повного циклу роботи світлофора, протягом якого для даного випадку реалізується проїзд перехрестя ТЗ спочатку з напрямків А і В, а потім С і D (або навпаки), то

$$T_{AB} + T_{CD} = T, \quad (1)$$

де T є постійною величиною для управління на перехресті, що розглядається окремо, і змінною, коли управління реалізується з урахуванням ситуацій на інших перехрестях (системні контролери).

Значення T_{AB} , T_{CD} , як складові значення T , обираються пропорційно значенням довжин черг у відповідних напрямках так, що

$$T_{AB} = \frac{N_{AB}}{N_{AB} + N_{CD}} T, \quad T_{CD} = \frac{N_{CD}}{N_{AB} + N_{CD}} T. \quad (2)$$

Такий вибір значень T_{AB} , T_{CD} здовольняє відношенню (1) і забезпечує адаптивний характер управління процесом пропуску ТЗ через перехрестя, оскільки

ки значення тривалостей зелених фаз світлофора (2) визначається з урахуванням довжин черг у кожному циклі функціонування світлофора, що сприяє зменшенню заторів.

Динаміка зміни ситуації на перехресті у кожному циклі функціонування світлофора характеризується двома основними процесами: зменшення черг в результаті проїзду ТЗ перехрестя у період зелених фаз світлофора для даних напрямків і збільшення черг в результаті прибуття нових ТЗ.

Процес збільшення черг має стохастичний характер. Випадковий потік нових ТЗ, що прибувають у чергу в період зеленої фази роботи світлофора, вважається таким, що задовольняє властивостям ординарності, відсутності післядії та стаціонарності. У зв'язку з цим цей потік є найпростішим (Пуасонівським) [6]. При цьому для більш адекватного урахування властивостей стаціонарності пропонується добовий період функціонування світлофора розбити на частини, кожна з яких характеризується певним постійним значенням математичного очікування числа нових ТЗ, що прибувають в чергу.

Таким чином, процес прибуття нових ТЗ в чергу пропонується відобразити декількома кривими розподілу випадкового числа нових ТЗ, що прибувають в чергу, кожна з яких відповідає частині доби роботи світлофора і характеризується певним значенням параметра закону Пуасона, що дорівнює, як відомо, значенню математичного очікування.

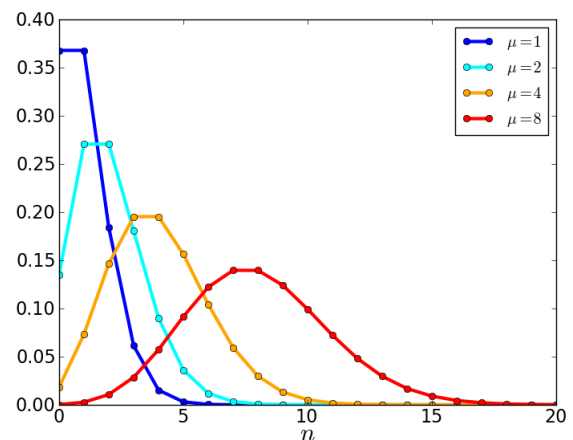


Рис. 2. Розподіл випадкової величини з різними параметрами

На рис. 2 зображено приклад декількох багатокутників розподілу випадкової величини n числа ТЗ, що прибувають в деякий інтервал часу, яка може приймати цілі невід'ємні значення $0, 1, 2, \dots, m, \dots, n$.

Кожен з багатокутників випадкової величини, що розглядається, розподіленої за законом Пуасона, відповідає певним значенням параметра a , який дорівнює значенню математичного очікування випадкової величини. При цьому індекс параметра на рис. 2 відповідає індексу частини доби роботи світлофора

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}.$$

Для визначення конкретного значення випадкової величини необхідно обрати певну криву закону розподілу, виходячи з моменту часу доби, і далі реалізувати відому процедуру жеребкування [7–8].

Реалізація вказаної процедури жеребкування дозволяє визначити значення числа нових ТЗ, що прибувають до черги в циклі T роботи світлофора за напрямками А, В, С, D. Далі ці значення позначаються як n_A, n_B, n_C, n_D і використовуються для корекції значень довжин черг N_A, N_B, N_C, N_D за напрямками, що розглядаються.

Така корекція визначає процес зміни черг за рахунок прибуття нових ТЗ протягом циклу роботи світлофора і виражається рекурентним співвідношенням

$$N_{\alpha}^i = N_{\alpha}^{i-1} + n_{\alpha}^i, (i \in \overline{1, I}; \alpha \in A, B, C, D), \quad (3)$$

де i – індекс поточного циклу роботи світлофора T^i ; I – загальна кількість циклів роботи світлофора в добі;

α – індекс напрямків, що розглядаються.

Зміна ситуації на перехресті у циклі роботи світлофора $i \in \overline{1, I}$, що розглядається, як відзначалось, характеризується також процесом зменшення черг шляхом проїзду перехрестя ТЗ за часові інтервали зелених фаз роботи світлофора T_{AB}^i і T_{CD}^i .

Значення T_{AB}^i і T_{CD}^i визначаються на основі виразу (2) на основі довжини черг за напрямками А, В, С, D у попередній $(i - 1)$ -й цикл роботи світлофора, тобто

$$T_{AB}^i = \frac{N_{AB}^{i-1}}{N_{AB}^{i-1} + N_{CD}^{i-1}} T^{i-1}, \quad (4)$$

$$T_{CD}^i = \frac{N_{CD}^{i-1}}{N_{AB}^{i-1} + N_{CD}^{i-1}} T^{i-1}.$$

Для визначення числа ТЗ, що проїдуть перехрестя, і інтервалів T_{AB}^i і T_{CD}^i , необхідно скористатись виразами, що визначають динаміку руху ТЗ через перехрестя.

До таких виразів відноситься диференційне рівняння руху ТЗ в одному ряду з урахуванням затримки [9–10]:

$$\frac{d^2 x_k(t + \tau)}{dt^2} = \alpha \left(\frac{dx_{k-1}(t)}{dt} - \frac{dx_k(t)}{dt} \right)$$

де $x_k(t), x_{k-1}(t)$ – положення k -го ТЗ і $(k - 1)$ -го ТЗ, що рухається перед k -м в напрямку x в момент часу t ;

τ – затримка, з якою водій k -го ТЗ реагує на зміну швидкості $(k - 1)$ -го ТЗ, що рухається перед ним;

α – коефіцієнт чутливості розмірності [1/сек].

Іншим способом вираження динаміки проїзду ТЗ перехрестя є використання співвідношень, що визначають переміщення тіл при рівноприскореному та рівномірному русі [7].

Реалізація цього способу передбачає використання характеристик перехрестя черги рекомендованого швидкісного режиму при русі ТЗ в один ряд через перехрестя та при під'їзді до нього.

На рис. 3 показано представлення черги ТЗ перед перехрестям як послідовності ділянок $k \in \overline{1, N_{\alpha}^i}$ довжиною l , де k – відповідає порядковому номеру ТЗ в черзі, а довжина l включає середньостатистичну довжину ТЗ в черзі та рекомендовану дистанцію між ТЗ в черзі.

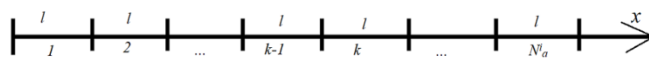


Рис. 3. Розподіл випадкової величини з різними параметрами

Стрілка на рисунку 3 показує напрямок руху ТЗ при включенні зеленого сигналу світлофора. Припустимо, що рух усіх ТЗ, що утворюють чергу, після включення зеленої фази світлофора за відповідними напрямками T_{α}^i реалізується в 2 етапи – спочатку рівноприскорене на ділянці шляху руху ТЗ в черзі довжиною S' протягом інтервалу часу Δt , а потім рівномірне, після досягнення ТЗ деякої рекомендованої (встановленої) швидкості V . Відмітимо, що вказані параметри руху задовольняють добре відомому співвідношенню $V = \frac{2S}{\Delta t}$, за умови, що початкова швидкість рівна 0 для всіх ТЗ в черзі [11–12].

Також припускається, що початок руху кожного наступного ТЗ в черзі по відношенню до безпосередньо попереднього ТЗ реалізується із затримкою τ . Таким чином, якщо перший в черзі ТЗ ($k = 1$) починає рух в момент часу $t = 0$, то ТЗ з індексом $k > 1$ в черзі починає рух в момент $t = (k - 1)\tau$.

ТЗ на початку черги можуть почати перетин перехрестя на етапі рівноприскореного руху, не досягнувши рекомендованої швидкості V , з якою виконується рівномірний рух. Число таких ТЗ визначається значенням індексу $k_1 = \max\{\overline{1, N_{\alpha}^i}\}$, для якого виконується співвідношення

$$\forall k \in \overline{1, k_1} (k - 1)l \leq S, \quad T_{\alpha}^i - (k - 1)\tau \geq \Delta t. \quad (5)$$

Якщо виявиться, що $k_1 = N_{\alpha}^i$, то усі ТЗ в черзі можуть почати перетин перехрестя реалізуючи лише рівноприскорений рух.

Якщо $k_1 < N_{\alpha}^i$, то ТЗ в черзі, які мають індекси $k > k_1 + 1$, можуть почати перетин перехрестя реалізуючи 2 види руху – рівноприскорений, а за ним рівномірний після досягнення швидкості V . Таким чином, рух ТЗ з індексами $k \in \overline{k_1 + 1, N_{\alpha}^i}$ реалізується спочатку як рівноприскорений з прискоренням a протягом часу Δt .

Потім, після подолання відстані S , реалізується рівномірний рух зі швидкістю V , який може продовжуватись протягом часу $(T_{\alpha}^i - (k - 1)\tau - \Delta t) > 0$. За цей час k -й ТЗ подолає відстань $V(T_{\alpha}^i - (k - 1)\tau - \Delta t)$.

Число ТЗ, які можуть почати перетин перехрестя, реалізуючи два види руху, визначається значенням індексу $k_2 = \max\{k_1 + 1, N_\alpha^i\}$, для якого виконується співвідношення

$$\forall k \in \overline{k_1 + 1, N_\alpha^i}, \quad (6)$$

$$(k - 1)l \leq S + V(T_\alpha^i - (k - 1)\tau - \Delta t).$$

Нехай, наприклад, на одному з напрямків перехрестя α в i -му циклі роботи світлофора утворилась черга з 15 ТЗ, тобто $N_\alpha^i = 15$. Тривалість зеленої фази світлофора в напрямку α , що розрахована на основі (4), визначається значення $T_\alpha^i = 20$ с. Статистично визначено, що $l = 7$ м. Інші вказані вище параметри мають наступні значення: $S = 20$ м, $\Delta t = 4$ с, $V = 10$ м/с, $\tau = 1$ с.

Спочатку, на основі співвідношення (5) визначається значення $k_1 = 3$, тобто тільки перші три ТЗ з черги можуть почати перетин перехрестя, реалізуючи тільки рівноприскорений рух.

Оскільки $k_1 < N_\alpha^i$, то переходимо до визначення k_2 на основі співвідношення (6). Для прикладу, що розглядається, $k_2 = 11$.

Таким чином з 15 ТЗ, що утворюють чергу, 11 ТЗ можуть почати перетин перехрестя, здійснюючи рівноприскорений та рівномірний рух. При цьому перші три з 11 можуть почати перетин перехрестя, реалізуючи тільки рівноприскорений рух.

Значення k_1 та k_2 для кожного напрямку α перехрестя в i -му циклі функціонування світлофора, що позначені як $k_1^i(\alpha)$, $k_2^i(\alpha)$, дозволяють остаточно скорегувати довжину черги перед розглядом наступного $(i + 1)$ -го циклу:

$$N_\alpha^i = \begin{cases} N_\alpha^i - k_1^i(\alpha), & \text{якщо } k_1^i(\alpha) = N_\alpha^i \\ N_\alpha^i - k_2^i(\alpha), & \text{якщо } k_2^i(\alpha) < N_\alpha^i \end{cases} \quad (7)$$

Після корекції значень N_α^i на основі (7) повторюються дії, пов'язані з визначенням довжин черг, тривалостей зелених фаз світлофора за напрямками перехрестя на основі виразів (3), (4), що реалізуються на наступному $(i + 1)$ -му циклі роботи світлофора.

Список літератури

1. *Адаптивное управление светофорными объектами*. URL: <https://spetsdor.ru/cases/adaptivnoe-upravlenie-svetoformymi-obektami/> (дата звернення: 28.10.2021).
2. *Адаптивная система управления светофорами теперь работает на 10 перекрестках Кемерово*. URL: <https://news.drom.ru/30855.html> (дата звернення: 17.10.2021).
3. Абрамов М. К., Прокопов А. Г. *Специальная техника в ОВД: учебно-методические рекомендации*. Белгород: Бел ЮИ МВД России, 2015. 176 с.
4. *163 светофора в Санкт-Петербурге будут оснащены адаптивными режимами управления*. URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/tr_infr_kom/news/59538/ (дата звернення: 28.10.2021).
5. Мирзай Х. Разработка адаптивного алгоритма контролера светофора с приоритетной выборкой в режиме реального

времени. *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. Воронеж: 2016. № 1. С. 26-32.

6. *Алгоритмы адаптивного регулирования светофорной сигнализации*. URL: <http://surl.li/aysmg> (дата звернення: 12.10.2021).
7. *Распределение и формула Пуассона*. URL: http://mathprofi.ru/raspredelenie_i_formula_puassona.html (дата звернення: 28.10.2021).
8. Билялов Р. Ф. *Теория вероятностей и математическая статистика. Лекционный курс и практические занятия*. Казань: Казанский государственный университет, 2004. 138 с.
9. Геворкян Э. А. *Дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом: учебно-методический комплекс*. Москва: Евразийский открытый институт, 2011. 155 с.
10. Бордовский Г. А., Кондратьев А. С., Чоудери А. *Физические основы математического моделирования. Учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры*. Москва: Юрайт, 2017. 320 с.
11. *Перемещение тела при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости*. URL: <https://100ballov.kz/mod/page/view.php?id=2576> (дата звернення: 28.10.2021).
12. *Рівноприскорений рух*. URL: <https://goo.su/9Qv8> (дата звернення: 17.10.2021).

References (transliterated)

1. *Adaptivnoe upravlenie svetoformimi obektami* [Adaptive traffic light control]. URL: <https://spetsdor.ru/cases/adaptivnoe-upravlenie-svetoformymi-obektami/> (accessed 28.10.2021).
2. *Adaptivnaya sistema upravleniya svetoformami teper' rabotaet na 10 perekrestkah Kemerovo* [The adaptive traffic light control system now works at 10 intersections in Kemerovo]. URL: <https://news.drom.ru/30855.html> (accessed 17.10.2021).
3. Abramov M. K., Prokopov A. G. *Specialnaya tehnika v OVD: uchebno-metodicheskie rekomendacii* [Special equipment in the police department: educational and methodological recommendations]. Belgorod, Bel YUI MVD Rossii Publ., 2015. 176 p.
4. *163 svetofera v Sankt-Peterburge budut osnashcheny adaptivnymi rezhimami upravleniya* [163 traffic lights in St. Petersburg will be equipped with adaptive control modes]. URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/tr_infr_kom/news/59538/ (accessed 28.10.2021).
5. Mirzai H. *Razrabotka adaptivnogo algoritma kontrolera svetofera s prioritetnoy viborkoi v rezhime realnogo vremeni* [Development of an adaptive algorithm for a traffic light controller with priority sampling in real time]. *Vestnik VGU, seriya: sistemniy analiz i informacionnie tehnologii* [Voronezh State University Bulletin, series: system analysis and information technology]. Voronezh, 2016, no. 1, pp. 26-32.
6. *Algoritmy adaptivnogo regulirovaniya svetoformoj signalizacii* [Algorithms for adaptive control of traffic light signaling]. URL: <http://surl.li/aysmg> (accessed 12.10.2021).
7. *Raspredelenie i formula Puassona* [Distribution and Poisson's formula]. URL: http://mathprofi.ru/raspredelenie_i_formula_puassona.html (accessed 28.10.2021).
8. Bilyalov R. F. *Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika. Lekcionnii kurs i prakticheskie zanyatiya* [Probability theory and mathematical statistics. Lecture course and practical exercises]. Kazan, Kazanskii gosudarstvennii universitet Publ., 2004. 138 p.
9. Gevorkyan E. A. *Differentsial'nye uravneniya s zapazdyvayushchim argumentom: uchebno-metodicheskij kompleks* [Differential equations with lagging argument: educational-methodical complex]. Moscow, Evrazijskij otkrytyi institut Publ., 2011. 155 p.
10. Bordovskii G. A., Kondratev A. S., Chouderi A. *Fizicheskie osnovi matematicheskogo modelirovaniya. Uchebnik i praktikum dlya bakalavriata i magistraturi* [Physical foundations of mathematical modeling. Textbook and workshop for undergraduate and graduate programs]. Moscow, Yurait Publ., 2017. 320 p.
11. *Peremeshchenie tela pri pryamolinejnom ravnouskorennom dvizhenii bez nachal'noj skorosti* [Moving a body in a rectilinear uniformly accelerated motion without an initial speed]. URL:

<https://100ballov.kz/mod/page/view.php?id=2576>
28.10.2021).

(accessed 12. Rivnoprискoreniі ruh [Uniformly accelerated motion]. URL:
<https://goo.su/9Qv8> (accessed 17.10.2021).

Надійшла (received) 02.11.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гамаюн Ігор Петрович доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/00000-0003-2009-4658>; e-mail: ipgamayun@kpi.kharkov.ua.

Шашков Сергій Віталійович Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5193-954X>; e-mail: serikshash@gmail.com.

Гамаюн Игорь Петрович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/00000-0003-2009-4658>; e-mail: ipgamayun@kpi.kharkov.ua.

Шашков Сергей Витальевич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент, г. Харьков, Украина, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5193-954X>; e-mail: serikshash@gmail.com.

Gamayun Igor Petrovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Software Engineering and Information Management Technologies; Kharkov, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/00000-0003-2009-4658>; e-mail: ipgamayun@kpi.kharkov.ua.

Shashkov Serhii Vitaliyovich – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", student, Kharkov, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5193-954X>; e-mail: serikshash@gmail.com.