УДК 656.11

к.т.н., профессор Човнюк Ю.В.,
ychovnyuk@ukr.net, orcid/ 0000-0002-0608-0203,
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
к.т.н., доцент Диктерук М.Г., dicteruk@ukr.net, orcid/ 0000-0003-1889-0876,
доцент Чередниченко П.П., petro_che@ukr.net, orcid / 0000-0001-7161-661x,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ: МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, АЛГОРИТМИ КОНТРОЛЮ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Розглянуті алгоритми моделювання простих транспортних потоків у режимі реального часу з використанням стандартних пакетів програм для ПЕОМ (типу MATLAB). Використання запропонованого підходу при формуванні моделі транспортного потоку дозволяє здійснити підрахунок числа автомобілів у реальному масштабі часу, розрахувати середню довжину черги для ухвалення рішення про регулювання проїзду. При подальшому розвитку моделі можливо здійснювати оперативну класифікацію транспортних засобів у потоці для формування ефективного керування системами регулювання шляховотранспортного комплексу.

Ключові слова: вдосконалення, ефективність, стратегії, керування, транспортні потоки, математичне моделювання, алгоритми, контроль, автоматизовані системи управління.

Постановка проблеми. Для пошуку сучасних ефективних стратегій керування транспортними потоками, наприклад, за допомогою автоматизованих систем управління рухом (АСУР) у структурі АСУТП великих промислових підприємств, оптимальних рішень по проектуванню дорожньої мережі і організації дорожнього руху необхідно враховувати широкий спектр характеристик транспортного потоку, закономірності впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на динамічні характеристики змішаного транспортного потоку.

Аналіз публікацій по темі дослідження. Великий досвід дослідження процесів руху, накопичений на сьогодні, загальний рівень досліджень в галузі створення АСУР і їх практичне використання не достатнє у силу наступних факторів: 1) транспортний потік нестабільний і різноманітний, а одержання об’єктивної інформації про нього є найбільш складним і ресурсномістким елементом системи керування; 2) критерії якості керування дорожнім рухом суперечливі: необхідно забезпечувати безперебійність руху одночасно знижуючи збиток від руху, накладаючи обмеження на швидкість і напрямки руху; 3) дорожні умови, при всій стабільності, мають непередбачувані як у частині відхилення погодно-кліматичних параметрів, так і, властивостей дороги; 4) з огляду на природу процесу дорожнього руху, виконання рішень по керуванню рухом завжди неточне при реалізації, що приводить до непередбачуваних ефектів [1].

Причиною відставання результатів наукових досліджень від вимог практики є труднощі формалізації процесу руху транспортного потоку. Для розрахунку розвантаження дорожньої ділянки потрібно знати, яка кількість автомобілів проїжджає через перехрестя. Якщо даних для розрахунків немає, тоді доводиться спиратися на експертні оцінки. При цьому транспортний потік адаптується під керуючі впливи і ефект вказаного вище перевантаження зникає через якийсь час за рахунок перерозподілу транспортного потоку. Таким чином, моделювання необхідне у силу наступних властивостей транспортної системи: 1) компенсації збільшення пропускної спроможності при розвитку мережі збільшенням попиту й перерозподілом його у нових умовах; 2) непередбачуваність поведінки водія – вибір маршруту, манера водіння і т.п.; 3) вплив випадкових факторів (ДТП, погода) і змін, пов'язаних із сезонами, вихідними й святковими днями й т.п.

Основні вимоги до програмних комплексів моделювання роботи транспортної системи, що дозволяють вирішувати наступні задачі, наведені у [2]:

1. Задачі промислового підприємства: зміни у роботі транспортної системи при використанні нових елементів, зміни при будівництві нового комплексу, цеху і т.п.; перерозподіл потоків транспорту у випадку тимчасового закриття або ліквідації якого-небудь елементу транспортної системи; ефект, який може дати впровадження автоматизованих систем керування вуличним рухом.
2. Задачі локального порядку: який ефект дасть перепланування перехрестя, групи перехресть, розширення проїжджої частини вулиці, зміни в організації руху на перетинаннях, оптимізація світлофорного регулювання, зміна умов завантаження вантажів.
3. Задачі аналізу роботи дорожньої мережі вантажного транспорту.

Задачею розвитку моделювання транспортних потоків є аналіз пропускної здатності магістралей і перетинань. Під ***пропускною здатністю*** розуміють максимально можливе число автомобілів, що може пройти через переріз дороги за одиницю часу. У спеціальній літературі зустрічаються такі модифікації поняття пропускної здатності, як ***теоретична, номінальна, ефективна, власна, практична, фактична*** й інші. У цей час пропускна здатність є найважливішим критерієм оцінки якості функціонування шляхів сполучення.

Перша макроскопічна модель, де рух транспортного потоку розглядається з позицій гідродинамічної аналогії суцільного середовища, була запропонована у [3]. Показано, що методи опису процесів переносу в суцільних середовищах можуть бути використані для моделювання заторів. Модель заснована на рівнянні безперервності для щільності автомобільного потоку у сполученні з гіпотезою про те, що середня швидкість на ділянці дороги є детермінованою функцією щільності автомобіля.

Виділення математичних досліджень транспортних потоків у самостійний розділ прикладної математики вперше було здійснено Ф. Хейтом [1].

Усі моделі транспортних потоків можна розбити на три класи [2] моделі-аналоги, моделі проходження за лідером й імовірнісні моделі.

У ***моделях-аналогах*** рух транспортного засобу вподібнюється фізичному потоку (гідро- й газодинамічні моделі, макроскопічні моделі).

У ***моделях проходження за лідером*** (мікроскопічні моделі) істотне припущення про наявність зв'язку між переміщенням відомого й головного автомобіля. У моделях цієї групи враховується час реакції водіїв, досліджується рух на багатосмугових дорогах, вивчається усталеність руху.

У ***імовірнісних моделях*** транспортний потік розглядається як результат взаємодії транспортних засобів на елементах транспортної мережі. У зв'язку із твердим характером обмежень мережі й масовим характером руху у транспортному потоці складаються виразні закономірності формування черг, інтервалів, завантажень по смугах дороги й т.п. Ці закономірності носять істотно стохастичний характер.

Останнім часом у дослідженнях транспортних потоків стали застосовувати міждисциплінарні математичні ідеї, методи і алгоритми нелінійної динаміки. Їхня доцільність обґрунтована наявністю у транспортному потоці стійких і нестійких режимів руху, втрат стійкості при зміні умов руху, нелінійних зворотних зв'язків, необхідності у великому числі змінних для адекватного опису системи.

Метою даної роботи є моделювання сучасних алгоритмів для використання в АСУР, оскільки різна організація руху в інших країнах і, найчастіше, особливості їзди вітчизняних водіїв, не дозволяють переносити зарубіжні моделі керування транспортом.

Виклад основного змісту дослідження. Розглянемо потік транспорту на односмуговій дорозі при русі без обгонів. Щільність автомобілів (кількість автомобілів на одиницю довжини дороги) $\rho(x,t),\ x \in R$ у момент часу $t \geq 0$. Число автомобілів в інтервалі ($x_1,\ x_2$) у момент часу t дорівнює:

$$n(t) = \int_{x_1}^{x_2} \rho(x,t)dx. \quad (1)$$

Нехай $v(x,t)$ - швидкість автомобілів у точці x у момент $t.$ Число минаючих через x (одиницю довжини) автомобілів у момент $t,$ є $\rho(x,t)\cdot v(x,t).$ Зміна щільності числа автомобілів в інтервалі (x_1, x_2) за час t змінюється відповідно до числа машин, що в'їжджають і виїжджають:

$$\frac{d}{dt}\int_{x_1}^{x_2} \rho(x,t)dx = \rho(x_1,t)\cdot v(x_1,t) + \rho(x_2,t)\cdot v(x_2,t). \quad (2)$$

Інтегруючи по часу і припускаючи, що ρ і v – безперервні функції, одержуємо:

$$\int_{t_1}^{t_2}\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t}dxdt = \int_{t_1}^{t_2}(\rho(x_1,t)\cdot v(x_1,t) + \rho(x_2,t)\cdot v(x_2,t))dt - \int_{t_1}^{t_2}\int_{x_1}^{x_2}\frac{\partial(\rho(x,t)\cdot v(x,t))}{\partial x}dxdt. \quad (3)$$

Якщо $x_1, x_2 \in R,\ t_1, t_2 > 0$ довільні, а накопичення машин на перехресті немає, тоді

$$\rho_t + (\rho\cdot v)_x = 0,\ \ x \in R. \quad (4)$$

При початкових умовах:

$$\rho(x,0) = \rho_0(x),\ \ x \in R. \quad (5)$$

Нехай швидкість v залежить тільки від щільності ρ. Якщо дорога порожня ($\rho = 0$), автомобілі їдуть із максимальною швидкістю $v = v_{\max}$. При заповненні дороги, швидкість падає аж до повної зупинки ($v = 0$). Якщо машини розташовані «бампер – до – бампера» ($\rho = \rho_{\max}$).

На рис. 1 показані можливі моделі, які характеризують залежність $v = v(\rho)$.

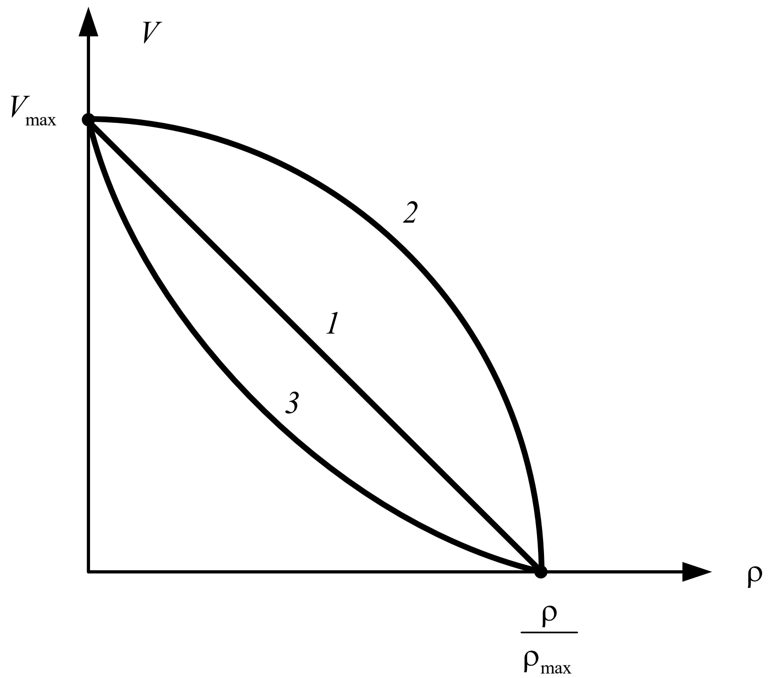

Рис. 1. Апроксимаційні залежності $\nu(\rho)$: *1* – лінійна; *2* – квадратична; *3* – гіперболічна

Для лінійної залежності (лінійної апроксимації) маємо:

$$v(\rho) = v_{\max} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}}\right), \ 0 \le \rho \le \rho_{\max}. \tag{6}$$

Для нелінійної апроксимації член у дужках залежності (6) слід піднести до степеня n $(n > 1,\ n < 1)$. Тоді рівняння (4) приймає вигляд (для лінійної апроксимації):

$$\rho_t + \left[v_{\max} \cdot \rho \cdot \left[1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}} \right] \right]_x = 0, \ x \in R, \ t > 0. \tag{7}$$

Очевидно, це закон збереження кількості автомобілів (транспортного потоку). Інтегруючи (7) по $x \in R$, одержуємо:

$$\frac{d}{dt}\int_R \rho(x,t)dx = -\int_R \frac{\partial}{\partial x}\left[v_{\max} \cdot \rho(x,t) \cdot \left(1 - \frac{\rho(x,t)}{\rho_{\max}} \right) \right] dx = 0, \tag{8}$$

якщо відсутні накопичення автомобілів на перехресті. Отже, кількість автомобілів у R постійна для будь-яких значень $t \ge 0$.

Довжина черги автомобілів, що очікують проїзду через перехрестя, є однією з найважливіших характеристик перехрестя. Розглянемо випадок перетинання двох доріг з однобічним рухом. Нехай τ^+ – тривалість горіння зеленого світла, а τ – тривалість усього циклу світлофора. Припустимо, що коли для однієї смуги зайнялося червоне світло, зелене світло для другої смуги загоряється через деякий час, щоб автомобілі встигли проїхати.

Нехай потік автомобілів є найпростішим потоком з параметром λ, $\lambda > 0$, що проходить через деяку точку А на ділянці дороги перед перехрестям. При накопиченні автомобілів у системі точка А зрушується вліво (рис. 2).

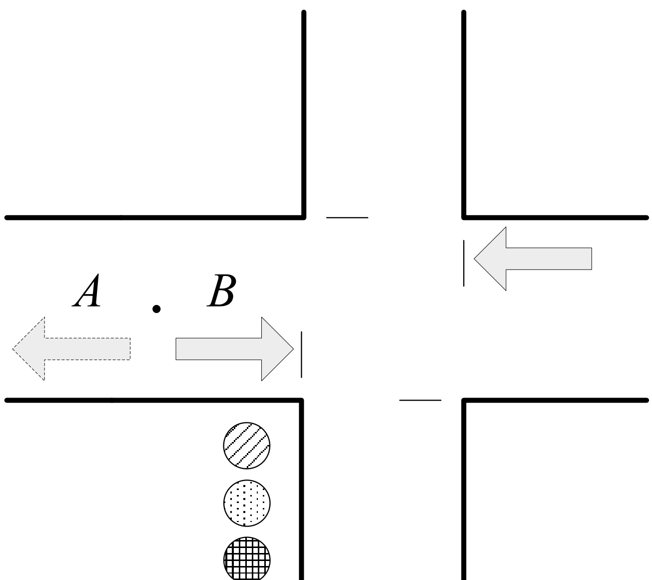

Рис. 2. Модель черги на перехресті

Автомобілі, що надходять у систему, або одержують обслуговування як запити (перетинають перехрестя, якщо проїзд вільний і горить зелене світло), або стають у чергу у перехрестя.

Обслуговування одного автомобіля у межах даної моделі являє собою проїзд через точку В – початок перехрестя. Приймемо час проїзду через точку В однаковим для всіх автомобілів і рівним T, $T>0$. За цей час наступний автомобіль під'їжджає до перехрестя (точка В) і чекає свого обслуговування. Таким чином, перехрестя може бути описане за допомогою однолінійної системи масового обслуговування (СМО) з очікуванням і максимальним числом автомобілів (буфером) розміру M, $M \in N$.

Знайдемо середину черги при умові, що кожне авто має однакові розміри. Знайдемо також середню довжину черги за умови, що перед перехрестям може стояти не більше M автомобілів ($M>1$). За одиницю часу через перехрестя можуть проїхати T^{-1} автомобілів, на зелене світло через перехрестя можуть проїхати $\tau^{+}T^{-1}$ автомобілів. Таким чином, $N=\left[\tau^{+}T^{-1}\right]$ представляє собою пропускну здатність перехрестя за час горіння зеленого світла.

Розглянемо накопичення автомобілів у системі за час одного циклу світлофора. Будемо досліджувати поведінку системи у моменти часу nT, $n=\overline{(0,N)}$. Позначимо через $p_i^{(n)}$ імовірності того, що у момент часу $nT+0$ довжина черги становить i автомобілів, $n=\overline{(0,N)}$, $m=\overline{(0,M)}$. Позначимо також через $P_i(t)$ імовірність того, що за час t у систему приїдуть i автомобілів, $i \geq 0$. Вираз для $P_i(t)$ має вигляд $P_i(t)=\exp(-\lambda t)\cdot\dfrac{(\lambda t)^i}{i!}$, $i \geq 0$.

Рівняння для ймовірностей $p_i^{(n)}$, $n=\overline{(0,N)}$, $i \geq 0$ мають вигляд:

$$p_i^{(0)}=\sum_{k=0}^{i} p_k^{(N)}\cdot P_{i-k}(\tau^*),\ i=\overline{(0,M)},$$

$$p_M^{(0)}=\sum_{k=0}^{M} p_k^{(N)}\cdot \sum_{l=M-k}^{\infty} P_l(\tau^*),\ \tau^*=\tau-NT,$$

$$p_i^{(n)}=\sum_{k=1}^{i+1} p_k^{(n-1)}\cdot \sum_{l=M-k}^{\infty} P_{i-k+1}(T),\ i=\overline{(0,M-1)}, \tag{9}$$

$$p_M^{(n)}=\sum_{k=0}^{M} p_k^{(n-1)}\cdot \sum_{l=M-k+1}^{\infty} P_l(T),\ n=\overline{(1,N)},$$

де кожна група ймовірностей $p_i^{(n)}$, $n=\overline{(0,M)}$ задовольняє умовам нормування:

$$\sum_{i=0}^{M} p_i^{(n)}=1,\ n=\overline{(0,N)}. \tag{10}$$

Середня довжина черги на перехресті до моменту початку періоду зеленого світла дорівнює:

$$\Omega = \sum_{i=0}^{M} i p_i^{(0)}. \tag{11}$$

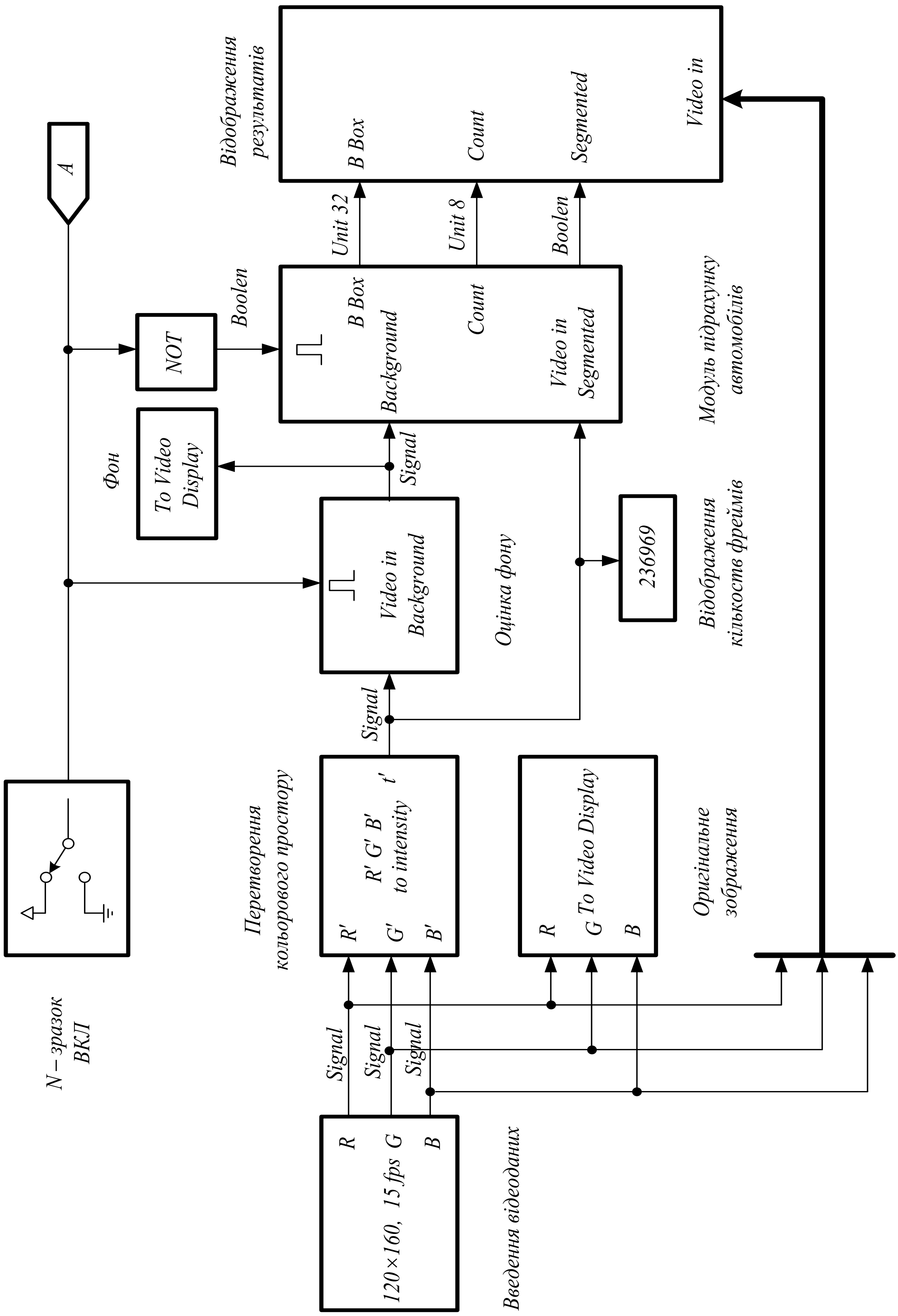

Рис. 3. Схема моделювання алгоритму підрахунку проїжджаючих автомобілів

Останнім часом зароджуються нові уявлення про моделювання транспортного потоку:

– поведінка транспортного потоку визначається звуженнями й розширеннями дороги;

– основним об’єктом дослідження повинні виступати черги, з урахуванням їхньої властивості, структури, поведінки і т.п., що виникають біля звужень;

– поведінка потоку може бути досліджена, якщо побудувати групу простих моделей звужень дороги.

У межах даної задачі виконано моделювання в середовищі Matlab, Simulink [5], де розглянутий варіант підрахунку числа автомобілів, що проїжджають через деяку ділянку дороги. Як базовий варіант схеми моделювання була використана демонстраційна схема Matlab. На рис. 3 показана схема моделювання для підрахунку проїжджаючих транспортних засобів. Відеозображення можна отримати за допомогою відеокамери, встановленій над проїжджою ділянкою дороги. Аналіз зображення виконується у реальному часі у форматі *. Avi при розрішенні 120x160x15 кадрів/с.

На рис. 4 показана схема модуля для оцінки фона зображення, де виконується перетворення колірного простору зображення, фільтрація із застосуванням медіанного фільтра і наступне перетворення фреймів для виконання оцінки загального фона.

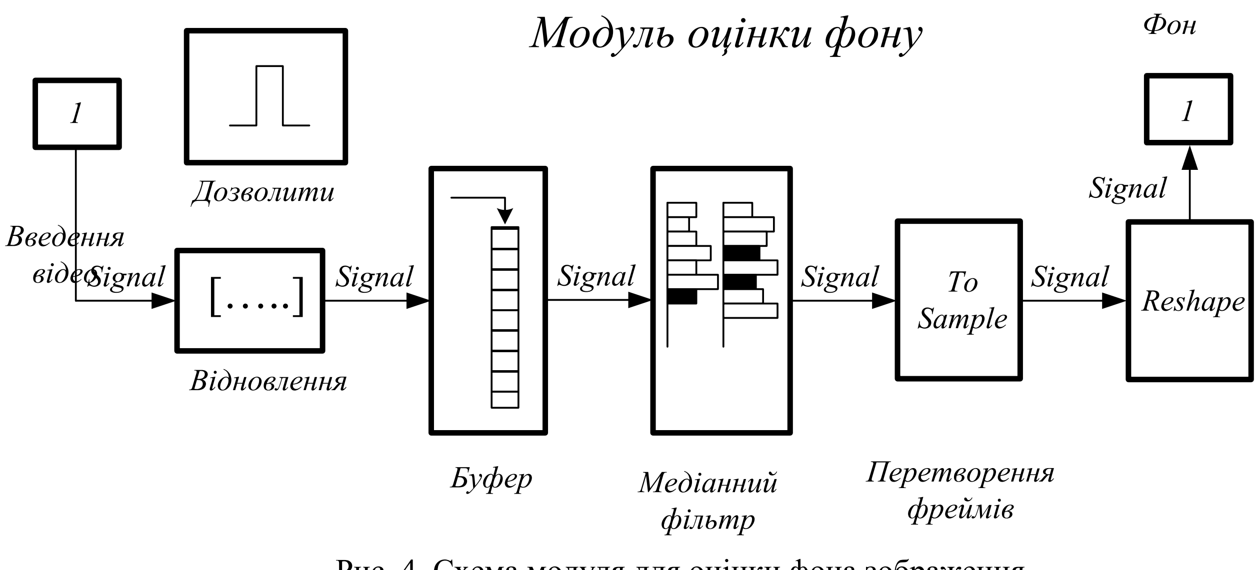

Рис. 4. Схема модуля для оцінки фона зображення

ВИСНОВКИ

1. Теоретичні труднощі реалізації не дозволяють в існуючих математичних пакетах у повному обсязі реалізувати програмну взаємодію різних моделей для вирішення задач шляхово-транспортного комплексу.

2. Використання даного підходу при формуванні моделі транспортного потоку дозволяє:
– здійснити підрахунок числа автомобілів у реальному масштабі часу;
– розрахувати середню довжину черги для ухвалення рішення про регулювання проїзду;
– при подальшому розвитку даної моделі можливо здійснювати оперативну класифікацію транспортних засобів у потоці для формування ефективного керування системами регулювання шляхово-транспортного комплексу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков /Ф. Хейт. – М.: Мир, 1966. – 286 с.
2. Брайловский Н.О. Моделирование транспортных систем /Н.О. Брайловский, Б.И. Грановский. – М.: Транспорт, 1978. – 125 с.
3. Lighthill M. J. On kinetic waves II. A theory of traffic flow on crowded roads /M.J. Lighthill M.J., F.R.S. Whitham//Proc. of the Royal Society. Ser. A. – 1995. – V. 229. – No. 1178. – P. 317-345.
4. www. Mathworks.com SIMULINK. Model-Based and System-Based Design.

Ph.D., Professor Chovnyuk Yu. V.,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Ph.D., associate Professor Dikteruk M.G.,
Ph.D., associate Professor Cherednichenko P.P.,
Kyiv National University of Construction and Architecture

IMPROVEMENT OF EFFECTIVE STRATEGIES FOR MANAGEMENT BY TRANSPORT FLOWS: MATHEMATICAL MODELING, ALGORITHMS OF CONTROL FOR AUTOMATED SYSTEMS OF MANAGEMENT

The algorithms of simulation of simple traffic flows in real time using standard software packages for a PC (MATLAB type) are considered. The use of the proposed approach in the formation of a model of traffic flow allows to calculate the number of automobile in real time, calculate the average length of the queue for the reduction of the decision on the regulation of travel. With the further development of the model, it is possible to carry out an operational classification of vehicles in a way for the formation of efficient management of the systems of regulation of the road-transport complex.

Key words: improvement, efficiency, strategy, management, traffic flows, mathematical modeling, algorithms, control, automated control systems.