

УДК 519.876.5; 656.051

**І. А. ВІКОВИЧ**, д-р техн. наук, проф., НУ «Львівська політехніка»;  
**Р. М. ЗУБАЧИК**, аспірант, НУ «Львівська політехніка»

## РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ДОВЖИНИ ЧЕРГИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Запропонована імітаційна модель для визначення максимальної довжини черги транспортних засобів на ізольованому регульованому перехресті, яка написана мовою програмування Objective-C (модель запускається також на мобільних телефонах). У статті розглядається процес створення моделі, перевіряється її адекватність, а також порівнюються результати, з іншими методиками. В залежності від ступеня насичення на підході визначено межі застосування законів розподілу (логнормального та Гіпер-Ерланга), за якими у моделі розподіляються моменти появи автомобілів на підході до перехрестя.

**Ключові слова:** імітаційна модель, максимальна довжина черги транспортних засобів, регульоване перехрестя, спеціальна смуга.

**Вступ та постановка проблеми.** Одним із ключових чинників для підвищення транспортного обслуговування міських маршрутних автобусів (тролейбусів) на вуличній мережі міста, є забезпечення просторово-часового пріоритету на регульованих перехрестях. Невід’ємною складовою такого пріоритету є впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиці не перериваючи їх на перехрестях. До регульованих перетинів, на яких складно забезпечити просторово-часовий пріоритет відносять перехрестя, підходи яких мають не більше двох смуг руху в одному напрямку. Для забезпечення пріоритетного руху в таких умовах авторами запропоновано метод «спеціальна смуга в зоні перехрестя» [1]. Суть цього методу полягає у створенні у певному напрямку додаткового поширення на підході до перехрестя і після нього, а також облаштування на цих поширеннях, включаючи ділянку на площі перетину між ними, спеціальної смуги для руху пріоритетного транспорту. При відсутності зупинних пунктів у зоні перехрестя або розташування їх перед ним, додаткові поширення впроваджуються лише на його підходах.

Основним етапом впровадження цього методу, є визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до перехрестя. Для цього необхідно визначити максимальну довжину черги транспортних засобів на смузі, що межуватиме із спеціальною.

**Аналіз досліджень і публікацій.** «Кількість автомобілів у черзі» та «довжина черги» (середня чи максимальна) це показники якості функціонування регульованих перехресть, які, відповідно, вимірюються в автомобілях і метрах. Однак з метою стислого викладу матеріалу в подальшому будемо використовувати, здебільшого, поняття «довжина черги», з одиницями виміру як в автомобілях, так і метрах.

У спрощеному варіанті, максимальну довжину черги розраховують за формулою [2]:

$$Q_i = \frac{t_u \cdot N_i}{\left(1 - \frac{N_i}{M_{H_i}}\right) \cdot T}, \quad (1)$$

де  $Q_i$  – максимальна довжина черги на  $i$ -й смузі, од.;  $t_u$  – тривалість забороненого сигналу світлофора, с;  $N_i$  – інтенсивність руху на  $i$ -й смузі, авто/год.;  $M_{u_i}$  – потік насичення на  $i$ -й смузі, авто/год.;  $T$  – тривалість періоду розрахунку, с.

У НСМ (від англ. Highway Capacity Manual) [4] для визначення максимальної довжини черги служить формула, з використання якої можна отримати точніші результати:

$$Q_i = Q_1 + Q_2, \quad (2)$$

де  $Q_i$  – максимальна довжина черги транспортних засобів на  $i$ -й смузі, од.;  $Q_1$  – перший доданок, середня довжина черги при рівномірному прибутті автомобілів до перехрестя;  $Q_2$  – другий доданок, довжина черги при випадковому прибутті автомобілів до перехрестя;

$$Q_1 = PF_2 \cdot \frac{\frac{N_i \cdot T_u}{3600} \left(1 - \frac{\lambda}{T_u}\right)}{1 - \left[\min(1.0; X_i) \cdot \frac{\lambda}{T_u}\right]}, \quad (3)$$

де  $PF_2$  – коефіцієнт коригування при періодичному надходженні автомобілів до перехрестя (для ізольованих перехресть  $PF_2 = 1,0$ );  $N_i$  – інтенсивність руху на  $i$ -й смузі, авто/год.;  $T_u$  – тривалість циклу, с;  $\lambda$  – ефективна тривалість фази, с;  $X_i$  – ступінь насичення на  $i$ -й смузі руху;  $M_{u_i}$  – потік насичення  $i$ -ї смуги руху, авто/год.

$$Q_2 = 0,25 \cdot P_i \cdot T \cdot \left[ (X_i - 1) + \sqrt{(X_i - 1)^2 + \frac{8 \cdot k_B \cdot X_i}{P_i \cdot T} + \frac{16 \cdot k_B \cdot Q_0}{(P_i \cdot T)^2}} \right], \quad (4)$$

де  $P_i$  – пропускна здатність  $i$ -ї смуги руху, авто/год.;  $T$  – тривалість періоду розрахунку, год.;  $Q_0$  – початкова довжина черги на початку періоду розрахунку (стандартне значення 0);  $k_B$  – коефіцієнт коригування для раннього прибуття (розрахункова формула наведена у [4])

В німецьких дорожніх нормативних матеріалах [5] (скорочено НБС) для визначення максимальної довжини черги пропонується така формула:

$$Q_i = e^{0,022 \cdot (S-50)} - 1 \cdot \sqrt{m_u + Q_{GR}} + (m_u + Q_{GR}), \quad (5)$$

де  $Q_i$  – максимальна довжина черги автомобілів, од.;  $S$  – запобігання надмірному скупченню, % (90; 95);  $m_u = \frac{N_i \cdot t_u}{T}$  – середня кількість автомобілів, що прибувають при забороненому сигналі, од.;  $N_i$  – інтенсивність руху на  $i$ -й смузі руху, авто/год.;  $t_u$  – тривалість забороненого сигналу, с;  $T$  – тривалість періоду розрахунку, с;  $Q_{GR}$  – кількість автомобілів у черзі в момент завершення зеленого сигналу, од. (розрахункові формули в залежності від ступеня насичення  $X_i$  наведено в [5]).

Для порівняння результатів розрахунків за формулами (2) і (5), розглянемо діапазон інтенсивності від 300 до 800 авто/год. на одному підході до перехрестя при однакових вхідних даних.

Нехай на деякому ізольованому підході з однією смугою руху транспортний потік є однорідним (100% легкових автомобілів). Потік насичення становить 1800 авто./год. Тривалість дозволеного сигналу змінюється від 10 до 30 с, з інтервалом 4 с в залежності від інтенсивності. Умови руху на підході до перехрестя,

характеризуються трьома ступенями насичення (0,65; 0,9 та 1,0). При ступені насичення  $X_i = 0,65$  тривалість циклу змінюється відповідно від 39 до 44, при  $X_i = 0,9$  – від 54 до 61 і від 60 до 68 при  $X_i = 1,0$ . Тривалість періоду розрахунку складає – 3600 с (рис. 1). З рис. 1 видно, що є велика розбіжність між отриманими результатами, яка становить від 3 до 9 автомобілів відповідно при ступенях насичення 0,65 та 1,0. З іншого боку значення довжини

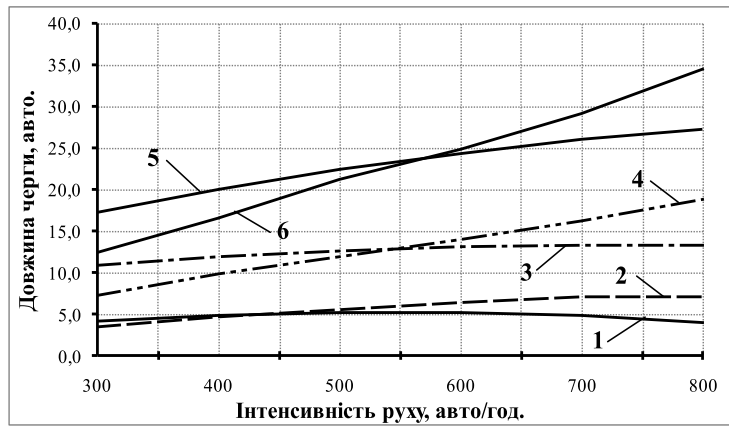


Рис. 1 – Максимальна довжина черги: 1; 3; 5 – за HCM відповідно при  $X_i = 0,65; 0,9; 1,0$ ; 2; 4; 6 – за HBS відповідно при  $X_i = 0,65; 0,9; 1,0$ ;

черги збігаються при інтенсивності 350 – 500 авто/год. у випадку  $X_i = 0,65$ , і приблизно при 550 авто/год. за інших двох ступенів насичення. Ці розбіжності, в основному, пояснюються тим, що в обох формулах випадковість прибуття автомобілів до перехрестя враховується за допомогою емпіричних коефіцієнтів, які отримані із заздалегідь заданих статистичних характеристик.

У зв'язку з цим виникає необхідність у дослідженні цього показника і розробленні методики розрахунку максимальної довжини черги, результати якої відповідали б (були адекватними) її значенням у реальних умовах. При цьому важливо, щоб із її використанням можна було б визначати на скільки максимально збільшується в довжину черга транспортних засобів у плані підходу впродовж усього циклу. Оскільки саме ці значення черги у метрах визначають оптимальну довжину спеціальної смуги на підході до перехрестя.

**Мета статті.** Розробити імітаційну модель для розрахунку максимальної довжини черги транспортних засобів на ізолюваному регульованому перехресті.

**Виклад основного матеріалу.** Для розробки цієї методики доцільно використовувати методи імітаційного моделювання, які є поєднанням аналітичного розрахунку та натурального експерименту [6]. Найскладнішим етапом імітаційного моделювання є створення моделі. Із складністю досліджуваного процесу зростають масштаби самої моделі. Тому при її розробці постановку завдання обмежимо лише визначенням максимальної довжини черги, що утворюється на початку дозволеного сигналу та за весь цикл (в автомобілях і метрах).

Імітаційна модель підходу(-ів) до ізолюваного перехрестя написана мовою програмування **Objective-C** у програмному середовищі **Xcode** (може використовуватися навіть на мобільних телефонах бренду iPhone).

Модель реалізована у такий спосіб, що при використанні, користувач може легко змінювати вхідні дані, зокрема збільшувати кількість підходів до перехрестя ( $\leq 4$ ) і вибирати потрібну кількість смуг руху на кожному з них ( $\leq 3$ ), включаючи схему проїзду.

Вхідні дані у моделі можна поділити за такими категоріями:

- 1) тривалість періоду розрахунку, кількість імітацій;
- 2) кількість підходів до перехрестя та кількість смуг на кожному з них (схема проїзду);

- 3) геометричні параметри підходу (ширина смуги руху, поздовжній ухил, радіус заокруглень для повороту праворуч і ліворуч);
- 4) параметри керування (тривалість циклу, дозволеного та жовтого сигналів);
- 5) умови руху (інтенсивність руху за період розрахунку, частка, що повертає праворуч, ліворуч та рухається прямо; частка по смугах; склад потоку (легкові, вантажні, автобуси) та розподіл їх за напрямками; наявність та інтенсивність пішохідного руху; закон розподілу часових інтервалів між автомобілями, що прибувають до перехрестя);
- 6) довжина у метрах динамічного габариту автомобіля в черзі при зупинці (легковий, вантажний, автобус), стартова затримка.

На рис. 2 наведено блок-схему алгоритму моделювання одного підходу до ізольованого перехрестя, яка обмежується однією смугою руху. При збільшенні кількості смуг – алгоритм збільшується на відповідну кількість етапів моделювання, які виконуються паралельно, а при розгляді більше одного підходу, алгоритм, від підходу до підходу, послідовно змінюється в залежності від вхідних параметрів.

Весь алгоритм моделювання можна поділити на два етапи. На першому етапі визначається середній інтервал між автомобілями, що проїжджають перехрестя та момент прибуття першого автомобіля на його підході (поява наступного визначається на другому етапі відразу після прибуття першого).

Середній інтервал між транспортними засобами при роз'їзді черги, визначається з потоку насичення, який є його оберненою величиною. Потік насичення розраховується за формулою [5]:

$$M_H = M_0 \cdot f_{SV} \cdot f_B \cdot f_R \cdot f_S \cdot f_F \cdot f_L \cdot f_{RT}, \quad (6)$$

де  $M_0$  – ідеальний потік насичення (у моделі може змінюватися від 1800 до 2000 авто/год.);  $f_{SV}$ ,  $f_B$ ,  $f_R$ ,  $f_S$  – коефіцієнти, що враховують відповідно частку вантажного транспорту, ширину смуги руху, радіус повороту, поздовжній ухил, пішохідний рух;  $f_L$ ,  $f_{RT}$  – коефіцієнти, що враховують поворот ліворуч і праворуч.

На другому етапі моделюється процес функціонування одного підходу впродовж періоду розрахунку (дослідження), що визначається користувачем (найчастіше задають одну годину).

Для цього період моделювання розбивається на мінімальні інтервали  $\Delta t$ , [7] який у моделі може набувати таких значень: 1,0 с; 0,1 с; 0,01 с; 0,001 с. Цей етап, також включає, визначення зміни світлофорних сигналів, моментів появи автомобілів на підході, визначення напрямку руху і тип транспортного засобу, проїзд перехрестя або формування черги, роз'їзд черги та визначення максимальної довжини черги (в автомобілях і метрах).

Визначення напрямку руху і типу транспортного засобу здійснюється випадково з використанням функції (arc4random), що розподіляє їх рівномірно відповідно до вхідних значень.

Роз'їзд черги у моделі виконується після завершення забороненого сигналу та стартової затримки, величина якої змінюється в залежності від типу першого автомобіля. Вплив пішохідного руху на транспортний потік, що при роз'їзді повертає праворуч чи ліворуч в одній фазі, виражається через відповідний коефіцієнт потоку насичення.

Максимальна кількість у черзі визначається в момент завершення стартової

затримки, що виникає на початку дозволеного сигналу (черга на початку дозволеного сигналу) та в момент рушання останнього автомобіля з черги, що утворилася на початку дозволеного сигналу або в момент завершення дозволеного сигналу (черга за цикл).

Результати, які видає модель є усереднена максимальна довжина черги (в автомобілях і метрах) на початку дозволеного сигналу та вкінці циклу за  $k$  імітацій, а також максимальні їх значення.

Другий етап алгоритму починається з забороненого сигналу та повної відсутності транспортних засобів у черзі, хоча в реальних умовах вони можуть мати місце, зокрема у насичених умовах руху на підході. Тому для усунення цього

недоліку, у вхідних параметрах моделі створена відповідна вкладка, при активації якої початок основного періоду моделювання розпочинається зі значенням черги, що визначається за період «розгону» моделі, який триває 15 хв., перед основним періодом. Значення черги вказуються ті, які залишилися після завершення дозволеного сигналу останнього циклу періоду «розгону». В результаті, це дає змогу врахувати ті автомобілі, які можуть появиться у черзі на початку першого циклу основного періоду.

Основною складовою обох етапів моделювання є прибуття автомобілів до перехрестя, які виражаються у моделі через часові інтервали між автомобілями. Для їх моделювання, приймається, що часові інтервали між автомобілями є випадковою величиною  $X$ , яка підпорядковується ймовірнісним законам розподілу. У моделі часові інтервали розподіляються за складеним законом Гіпер-Ерланга [6, 8] та неперервним логнормальним законом [9, 10].

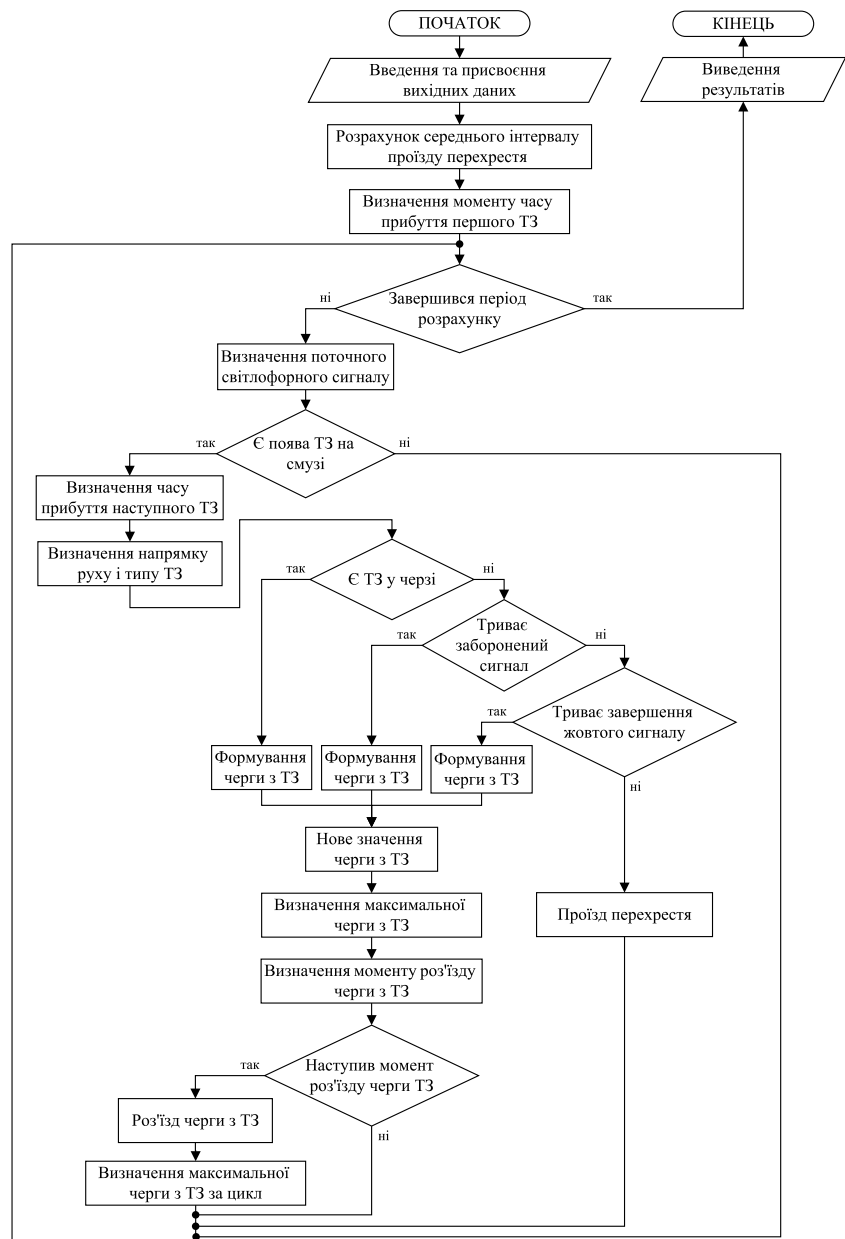


Рис. 2 – Блок-схема алгоритму моделювання одного підходу до регульованого перехрестя

Розподіл Гіпер-Ерланга є лінійною комбінацією зміщеного експоненційного розподілу та розподілу Ерланга. Відповідно до цього розподілу транспортний потік розділяють на дві групи – автомобілі, що вільно прибувають до перехрестя та автомобілі зі зв'язаним рухом [6, 8]. Щільність розподілу інтервалів між автомобілями задається виразом:

$$f(x) = \beta \cdot \lambda_1 e^{-\lambda_1(x-\tau)} + (1-\beta) \cdot \frac{\lambda_2^a}{(a-1)!} x^{a-1} \cdot e^{-\lambda_2 x}, x \in (0; +\infty) \quad (7)$$

де  $a, \lambda_1, \lambda_2$  – параметри закону розподілу;  $a > 0, a \in \mathbb{Z}; \lambda_1 > 0; \lambda_2 > 0; \lambda_1 = \frac{1}{\bar{x}}; \lambda_2 = \frac{a}{\bar{x}}$ ;  $\bar{x}$  – середній часовий інтервал між автомобілями;  $\tau$  – мінімальний інтервал між автомобілями (згідно [8] лежить у межах 0,5-1,5 с.);  $\beta$  – частка автомобілів, що вільно прибуває до підходу перехрестя.

Застосування цього розподілу вимагає визначення величини  $\beta$ , тобто частки автомобілів, що при русі не впливають один на одного і вільно прибувають до перехрестя. У [10, 11] вважається, що до них відносяться автомобілі, часовий інтервал між якими є більше 8 с.

З врахуванням цього було проведено модельний експеримент, в ході якого генерувалися випадкові часові інтервали між автомобілями, що прибувають до перехрестя за розподілом Ерланга, зі щільністю:

$$f(x) = \frac{\lambda_2^a}{(a-1)!} x^{a-1} \cdot e^{-\lambda_2 x}, x \in (0; +\infty) \quad (8)$$

При цьому розглядався діапазон інтенсивності від 50 до 1000 авто./год. (з інтервалом 50 авто./год.) при параметрах розподілу  $a=2; a=3; a=4$ . Для кожного значення інтенсивності та параметру проводилось по 1000 імітацій, фіксувалося кількість автомобілів, інтервал яких становив більше 8 с. (перед автомобілем та після нього), а також визначалася їх усереднена частка в залежності від годинної інтенсивності руху.

На основі цих результатів проведено регресійний аналіз, внаслідок чого отримано експоненційну залежність між  $\beta$  часткою автомобілів, що вільно прибувають та інтенсивністю руху. При параметрі розподілу  $a=2$  спостерігається найтісніший зв'язок між двома змінними (рис. 3), про що також свідчить високе значення коефіцієнта кореляції (0,9951). Рівняння регресії, що описує цю залежність закладено у модель і має такий вигляд:

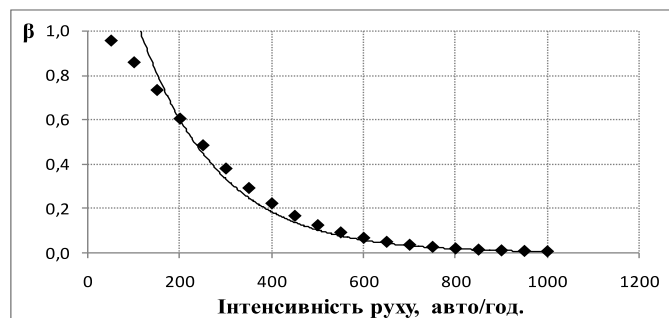


Рис. 3 – Залежність частки автомобілів, що прибувають вільно від інтенсивністю руху

$$\beta = 1,961 \cdot e^{-0,006 \cdot N}, \quad (9)$$

де  $N$  – інтенсивність руху, авто/год.

Щільність логнормального закону розподілу, задається такою формулою:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad x \in (0; +\infty), \quad (10)$$

де  $\mu, \sigma^2$  – математичне сподівання та дисперсія;  $\mu \in \mathbb{R}, \sigma > 0; \mu = \bar{x}$



Для визначення середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  використовується формула [12] (правило «чотирьох сигм»):

$$P\{X > \alpha\} = 0.5 - \Phi\left(\frac{\alpha - \mu}{\sigma}\right), \quad (11)$$

де  $\alpha$  – мінімальний інтервал між автомобілями,  $\sigma$ ;  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz$  – функція Лапласа;  $P\{X > \alpha\} \approx 0.999968$  (приймається, що з такою ймовірністю випадкова величина  $X$  попадає на проміжок  $(0.5; +\infty)$ ).

Для генерування у моделі випадних часових інтервалів за цими розподілами, неперервна випадкова величина  $Y$ , що розподілена з постійною щільністю на інтервалі  $(0;1)$ , піддається функціональному перетворенню  $X = \varphi(Y)$  [12]. Відповідно до цього, значення інтервалів  $x$  випадкової величини  $X$  визначаються через обернену функцію  $F^{-1}(y)$  по відношенню до  $F(x)$  за формулою:

$$x = F^{-1}(y) \quad (12)$$

де  $F^{-1}(y)$  – обернена функція до функції розподілу  $F(x)$

Обернена функція для розподілу Гіпер-Ерланга визначається на основі того, що закон Ерланга  $k$ -го порядку це сума незалежних випадкових величин, кожна з яких розподілена за показниковим законом [12]. Перетворюючи за формулою (12) функцію експоненційного розподілу та їх суму, отримуємо:

$$\begin{cases} x_i = -\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln(1 - y_i) + \tau & y_i \in (0;1) \\ x_i = -\frac{1}{\lambda_2} \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(1 - y_i)), & y_i \in (0;1) \end{cases} \quad (13)$$

Для визначення функції логнормального розподілу використовується не загальновідома у теорії ймовірності функція Лапласа, а функція помилок

$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ , що є вбудованою у таких мовах програмування як C++ та

Objective-C. З її використанням функція розподілу набуде такого виду:

$$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} erf\left[\frac{\ln x - \mu}{\sqrt{2\sigma^2}}\right] \quad (14)$$

На основі (12) формула (14) після простих перетворень матиме такий вигляд:

$$x_i = e^{(\mu + \sqrt{2\sigma^2} \cdot erf^{-1}(2y_i - 1))} \quad y_i \in (0;1) \quad (15)$$

Якщо у формулі (15) використовувати значення  $\sigma$ , що отримані із формули (11), то загальна кількість автомобілів, що генерується за логнормальним розподілом не збігається (не є тотожною) із кількістю, яка задається у вхідних даних (зі зменшенням інтенсивності між ними спостерігається значна розбіжність). Тому, для усунення цього недоліку (чого не спостерігається при розподілі Гіпер-Ерланга), було проведено статистичне моделювання, за яким встановлено залежності між параметрами розподілу ( $\mu$ ,  $\sigma$ ) і годинною інтенсивністю руху, що задається в моделі у вхідних параметрах (табл. 1).

Таблиця. 1 – Залежності між параметри логнормального розподілу та інтенсивністю руху

Інтенсивність руху	Математичне сподівання		Середньоквадратичне відхилення	
	Рівняння регресії	Коефіцієнт кореляції	Рівняння регресії	Коефіцієнт кореляції
$\leq 600$	$\mu=14,85 \cdot e^{-0,002 \cdot N}$	0,9801	$\sigma=3,0338 \cdot e^{-0,002 \cdot N}$	0,9970
$\leq 850$			$\sigma=1,9986 \cdot e^{-0,001 \cdot N}$	0,9690

**Перевірка адекватності моделі та аналіз її результатів.** Для перевірки результатів за розробленою моделлю, інтерфейс якої наведено на рис. 4,

розглядається той же діапазон

інтенсивності руху (від 300 до 800),

умови руху та дорожні умови, що й при аналізі формул (2) та (5). При цьому для порівняння результатів з тими, що відповідають їм у



Рис. 4 – Інтерфейс моделі для розрахунку максимальної довжини черги транспортних засобів

реальних умовах, додатково, значення максимальна довжина черги, визначаються у програмному середовищі VISSIM, які приймаються за еталонні (VISSIM адекватно відтворює реальні умови). Щоб усереднити результати у VISSIM проведено 10 імітацій і з отриманих значень у метрах визначається черга в автомобілях (відношення довжини черги у метрах до середньої довжини динамічного габариту транспортного засобу при зупинці у черзі).

Результати усередненої максимальної довжини черги на початку дозволеного сигналу за 1000 імітацій, що отримані з моделі в Objective-C при ступенях насичення 0,65, 0,9 і 1,0 наведено на рис. 5 – 7. Поряд з цим наведено значення, що отримані з формул (2) і (5), або за HCM та HBS, а також за VISSIM.З наведених результатів видно, що значення, які отримані з VISSIM є дуже близькими до тих, що визначаються за HBS, при чому на всій довжині діапазону інтенсивності, що розглядається, збігається динаміка їх кривих (не спостерігається перетинів та значних розбіжностей). Але у всіх випадках значення за HBS є меншими за ті, що отримані з VISSIM. Це пояснюється тим, що у середовищі VISSIM чергу формують також ті автомобілі, швидкість яких є меншою за 5 км./год. при підході до перехрестя.

З огляду на ці результати можна стверджувати, що значення максимальної довжини черги за HBS відповідають реальним даним набагато більше ніж за HCM. Тоді, при ступені насичення 0,65 найбільше, зі значеннями за HBS збігаються результати моделювання за логнормальним розподілом (рис. 5), а при ступені насичення 0,9 і 1,0 – за розподілом Гіпер-Ерланга з параметром  $a = 3$  (рис. 6 і 7).

При ступені насичення 0,9 і 1,0 результати за логнормальним розподілом суттєво відрізняються від тих, що відповідають їм у реальних умовах. Зумовлено це тим, що в процесі моделювання за цим розподілом збільшуються коливання значень загальної кількості автомобілів, які прибувають за період, хоча усереднена кількість



за  $k$  імітацій є близькою до значень, що задаються на вході. При моделюванні за розподілом Гіпер-Ерланга такого не спостерігається.

Зважаючи на відмінність у ефективності використання законів розподілу доцільно у моделі, в частині вибору розподілу інтервалів між автомобілями що прибувають, створити додаткову вкладку (режим «автоматично»), налаштування якої дозволяти б визначати максимальну довжину черги при різних ступенях насичення на підході. Порівнюючи результати максимальної довжини черги, що видає модель з даними за НBS при різних ступенях насичення, було встановлено межі застосування законів розподілу, які наведено у табл. 2.

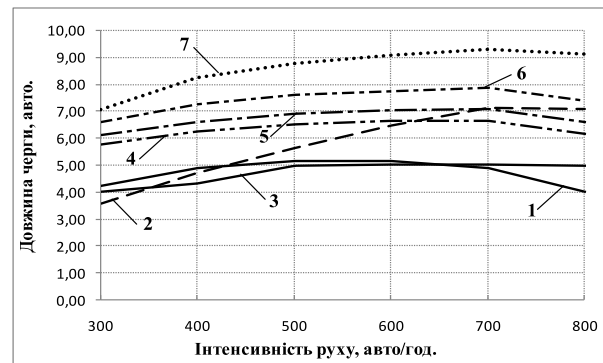


Рис. 5 – Максимальна довжина черги при ступені насичення  $X_i = 0,65$ : 1 – за НBS; 2 – за HCM; 3 – за логнормальним розподілом; 4, 5, 6 – за розподілом Гіпер-Ерланга відповідно з параметрами  $a = 2, a = 3, a = 4$ ; 7 – за VISSIM

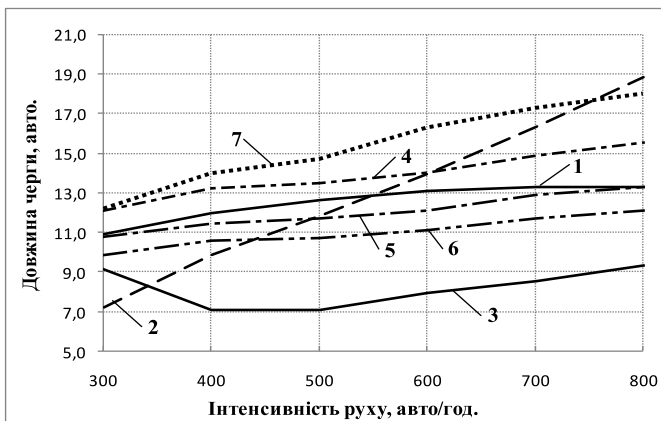


Рис. 6 – Максимальна довжина черги при ступені насичення  $X_i = 0,9$ : 1 – за НBS; 2 – за HCM; 3 – за логнормальним розподілом; 4, 5, 6 – за розподілом Гіпер-Ерланга відповідно з параметрами  $a = 2, a = 3, a = 4$ ; 7 – за VISSIM

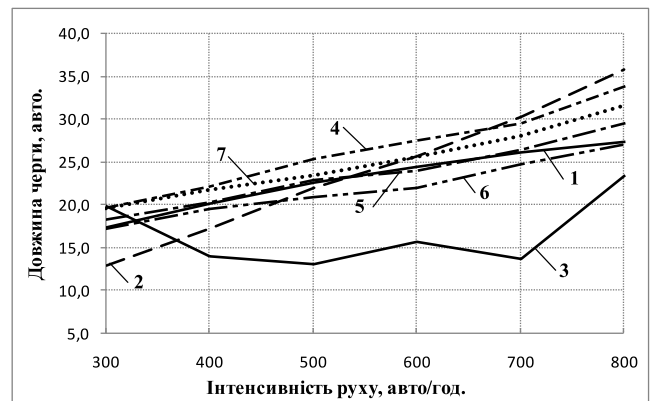


Рис. 7 – Максимальна довжина черги при ступені насичення  $X_i = 1,0$ : 1 – за НBS; 2 – за HCM; 3 – за логнормальним розподілом; 4, 5, 6 – за розподілом Гіпер-Ерланга відповідно з параметрами  $a = 2, a = 3, a = 4$ ; 7 – за VISSIM

Таблиця 2 – Межі застосування у моделі законів розподілу в залежності від ступеня насичення

Ступінь насичення	Закон розподілу
$\leq 0,65$	Логнормальний
$\leq 0,85$	Гіпер-Ерланга з параметром $a = 2$
$\leq 1,0$	Гіпер-Ерланга з параметром $a = 3$
$> 1,0$	Гіпер-Ерланга з параметром $a = 3$

Для визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до перехрестя необхідно використовувати значення максимальної довжини черги, що

утворюється за весь цикл [1]. Черга за «цикл» це черга, що утворюється на початку дозволеного сигналу та кількість автомобілів, яка прибуває до перехрестя впродовж її роз'їзду. Завершення відрізка часу, за який у моделі здійснюється підрахунок автомобілів, що прибувають до підходу впродовж дозволеного сигналу, є момент рушання останнього автомобіля з черги, що сформувалась на початку дозволеного сигналу (визначається як добуток  $(n-1)$ -ї кількості автомобілів у черзі на початку дозволеного сигналу та середнього інтервалу проїзду стоп-лінії).

У табл. 3 наведено усереднені значення максимальної довжини черги, що утворюються на початку дозволеного сигналу та за весь цикл при ступенях насичення 0,65, 0,9, 1,0 з врахуванням результатів, що наведені у табл.2.

Таблиця 3 – Залежність між інтенсивністю руху та максимальною довжиною черги на початку дозволеного сигналу і за цикл при різних ступенях насичення

Інтенсивність руху	Тривалість зеленого сигналу	Довжина черги за моделлю в Objective-C, авто.					
		логнормальний розподіл		розподіл Гіпер-Ерланга			
		ступінь насичення					
		0,65		0,9		1,0	
		на поч. зеленого	за цикл	на поч. зеленого	за цикл	на поч. зеленого	за цикл
300	10	4,00	5,00	10,82	11,79	18,20	20,64
400	14	4,30	6,19	11,48	13,30	20,17	23,32
500	18	4,98	6,97	11,71	14,60	22,78	27,66
600	22	5,00	7,94	12,13	16,33	23,82	29,76
700	26	5,00	8,71	12,89	18,59	26,41	33,46
800	30	4,99	9,24	13,30	20,84	29,42	39,22

Як видно з таблиці розбіжність між значеннями зростає із збільшенням на підході інтенсивності прибуття, ступеня насичення і тривалості дозволеного сигналу. При  $X_i = 0,65$  різниця між ними складає від 1 до 4 автомобілів, а при  $X_i = 1,0$  – від 2 до 10. Для останніх умов руху зростання розбіжності між значеннями пояснюється тим, що при них, спостерігаються цикли за, які черга не повністю роз'їжджається за дозволений сигнал. В наслідок чого, до черги, яка утворилася на початку дозволеного сигналу, додаються автомобілі, що прибувають впродовж повної тривалості дозволеного сигналу.

Важливо відзначити, що при ступені насичення 0,9 і 1,0 значення черги за «цикл» є близькими до тих, що отримані з VISSIM. Пояснюється це тим, що максимальна черга у VISSIM визначається у метрах і фіксується в момент максимального видовження черги з транспортних засобів у плані підходу, що відповідає алгоритму формування черги за «цикл» у моделі.

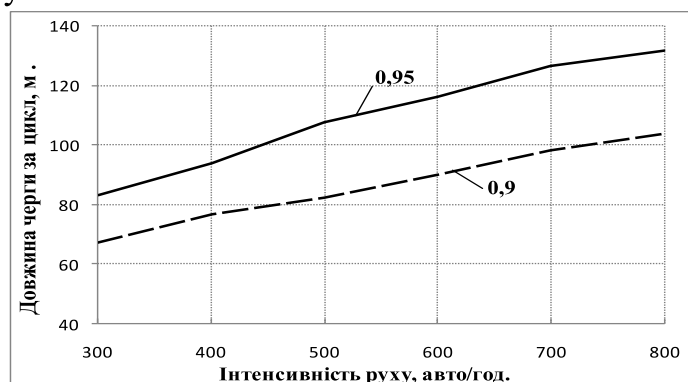


Рис. 8 – Максимальна довжина черги автомобілів у метрах, що утворюється впродовж циклу (цифри на кривих – ступінь насичення)

Враховуючи вищенаведене, з використанням моделі визначається максимальна довжина черги у метрах для однорідного складу потоку при довжині автомобіля 6 м та ступенях насичення  $X_i = 0,9$  та  $X_i = 0,95$ . Останній відповідає верхній межі нормальних умов руху на підході до перехрестя [13] (рис. 8). Інші вхідні параметри є аналогічними як і при аналізі формул (2) та (5).

Наведені результати показують, що діапазон довжина спеціальної смуги на підході до перехрестя може коливатися від 59 м до 135 м.

**Область застосування результатів дослідження.** Розроблена імітаційна модель, яка написана мовою програмування Objective-C, базується на моделі прибуття автомобілів до перехрестя, очікування у черзі та її роз'їзду впродовж дії дозволеного сигналу. Модель видає значення максимальної довжини черги транспортних засобів, що утворюється на початку дозволеного сигналу та впродовж циклу. Черга на початку дозволеного сигналу може використовуватися для оцінки ефективності керування світлофорною сигналізацією, а черга за «цикл» – для визначення довжини додаткового поширення на підході до перехрестя, яке застосовується з метою підвищення пропускної здатності перехрестя або для забезпечення просторово-часового пріоритету автобусам (метод «спеціальна смуга в зоні перехрестя»).

Відрізок часу, за який модель видає результати залежить від мінімального інтервалу  $\Delta t$  (кроку моделювання), що обирається при введенні вхідних параметрів. При значеннях  $\Delta t = 1,0$  с;  $0,1$  с;  $0,01$  с;  $0,001$  с. та максимальній кількості імітацій (1000) розрахунок відповідно триває – 4,7 с; 23,9 с; 219,2 с. та понад 20 хв. Точність результатів після  $0,1$  с практично не підвищується, тому, з точки зору економії часу, в нормальних (не перенасичених) умовах руху на підході, зокрема при ступені насичення  $\leq 0,65$  доцільно використовувати  $\Delta t = 1,0$  с, а для насичених і перенасичених –  $\Delta t = 0,1$  с.

### **Висновки:**

1) Значення максимальної довжини черги за моделлю в Objective-C, є близькими до тих, що видає спеціалізоване програмне забезпечення VISSIM, тобто – адекватні реальним даним;

2) Основною складовою імітаційної моделі є часові інтервали між автомобілями, що прибувають до перехрестя, які найкраще відповідають реальному процесу, якщо розподіляються за законом Гіпер-Ерланга з параметром  $a = 3$ ;

3) Імітаційна модель реалізована у таких спосіб, що користувачу легко змінювати умови дослідження через зміну вхідних параметрів і може запускатися як на ПК, так і на переносних пристроях (мобільний телефон, планшет). Модель можна завантажити за таким посиланням: <https://itunes.apple.com/us/app/trafficqueue/id694798189?ls=1&mt=8>;

4) Модель може використовуватися інженерами як на стадії проектування світлофорної сигналізації на перехресті, так і для оцінки його роботи за показником максимальна довжина черги.

5) В моделі наявні такі спрощення: автомобілі, які прибувають до перехрестя зупиняються та розганяються миттєво; розподіл складу потоку і рух у певному напрямку виконується за рівномірним розподілом, що не завжди відповідає реальним умовам.

**Список літератури:** 1. Вікович, І. А. Розробка методу забезпечення пріоритету маршрутним автобусам на регульованих перехрестях [Текст] / І. А. Вікович, Р. М. Зубачик // Східно-Європейський журнал передових технологій. Науковий журнал. – Харків: Технологічний центр, 2013. – № 5/3 (65). – С. 27 – 33. 2. Bus rapid transit / Planning guide [Текст] / New York.: 3ed edition – June, 2007. 3. Рэнкин, В. У. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения. [Текст] / В.У. Рэнкин, П. Клафи, С. И. Халберт др. – М.: Транспорт, 1981. – 592 с. 4. Highway Capacity Manual. [Текст] / TRB, Washington, DC, 2000. – 1134 p. 5. Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. / Bundesanstalt für Straßenwesen. Oktober 2001. – 370. 6. Иносэ, Х. Управление дорожным движением. / [Текст] Под ред. М.Я. Блинкина: Пер. с англ. / Х. Иносэ, Т. Хамада – М.: Транспорт, 1983. – 248 с. 7. Гаврилов, А. А. Моделирование дорожного движения [Текст] / А. А. Гаврилов – М.: Транспорт, 1980. – 190 с. 8. Поліщук, В. П. Теорія транспортного потоку: методи та моделі організації дорожнього руху. [Текст] / В. П. Поліщук, О.П. Дзюба. – К.: Знання України, 2008, – 175 с. 9. Дрю, Д. Теория транспортных потоков и управление ими [Текст] / Д. Дрю. – М.: Транспорт, 1976. – 424 с. 10. Сильянов, В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации дорожного движения. [Текст] / В.В. Сильянов – М.: Транспорт, 1977. – 303 с. 11. Лобанов, Е. М. Транспортная планировка городов [Текст] / Е. М. Лобанов – М.: Транспорт, 1990. – 240 с. 12. Венцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст] / Е.С. Венцель, Л. А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – М.: Висш. шк., 2000. – 480 с. 13. Scnabel, W. Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung [Текст] / W. Scnabel. Band 1: Straßenverkehrstechnik, 2. Auflage, Berlin, Verlag fur Beuwesen GmbH, 1997.

Надійшла до редколегії 15.11.2013

УДК 519.876.5; 656.051

**Разработка имитационной модели для определения максимальной длины очереди транспортных средств / Викович І. А., Зубачик Р. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. - № 70 (1043). – С.48-59 . – Бібліогр.: 13 назв.**

Предложенная имитационная модель для определения максимальной длины очереди автомобилей на изолированном регулируемом перекрестке, написанная на языке программирования Objective - C (модель запускается также на мобильных телефонах). В статье рассматривается процесс создания модели, проверяется ее адекватность, а также сравниваются результаты, с другими методиками. В зависимости от степени насыщения на подходе определены границы применения законов распределения (логнормального и Гипер-Эрланга), по которым в модели распределяются моменты появления автомобилей на подходе к перекрестку.

**Ключевые слова:** имитационная модель, максимальная длина очереди транспортных средств, регулируемый перекресток, специальная полоса.

Simulation model for determination of the maximum length of queued vehicles on an isolated intersection has proposed. This model is written in Objective-C (the model can be running on the iPhone). This article describes the process of creating model, checks its adequacy and the results are compared with other methods. Also the limits of usage of distribution laws (log-normal and Hyper-Erlang) are determined in accordance with the saturation flow ratio on the intersection due to which intervals between the vehicles at the intersection are distributed in the model.

**Keywords:** simulation model, maximum length of queued vehicles, intersection, special bus lane.

УДК 681.326

**И. В. ФИЛИППЕНКО**, канд. техн. наук, доц., ХНУРС, Харьков

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Рассматриваются особенности моделирования системы радиочастотной идентификации с использованием широкополосной технологии.

**Ключевые слова:** идентификация, широкополосная технология.

© И. В. ФИЛИППЕНКО, 2013