

УДК. 656.13 (045)

**Степанчук О.В.**<sup>15</sup>, к.т.н., доц.

*olst@i.ua, ORCID 0000-0002-2822-3471,*

**Белятинський А.О.**, д.т.н., проф.

*beljatynskij@ukr.net, ORCID 0000-0002-2158-512,*

**Кардаш О.В.**, д.т.н., проф.

*kardash.o.v@ukr.net*

*Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна*

## **МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ТА РОЗПОДІЛЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА ВУЛИЧНО-ДОРОЖНІЙ МЕРЕЖІ МІСТА**

*Розглянуті та проаналізовані ефективні методи системно-оптимального управління транспортними потоками. Визначені принципи та пріоритетні напрямки щодо вибору оптимального методу розподілення та щодо вибору маршруту руху транспортними засобами в умовах інтенсивного завантаження вулично-дорожньої мережі міста.*

*Ключові слова: вулично-дорожня мережа, транспортний потік, інтенсивність руху, пропускна спроможність, оптимальне розподілення, принципи Вардрона.*

**Вступ.** Останнім часом транспортні потоки перейшли до нового стану – транспортної конгестії, коли локальне погіршення умов руху транспорту розповсюджується швидко по мережі і різко змінює умови руху на ній. На вулично-дорожній мережі (ВДМ) крупних і найкрупніших міст транспортний потік має дуже високу чутливість до випадкових, відносно невеликих змін обставин, що виникли на проїзній частині вулиці.

Однією з проблем у погіршенні умов руху транспортних засобів у відповідній ситуації є невизначеність водія, тому що природа транспортних потоків значною мірою обумовлена саме діями водія. Зміна маршруту руху водієм здійснюється тільки в тому випадку, якщо новий маршрут характеризується меншими матеріальними витратами і втратами часу. Невідповідна організація

---

<sup>15</sup> © Степанчук О.В., Белятинський А.О., Кардаш О.В.

руху транспортних потоків на вулично-дорожній мережі, в тому числі і транзитних, призводить до перевантаження окремих магістральних вулиць або їхніх окремих ділянок. Вирішення цієї проблеми вимагає оптимального завантаження магістральних вулиць у залежності від дорожніх умов і характеристик транспортних потоків, що рухаються по ній. Саме такий підхід і базується на створенні умов та забезпеченні заходів і прийомів раціонального розподілу транспортних потоків по ВДМ міста.

На даний час існує два способи розподілення транспортних потоків по ВДМ. Перший спосіб – це розподілення потоків, які формуються при самостійному виборі маршруту водієм, з урахуванням ним мінімальних витрат. Другий спосіб розподілу полягає в тому, що сумарні затримки в мережі теж повинні бути мінімальними.

**Мета роботи.** Покращення умов руху транспортних засобів на ВДМ крупних і найкрупніших міст шляхом моделювання оптимального розподілу завантаження магістральних вулиць, з урахуванням дорожніх умов і характеристик транспортних потоків, які рухаються по вуличній мережі.

**Основна частина.** Проводячи аналіз оцінки максимального об'єму завантаження певної ділянки ВДМ, необхідно встановити правила, за якими водій вибрав саме даний маршрут і наскільки він є доцільним у порівнянні з іншими маршрутами в даній ситуації.

Необхідно зазначити, що розподіл транспортних потоків по ВДМ базується на тому, що зміна маршруту руху водієм здійснюється тільки в тому випадку, якщо новий маршрут характеризується меншими втратами, є сформульовані умови рівноваги і стаціонарності розподілу та визначені умови, які гарантують існування стійкої рівноваги стану розподілу транспортних потоків по вулично-дорожній мережі.

Розподіл, який забезпечує меншу сумарну затримку на ВДМ, полягає в системно-оптимальному управлінні згідно другого принципу Вардропа [1]. Дослідженням щодо впровадження системно-оптимального управління транспортними потоками

присвячено багато робіт. Основними перешкодами для впровадження цього принципу управління є те, що оптимальний маршрут, який пропонується системою управління, може не співпадати з уявою водія про найкоротший маршрут. Відповідно, деякі з них не будуть їхати по рекомендованому маршруту руху, і це знижує ефект такого розподілу.

Тобто, перший принцип полягає в тому, що кожний водій прагне досягнути кінцевого пункту своєї поїздки якнайшвидше, і з можливою кількістю варіантів вибрати той, який має самі менші витрати. Тому даний принцип називають оптимізацією користувача. Такий підхід до визначення маршруту руху вибирають водії саме індивідуального легкового транспорту. На відміну від першого другий принцип Вардропа передбачає централізоване управління рухом на мережі. Відповідне розподілення транспортних потоків називається системним оптимумом. Такий розподіл на даний час більше відноситься до громадського пасажирського транспорту. Впровадження підходу системного оптимуму для всього транспортного потоку при складних умовах руху на певних ділянках вуличної мережі дозволить забезпечити рівномірне завантаження можливих маршрутів, тим самим мінімізувати середню вартість витрат для усіх ТЗ, які переміщуються між відповідними пунктами.

Конкурентна транспортна рівновага відповідає першому принципу Вардропа, а системний оптимум відповідає другому принципу. Різниця між цими двома типами розподілення отримала назву «ціна анархії». Точніше, ціна відсутності централізованого контролю над розподілом потоку. Але треба зазначити, що і в першому і в другому випадку основна складність при чисельних розрахунках полягає у великій різноманітності задач, що вирішуються на реальних транспортних мережах.

Виходячи з розглянутих принципів, математична модель транспортних потоків буде виглядати наступним чином. Для цього міську вуличну мережу розглянемо у вигляді орієнтованого графу (рис.1) [2]  $G = G(V, E)$ , де  $V$  – множина вершин,  $E$  – множина дуг мережі, кожна дуга відповідає реальній ділянці вулиці без

перехрестя, а кожна вершина являє собою вузол, який розподіляє ділянки вулиць. Напрямок дуги визначає напрямок слідування ТЗ. Інформація про дозволені напрямки руху задається як функція на безлічі дуг графа. Кожній дузі графа  $G$  можуть бути задані числові характеристики, які характеризують ВДМ: число смуг, профіль дороги, якість покриття, освітленість проїзної частини, дані по структурі та динаміці транспортного потоку, метеорологічні умови і т. п.

Сформульовані умови дуже важливі для вирішення завдань управління, а саме: дві точки на площині можуть бути фізично досягнуті в будь-якому напрямку руху. Також для кожної дуги та вершини можна встановити показник транспортної залежності, який характеризує кількість ТЗ, що протягом певного періоду проїжджають через відповідний елемент. Відомо, що чим більше ТЗ використовують даний елемент ВДМ тим більше часу необхідно для проїзду по ньому.

При дослідженні потокоутворюючих факторів [3] пропонується вершини поділити на дві множини: перша  $A \subseteq V$ , що включає транспортні вузли, які породжують транспортні потоки, елементи множини  $S$ ; друга множина  $D \subseteq V$  – це транспортні вузли, в яких поглинаються потоки, елементи множини  $D$ .

Тоді, множину усіх потокоутворюючих пар подано у вигляді:

$$W = \{w = (i, j) : i \in A, j \in D\}, \quad (1)$$

Звідси, кожній парі  $w = (i, j) \in W$  відповідає свій попит на переміщення  $P_w$  об'єм переміщень, що повинна з вершини  $i$  прибути у вершину  $j$ . Тоді,  $\{P_w : w \in W\}$  матриця переміщень. Об'єм переміщень може виражатися у кількості ТЗ або пасажирів, а також як функція від витрат на переміщення по даній ділянці мережі, а саме  $P_w = \rho(u_w)$ , де  $u_w$  – транспортні затрати на проїзд для пари  $w$ , що суттєво залежить від завантаження мережі.

Шляхом маршруту в мережі  $G$ , який з'єднує вершини  $i$  та  $j$ , є послідовність дуг, наприклад,  $e_1 = (i \rightarrow k_1), e_2 = (k_1 \rightarrow k_2), e_l = (k_{l-1} \rightarrow k_l), e_{l+1} = (k_l \rightarrow j)$ , де

$e_t \in E$  при усіх  $t = 1 \dots \dots l + 1$ . Прийmemo, що  $P_w$  - кількість альтернативних маршрутів, для кожної пари  $w = (i, j) \in W$ , рухаючись якими можна із вершини  $i$  прийти у вершину  $j$ . Сукупність усіх шляхів у мережі  $G$  можна записати  $P = \bigcup_{w \in W} P_w$ .

Якщо  $x_p$  величина потоку, який рухається по шляху  $p \in P$ , тоді для кожної пари  $w$  потоки  $x_p, p \in P$  повинні належати множині [4]:

$$X_w = \{x_p \geq 0; p \in P_w, \sum_{p \in P_w} x_p = P_w\}, \quad (2)$$

Рух транспортного засобу кожним із шляхів  $p \in P$  супроводжується певними витратами (часу, пального, зношення ТЗ, зношення дорожнього покриття і т.п.). Кількісна характеристика даних витрат залежить від інтенсивності й щільності руху в мережі. Зазвичай, у відповідних моделях розглядаються часові та фінансові витрати. Звідси, якщо позначити, що  $G_p$  – питомі витрати користувачів на проїзд по шляху  $p$ , враховуючи те, що на витрати по одному маршруту може впливати транспортне завантаження інших шляхів на ВДМ, то у загальному випадку  $G_p$  являє собою функцію від завантаження усієї мережі  $G_p = G_p(x)$  [4].

Згідно першого принципу Вардропа, водії вибирають шлях з найменшими транспортним витратами, тому для кожної пари  $w$ , якщо на шляху  $p \in P_w$  спостерігається вільний режим руху транспортних потоків, то витрати на відповідному шляху мінімальні.

Тоді, якщо

$$x'_p > 0, \text{ то } G_p(x') = \min_{q \in P_w} G_q(x') = u_w(x'), \quad (3)$$

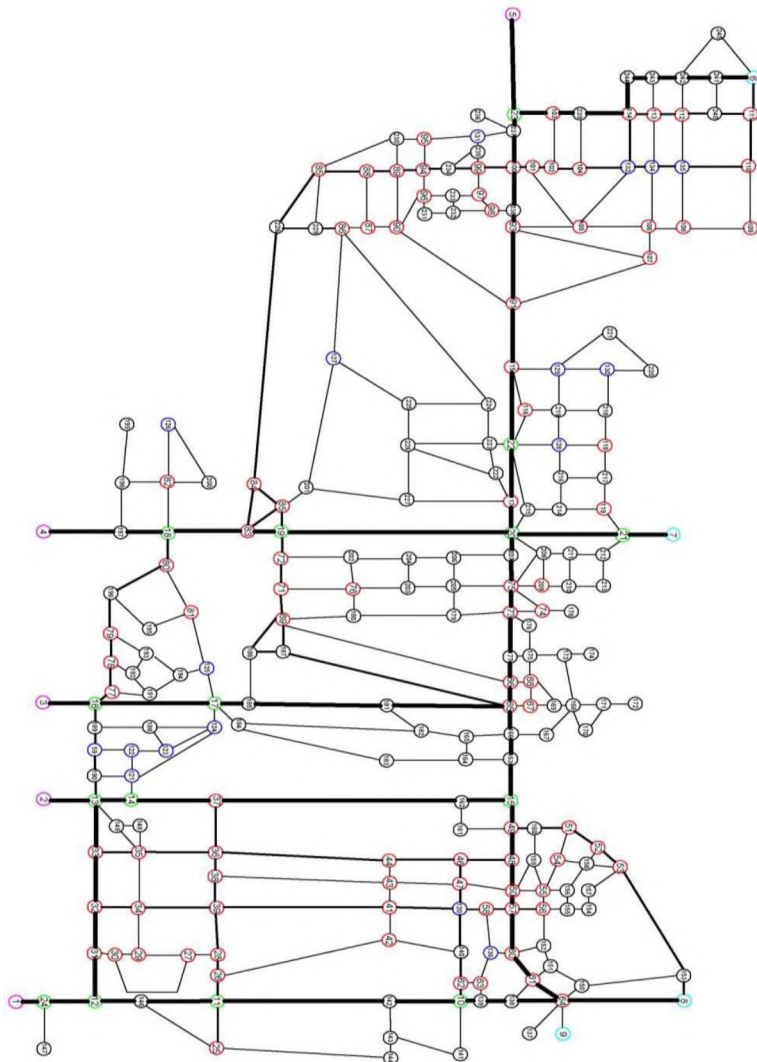
де  $u_w(x')$ -мінімальні транспортні витрати на маршруті, що поєднує пару  $w \in W$  при завантаженні та визначаються вектором  $x'$ .

Потік, який задовольняє принцип Вардропа, називається рівномірним. Проблема пошуку рівномірного розподілу потоків  $x'$  називається задачею транспортної (потокової) рівноваги.

Для дослідження та пошуку рівномірного розподілу потоків  $x'$  задачу транспортної рівноваги прийнято переформулювати у вигляді еквівалентної варіаційної нерівності [3].

$$G(x')(x - x') = \sum_{p \in P} G_p(x')(x_p - x'_p) \geq 0, \forall x \in X \quad (4)$$

Задача транспортної рівноваги буде мати вирішення, коли всі витрати  $G_p(x)$  будуть подані у вигляді неперервних функцій.



*Рис. 1. Граф ВДМ мережі лівобережної частини міста Києва*

Складність чисельного вирішення задачі транспортної рівноваги залежить від аналітичного прийняття функції транспортних витрат. Зрозуміло, що на транспортні витрати при русі від джерела до мети, в першу чергу, впливають витрати на перегонах і вузлах, які складають маршрут руху.

Якщо відомо розподілення потоку по шляху, при  $y_e$  – величині потоку на дузі  $e \in E$ , можна визначити завантаження кожної дуги за формулою [5]:

$$y_e = \sum_{p \in P} \delta_{pe} x_p \quad (5)$$

де  $\delta_{pe} = \begin{cases} 1 & \text{– якщо шлях проходить через дугу } e; \\ 0 & \text{– якщо шлях не проходить по дузі } e. \end{cases}$

Вираз (5) визначає  $\delta = (\delta_{pe} : e \in E, p \in P)$  – матрицю інцидентності дуг і шляху;  $y = (y_e : e \in E)$  – вектор, який описує завантаження дуг мережі. У матричній формі взаємозв'язок потоків по шляхах і дугах описується рівнянням:  $y = \delta x$

Питомі витрати на проходження дуги  $e$  включає вузол  $z$  – початок дуги ( $\tau_{ez}$ ). У загальному випадку значення  $\tau_{ez}$  залежить не тільки від величини потоку  $y_e$ , але й від потоку по інших дугах мережі. Тому правильно запропонувати, що  $\tau_{ez} = \tau_{ez}(y)$ .

Найрозповсюдженішою і найбільш простою пропозицією про властивості функції транспортних витрат є пропозиція про адитивну залежність функції транспортних витрат  $G(x)$  від  $\tau(y)$ , яка базується на тому, що транспортні витрати на проходження кожного шляху складаються тільки з витрат на проходження по дугах, які складають цей шлях [5]:

$$G_p(x) = \sum_{e \in E} \delta_{pe} \tau_e(y) = \sum_{e \in E} \delta_{pe} \tau_e^0 (1 + \mu \left( \frac{y_e}{h_p} \right)^\alpha) \quad (6)$$

де  $\mu$  та  $\alpha$  – деякі позитивні константи;

$h_p$  – пропускна спроможність проїзної частини вулиці або дороги.

Під транспортними витратами розуміється час, який витрачається на проходження тієї або іншої ділянки мережі.

Витрати на  $\tau_s^0(y)$  проходження дуги між двома суміжними вузлами мережі будуть дорівнювати:

$$\tau_s^0(y) = \frac{l(y)}{v(y)} \quad (7)$$

де  $l(y)$ -довжина дуги;

$v(y)$ -середня швидкість руху по дузі.

Прагнення науковців до більш адекватного моделювання транспортних потоків призвело до нових форм аналітичного опису витрат. У роботі [6] запропоновано функцію, яка характеризує фінансові витрати, на які впливають часові затримки:

$$G_p(x) = \Phi_p(\sum_{s \in E} \theta_{sp} t_s(y)) + \psi_p(x) + \eta \sum_{s \in E} \theta_{sp} \tau_s^0(y), p \in P, \quad (8)$$

де  $\Phi_p$  – функція, яка перетворює часові затримки на шляху  $p$  у фінансові витрати; втрат для пари  $w \in W$ ;

$\theta_{sp}$ -завантаженість дуги;

$t_s(y)$ -час, витрачений на проходження дуги  $e$ ;

$\psi_p$ - фінансові витрати, які характеризують маршрут  $p$  та можуть змінюватися в залежності від завантаження мережі;

$\eta > 0$ - експлуатаційні витрати на одиницю часу.

На даний час існує два основних підходи вирішення задачі транспортної рівноваги. У першому випадку задачу транспортної рівноваги моделюють тільки через поточкові змінні по дугах і, відповідно, пошук рівноваги здійснюється по дугах мережі (дуговий алгоритм). У другому випадку-основною змінною задачі є потік по шляху, тоді, відповідно, пошук рівноваги здійснюється за допустимими маршрутами (маршрутний алгоритм). Основна задача алгоритмів полягає у послідовному балансуванні потоків між альтернативними маршрутами, тому що перерозподіл одного потоку між маршрутами змінює транспортні витрати по усій мережі і тим самим впливає на розподіл інших кореспонденцій. Встановлення можливих напрямків руху транспортних засобів при розподіленні транспортних потоків по ВДМ міст є визначальним при виборі



оптимального маршруту руху, саме для транспорту, який здійснює транзитний рух відповідною вулицею.

Розглядаючи питання забезпечення ефективності функціонування ВДМ, необхідно розглянути залежність функції транспортних витрат від проходження окремих дуг та вершин, а також вибір оптимального маршруту при русі потоку по даній мережі. Як було відзначено вище, вулично-дорожня мережа має можливість забезпечити певну кількість маршрутів між її транспортними вузлами.

Тоді відмітимо, що від місця початку руху  $a_0$  до місця призначення  $a_n$  існує кінцева кількість маршрутів  $M_i(a_0, a_n)$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ , які задані перерахуванням вершин у порядку їхнього проходження вимогами потоку.

В якості критерія оптимізації прийнята наступна функція:

$$t(M_i(a_0, a_n)) = \sum_{\substack{j \in E_i \\ n \in A_i}} (t(v_n) + \mu(l_i)) \quad (9)$$

$t$  - час, який витрачається на проходження даного маршруту.

$t(v_n)$  – вага вузла (витрати), для потоку даного напрямку;

$t(l_i)$ -вага дуги  $l_i$  для потоку даного напрямку;

$E_i$ -кількість перегонів на маршруті  $M_i(a_0, a_n)$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ ;

$V_i$ -кількість транспортних вузлів на маршруті  $M_i(a_0, a_n)$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$

Тоді, оптимальний маршрут є вирішенням наступної задачі:

$$M_{opt} = \min_i [t(M(a_0, a_n))] \quad (10)$$

Звідси, зрозуміло, що, для забезпечення ефективного функціонування ВДМ міста, необхідно в процесі її експлуатації створити умови руху заданим маршрутом для ТЗ, дотримуючись принципу транспортної рівноваги.

Відповідна модель дає можливість із мінімальною кількістю вихідних даних, з допустимою точністю, моделювати рух транспортних потоків по вулично-дорожній мережі, враховуючи основні взаємозв'язки між транспортними засобами, які відбуваються на мережі. Також треба відмітити, що структура даної

моделі така, що дозволяє, без проведення додаткового експериментального збору вхідних параметрів, розрахувати потрібні критерії у випадку зміни організації руху.

**Висновок.** Аналіз існуючих методів моделювання розподілення транспортних потоків по мережі показує, що, з точки зору транспортного процесу, найбільш важливими параметрами є час або вартість руху, які відтворюють недосконалість організації руху транспортного потоку. Модель вибору маршруту базується на визначенні ймовірного вибору альтернативного шляху на основі вартості руху.

### **Список використаних джерел**

1. Roughgarden T. How Bad is Selfish Routing? [Електронний ресурс] / T. Roughgarden, E. Tardos. – 2001. – Режим доступу до ресурсу: <http://theory.stanford.edu/~tim/papers/optima.pdf>.
2. Степанчук О. В. Вплив управління транспортними потоками на ефективність функціонування вулично-дорожньої мережі міст / О. В. Степанчук // Вісник Інженерної академії України. - 2017. - №1. - С. 212-216.
3. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. пособие / [Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А. и др.]; под ред. А.В. Гасникова. - М.: МФТИ, 2010. - 362 с.
4. Нурминский Е.А. Моделирование транспортных потоков г. Владивостока на основе теории равновесия / Нурминский Е.А., Шамрай Н.Б. // Транспортная система и логистика: III Международная научная конференция, 22-23 октября 2009 года. – Кишинев, Академия транспорта, информатики и коммуникаций, 2009. С. 334-348.
5. Наумова Н.А. Теоретические основы и методы управления транспортными потоками средствами мезоскопического моделирования: Дис. докт. техн. наук: 05.22.10 / Наумова Наталья Александровна. - Волгоград, 2015. - 331 с.
6. Gabriel S.A., Bernstein D. The traffic equilibrium problem with nonadditive path costs // Transportation Science. 1997. Vol. 31, № 4. P. 337-348.

**Аннотация**

*Рассмотрены и проанализированы методы системно-оптимального управления транспортными потоками. Определены принципы и приоритетные направления по выбору оптимального метода распределения и выбора маршрута движения транспортных средств в условиях интенсивной загрузки улично-дорожной сети города.*

*Ключевые слова: улично-дорожная сеть, транспортный поток, интенсивность движения, пропускная способность, оптимальное распределение, принципы Вардрона.*

**Abstract**

*The effective methods of system-optimal management of traffic flows are considered and analyzed. The principles and priorities concerning the optimal method of traffic distribution and traffic route selection under dense city street network traffic are determined.*

*Key words: street network, traffic flow, traffic intensity, traffic capacity, optimal traffic distribution, Vardrop's principles.*

*Стаття надійшла до редакції у березні 2018 р.*

УДК 712.28 (045)

**Ольховская Е.В.**<sup>16</sup> канд. арх., доц.  
lolkhovska@gmail.com

*Киевский национальный университет строительства  
и архитектуры,*

**Бенаисса Валид**, магистр  
*Институт искусств художественного моделирования  
и дизайна им. С. Дали, г. Киев, Украина.*

**СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ЛАНДШАФТНОГО ДИЗАЙНА  
В МЕЖДУНАРОДНОЙ ПРАКТИКЕ (на примере малых садов)**

*Процесс развития ландшафтного дизайна как отдельной специальности, который происходил в начале XX ст., привел к формированию новых подходов и принципов в сфере его деятельности. В*

---

<sup>16</sup>© Ольховская Е.В., Бенаисса Валид