

Rozwój logistyki na krajowym rynku spowodował jego zagospodarowanie przez dużą ilość nowych firm kurierskich. Dla każdej firmy efektywność działania jest podstawą do zapewnienia sobie mocnej pozycji na rynku KEP. Każda firma posiada inne cele i różne priorytety, dlatego przy formułowaniu swoich ofert kieruje się różnymi odpowiednio dobranymi wskaźnikami.

#### Literatura

1. Fajfer P., Koliński A.: Rola systemu teleinformatycznego w przemieszczaniu się przesyłek. E-mentor nr 5 (37) 2010 r.
2. Fraś J., Koliński A., Świątkowski R.: Wpływ strategii zarządzania jakością na ocenę efektywności procesów transportowych. Zeszyty naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego 2015r.
3. Gębczyńska A.: Pomiar efektywności procesów logistycznych. WSB Wrocław 2012r.
4. Jendryczka V.: Efektywność ekonomiczna łańcuchów transportowych. AM Szczecin 2014r.
5. Lejda K., Siedlecka S.: Wskaźniki logistyczne w przedsiębiorstwie kurierskim służące do oceny usług transportowych. Series „Technical sciences”. Scientific and Technical Collection. Issue 3 (39), Kijów 2017.
6. Michałowska M.: Efektywność transportu w warunkach gospodarki globalnej. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach 2012 r.
7. Rydzewska-Włodarczyk M., Sobieraj M.: Pomiar efektywności procesów za pomocą kluczowych wskaźników efektywności. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego nr 864 2015 r.
8. Siedlecka S. Porównanie i ocena jakości obsługi klienta dla wybranych firm kurierskich. Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. Instytut Naukowo-Wydawniczy „SPATIUM”, Nr12, Radom 2017.
9. Twaróg J.: Logistyczne wskaźniki oceny transportu. Instytut Logistyki i Magazynowania, 2004r.

УДК 656.1/5

### ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ТА МОДЕЛІ АНАЛІЗУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

#### BASIC PARAMETERS AND MODELS OF ANALYSIS OF TRANSPORT FLOWS

**Василь Онищук, Володимир Лотиш, Валерій Стельмашук**

*Луцький національний технічний університет  
43018, Луцький НТУ, вул. Львівська, 75, Луцьк*

*The growing intensity of traffic flows in the cities necessitates their objective and adequate research, which will allow improving the road environment, traffic safety and the ecological situation in the cities.*

Спроби розробити математичну теорію руху транспорту були ще до 1920-х років, коли Френк Найт вперше здійснив аналіз системи рівноваги руху, який був уточнений у першому та другому принципах рівноваги Уардопа в 1952 році.

Тим не менше, навіть з появою значної обчислювальної потужності комп'ютера на сьогоднішній день відсутня задовільна загальна теорія, яка може бути послідовно застосована до реальних умов потоку. Поточні моделі трафіку використовують суміш емпіричних та теоретичних методів.

Транспортний потік веде себе складно і нелінійно, залежно від взаємодії великої кількості транспортних засобів. Завдяки індивідуальним реакціям водіїв людини, транспортні засоби не взаємодіють просто з дотриманням законів механіки, а швидше показують формування кластерів і поширення ударної хвилі у прямому і зворотному напрямках, залежно від густини транспортного засобу.

У довільній транспортній мережі теорія потоку трафіку складається з таких змінних параметрів – швидкості руху потоку, власне потоку транспортних засобів та їх концентрації. Ці параметри в основному стосуються безперебійного руху транспорту, який у більшості своїй має місце на магістральних автомобільних шляхах. [1] Умови потоку вважаються "вільні", коли на дорозі менше 6 автомобілів на 1 км. "Стабільний" потік іноді описують як 6-15 автомобілів на 1 км на одній із смуг руху. Оскільки щільність потоку має тенденцію до зростання, при досягненні значення більше 15 автомобілів на 1 км, рух транспорту стає нестійким, і навіть незначний інцидент може призвести до виникнення корків. Критичне насичення відбувається тоді, коли трафік стає нестійким і перевищує 35 автомобілів на кілометр. [2] Трафік повністю зупиняється, як правило, в межах 92-125 автомобілів на кілометр. [3]

Проте розрахунки при перевантаженні транспортної мережі є більш складними і більшою мірою покладаються на емпіричні дослідження та екстраполяції з фактичних підрахунків. Такі фактори як безпека дорожнього руху та екологічний стан також впливають на оптимальні умови у транспортній мережі.

Існують загальні просторово-часові емпіричні особливості корків, які є якісно однаковими для різних магістралей у різних країнах, виміряні під час багаторічних спостережень за трафіком. Деякі з цих загальних особливостей перевантаження трафіку визначають синхронізований потік і широкомасштабні переадресаційні фази перевантаженого трафіку в трифазній теорії траєкторії Кернера.

Існує три основні змінні для візуалізації потоку руху: швидкість ( $v$ ), щільність ( $k$ , кількість транспортних засобів на одиницю простору), а також потік ( $q$ , кількість транспортних засобів за одиницю часу).

Не можна відстежувати швидкість кожного автомобіля; тому на практиці середня швидкість вимірюється шляхом відбору проб транспортних засобів у певному сегменті транспортної мережі протягом певного періоду часу. Існує два поняття середньої швидкості: "середня швидкість" та "середня швидкість потоку".

"Середня швидкість" вимірюється в контрольній точці на проїжджій частині протягом певного періоду часу. На практиці вона вимірюється за допомогою петлевих детекторів. Датчики циклів поширюють свій сигнал по опорній площині, і тим самим можуть ідентифікувати кожен транспортний засіб і відстежувати його швидкість. Проте середні вимірювання швидкості, отримані з цього методу, не є точними, оскільки усереднена швидкість різних транспортних засобів, не враховує різниці у часі проїзду транспортних засобів, що рухаються з різною швидкістю на однаковій відстані.

$$v_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_i$$

де  $m$  – кількість транспортних засобів, що проходять фіксовану точку, і  $v_i$  – швидкість  $i$ -го автомобіля.

"Середня швидкість потоку" вимірюється по всьому сегменту проїжджої частини. Послідовні фотографії або відеоролики сегмента дорожнього руху відстежують швидкість окремих транспортних засобів, а потім обчислюється середня швидкість. Це вважається більш точним, ніж середня швидкість. Дані для обчислення середньої швидкості потоку можуть бути взяті з супутникових зображень, камери чи за допомогою інших засобів фіксації транспортного потоку.

$$v_s = \left( (1/n) \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i} \right)^{-1}$$

де  $n$  – кількість транспортних засобів, що проходять через сегмент проїзду.

"Проміжна середня швидкість", таким чином, є гармонійною середньою швидкістю.

Середня швидкість часу ніколи не менше проміжної середньої швидкості:

$$v_t = v_s + \frac{\sigma_s^2}{v_s}$$

де  $\sigma_s^2$  – це дисперсія проміжної середньої швидкості

Щільність ( $k$ ) визначається як кількість транспортних засобів на одиницю довжини проїжджої частини. У транспортному потоці дві найважливіші щільності – критична щільність ( $k_c$ ) та щільність ділянок ( $k_j$ ). Максимальна щільність, що досяжна при вільному потоці, дорівнює  $k_c$ , а  $k_j$  – максимальна щільність, досягнута при заторі. Взагалі, щільність заторів в сім разів перевищує критичну щільність потоку. Зворотна щільність – це відстань, між центрами двох транспортних засобів.

$$k = \frac{1}{s}$$

Щільність ( $k$ ) в межах довжини проїжджої частини ( $L$ ) у заданий час ( $t_1$ ) дорівнює зворотному середньому інтервалу  $n$  транспортних засобів.

$$K(L, t_1) = \frac{n}{L} = \frac{1}{\bar{s}(t_1)}$$

Потік ( $q$ ) – це кількість транспортних засобів, що проходять базову точку за одиницю часу, транспортні засоби за годину. Зворотний потік – це відстань ( $h$ ), між  $i$ -м транспортним засобом, який пройшов контрольну точку в просторі та  $(i+1)$ -м транспортним засобом. У заторах параметр  $h$  залишається постійним.

$$q = kv$$

$$q = 1/h$$

Потік ( $q$ ), що проходить фіксовану точку ( $x_1$ ) протягом інтервалу ( $T$ ), дорівнює протилежному середньому проходженню  $m$  транспортних засобів.

$$q(T, x_1) = \frac{m}{T} = \frac{1}{\bar{h}(x_1)}$$

Аналіз транспортних потоків проводять у трьох основних способами, що відповідають трьом основним шкалам спостережень у фізиці:

Мікроскопічна шкала: на базовому рівні кожен транспортний засіб розглядається як фізична одиниця. Рівняння руху можна записати для кожного транспортного засобу, у вигляді звичайного диференціального рівняння. Можуть бути використані моделі клітинкових автоматів, де дорога розділена на клітинки, кожна з яких містить або рухомий автомобіль, або порожня. Модель Нагеля-Шрекенберга є простим прикладом такої моделі. Оскільки автомобілі взаємодіють, вони можуть моделювати колективні явища, такі як затори.

Макроскопічна шкала: аналогічно моделям динаміки рідин, вважається корисним застосування системи диференціальних рівнянь в приватних похідних, яка балансує закони для деяких вагових величин; наприклад, щільність транспортних засобів або їх середня швидкість.

Мезоскопічна (кінетична) шкала – третя проміжна можливість полягає у визначенні функції  $f(t, x, v)$ , яка виражає ймовірність наявності транспортного засобу в часі  $t$  у положенні  $x$ , що працює з швидкістю  $v$ . Ця функція, використовує методи статистичної механіки та може бути обчислена за допомогою інтегрально-диференціального рівняння Больцмана.

Інженерний підхід до аналізу проблем транспортного руху автомобільних доріг ґрунтується, перш за все, на емпіричному аналізі (наприклад, спостереженні та фіксації

математичної кривої). Однією з основних прикладних праць, яку використовують американські планувальники, є " Highway Capacity Manual" [5], опублікована Радою з транспортних досліджень, яка є частиною Національної академії наук Сполучених Штатів. В цій праці рекомендується моделювати потоки трафіку, використовуючи весь час проїзду по смузі за допомогою функції затримки/руху, включаючи ефекти чергування. Ця техніка використовується в багатьох моделях американського трафіку та в моделі SATURN у Європі [6].

У багатьох частинах Європи використовується гібридний емпіричний підхід до моделювання транспортних потоків, який поєднує макро-, мікро- та мезоскопічні особливості. Замість того, щоб імітувати стійкий стан потоку для руху транспортного засобу, моделюються перехідні "піки попиту" заторів. Вони моделюються за допомогою малих відрізків часу по всій мережі протягом робочого дня чи вихідних. Як правило, спочатку оцінюються витрати та напрямки поїздки, а модель руху створюється перед калібруванням, порівнюючи математичну модель зі спостереженим числом фактичних потоків руху, класифікованих за типом транспортного засобу. "Матрична оцінка" потім застосовується до моделі, щоб домогтися кращого відповідності спостережуваних послань до будь-яких змін, а оглядова модель використовується для створення більш реального прогнозу трафіку для будь-якої запропонованої схеми. Модель буде працювати кілька разів (включаючи поточну базову лінію, прогноз "середній день" на основі ряду економічних параметрів та підтримується аналізом чутливості), щоб зрозуміти наслідки тимчасових завад або інцидентів у мережі. З моделей можна об'єднати час, необхідний для всіх водіїв різних типів транспортних засобів у мережі, і таким чином вивести середнє споживання палива та викиди.

У Великобританії, скандинавських країнах та Голландії для моделювання транспортних систем використовують програму моделювання для великих схем, яка була розроблена протягом кількох десятиліть під егідою дослідницької лабораторії Великої Британії та нещодавно за підтримки Шведської дорожньої адміністрації. Моделюючи прогнози дорожньої мережі протягом декількох десятиліть у майбутнє, можна буде обчислити економічні вигоди від змін у дорожній мережі, використовуючи оцінки для значення часу та інших параметрів. Результати цих моделей можуть потім потрапляти в програму аналізу витрат і вигод [7].

На сучасному етапі в Україні нажалі не існує єдиного методологічного та практичного підходу до аналізу транспортних потоків і методів керування ними. Це зумовлює наростання транспортного колапсу у більшості обласних центрів, оскільки дорожня мережа і режими управління рухом не пристосовані до постійно зростаючої кількості автомобілів. Така тенденція призводить до погіршення екологічної ситуації і збільшення аварійності на дорогах.

#### Список літератури

1. Henry Lieu (January–February 1999). "Traffic-Flow Theory". Public Roads. US Dept of Transportation (Vol. 62· No. 4).
2. Rijn, John. "Road Capacities" (PDF). Indevlopment. Retrieved 22 July 2014.
3. V.L. Knoop and W. Daamen (2017). "Automatic fitting procedure for the fundamental diagram". Transportmetrica B: Transport Dynamics. Taylor and Francis. 5 (Vol. 5 No 2): 133–148. doi:10.1080/21680566.2016.1256239.
4. Lint, J. W. C. V., "Reliable travel time prediction for freeways", Phd thesis, Netherlands TRAIL Research School, 2004
5. Highway Capacity Manual 2010. Volume 2: UNINTERRUPTED FLOW. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD OF THE NATIONAL ACADEMIES.
6. SATURN ITS Transport Software Site Retrieved from <https://saturnsoftware2.co.uk/>
7. UK Department for Transport's WebTag guidance on the conduct of transport studies