

УДК 711.73

Степанчук Олександр Васильович

доктор технічних наук,

Національний авіаційний університет,

професор кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів

ORCID: 0000-0002-2822-3471

olstnau@gmail.com

РОЗПОДІЛЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА ВУЛИЧНО-ДОРОЖНІЙ МЕРЕЖІ МІСТА ШЛЯХОМ ВИЗНАЧЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО МАРШРУТУ

В основу роботи покладені теоретичні дослідження, які дозволяють вирішити задачі розподілу транспортних потоків по вулично-дорожній мережі міст із мінімальними часовими витратами під час переміщення транспортних засобів за певним маршрутом.

Розроблена і теоретично обґрунтована методологія побудови моделі розподілення транспортних потоків по вулично-дорожній мережі, що базується на концепції відповідності якісних і кількісних показників елементів вулично-дорожньої мережі («вузьких місць»), які виступають як два суміжні вузли, що забезпечують переміщення відповідно до визначеного району міста. Розглядається методика опису вулично-дорожньої мережі міста подібно до стисненого графу, на якому кожна вершина характеризується як «вузьке місце», яке включає в себе усі суміжні вузли, через які транспортні засоби направляються до виділеної вершини. Така модель чітко вказує на певну кількість альтернативних маршрутів і наявність можливих вулиць-дублерів, які дозволяють перерозподілити транспортні потоки у разі виникнення складної ситуації на одному з напрямків руху. На основі використання методу кліткової дискретизації графу розроблена схема вулично-дорожньої мережі міста Києва. Запропоновано визначати кількість можливих маршрутів руху шляхом аналізу існуючих транспортних зв'язків між районами міста, враховуючи особливості внутрішньорайонних, зовнішніх або транзитних переміщень. Модель взаємозв'язку «вузьких місць» на

вулично-дорожній мережі міста дозволяє отримати оцінку важливості «вузького місця», а саме його навантаження, близькість та ступінь зв'язності. Відповідна модель вулично-дорожньої мережі дозволяє визначити мінімальну кількість входів і виходів для транспортних потоків під час переміщення між районами міста.

Ключові слова: вулично-дорожня мережа, транспортні потоки, транспортний засіб, транспортні вузли, граф мережі, затор (транспортна конгестія), район міста, розподіл транспортних потоків, «вузькі місця».

Oleksandr Stepanchuk

Doctor of Engineering Sciences,

National Aviation University,

Professor of the Department of Reconstruction

of Airports and Highways

ORCID: 0000-0002-2822-3471

olstnau@gmail.com

DISTRIBUTION OF TRANSPORT FLOWS ON THE STREET NETWORK OF THE CITY BY DETERMINING THE ALTERNATIVE ROUTE

The work is based on theoretical studies allowing solving problems of traffic flows distribution on city street network with minimal time required for moving vehicles on a certain route.

The methodology of modelling the traffic flows distribution in the street network, based on the concept of correspondence of qualitative and quantitative indicators of the street network elements ("bottlenecks"), acting as two adjacent nodes, providing the traffic to defined city district, is developed. The street network description technique is considered in the form of a compressed graph, in which each vertex is characterized as a "narrow place", which includes all adjacent nodes, through which the vehicles are directed to the defined vertex. This model clearly indicates a certain number of alternative routes and the availability of possible street-doubles, which will allow redistributing traffic flows in the event of a difficult situation in one of the traffic directions. The street network of Kiev was developed on the basis of

the method of cell sampling of a graph. It is proposed to determine the number of possible routes by considering the existing transport links between the city districts, taking into account the peculiarity of internally district, interdistrict or transit traffic. The model of the "bottlenecks" interconnection in the city street network allows us to assess the importance of the bottleneck, namely its workload, proximity and connectivity degree. Such street network model points to the minimum number of entrances and exits for traffic flows.

Key words: *street network, traffic flows, vehicle, transport hubs, traffic density, network graph, traffic congestion, intersection, city district, traffic flows distribution, "bottlenecks".*

ВСТУП

Основною проблемою впровадження заходів з управління транспортними потоками на вулично-дорожній мережі (ВДМ) крупних і найкрупніших міст є розміри їх території, значна довжина магістральних вулиць, велика кількість перехресть на них, а також різноманітний склад транспортних засобів (ТЗ), які рухаються за індивідуальними маршрутами. Значною проблемою для забезпечення ефективного функціонування вулично-дорожньої мережі є те, що транспортні потоки (за своїми кількісними та динамічними характеристиками для однієї й тієї ж ділянки вуличної мережі) суттєво різняться між собою (в залежності від часу доби), що, у багатьох випадках, ускладнює підходи щодо прогнозування стану й прийняття ефективного рішення управління ними.

Основою ефективності управління транспортними потоками у місті є забезпечення оперативного моніторингу завантаження вуличної мережі транспортними засобами, що дозволяє миттєво отримувати інформацію про зміни на вулично-дорожній мережі. Відомо, що рівень оперативності й ефективності управлінських рішень залежить від мінімізації часу між початком ускладнення ситуації й до прийняття відповідного управлінського рішення. Тому система управління транспортними потоками на ВДМ міста повинна бути гнучкою, що означає миттєве реагування на локальні ситуації, і тим самим підтримувати ефективні показники роботи для всієї вуличної мережі.

Головним завданням управління транспортними потоками на вулицях міста є мінімізація ймовірності виникнення заторів у проблемних місцях ВДМ. Метою системи управління транспортними потоками є недопущення ситуації утворення заторів і, за умови виникнення затору, передбачення можливих альтернативних маршрутів, які дозволять розподілити потоки, тим самим мінімізувати часові втрати, що обумовлено підходом до визначення ефективного маршруту руху ТЗ.

1. Викладення основного матеріалу дослідження

Особливості функціонування ВДМ населеного пункту, зокрема, завантаженість транспортними засобами, мають свої закономірності. На це суттєво впливає те, в якій зоні міста розміщена відповідна ділянка вулиці, який це період доби або день тижня, яке функціональне значення відповідної вулиці і т. п. У багатьох випадках ми можемо спостерігати ділянки вулиць і доріг, які, за умови максимального завантаження окремих напрямків (заторовий стан), завантажені всього на 10–15% від своєї проектної потужності [1]. Тобто, ці ділянки міських вулиць фактично можуть слугувати альтернативними маршрутами руху (вулицями-дублерами), на які можна перенаправити транспортні засоби і тим самим розвантажити складні ділянки мережі.

Звідси, показник наявності альтернативних маршрутів (вулиць-дублерів) перевантажених магістралей можна визначити за формулою:

$$K_D = \frac{1 + B_D}{B_{MB}}, \quad (1)$$

де K_D – показник наявності вулиць-дублерів перевантажених магістралей;

B_D – кількість альтернативних шляхів (вулиць-дублерів) перевантажених магістралей;

B_{MB} – загальна кількість магістралей загальноміського і районного значення з інтенсивним рухом (пропускна спроможність близька за значенням до максимальної інтенсивності руху в години “пік”).

Покращення умов руху транспортних засобів на вулицях міст досягається шляхом раціонального розподілу транспортних потоків по них і призводить до зменшення інтенсивності руху на ділянках ВДМ, пропускна спроможність яких не дозволяє пропустити кількість ТЗ, що прямують до відповідного елемента. Розподіл руху ТЗ мережею можливий лише за наявності певних дорожніх умов окремих ділянок, зокрема, наявності резервів у вигляді окремих альтернативних вулиць та доріг.

Розподілення транспортних потоків з метою зменшення перевантаження ділянок мережі призводить до зниження затримок на перехрестях і на ділянках, які до них примикають. При цьому можна стверджувати, що на перевантажених ділянках завжди буде проходити зниження затримок, а на недовантажених – збільшення, але збільшення затримок може і не відбуватися. Це залежить від наявності резервів пропускної спроможності цих елементів мережі. На основі такого розподілу в цілому на усій мережі буде відбуватися зниження сумарного часу затримок.

Під час вирішення задачі розподілення транспортних потоків по вулично-дорожній мережі значних і найзначніших міст треба приділити увагу тому, що в місті існують значні пасажировантажотворюючі та пасажировантажо-поглинаючі вузли і що перевезення між ними є не тільки основними в загальному перевезенні, але дуже часто й стійкими за напрямком. Тому треба відмітити, що знаходження оптимального розподілення транспортних потоків заданою вулично-дорожньою мережею все-таки базується на розподілі транспортних потоків за пріоритетним напрямком.

Пріоритет того чи іншого напрямку залежить від:

- кількості можливих маршрутів руху;
- сумарної довжини маршрутів руху;
- запасу пропускної спроможності напрямку руху для транзитного транспорту.

Чим менша кількість можливих маршрутів за напрямком руху, тим більший пріоритет напрямку.

Серед вибраної сукупності напрямків руху, які мають однакову кількість маршрутів, і запасу відповідної пропускної спроможності

більший пріоритет буде мати напрямок руху, який характеризується найменшою сумарною довжиною маршруту.

Необґрунтована організація руху транспортних потоків на вулично-дорожній мережі, в тому числі і транзитних, призводить до перевантаження окремих магістральних вулиць або їхніх окремих ділянок з одночасним недовантаженням паралельних їм вулиць. Вирішення цієї проблеми вимагає вирішення задачі оптимального завантаження магістральних вулиць залежно від характеристик дорожньо-транспортних умов і характеристик транспортних потоків, які рухаються по ній.

Але в багатьох випадках навіть за наявності декількох альтернативних шляхів (вулиць-дублерів) транспортні потоки, які були перерозподілені по ВДМ певного району, сходяться в одному місці (це може бути мостовий перехід, транспортна розв'язка, шляхопровід і т.п.). Тому для подальшого вивчення й аналізу руху транспортних потоків вуличною мережею населеного пункту необхідно встановити кількість місць, куди можуть бути спрямовані основні маршрути руху ТЗ, які здійснюють переміщення відповідно кожного району міста.

Аналіз проведених досліджень, які були виконані в роботі [1], вказують, що затори на ВДМ міста Києва утворюються на регульованих перехрестях – 69%, на мостах – 13%, на розв'язках в різних рівнях – 9%, на перехрестях із кільцевим рухом – 3% і на перегонах – 6%. Враховуючи те, що затори на перегонах, в основному, відносяться до нерегулярних (ті, які виникають у результаті ДТП, проведення дорожніх робіт і т.п.), усі такі елементи ВДМ, куди стягуються транспортні потоки, ми прийняли за «вузькі місця». До них відносяться: мости, шляхопроводи, регульовані перехрестя, в'їзди і виїзди з населеного пункту. Саме такий підхід дає можливість розглядати «вузькі місця» як пункти, де утворюються транспортні потоки, та місця, де вони розподіляються, а саме місця, в яких, у більшості випадків, і виникають транспортні затори, що призводять до затримки в русі та утворення черг.

Така невідповідність пропускнуої спроможності деяких елементів ВДМ та неефективні заходи з управління й організації дорожнього

руху призводить до значних часових втрат. Для того, щоб покращити транспортну ситуацію у відповідних місцях та на всій мережі вцілому, необхідно перерозподілити транспортні потоки, направляючи частину потоку за іншим альтернативним маршрутом.

Також треба відмітити, що під час впровадження заходів по розподілу транспортних потоків набуває актуальності питання перепробігу транспортних засобів мережею. Тому, визначаючи маршрут руху ТЗ після їхнього перерозподілу, ставиться головна умова, щоб витрати під час перепробігу не перевищували витрат руху за основним напрямком із можливими затримками та вимушеними зупинками.

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 матеріальними витратами і втратами часу, а також коли 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 Вардтропа [2]. 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 рекомендованим маршрутом руху і це знижує ефект такого розподілу.

Конкурентна транспортна рівновага відповідає першому принципу Вардтропа, 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 під час чисельних розрахунків полягає у великій різновидності задач, що вирішуються на реальних транспортних мережах.

Аналіз існуючих методів моделювання розподілення транспортних потоків мережею 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.

Вибір кожного водія впливає на завантаження мережі, що, своїм чином, впливає на вибір маршруту руху іншими водіями.

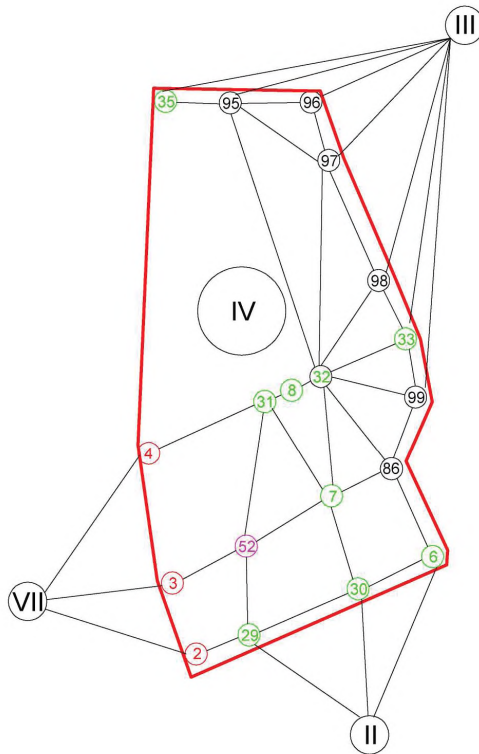
На основі вищесказаного, необхідно розглянути таку особливість як максимальна кількість можливих маршрутів, що можуть бути прокладені між двома пунктами тяжіння (джерелом та метою переміщення). На це значною мірою впливає кількість та тип елементів ВДМ (мости, шляхопроводи, регульовані перехрестя і т.п.), які забезпечують транспортний зв'язок між суміжними або віддаленими районами та стягують до себе транспортні потоки на території кожного району. Фактично ці елементи встановлюють кількість можливих маршрутів руху між певними пунктами тяжіння.

Розглядаючи можливі маршрути переміщення між районами міста, можна виділити певну n -кількість місць, через які можна проїхати з одного району в інший, тобто визначену кількість можливих маршрутів руху для здійснення зовнішніх та транзитних переміщень.

Для більш повного розуміння та пояснення розглянемо ситуацію одного з адміністративних районів міста Києва. На рис. 1 така схема складена для Дніпровського району. Цей район межує з трьома районами міста: Дарницьким, Деснянським та Печерським. З отриманої схеми видно, що Дніпровський район має 14 зовнішніх зв'язків з іншими районами, із них: з Дарницьким – 3 зв'язки, з Деснянським – 7, але три з них забезпечуються вулицями місцевого значення, з Печерським – 3 зв'язки й усі вони проходять через мостові переходи. Також на схемі відтворені «вузькі місця» в середині відповідного району (мостові переходи, шляхопроводи, регульовані перехрестя і т.п.), які мають суттєвий вплив на вибір основних маршрутів руху для транспортних засобів.

Відповідні схеми, побудовані для кожного району міста, чітко вказують на можливі шляхи сполучення між ними, а також існуючі

основні маршрути всередині кожного району. Наша подальша робота зводиться до того, щоб створити модель ВДМ міста, виходячи з кількості вузлових точок («вузьких місць»), до яких закономірно стягуються транспортні потоки, тому що під час будь-якого вирішенні перерозподілу транспортних потоків по ВДМ міста основну увагу необхідно приділяти саме пропускній спроможності та кількості «вузьких місць».



II-Дарницький район;
III-Деснянський район;

IV-Дніпровський район;
VII-Печерський район.

Рисунок 1 – Схема транспортних зв'язків на ВДМ Дніпровського району міста Києва з сусідніми районами

Кількість «вузьких місць» та їхня пропускна спроможність вказують на доцільність прийняття рішення з організації та управління дорожнім рухом на ВДМ міста, саме їх необхідно виділити як місця, куди спрямовані транспортні потоки. Звідси, вулично-дорожня мережа такої моделі вказує на мінімальну кількість входів і виходів для транспортних потоків.

Тобто, таким чином, можна створити схему зв'язків для кожного району будь-якого міста. Як приклад, нами були виділені місця 65-ти можливих транспортних зв'язків між районами міста Києва [3].

Під час аналізу існуючих вуличних зв'язків між районами до уваги бралися усі можливі вулиці й дороги та елементи ВДМ, незалежно від їхньої категорії та технічних і планувальних характеристик. Кількість вуличних транспортних зв'язків між адміністративними районами міста Києва наведено у табл. 1, врахувавши дані якої, можна чітко визначити максимальну кількість маршрутів вуличного транспорту між районами міста.

Таблиця 1 – Матриця вуличних транспортних зв'язків між районами міста Києва

Район міста	Кількість місць вуличного транспортного сполучення, в од.									
	Голосіївський	Дарницький	Деснянський	Дніпровський	Оболонський	Печерський	Подільський	Святошинський	Солом'янський	Шевченківський
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Голосіївський	–	1	0	0	0	7	0	0	6	4
Дарницький	1	–	0	3	0	0	0	0	0	0
Деснянський	0	0	–	7	1	0	0	0	0	0
Дніпровський	0	3	7	–	0	3	0	0	0	0
Оболонський	0	0	1	0	–	0	9	0	0	0
Печерський	7	0	0	3	0	–	1	0	0	3
Подільський	0	0	0	0	9	1	–	1	0	9

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Святошинський	0	0	0	0	0	0	1	–	3	2
Солом'янський	6	0	0	0	0	0	0	3	–	6
Шевченківський	4	0	0	0	0	3	9	2	6	–
Всього по району	18	4	8	13	10	14	20	6	14	23

Але, як уже було зазначено, що, крім місць, які забезпечують вуличний транспортний зв'язок, між районами існують «вузькі місця» на території кожного району міста, які мають вплив на формування маршрутів руху не тільки зовнішньорайонного та транзитного переміщення, а й внутрішньорайонного. Тому пропонується розглянути певну ситуацію для міста Києва, виділивши усі «вузькі місця» на його території (рис. 2).

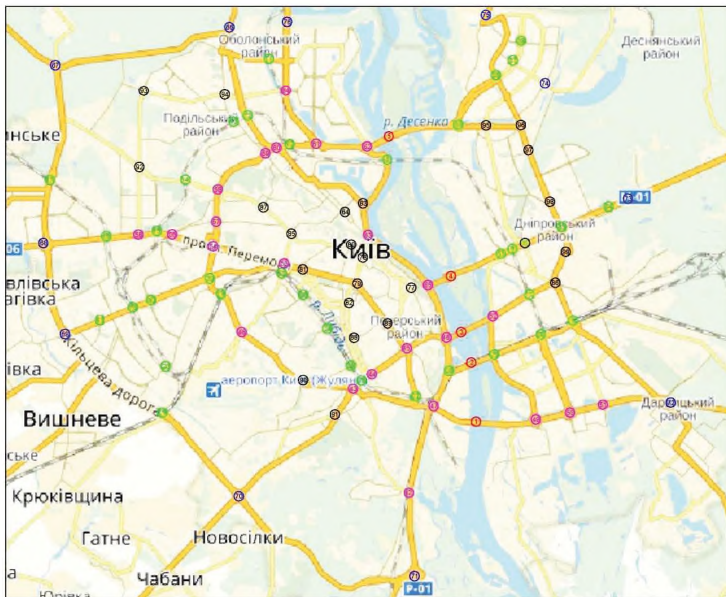


Рисунок 2 – Схема ВДМ міста Києва з виділенням «вузьких місць»

На ВДМ міста Києва нами було виділено 99 відповідних «вузьких місць», до яких були віднесені [4]:

- мостові переходи – 5 місць;
- шляхопроводи через залізницю, лінію метрополітену або швидкісного трамвая – 36 місць;
- транспортні розв'язки на магістральних вулицях у різних рівнях – 24 місця;
- регульовані перехрестя (які знаходяться на межі адміністративних районів або наближені до них) – 23 місця;
- в'їзди і виїзди з міста – 11 місць.

На основі отриманої схеми вулично-дорожньої мережі міста Києва можна отримати геометричний граф, що є вихідним матеріалом для створення алгебраїчного образу «вузьких місць» ВДМ, та який можна використовувати безпосередньо в математичних моделях (рис. 3).

Фактично ми описали вулично-дорожню мережу міста стисненим графом, на якому кожна вершина характеризується як вузьке місце, яке включає в себе усі суміжні вузли і через які транспортні засоби направляються до виділеної вершини. Дана модель чітко вказує на певну кількість альтернативних маршрутів і можливих вулиць-дублерів, які дозволять перерозподілити транспортні потоки у разі виникнення складної ситуації на одному з напрямків руху.

Звідси, виходячи з прийнятого, що «вузьке місце» на ВДМ – це вузол, та взявши до уваги, що основні ТП спрямовані саме до нього або від нього на основі теорії складних мереж [5; 6; 7; 8; 9; 10], можна провести дослідження функціонування ВДМ міста. Так, саме такий підхід дозволяє виключити із системи управління деяку кількість вулиць та перехресть, які не мають суттєвого впливу на рух ТП. Важливими в дослідженні функціонування ВДМ є тільки ті вузли, на яких змінюється напрямок руху для значної кількості ТЗ, або елементи ВДМ, до яких рухаються основні транспортні потоки.

У роботі [6] зазначено, що для оцінки транспортної мережі за умови віддаленості вузлів застосовують новий параметр

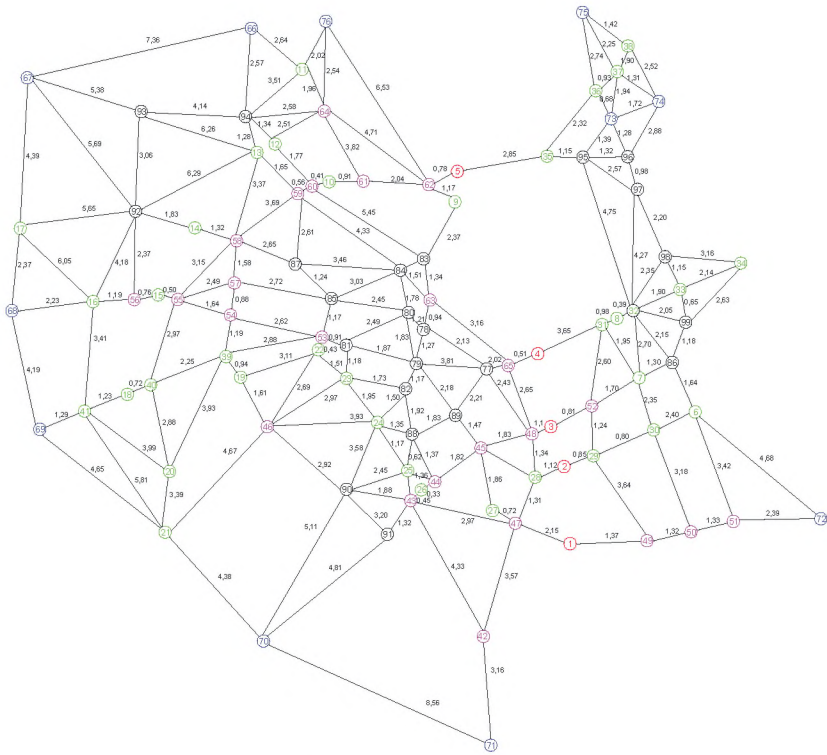


Рисунок 3 – Модель взаємозв'язку «вузьких місць» вулично-дорожньої мережі міста Києва

оцінювання – ефективність. Ефективність визначається середньою величиною від обернених значень довжини найкоротшого шляху між вузлами мережі.

$$E = \frac{2}{V(V-1)} \times \sum \frac{1}{d_{ij}}, \quad (1)$$

де V – кількість вузлів у мережі;

d_{ij} – кількість зв'язків найкоротшим маршрутом між вузлами i та j .

Відповідно до інформації, яка відтворена на рис. 3, можна отримати оцінку важливості вузла. Виходячи з теорії мереж, необхідно виділити три основні категорії цього показника [5]: навантаження вузла, близькість та ступінь вузла.

Згідно визначення, наведеного у [5], зазначено, що завантаженість вузла – це показник, який визначається як сумарне число найкоротших шляхів між усіма вузлами, що проходять через цей вузол, до загального числа найкоротших шляхів. Але, відповідно до прийнятого положення щодо ускладнення умов руху, що викликані збільшенням кількості ТЗ, оптимальний маршрут характеризується мінімальними витратами часу, а не мінімальною відстанню. Тому завантаженість вузла буде залежати від кількості усіх маршрутів, які можуть бути прокладені через певний вузол. Відповідну залежність необхідно записати як:

$$B_i = \sum_{st} G_{st}(i) / G_{st}, \quad (2)$$

де $G_{st}(i)$ – загальна кількість маршрутів із вузла s до вузла t , які проходять через вузол i ;

G_{st} – загальне число можливих маршрутів між вузлами s та t .

Відповідне навантаження можна визначити і для ділянки вулиці, яка забезпечує рух ТЗ за заданим маршрутом [5]:

$$B_{ib} = \sum_{bst} G_{stb}(ib) / G_{st}, \quad (3)$$

де $G_{stb}(ib)$ – загальна кількість маршрутів із вузла s до вузла t , які проходять через ділянку вулиці ib .

Близькість вузла характеризує середню близькість до даного вузла усіх інших вузлів мережі [5].

$$C_i = \frac{V}{\sum_j d_{ij}}, \quad (4)$$

У сучасній теорії мереж число зв'язків називають його ступенем (degree). Ступінь вузла є кількісною мірою його важливості, виходячи з кількості зв'язків, які належать цьому вузлу. Тому з графа,

який був утворений внаслідок кліткової дискретизації графу ВДМ міста Києва, можна виділити ступені вершин:

$\text{deg } v_i = 2$ таких вершин нараховується 15;

$\text{deg } v_i = 3$ таких вершин нараховується 17;

$\text{deg } v_i = 4$ таких вершин нараховується 35;

$\text{deg } v_i = 5$ таких вершин нараховується 22;

$\text{deg } v_i = 6$ таких вершин нараховується 8;

$\text{deg } v_i = 7$ таких вершин нараховується 1;

$\text{deg } v_i = 8$ таких вершин нараховується 1.

Взявши за основу отримані ступені вершин, які фактично характеризують кількість можливих напрямків маршрутів, що можуть бути прокладені через відповідну вершину, можна визначити кількість напрямків, за якими прокладені маршрути, що можуть пройти через відповідне «вузьке місце»:

$$n_m = (k_i - 1), \quad (5)$$

де n_{km} – кількість напрямків, за якими можуть бути прокладені маршрути руху транспортних засобів, що проходять через відповідне «вузьке місце»;

k_i – кількість перегонів вулиць, доріг, які підходять до відповідного «вузького місця», або ступінь вершини.

Виходячи з вищесказаного, усі «вузькі місця» можна розподілити за відповідними рівнями ієрархії, які будуть характеризувати його функціональне значення у системі вулично-дорожньої мережі міста. Тобто, рівні ієрархії елементів ВДМ («вузьких місць») вказують на їхнє значення у забезпеченні транспортного зв'язку між планувальними елементами міста: на скільки вихід з ладу певного елемента ВДМ призводить до погіршення транспортної ситуації на ній і яка кількість альтернативних маршрутів залишилася за певних умов. Наприклад, утворення затору на елементі ВДМ, який має ступінь $\text{deg } v_i = 2$, вказує на повну відсутність альтернативного маршруту для ТЗ, які рухаються до відповідного вузла, а при $\text{deg } v_i = 3$ є можливість прокладання маршруту у двох напрямках, що дозволяє розглянути альтернативний маршрут руху і т.п.

Для проведення відповідного поділу «вузьких місць» на вулично-дорожній мережі міста використаємо відомий метод аналітичної ієрархії [11]. Використання цього методу полягає в процесі поетапного встановлення пріоритетів.

Визначаємо три критерії, яким повинен відповідати такий вид елемента ВДМ: так зване «вузьке місце», а саме пропускна спроможність, середній час затримки транспортного засобу та кількість можливих напрямків руху. Завдання в ієрархічній формі подані так, що на першому рівні знаходиться спільна мета – «функціонування елемента ВДМ», на другому рівні знаходяться три критерії, які утворюють мету, і на третьому, нижньому рівні, – елементи ВДМ, які повинні бути оцінені щодо критеріїв другого рівня.

Закон ієрархічного поділу вимагає, щоб порівняння елементів нижнього рівня ієрархії було проведено попарно щодо елементів наступного рівня, аж до вершини ієрархії [11].

Поєднання ієрархічної декомпозиції і шкали відносної важливості дозволяє визначити локальні пріоритети. Для безпосереднього вибору елемента ВДМ у табл. 2 подана матриця попарних порівнянь для другого рівня ієрархії. Ця матриця визначає вектор пріоритетів, власне значення інтенсивності λ_{\max} , індекс узгодженості та відношення узгодженості. Вектор пріоритетів, отриманий із цієї матриці, поданий у вигляді вектора-стовпця:

$$\omega = \begin{pmatrix} 0,65 \\ 0,23 \\ 0,12 \end{pmatrix}$$

Таблиця 2 – Матриця попарних порівнянь для другого рівня ієрархії

Порівняння	Завантаження вузла	Близькість вузла	Ступінь вузла
Завантаження вузла	1	3	5
Близькість вузла	1/3	1	2
Ступінь вузла	1/5	1/2	1
$\lambda_{\max} = 3,00$; ІУ = 0,0; ВУ = 0,0			

Матриці попарних порівнянь третього рівня подані наступним чином: за пропускнуою спроможністю (в табл. 3), за витратами часу (в табл. 4), за кількістю напрямків зв'язку (в табл. 5).

Таблиця 3 – Матриця попарних порівнянь для третього рівня ієрархії (за пропускнуою спроможністю)

Порівняння	Міст	Шляхопровід	Перехрестя в різних рівнях	Регульоване перехрестя	Перехрестя з кільцевим рухом	Нерегульоване перехрестя
Міст	1	1	2	3	5	7
Шляхопровід	1	1	2	3	5	7
Перехрестя в різних рівнях	1/2	1/2	1	2	4	6
Регульоване перехрестя	1/3	1/3	1/2	1	2	4
Перехрестя з кільцевим рухом	1/5	1/5	1/4	1/2	1	2
Нерегульоване перехрестя	1/7	1/7	1/7	1/4	1/2	1
$\lambda_{\max} = 6,06; IU = 0,01; VU = 0,01$						

Таблиця 4 – Матриця попарних порівнянь для третього рівня ієрархії (за витратами часу)

Порівняння	Міст	Шляхопровід	Перехрестя в різних рівнях	Регульоване перехрестя	Перехрестя з кільцевим рухом	Нерегульоване перехрестя
1	2	3	4	5	6	7
Міст	1	1	2	4	4	5
Шляхопровід	1	1	2	4	4	5
Перехрестя в різних рівнях	1/2	1/2	1	2	2	3

Закінчення таблиці 4

1	2	3	4	5	6	7
Регульоване перехрестя	1/4	1/4	1/2	1	1	2
Перехрестя з кільцевим рухом	1/4	1/4	1/2	1	1	1
Нерегульоване перехрестя	1/5	1/5	1/3	1/2	1	1
$\lambda_{\max} = 6,02; IU = 0,00; BU = 0,00$						

Таблиця 5 – Матриця попарних порівнянь для третього рівня ієрархії (за складністю маневру зміни напрямку руху)

Порівняння	Міст	Шляхопровід	Перехрестя в різних рівнях	Регульоване перехрестя	Перехрестя з кільцевим рухом	Нерегульоване перехрестя
Міст	1	1	2	3	4	5
Шляхопровід	1	1	2	3	4	5
Перехрестя в різних рівнях	1/2	1/2	1	1	2	4
Регульоване перехрестя	1/3	1/3	1	1	2	3
Перехрестя з кільцевим рухом	1/4	1/4	1/2	1/2	1	2
Нерегульоване перехрестя	1/5	1/5	1/4	1/3	1/2	1
$\lambda_{\max} = 6,00; IU = 0,00; BU = 0,00$						

Для того, щоб визначити глобальні пріоритети і встановити відповідні рівні ієрархії для елементів вулично-дорожньої мережі за виділеними трьома критеріями, застосуємо принцип синтезу. Звідси, вектори пріоритетів, які були отримані з кожної матриці, запишемо у вигляді трьох стовпців:

$$\begin{pmatrix} 0,30 & 0,31 & 0,30 \\ 0,30 & 0,31 & 0,29 \\ 0,19 & 0,16 & 0,15 \\ 0,11 & 0,08 & 0,12 \\ 0,06 & 0,07 & 0,07 \\ 0,03 & 0,06 & 0,05 \end{pmatrix}$$

Отриману матрицю помножимо на вектор ω , що дозволить зважити вектор пріоритетів, яким вимірюють кожний вплив пріоритету відповідної мети.

$$\begin{pmatrix} 0,24 \\ 0,24 \\ 0,18 \\ 0,14 \\ 0,11 \\ 0,09 \end{pmatrix}$$

Таким чином, отриманий загальний вектор пріоритетів дає можливість встановити відповідні рівні ієрархії для «вузьких місць» елементів ВДМ.

Тобто, за рівнями ієрархії елементи ВДМ можна записати:

- перший рівень – мостові переходи та шляхопроводи;
- другий рівень – транспортні розв'язки у різних рівнях;
- третій рівень – регульовані перехрестя;
- четвертий рівень – перехрестя з кільцевим рухом;
- п'ятий рівень – нерегульовані перехрестя.

Розглядаючи саме «вузькі місця» як ділянки основних транспортних зв'язків та виділивши їх як транспортний вузол ВДМ міста й зіставивши сумарну кількість смуг руху, які безпосередньо входять у такий вузол, можна зробити аналіз щодо потужності вуличної-дорожньої мережі району і всього міста. Взнявши за основу відповідну інформацію, можна побудувати розподілення вузлів за кількістю смуг, що дозволить фактично прорангувати «вузькі місця» ВДМ за їхньою пропускнуною спроможністю.

Кожне «вузьке місце» має геометричні координати та сумарну кількість смуг руху, які безпосередньо входять та виходять з нього. Звідси, використовуючи методичку, запропоновану у роботі [12] щодо розподілу елементів ВДМ за кратністю, можна визначити потужність вуличної мережі.

Отримавши дані щодо потужності елементів ВДМ, можна визначити відповідність їхньої пропускної спроможності транспортним потребам та виявити необхідність у будівництві додаткових елементів ВДМ, а також виявити можливі незавантажені альтернативні шляхи руху, що є основним під час створення інтелектуальної системи управління дорожнім рухом, яка дозволить ефективно розподіляти транспортні потоки по вуличній мережі.

Відповідну віддаленість «вузьких місць» можна подати як матрицю відстані, де чітко прослідковується мінімальна відстань від однієї вершини графа («вузького місця») до іншої. Так, подану матрицю, на якій визначена відстань віддаленості усіх «вузьких місць» у місті, необхідно взяти за основу забезпечення ефективного розподілу транспортних потоків на ВДМ.

Область застосування відповідної моделі дуже широка: транспортні задачі, завдання оптимізації мережі і системи перевезення. Одним із відомих оптимізаційних завдань є знаходження найкоротших шляхів у графі із зваженими дугами. Також, прийнявши, що вершини графу є джерелом та метою переміщення населення, на основі даних можна вирішити мережеву задачу про оптимальний потік, максимальний потік і мінімальний розріз, а також побудувати модель взаємодії різних видів транспорту.

Використовуючи відповідну матрицю відстаней на основі відомого алгоритму Дейкстри [13], можна визначити найкоротший шлях, враховуючи основний показник мінімальної витрати часу під час переміщення між відповідними пунктами тяжіння. А за умови завантаження окремих ребер, враховуючи пропускну спроможність кожного ребра та використовуючи метод Форда-Фалкерсона [4; 14], можна знайти величину максимального потоку між відповідними вхідними та вихідними вузлами («вузькими місцями»), а також це дозволить, за умови прийняття заданої пропускної спроможності не

дути, а саме пропускної спроможності вершини («вузького місця»), визначити можливий потік насичення всієї мережі.

Для цього будь-якому орієнтованому ребру $f(a,b)$ співставляється потік $f(a,b)$, який проходить по ребру за умови, що величина потоку менша або дорівнює пропускній спроможності ребра $z(a,b)$ [14].

$$f : (a,b) \rightarrow f(a,b) \leq c(a,b), \quad (6)$$

Тоді, будь-якій вершині b , яка не належить вершинам S і T , повинен задовольнятися закон збереження, а саме величина потоку, що приходить по ребру $f(a,b)$ повинна співпадати з величиною потоку вихідного із вершини по ребру $f(b,c)$ [14].

$$\sum_{a:(a,b) \in E(G)} f(a,b) = \sum_{c:(b,c) \in E(G)} f(b,c), \quad (7)$$

Пропускна спроможність розрізу

$$z(S,T) = \sum_{z(S,T) \in R(S,T)} z(a,b) = G, \quad (8)$$

Максимальний потік у мережі

$$Q \leq z(S,T) \forall R(S,T), \quad (9)$$

Такий метод дозволяє виявити можливі альтернативні маршрути розподілення транспортних потоків по мережі у раз відмови одного або декількох її елементів, які забезпечують транспортну зв'язність та надійність функціонування вулично-дорожньої мережі міста в цілому.

ВИСНОВКИ

Методика моделювання ВДМ міста, що ґрунтується на встановленні зв'язку між «вузькими місцями», дозволяє провести аналіз, визначити необхідну кількість елементів вуличної мережі за відповідними рівнями, установити оптимальну щільність та визначити перспективні напрямки її розвитку, а також створити умови забезпечення та організації ефективного функціонування ВДМ міст, вирішення задачі визначення й мінімізації впливу утворюючих на вулично-дорожній мережі перешкод. Також дозволить побудувати

загальну модель розподілення транспортних потоків мережею вулиць у разі зменшення пропускної спроможності або припинення руху на одному з перегонів або перехресті в конкретному «вузькому місці».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Stepanchuk O. Surveying of Traffic Congestions on Arterial Roads of Kyiv City / O. Stepanchuk, A. Bieliatynskiy, O. Pylypenko, S. Stepanchuk/ *Procedia Engineering*. – 2017. – № 187. – P. 14–21.
2. Roughgarden T. Selfish Routing and the Price of Anarchy. [Електронний ресурс] / T. Roughgarden. – 2006. – 36 p. – Режим доступу до ресурсу: <http://theory.stanford.edu/~tim/papers/optima.pdf>.
3. Stepanchuk O. Regularities of City Passenger Traffic Based on Existing Inter-district Links / O. Stepanchuk, A. Bieliatynskiy, O. Pylypenko. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2021. – Vol. 1258. – P. 81–93. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_8
4. Stepanchuk O. Modelling the Bottlenecks Interconnection on the City Street Network. / O. Stepanchuk, A. Bieliatynskiy, O. Pylypenko. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – Vol. 1116. – P. 889–898. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_88.
5. Евин И.А. Теория сложных сетей как новая научная парадигма [Електронний ресурс] / И.А. Евин – Режим доступу до ресурсу: <http://spkurdyumov.ru/uploads/2013/09/evvvin.pdf>.
6. Barabasi A. Degree Distribution [Електронний ресурс] / A.-L. Barabasi. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <http://barabasi.com/networksciencebook/>.
7. Barrat A. The architecture of complex weighted networks / A. Barrat, M. Barthélemy, R. Pastor-Satorras, A. Vespignani // *PNAS March*, 16, 2004. – Vol. 101 no. 11, 3747–3752.
8. Stoilova S. An application of the graph theory which examines the metro networks / S. Stoilova, V. Stoev // *Transport problems*. – 2015. – № 10. – С. 35–48.
9. Евин И.А. Модели общественного транспорта Москвы на основе теории сложных сетей / И.А. Евин, А.А. Соловьев, Т.Ф. Хабибуллин // *Информатизация и связь*. – 2013. – С. 81–89.
10. Stepanchuk, O. Peculiarities of City Street-Road Network Modelling. / Stepanchuk, O., Bieliatynskiy, A., Pylypenko, O., Stepanchuk, S. *Procedia Engineering*. 134, pp. 276–283 (2016) doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.008.
11. Саати Т. Аналитическое планирование и организация систем / Т. Саати, К. Керис. – М. : Радио и связь, 1991. 368 с.

12. Луканин В.Н. Автотранспортные потоки и окружающая среда – учебное пособие для вузов / Луканин В.Н., Буслаев А.П., Яшина М.В. – Москва : ИНФРА-М, МАДИ-ТУ, 2001. – 645 с.
13. Патракеев І.М. Транспортно-навігаційні ГІС / І.М. Патракеєв. – Х. : ХНФМГ, 2009. – 43 с.
14. Кирсанов М.Н. Графы в Maple. Задачи, алгоритмы, программы / М.Н. Кирсанов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 168 с.

REFERENCES

1. Stepanchuk O. Surveying of Traffic Congestions on Arterial Roads of Kyiv City / O. Stepanchuk, A. Bieliatynskiy, O. Pylypenko, S. Stepanchuk / Procedia Engineering. – 2017. – № 187. – P. 14–21.
2. Roughgarden T. Selfish Routing and the Price of Anarchy. [Електронний ресурс] / T. Roughgarden. – 2006. – 36 p. – Режим доступу до ресурсу: <http://theory.stanford.edu/~tim/papers/optima.pdf>.
3. Stepanchuk O. Regularities of City Passenger Traffic Based on Existing Inter-district Links / O. Stepanchuk, A. Bieliatynskiy, O. Pylypenko. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1258. – P. 81–93. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_8
4. Stepanchuk O. Modelling the Bottlenecks Interconnection on the City Street Network / O. Stepanchuk, A. Bieliatynskiy, O. Pylypenko. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1116. – P. 889–898. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_88.
5. Evin I.A. Theory of complex networks as a new scientific paradigm [Electronic resource] / I.A. Evin – Mode of access to the resource: <http://spkurdyumov.ru/uploads/2013/09/evvvin.pdf>.
6. Barabasi A. Degree Distribution [Електронний ресурс] / A.-L. Barabasi. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <http://barabasi.com/networksciencebook/>.
7. Barrat A. The architecture of complex weighted networks / A. Barrat, M. Barthélemy, R. Pastor-Satorras, A. Vespignani // PNAS March, 16, 2004. – Vol. 101 no. 11, 3747–3752.
8. Stoilova S. An application of the graph theory which examines the metro networks / S. Stoilova, V. Stoev. // Transport problems. – 2015. – № 10. – С. 35–48.
9. Evin I.A. Models of public transport in Moscow based on the theory of complex networks / I.A. Evin, A.A. Soloviev, T.F. Khabibullin // Informatization and communication. – 2013. – S. 81–89.
10. Stepanchuk O. Peculiarities of City Street-Road Network Modelling. / Stepanchuk O., Bieliatynskiy A., Pylypenko O., Stepanchuk S. Procedia Engineering. 134, pp. 276–283 (2016) doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.008.

11. Saati T. Analytical planning and organization of systems / T. Saati, K. Keris – М. : Radio and communication, 1991. 368 p.
12. Lukanin V.N. Road traffic and the environment – 2: textbook for universities / Lukanin V.N., Buslaev A.P., Yashina M.V. – Moscow : INFRA-M, MADI-TU, 2001 – 645 p.
13. Patrakeev I.M. Transport and navigation GIS / I.M. Patrakeev. – Kh. : KhNFMG, 2009. – 43 p.
14. Kirsanov M.N. Graphs in Maple. Tasks, algorithms, programs / M.N. Kirsanov. – Moscow : FIZMATLIT, 2007. – 168 p.