

Саєнко С. М.,

saienkosm@gmail.com, ORCID: 0009-0002-2486-5503

д. т. н., професор **Скочко В. І.,**

vladimir.and.friends@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1709-2621

к. т. н. **Пасько Р. М.,**

roman.pasko@kndise.gov.ua, ORCID:0000-0002-3313-0368

д. т. н., професор **Плоский В.О.,**

ploskyivo@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2632-8085

Київський національний університет будівництва і архітектури

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПІШОХІДНИХ ТА ТРАНСПОРТНИХ ДОРОЖНІХ МЕРЕЖ ІЗ МІНІМАЛЬНИМ ЧАСОМ РУХУ МІЖ ВУЗЛАМИ

Дана робота присвячена розгляду актуального питання розробки транспортних та пішохідних мереж на основі використання методів дискретного геометричного моделювання. У науковій літературі основним напрямком досліджень є так звана «транспортна задача», що полягає у пошуку оптимального маршруту для вже існуючої системи доріг, а також аналіз транспортних мереж в контексті оптимального планування міст і населених пунктів на основі мінімізації довжини шляху. Проте підходи, які ґрунтувались би на критерію мінімізації часу руху між вузлами дорожньої мережі, не висвітлені. У статті запропоновано інтерпретаційний підхід представлення дорожньої мережі як геометричної моделі у вигляді неупорядкованого дискретного графу. Основним критерієм оптимізації проектних рішень прийнято умову мінімальності загального часу пересування «об'єктів», що в залежності від початкових даних можуть відображати переміщення пішоходів або транспортних засобів, дорожньою мережею. Застосування запропонованого підходу, наприклад, дозволяє розробити оптимальні траєкторії (маршрути) переміщення відвідувачів парків або громадських просторів за критерієм мінімізації часу досяжності ними укриттів під час повітряних тривог. Іншим прикладом є розробка логістичних маршрутів постачання або перевезення предметів різного призначення по території технологічних парків, промислових комплексів, а також для військових логістичних задач. Проектування дорожніх мереж оптимізованих за умови скорочення часу руху між вузлами, як наслідок, буде зменшувати вплив на навколишнє середовище, підвищення мобільності та комфортності для населення, у тому числі підвищення рівня безпеки. Подальшим напрямком досліджень є врахування додаткових факторів та реалізація підходу у програмному середовищі.

Ключові слова: транспортні і пішохідні мережі, геометричне моделювання, неупорядкований граф, оптимізація, мінімізація, час руху.

Постановка проблеми. Сучасні світові тенденції сталого будівництва вимагають пошуку нових підходів до проектування та реновації міських просторів, об'єктів інфраструктури, громадських комплексів, промислових територій, технологічних парків тощо. Основною метою є покращення якості життя людини, скорочення ресурсних та енергетичних витрат, зменшення впливу на природне середовище в цілому. В той же час вплив війни в Україні накладає додаткові виклики, серед яких збільшення кількості мешканців міст у західних та центральних областях України внаслідок внутрішніх переміщень населення, логістичні особливості транспортних перевезень, необхідність швидкого пересування містом у пошуку укриття під час повітряної тривоги та ряд інших аспектів. Тож українські міста вже сьогодні потребують урбаністичних інновацій та ще більше потребуватимуть у повоєнний період відбудови країни.

Актуальною комплексною проблемою, вирішення якої спрямовано на досягнення одночасно декількох цілей сталого міського розвитку, є оптимізація рішень при проектуванні дорожніх сполучень для оптимізації логістичних потоків, підвищення ефективності просторового планування, покращення умов мобільності та інклюзивності для пішоходів.

Моделювання оптимальних конфігурацій пішохідних і транспортних мереж має різні підходи та залежить від кінцевої мети або функціонального призначення окремого типу дорожнього сполучення між вузловими точками, якими можуть виступати перетини доріг, місця повороту, початок або кінець дороги. Таким чином, дорожню мережу можна інтерпретувати як деяку систему, що складається з сукупності вузлових точок та ланок, що їх з'єднують. Умовами організації таких систем можуть виступати різні критерії, зокрема, обумовлені властивостями її складових елементів, наприклад, обмеження довжин ланок, обмеження загальної довжини шляху (сума довжин ланок, які його формують), а також обумовлені певними накладеними на них функціональними залежностями, як-от мінімізація часу проходження по заданому маршруту, пропускна здатність вузлів та інші.

Важливим критерієм оптимізації планування територіально відділених комплексів, що об'єднують сукупність об'єктів різного призначення (будівлі, інженерні споруди, функціональні зони, тимчасові укриття) для успішного досягнення спільної мети є ефективне розміщення таких об'єктів зі створенням мережі транспортних та пішохідних доріг між ними з урахуванням витрат часу на пересування людських та транспортних потоків. Варто зауважити, що можливі два сценарії: 1) розробка рішень щодо визначення місць розташування об'єктів комплексу та 2) розробка рішень з прокладання дорожніх сполучень відносно самих об'єктів. Відтак в обох випадках виникає потреба у моделюванні пішохідних та транспортних дорожніх мереж із мінімальним часом руху між вузлами.

Ціль статті. Розробити оптимізаційний підхід геометричного моделювання пішохідних та транспортних дорожніх мереж із мінімальним часом руху між вузлами.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Дослідження проблеми проектування, оптимізації, аналізу дорожніх мереж достатньо широко представлено у науковій літературі [1]. Проте основним напрямком досліджень є так звана «транспортна задача», що полягає у пошуку оптимального маршруту для вже існуючої системи доріг. Іншим переважним напрямком є моделювання транспортних мереж в контексті оптимального планування міст і населених пунктів на основі мінімізації довжини шляху. Наприклад, в роботі [2] розглядається трасування доріжок шляхом побудови ортогональної мережі Штейнера з урахуванням вагових коефіцієнтів функціональних зон. Проте підходи, які ґрунтувались би на критерію мінімізації часу руху між вузлами дорожньої мережі, не висвітлені.

Для досягнення поставленої у статті мети було проведено аналіз різних методів математичного моделювання. Найбільш доцільним на думку авторів є застосування інструментарій прикладної геометрії. Тоді дорожню мережу, що проектується, можна представити як дискретний неупорядкований граф, вузли та ланки якого знаходяться у функціональній залежності, узгоджені у певну топологічну схему опорних та вільних вузлів. Цим вузлам відповідатимуть відповідно в якості нерухомих (опорних) вузлів наперед задані входи та виходи (пункти призначення), а в якості вільних (рухомих) вузлів – вузли можливих сполучень доріжок, що відносяться до заданої функціональної зони [3].

В межах вирішення поставленої у статті задачі буде застосовано принципи статико-геометричного методу дискретної геометрії [4-6].

Основна частина. Для завдання деякої мережі доріг або доріжок, що проектується, на початковому етапі складається її геометрична модель, з визначеними топологічними ознаками та задаються відповідні крайові й початкові умови моделювання. Таким чином мережа доріжок подається у вигляді сукупності вузлових точок, які задають ланки ділянок доріг довжиною (1):

$$\delta_{i,j} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (1)$$

де $\delta_{i,j}$ – довжина ланки між i -м та j -м вузлами з координати початку та кінця ланки відповідно (x_i, y_i) та (x_j, y_j) .

Якщо розглянути дорожню мережу як деяку гідростатичну систему, де кожній ланці відповідає умовний канал або трубопровід через який відбувається проходження потоку ресурсів (в нашому випадку слід прийняти умовний потік людей або транспорту), то класичним вирішенням оптимізаційної задачі розподілу будь-яких ресурсів [7] вважається пошук оптимального положення єдиної точки розподілу $P_0(x_0, y_0)$, до якої спочатку подається весь обсяг ресурсів від постачальника, а потім цей ресурс розподіляється до усіх споживачів. При цьому оптимальним вважається умовно рівновіддалене від постачальника $P_1(x_1, y_1)$ й усіх споживачів ($P_i(x_i, y_i); i = 1, 2, 3, \dots, n$) положення, тобто таке, при якому загальна сума відстаней від точки $P_0(x_0, y_0)$ до усіх інших точок системи мінімальна.

Пропонується застосувати дещо інший підхід оптимізації дорожньої мережі з урахуванням запропонованого в [8] підходу геометричного моделювання систем теплопостачання. Нехай деяка дорожня мережа складається з окремих наперед визначених маршрутів, що в свою чергу сформовані як послідовність ланок дорожньої мережі, що розглядається. Кожний такий маршрут буде мати вхід та вихід, як зазначалось вище, їм відповідатимуть опорні вузли інтерпретаційної геометричної моделі, та проміжні вузли визначені з міркувань раціональності проектування, яким відповідатимуть вільні вузли геометричної моделі. Привласнюючи кожному опорному вузлу певну характеристику його пріоритетності або значущості, визначаються потенційні потоки людей або транспорту (тобто “об’єктів”, що пересуваються залежно від призначення дорожньої мережі). Тобто кожна ланка дорожньої мережі матиме певну щільність та швидкість потоку. Слід зауважити, що сумарна кількість об’єктів, що задається на входах повинна бути рівною сумарній їх кількості на виходах.

Таким чином, умовою оптимізації дорожньої мережі приймається мінімальний загальний час руху всіх об’єктів по дорожній мережі з урахуванням характеристик розподілу потоків (2):

$$\sum_{j=1}^m t_{i,j} \rightarrow \min \quad (2)$$

де $t_{i,j}$ – умовний час, який є необхідним для проходження об’єкту по ланці між кожним i -м та кожним j -м (де $j = 1, 2, 3, \dots, m$) вузлами відповідно.

Для цього необхідно провести оптимізацію геометричних параметрів усіх ділянок заданої дорожньої мережі не порушуючи при цьому топологію самої геометричної моделі. Враховуючи, що геометричні параметри кожної ділянки доріг будуть визначатись на основі руху потоків об’єктів за одиницю часу із заданими характеристиками розподілу потоку, то параметри кожної ланки варто прийняти сталими. Відповідно тоді об’єкти, що рухатимуться по ланці дороги, матимуть середню швидкість потоку:

$$v_{i,j} = \frac{Q_{i,j}}{S_{i,j}}, \quad (3)$$

де $v_{i,j}$ – середня швидкість руху об’єктів по ланці дороги між i -м та j -м вузлами; $Q_{i,j}$ – щільність потоку об’єктів по ланці; $S_{i,j}$ – приведена площа перетину відповідної ланки, що виражається через її середню ширину (умовна висота перерізу приймається рівною 1).

Підставивши (3) в (2) з урахуванням того, що середня швидкість $v_{i,j}$ пересування об’єкту ланкою від i -го до j -го вузла є рівною відношенню довжини цієї ланки $\delta_{i,j}$ до часу необхідного для її подолання $t_{i,j}$, тобто $v_{i,j} = \delta_{i,j} / t_{i,j}$, отримаємо видозмінену умову мінімізації часу проходження об’єктів дорожньою мережею:

$$\sum_{j=1}^m t_{i,j} = \sum_{j=1}^m \frac{\delta_{i,j} \cdot S_{i,j}}{Q_{i,j}} \rightarrow \min, \quad (4)$$

Як зазначено в [8], з точки зору диференціального числення оптимізація геометричних параметрів геометричної моделі, пристосовуючи

до нашого випадку, дорожньої мережі має базуватись на пошуку екстремумів визначеної цільової функції (4). Відповідно враховуючи, що на різних ділянках дорожньої мережі будуть різні потоки об'єктів, доцільніше виконувати локальний аналіз заданої дискретної геометричної моделі у формі графа. Окрім цього в даній роботі рельєф місцевості нехтується і розглядається двовимірна задача формоутворення дорожньої мережі.

Для того, щоб забезпечити необхідну умову існування екстремуму локальної функції (4) для кожного i -го вузла необхідно щоб перші похідні по параметрам варіювання дорівнювали нулю:

$$\begin{cases} \partial \left(\sum_{j=1}^m \frac{\delta_{i,j} \cdot S_{i,j}}{Q_{i,j}} \right) / \partial x_i = 0; \\ \partial \left(\sum_{j=1}^m \frac{\delta_{i,j} \cdot S_{i,j}}{Q_{i,j}} \right) / \partial y_i = 0; \end{cases} \quad (5)$$

де $i = 1 \dots n, j = 1 \dots k; k$ – кількість вільних вузлів з множини m .

В результаті диференціювання системи (5) та необхідних спрощень і перетворень [9] отримаємо систему рівнянь (6):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m (x_i - x_j) \cdot \frac{S_{i,j}}{Q_{i,j}} \cdot \frac{1}{\delta_{i,j}} = 0; \\ \sum_{j=1}^m (y_i - y_j) \cdot \frac{S_{i,j}}{Q_{i,j}} \cdot \frac{1}{\delta_{i,j}} = 0; \end{cases} \quad (6)$$

Для проведення ітераційного процесу розрахунку введено тимчасову змінну:

$$K_{i,j} = \frac{1}{\delta_{i,j}} \cdot \frac{S_{i,j}}{Q_{i,j}} \quad (7)$$

Тоді рівняння рівноваги вузла приймає вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m (x_j - x_i) / K_{i,j} = 0; \\ \sum_{j=1}^m (y_j - y_i) / K_{i,j} = 0; \end{cases} \quad (8)$$

Розв'язання системи рівнянь (8) відносно координат кожного i -го вузла дасть змогу визначити оптимальне положення всіх вільних вузлів, що передбачає побудову мережі доріг з виконанням умови мінімізації часу проходження окремими її ланками.

Висновки та перспективи. Запропонований у роботі підхід до оптимізації проектних рішень дорожніх мереж за рахунок мінімізації часу переміщення між вузлами на основі побудови інтерпретаційної геометричної моделі є початковим етапом дослідження та має ряд спрощень, а також не враховує фактори впливу, що можуть бути наявні в реальних неідеалізованих умовах.

Наступним кроком дослідження є розробка алгоритму комп'ютерного програмування та побудова розрахункової геометричної моделі на прикладі дорожньої мережі із заданими параметрами та вихідними даними. Іншим напрямом дослідження є розробка геометричних моделей мереж доріг із

урахуванням наявних зовнішніх умов та особливостей топографічного рельєфу місцевості.

Окрім цього важливим напрямком розширення дослідження є адаптація запропонованого підходу для різних типів дорожніх мереж з різним функціональним призначенням та характеристиками потокорозподілу як для пішохідних доріжок, так і транспортних логістичних мереж.

Література

1. *Jabbari M.* The Pedestrian Network Concept: A Systematic Literature Review / *Jabbari M., Fonseca F., Smith G., Conticelli E., Tondelli S., Ribeiro P., Ahmadi Z., Papageorgiou G., Ramos R.* // Journal of Urban Mobility. Volume 3, Dec. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2023.100051>
2. *Kuspekov K. A.* Optimization geometric models of transport network tracing used in city planning. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVIII-5/W2-2023, С. 63-69. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W2-2023-63-2023>
3. *Саєнко С. М.* Оптимізація громадського простору з метою мінімізації рівня небезпеки при критичних ситуаціях / *Саєнко С. М., Скочко В. І.* // Conference proceedings International Scientific- Practical Conference of Young Scientist «Build-Master-Class-2023», КНУБА, 2023, – С. 55-56.
4. *Ковалёв С. Н.* Формирование дискретных моделей поверхностей пространственных архитектурных конструкций. Дис. ... доктора техн. наук. 05.01.01. М. : МАИ, 1986. – 348 с.
5. *Ботвіновська С. І.* Теоретичні основи формоутворення в дискретному моделюванні об'єктів архітектури та дизайну. дис. ... доктора техн. наук. 05.01.01. К. : КНУБА, 2018. – 526 с.
6. *Скочко В. І.* Методи інтерпретаційного геометричного моделювання сітчастих структур та їх застосування. Дис. ... доктора техн. наук : 05.01.01. К. : КНУБА, 2021. – 590 с.
7. *Орел Ю. М.* Геометричне моделювання оптимальної траєкторії прокладання трубопроводу ефективних систем водопостачання / *Ю. М. Орел* // Містобудування та територіальне планування, (74), КНУБА, 2020, – С. 232–246. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2020.74.232-246>
8. *Скочко В.І.* Скорочення тепловтрат систем теплопостачання шляхом оптимізації їх геометричних моделей при проектуванні / *В.І. Скочко, В.О. Плоский, А.Д. Гегер, Л.О. Скочко* // Наук. тех. журн.: Енергоефективність в будівництві та архітектурі. Вип. 10. КНУБА, 2018. – С. 15-28. <https://doi.org/10.32347/2310-0516.2018.10.15-28>
9. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике для инж. и учащихся вузов. 1980. – 976.

References

1. *Jabbari M.* The Pedestrian Network Concept: A Systematic Literature Review / *Jabbari M., Fonseca F., Smith G., Conticelli E., Tondelli S., Ribeiro P., Ahmadi Z., Papageorgiou G., Ramos R.* // Journal of Urban Mobility. Volume 3, Dec. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2023.100051>
2. *Kuspekov K. A.* Optimization geometric models of transport network tracing used in city planning. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVIII-5/W2-2023, S. 63-69. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W2-2023-63-2023>
3. *Saienko S. M.* Optymizatsiia hromadskoho prostoru z metoiu minimizatsii rivnia nebezpeky pry krytychnykh sytuatsiakh / *Saienko S. M., Skochko V. I.* // Sonference proceedings International Scientific-Practical Conference of Young Scientist «Build-Master-Class-2023», KNUCA, 2023, – pp. 55-56.
4. *Kovalëv S. N.* Formyrovanye diskretnykh modelei poverkhnostei prostranstvennykh arkhytekturnykh konstruktsyi. Dissertation of ScD in Tech.: 05.01.01. M. : MAI, 1986. – 348 p.
5. *Botvinovska S. I.* Teoretychni osnovy formoutvorennia v diskretnomu modeliuvanni obiektiv arkhytektury ta dyzainu. Dissertation of ScD in Tech.: 05.01.01. K. : KNUCA, 2018. – 526 p.
6. *Skochko V. I.* Metody interpretatsiinoho heometrychnoho modeliuvannia sitchastykh struktur ta yikh zastosuvannia. Dissertation of ScD in Tech.: 05.01.01. K. : KNUCA, 2021. – 590 p.
7. *Orel Yu. M.* Heometrychne modeliuvannia optymalnoi traiektorii prokladannia truboprovodu efektyvnykh system vodopostachannia / Yu. M. Orel // *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, (74), KNUCA, 2020, – pp. 232–246. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2020.74.232-246>
8. *Skochko V.I.* Skorochennia teplovtrat system teplopstachannia shliakhom optymizatsii yikh heometrychnykh modelei pry proektuvanni / *V.I. Skochko, V.O. Ploskyi, A.D. Heher, L.O. Skochko* // Sci. And tech. journal: *Energy-efficiency in civil engineering and architecture*. Issue. 10. KNUCA, 2018. – pp. 15-28. <https://doi.org/10.32347/2310-0516.2018.10.15-28>
6. *Bronshtein Y. N., Semendiaev K. A.* Spravochnyk po matematyke dlia inzheneriv i uchashchykhsia vuzov. 1980. – 976 p.

Serhii Saienko,

saienkosm@gmail.com , ORCID : 0009-0002-2486-5503

Doctor of Technical Sciences, Professor **Volodymyr Skochko,**
vladimir.and.friends@gmail.com, ORCID : 0000-0002-1709-2621

Ph.D. **Roman Pasko,**

roman.pasko@kndise.gov.ua, ORCID :0000-0002-3313-0368

Doctor of Technical Sciences, Professor **Vitalii Ploskyi,**

ploskyivo@ukr.net, ORCID : 0000-0002-2632-8085

Kyivskyi National University of Construction and Architecture

GEOMETRIC MODELING OF PEDESTRIAN AND TRANSPORTATION NETWORKS WITH MINIMUM MOVING TIME BETWEEN NODES

This work is devoted to the consideration of the topical issue of the development of transport and pedestrian networks based on the use of discrete geometric modeling methods. In scientific literature, the main direction of research is the so-called "transport problem", which consists in finding the optimal route for the already existing road system, as well as the analysis of transport networks in the context of optimal planning of cities and settlements based on the minimization of the path length. However, approaches that would be based on the criterion of minimizing travel time between road network nodes are not covered. The article proposes an interpretative approach to representing the road network as a geometric model in the form of an unordered discrete graph. The main criterion for the optimization of design solutions is the condition of minimum total moving time of «objects», which, depending on the initial data, may reflect the movement of pedestrians or vehicles through the road network. Application of the proposed approach, for example, makes it possible to develop optimal trajectories (routes) for the movement of visitors to parks or public spaces based on the criterion of minimizing the time it takes them to reach shelters during air raids. Another example is the development of logistics routes for the supply or transportation of items of various purposes on the territory of technological parks, industrial complexes, as well as military logistics tasks. The design of road networks optimized under the condition of reducing the moving time between nodes will reduce the impact on the environment, increase mobility and comfort for the population, including an increase in the level of safety, as a result. The further direction of research is the consideration of additional factors and the implementation of the approach in the software environment.

Keywords: transport and pedestrian networks, geometric modeling, disordered graph, optimization, minimization, moving time.