

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерства освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

Чернишова Олена Сергіївна

УДК 656.183

ДИСЕРТАЦІЯ

**ФОРМУВАННЯ МЕРЕЖІ ВЕЛОСИПЕДНОГО ТРАНСПОРТУ В МІСТАХ
З НИЗЬКИМ РІВНЕМ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ**

05.22.01 – Транспортні системи

27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела

_____ О.С. Чернишова

Науковий керівник Горбачов Петро Федорович, д.т.н., професор

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Чернишова О. С. Формування мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем його використання. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.01 «Транспортні системи» (275 – Транспортні технології (на автомобільному транспорті)). – Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України, Харків, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної задачі формування мережі велосипедного транспорту, заснованій на моделі вибору шляху руху велосипедистами при пересуванні у транспортній мережі в містах з низьким рівнем використання велосипеда та нерозвиненою велосипедною мережею.

Управління містами повинно задовольняти існуючі потреби населення та реалізовувати стратегічну політику розвитку міста, яка покращить якість життя в довгостроковій перспективі. Розвиток велосипедної мережі сприяє більш ефективному використанню міського простору, покращенню здоров'я населення та зменшенню впливу транспорту на навколишнє середовище. Планування велосипедної інфраструктури в містах з низькою кількістю велосипедних поїздок може бути ускладнено через відсутність інформації про найбільш бажані маршрути. Це стає ще більш важливим, якщо наявні ресурси для розвитку інфраструктури обмежені. Метою цієї роботи є надання управлінцям міста керівних принципів і практичних інструментів для планування велосипедної інфраструктури в містах з низьким рівнем використання велосипедного транспорту і за відсутності інфраструктури.

У роботі розглянуто проблему планування мережі велосипедного транспорту в містах з низькою часткою велосипедних поїздок, розроблено принципи фо-

рмування мережі маршрутів і запропоновано використання підходу до планування мережі велосипедного транспорту на основі результатів моделювання. Відповідно до особливостей пересування велосипедом обґрунтовано велосипедна мережа має плануватися відповідно до ключових принципів, а саме забезпечення максимальної прямолінійності шляхів пролягання маршруту; забезпечення зв'язності мережі, яка характеризується можливістю реалізувати поїздку без необхідності переходу до інших форм пересування; орієнтованість на мету поїздки і типи користувачів, яка реалізується за рахунок комбінації форм організації руху і виділення різних рівнів ієрархії мережі; врахування рівня фізичної роботи, необхідної для реалізації поїздки за рахунок вибору шляху проходження велосипедного маршруту і інтеграції з громадським транспортом; забезпечення безпеки руху велосипедиста; організація доступності мережі для велосипедистів у безпосередній близькості до об'єктів тяжіння та максимізація ефективності створення фрагменту веломережі за рахунок її пріоритизації.

В умовах, коли наявні велосипедні потоки занадто малі, щоб визначити бажані маршрути, пропонується використовувати модель транспортного прогнозу, яка базується на потенційно можливому, а не наявному попиті. Застосування чотирьохетапної транспортної моделі дозволило отримати матрицю велосипедних кореспонденцій за рахунок формування матриці загальних кореспонденцій та застосування до неї функції розподілу велосипедних поїздок за відстанню. Транспортне мікрорайонування виконано за спеціально розробленим алгоритмом автоматизованого виділення однорідних територій, який дозволяє враховувати особливості пересування велосипедом. З метою врахування порогу прийняття рішення велосипедиста про дальність поїздки використане обмеження по розміру транспортного району відповідно до точки вгнутості щільності розподілу поїздок за відстанню. Дослідження функції розподілу для м. Харків показали, що поїздки розподілені за нормальним законом в межах від 2 км до 20 км, середня відстань поїздки $\bar{x}=8,42$ км, дисперсія $D[\bar{x}] = 17,89$. В результаті здійснення відповідних операцій було отримано матриці велосипедних кореспонденцій, що дозволило перейти до етапу розподілення поїздок мережею.

Задля реалізації етапу розподілення було сформовано теоретичну модель вибору маршруту руху велосипедистами. Рациональність використання велосипедного транспорту обмежена тим, що велосипед приводиться у рух фізичною силою людини, і тому розподіл транспортних кореспонденцій велосипедного транспорту обмежений певними межами. Таким чином, можна припустити, що корисність шляху руху для велосипедистів не є лінійною функцією відстані, а залежить від сукупності характеристик вулично-дорожньої мережі (ВДМ). Оскільки велосипедисти більш чуттєві до статичних характеристик ВДМ, ніж до динамічних, їм властиво повторно обирати маршрут, який відповідає у певній мірі оптимальному. Тому доцільно вважати, що ймовірність вибору шляху руху реалізації утилітарних поїздок велосипедистом може бути описано мультиноміальною логіт-моделлю дискретного вибору, де ймовірність вибору визначається на основі корисності поїздки (U_{in}) альтернативи i для велосипедиста n . Корисність поїздки, в свою чергу, є лінійною функцією властивостей альтернативи x_{in} та випадкової складової ε_{in} .

На основі дослідження літературних джерел та глибинних інтерв'ю з велосипедистами було виділено основні категорії факторів вибору шляху руху: безпека, комфорт та фізична складність пересування. Кількісна оцінка факторів була здійснена за рахунок геокодування параметрів вулично-дорожньої мережі: довжина маршруту, кількість поворотів і лівих поворотів, щільність паркування, кількість світлофорів, категорія дороги, швидкість транспортного потоку і фізичного зусилля, необхідного при русі на велосипеді. Для формалізації показника фізичного навантаження (накопиченого зусилля) було отримано кількісну оцінку фізичної роботи при русі на велосипеді, яка враховує розподіл фізичних сил при русі на велосипеді в залежності від дорожніх умов.

З метою збору фактичної інформації про шлях пересування запропоновано використовувати дані геопозиціонування маршрута зібрані за допомогою GPS трекінгу руху велосипедистів. З метою уникнення упередженості, що виникає при фіксації висловлених вподобань в умовах, коли учасники не мають досвіду

стосовно предмета дослідження, було розроблено методику збору даних, про виявленні вподобання велосипедистів за допомогою мобільних додатків з фіксацією GPS координат. Регресійний аналіз залежності добового розподілу велосипедних поїздок у просторі на основі даних зібраних за розробленою методикою показав, що вона може використовуватися для оцінки виявленого попиту на велосипедний транспорт ($r = 0,86$, $r^2 = 0,73$) і створює надійну основу для розподілу велосипедних потоків по мережі.

Для оцінки параметрів функції корисності шляху руху для кожного фактичного маршруту було сформовано п'ять альтернативних маршрутів. Мультиномінальна логіт-модель вимагає, щоб альтернативи не були подібними, а похибки не корелювали. Для подолання подібності альтернативи був застосований алгоритм генерації альтернатив, заснований на штрафуванні сегментів мережі.

На основі експериментальних досліджень в м. Харкові виявлено, що найбільш статистично значущими факторами моделі вибору маршруту є довжина маршруту, кількість поворотів та категорія дороги. Фізична складність маршруту є статистично значущим фактором за умови, що довжина маршруту не враховується через те, що ці два фактори мають високий рівень кореляції один з одним. Проведено порівняльний аналіз чотирьох моделей розподілу велосипедних поїздок мережею, який показав, що найбільш прийнятною є модель, яка враховує відстань, категорію дороги, кількість поворотів та фізичну складність маршруту ($r = 0,63$, без калібрування). Можна припустити, що реалізовувати велосипедну інфраструктуру доцільно шляхами, які є найбільш привабливими для велосипедистів, та у пріоритетності, що відповідає максимізації корисності шляху, яка представлена кількістю потенційних велосипедистів, що можуть пересуватися даним шляхом. Отримані результати надали кількісну оцінку потенційних велосипедних потоків для визначення ієрархії маршрутів велосипедної мережі та пріоритетності її розбудови.

На основі результатів роботи розроблені практичні рекомендації для представників органів міської адміністрації або транспортних планувальників, які

займаються питанням створення комплексної велосипедної мережі. Запропонована і обґрунтована послідовність створення мережі велосипедного транспорту.

Запропонована концепція розвитку велосипедної інфраструктури та метод визначення пріоритетів дозволила розробити велосипедну мережу для міст з низькою часткою велосипедних поїздок, поїздок, що максимізують ефективність її реалізації. Передбачається, що реалізація мережі основних маршрутів у Харкові забезпечить доступ до велосипедної інфраструктури 359,5 тис. жителів, з яких 149,5 тис. осіб є потенційними велосипедистами. Загальна вартість реалізації мережі основних маршрутів становить 166,174 млн грн, що дорівнює 114,6 грн на одного мешканця міста або 1111 грн на одного потенційного споживача.

Результати дослідження мають практичне значення, що підтверджено актами впровадження розроблених у роботі методик при формуванні Концепції розвитку велосипедного руху і розбудови велосипедної інфраструктури м. Харків, Концепції розвитку велосипедної інфраструктури м. Полтава на 2016–2020 рр. та Плану сталої міської мобільності м. Житомир.

Ключові слова: велосипед, мережа велосипедного транспорту, модель вибору шляху пересування, маршрут, ймовірність вибору, корисність шляху, моделювання.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Токмиленко Е.С. Влияние вертикального профиля дороги на затраты энергии при движении на велосипеде / Е.С. Токмиленко, П.Ф. Горбачёв // Містобудування та територіальне планування. – К., КНУБА, 2012. – Вип. 45, в 3 частинах. – ч. 3. – С. 141–145.

2. Горбачёв П.Ф. Модель выбора маршрута велосипедного транспорта с целью минимизации времени в пути / П.Ф. Горбачёв, Е.С. Токмиленко // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету – 2013. – № 61-62. – С. 218–222.

3. Горбачёв П.Ф. Топографическая модель условий движения велосипедного транспорта в центральной части г. Харькова / П.Ф. Горбачёв,

Е.С. Токмиленко, С.В. Козлов // Автомобільний транспорт. – Харків – 2014. – Вип. 34. – С. 79-82.

4. Чернишова О.С. Мультиномінальна логіт модель вибору шляху велосипедистами // Автомобільний транспорт. – Харків – 2016. – Вип. – 38. – С. 21-25

5. Чернышева Е.С. Алгоритм автоматизированного микрорайонирования при моделировании транспортных систем // Комунальне господарство міст. – Х.: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. – 2016. – Вип.130. – С. 76-80.

6. Любий Є.В. Транспортне планування міст: сучасні інструменти транспортного моделювання автотранспортних систем / Є.В. Любий, Н.В. Пономарьова, О.С. Чернишова // Комунальне господарство міст. – Х.: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2016. – Вип. 128. – С. 76 – 82.

7. Lissner, S. Cycling Data App Data – An Exploratory Data Analysis of GPS Data in Cycling / S. Lissner, A. Francke, O. Chernyshova, T. Becker. // International Transportation (69) – 2017. – no. 1 – P. 48-52.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Tokmylenko O. New approach to bicycle infrastructure planning. Collection of scientific works. Innovative technologies and perspective in development of transportation, automotive and road construction industries (in foreign languages). – Kharkov. – 2013. – P.120-123

9. Токмиленко Е.С. Планирование велосипедной инфраструктуры для обеспечения безопасности и комфорта движения / Токмиленко Е.С., Горбачев П.Ф. // Матеріали 3-ї міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорта і культури дорожнього руху» – Харків: ХНАДУ. – 2013. – С. 196-197

10. Tokmylenko O.S. Methods of bicycle users' survey // Міжнародна конференція молодих вчених Інженерна механіка та транспорт. – Львів: Національний університет «Львівська Політехніка». – 2013. – С.111 - 112

11. Tokmylenko O. Review of the Factors that Affect Motivation to Bicycle / O. Tokmylenko, A. Yakovlev // Integration processes and innovative technologies.

Achievements and prospects of engineering sciences (in foreign languages): Collections of Scientific Works. Kharkiv: KhNAHU. – 2014. – issue 3. – P. 102 – 104

12. Горбачов П.Ф. Формування набору альтернатив моделей дискретного вибору шляху прямування велосипедним транспортом / Горбачов П.Ф., Чернишова О.С. // Наукові праці міжнародної науково-практичної конференції «Новітні технології в автомобілебудівництві на транспорті», 15-16 жовтня 2015 р. – Х.: ХНАДУ. – 2015. – С. 68 – 69.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

13. А.с. Методика визначення привабливості маршрутів велосипедного транспорту / О.С. Чернишова (Україна). – № 66185; зареєстровано 21.06.2016.

ABSTRACT

Chernyshova Olena Sergiivna. Development of cycling network in cities with low level of cycling. – Manuscript.

Thesis for a candidate degree (PhD) in specialty 05.22.01 "Transport Systems" (275 – Transportation technology (for automobile transport)). – Kharkiv National Automobile and Highway University Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The dissertation is devoted to solving the scientific and practical problem of developing cycling network, based on a of route choice model for cities with low share of cycling trips in modal split within conditions of undeveloped cycling network.

Urban management must satisfy the existing needs of the population and implement a strategic city development policy that will improve the quality of life in long-term perspective. The development of the bicycle network contributes to more efficient use of urban space, improvement of public health, and reducing impact of transportation on environment. Planning cycling infrastructure in cities with low number of cyclists can be complicated due to lack of information on most preferable routes. It becomes even more important if resources available for infrastructure development are limited. The purpose of this work is to provide a planner with guiding principles and

practical tools for planning cycling infrastructure in cities with poor cycling and no or little infrastructure.

The work reviews the challenge of planning cycling network in the cities with a low share of cycling in modal split. There are principles of cycling network development is proposed to plan cycling network based on modeling results. Considering characteristics of cycling as transport mode the network has to be planned in accordance with the key principles, namely ensuring the maximum straightforwardness of route routes; providing network connectivity, which is characterized by the opportunity to travel without the need to switch to other forms of travel; orientation on the purpose of the trip and types of users, which is realized via a combination of traffic management solutions and the allocation of different levels of network hierarchy; taking into account the level of physical effort required to complete the trip by locating cycling route appropriately and integrating cycling with public transport; ensuring the safety of cyclist movement; organization of network accessibility for cyclists in the immediate vicinity of objects of attraction and maximization of the effectiveness of creation of a section of the network through its prioritization.

In conditions, when current cycling flows are too little to identify desirable routes, it is proposed to use transport forecast model, which is based on potential rather than existing demand. The application of the four-step modeling approach allowed to obtain the cycling trip matrix by estimating the general trip matrix and applying the function of distribution of cycling trips over a distance. Traffic analysis zones for the model has been developed by a special algorithm based on analysis of homogeneous territories, which allows considering characteristics of cycling. The traffic zones size is restricted by threshold of distance that cyclists are willing to travel, which were identified empirically. Studies for the city of Kharkiv showed that the trips are distributed normally in the range from 2 km to 20 km, the average trip distance $\bar{x} = 8,42$ km, the dispersion $D[\bar{x}] = 17,89$. As a result of estimations trip matrices for cycling were received, which allowed to proceed to the traffic assignment stage.

In order to conduct traffic assignment, the theoretical model for route choice was developed.

The rationality to use bicycle as a transport mode is limited by the fact that the bike is driven by human physical power, and therefore the distribution of cycling trips is limited to certain limits. Thus, it can be assumed that utility of cycling trip is not a linear function of distance but depends on the set of road network characteristics. Since cyclists are more sensitive to the static characteristics of road network than dynamic ones, they tend to repeatedly select the route that to some extent is optimal for them. Therefore, it is reasonable to assume that the probability of choosing the path to complete commuting trip by cyclist can be described by the multinomial logit model of discrete choice where the probability of choice is determined based on the utility of the trip (U_{in}) of the alternative i for the cyclist n . The utility of the trip in fact is a linear function of the properties of the alternative x_{in} and random variable ε_{in} .

Based on literature review and in-depth interviews of cyclists there were following categories of route choice factors identified: travel safety, comfort, and physical effort of cycling. Quantitative assessment of the factors was made by geocoding the parameters of the road network, such as, length of the route, number of turns and left turns, parking density, number of traffic lights, road category, speed of the traffic flow and physical effort required for cycling. Considering the distribution of physical forces needed to ride a bicycle in existing road conditions, allowed to obtain a quantitative estimate of physical work required to cycle, which was integrated into the route choice model.

In order to collect factual data on cyclists routes it was proposed to use geolocation data collected by GPS tracking. In order to avoid bias that appear when collecting stated preferences in conditions when participant do not have experience regarding the subject of the research, the revealed preferences data collection method with GPS tracking was proposed. The regression analysis of spatial distribution of cycling trips based on the data collected according to the developed method showed that it can be used to estimate the revealed demand for cycling ($r = 0,86$, $r^2 = 0,73$) and creates a reliable basis for estimating cycling flows assignment.

In order to estimate the parameters of the utility function there were five route alternatives generated for each observed route. Multinomial logit model requires that

alternatives independency. In order to avoid similarity of the alternatives were generated using a link penalty method.

The application of the model to Kharkiv revealed that the most significant factors of the route choice model is the length of the route, the number of turns and the category of road. The physical work required to cycle is a statistically significant factor, provided that the length of the route is not considered, because of multicollinearity. A comparative analysis of four assignment models has shown that the most precise is the model that includes the distance, road category, the number of turns and the physical work ($r = 0.63$ without calibration). It can be assumed that cycling infrastructure should be built over the routes, which are the most attractive for cyclists, and in the order that maximize the route utility, which is represented by the number of potential cyclists who can ride along the route.

The results of the research provided with a quantitative estimate of potential bicycling flows that allow to determine the hierarchy of bicycle network routes and priority for its development. Based on the lessons learned from the research the practical recommendations were developed for city administration or transport planners dealing with the development of a comprehensive bicycle network. Logical order of cycling network development was proposed.

The proposed concept for development of cycling infrastructure and prioritization method allowed to draft a cycling network for cities with low share of cycling, trips maximizing the effectiveness of its implementation. It is estimated that implementation of the network of main routes in Kharkiv will provide access to cycling infrastructure to 359.5 thousand residents, of which 149.5 thousand people are potential bicyclists. The total cost of main routes implementation is 166,174 million UAH, which equals 114.6 UAH per city resident or 1111 UAH per potential user.

The results of the research were used to develop the Concept for cycling development and cycling infrastructure construction of Kharkiv, the Concept of cycling infrastructure development of Poltava for 2016-2020, and Sustainable Urban Mobility Plan of Zhytomyr.

Key words: bicycle, bicycling network, route choice model, route, probability of choice, route utility, modeling.

List of candidate's publications

Scientific papers in which the main scientific results of the thesis are published:

1. Tokmylenko E.S. Influence of the vertical profile of the road on energy consumption while cycling / E.S. Tokmylenko, P.F. Gorbachev // *Municipal Construction and Territorial Planning*. – K., KNUBA. – 2012. – Vol. 45, in 3 parts. – Part 3. – p. 141-145.
2. Gorbachev P.F. Bicycling route choice model with a purpose to minimize travel time / P.F. Gorbachev, E.S. Tokmylenko // *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University* – 2013. - No. 61-62. - P. 218-222.
3. Gorbachev P.F. Topographic model of bicycling traffic conditions in the center of Kharkiv / P.F. Gorbachev, E.S. Tokmylenko, SV Kozlov // *Automobile transport*. – Kharkiv. – 2014. – Vol. 34. – p. 79-82.
4. Chernyshova O.S. Multinomial logit model of bicyclist route choice // *Automobile transport*. – Kharkiv – 2016. – Vol. 38 – p. 21-25
5. Chernyshova E.S. Automated process of generating traffic analysis zones during modeling transport system // *Municipal economy of cities. Series: «Engineering science and architecture»*. – Kharkiv – 2016. – Vol.130 – p. 76-80
6. Liubiyi Ye.V. Urban transportation planning: current instruments modeling of motor transport systems / E.V. Liubiyi, N.V. Ponomareva, O.S. Chernyshova // *Municipal economy of cities. Series: «Engineering science and architecture»*. – Kharkiv – 2016. – Vol.128 – p. 76-82
7. Lissner, S. Cycling Data App Data – An Exploratory Data Analysis of GPS Data in Cycling / S. Lissner, A. Francke, O. Chernyshova, T. Becker. // *International Transportation* 69. – 2017. – no. 1 – p.48-52.

Scientific works certifying the testing of the dissertation materials:

8. Tokmylenko O. New approach to bicycle infrastructure planning. Collection of scientific works. Innovative technologies and perspective in development of

transportation, automotive and road construction industries (in foreign languages).
Kharkov. – 2013. p.120-123

9. Tokmylenko E.S. Planning of cycling infrastructure for safety and comfort of movement / Tokmylenko E.S., Gorbachev P.F. // Materials of the 3rd international scientific and practical conference "Problems of raising the level of road safety, comfort and road culture ". Kharkiv: KhNADU. – 2013. – p. 196-197

10. Tokmylenko O.S. Methods of bicycle users survey // International Conference of Young Scientists, Engineering Mechanics and Transport. - Lviv: National University "Lviv Polytechnic". – 2013. – p.111 – 112

11. Tokmylenko O. Review of the Factors that Affect Motivation to Bicycle / O. Tokmylenko, A. Yakovlev // Integration processes and innovative technologies. Achievements and prospects of engineering sciences (in foreign languages): Collections of Scientific Works. KhNAHU. – Kharkiv. – 2014. – issue 3. – p. 102 – 104

12. Gorbachev P.F. Development of a set of alternatives for cycling route choice discrete models / Gorbachev PF, Chernyshova O.S. // Scientific papers of the international scientific-practical conference "New technologies in automotive construction in transport", October 15-16. X.: XHAДY. – 2015. – p. 68 - 69.

Scientific works, which additionally reflect the scientific results of the dissertation:

10. C.A. Method of determining the attractiveness of cycling routes / O.S. Chernyshova (Ukraine). - No. 66185; listed on 21/06/2016.

ЗМІСТ

Анотація	2
Перелік умовних скорочень	16
Вступ.....	17
Розділ 1 Аналіз наявних підходів до планування велоінфраструктури в містах	23
1.1 Наявні підходи до планування велосипедної інфраструктури в містах	24
1.2 Інструменти формування велосипедної мережі.....	37
1.3 Мета і постановка задачі дослідження.....	51
Висновки до першого розділу.....	54
Розділ 2 Формування теоретичної моделі планування велоінфраструктури в містах	56
2.1 Розробка принципів планування мережі велосипедного транспорту.....	56
2.2 Теоретичні основи формування моделі попиту на велосипедні поїздки	65
2.3 Формування теоретичних основ визначення оптимальної траси маршруту руху	77
2.4 Обґрунтування методики дослідження фактичного вибору маршруту велосипедистами	85
Висновки по другому розділу	90
Розділ 3 Експериментальні дослідження системи велосипедного транспорту в м. Харків	92
3.1 Характеристика об'єкту проведення експериментальних досліджень	92
3.2 Експериментальні дослідження попиту на велосипедний транспорт	95
3.3 Експериментальні дослідження маршрутів руху велосипедистів по вулично-дорожньої мережі м. Харкова	107

3.4 Визначення математичного виду функції привабливості шляху проходження і ймовірності його вибору	124
Висновки по третьому розділу.....	129
Розділ 4 Практична реалізація процесу формування мережі велосипедного транспорту.....	131
4.1 Аналіз велосипедних потоків і організації мережі велосипедних маршрутів	131
4.2 Визначення пріоритетності розвитку велосипедної мережі в міському середовищі	138
4.3 Розробка практичних рекомендацій.....	151
Висновки по четвертому розділу.....	154
Висновки	156
Список використаних джерел	159
Додаток А Інформація про кількість зареєстрованих виборців	176
Додаток Б Характеристики транспортних районів.....	185
Додаток В Графічне відображення послідовності дій процесу моделювання .	191
Додаток Г Програмний код для розрахунку мультиномінальної логіт моделі	193
Додаток Д Акти впровадження результатів дослідження	196
Додаток Е Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	204

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

GPS – geo-positioning system (система географічного позиціонування)

ВД – виборчі ділянки

ВДМ – вулично-дорожня мережа

ВІ – інфраструктура велосипедного транспорту

ВМ – мережа велосипедного транспорту

ВТ – велосипедний транспорт

ГІС – гео-інформаційні системи

ГТ – громадський транспорт

ДБН – Державні будівельні норми

ІПВ – індекс придатності велоруху

МК – матриця кореспонденцій

НДР – науково-дослідна робота

ПДД – Правила дорожнього руху

ПЗ – програмне забезпечення

США – Сполученні штати Америки

ТР – транспортний район

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Велосипедний транспорт є одним із найефективніших видів транспорту з точки зору використання міського простору та енергоресурсів, не спричиняє прямого впливу на навколишнє середовище і позитивно впливає на фізичний та емоційний стан його користувачів. Станом на 2018 рік понад 25 міст України затвердили нормативні документи (концепцію або програму), що регламентують стратегію розвитку велосипедного руху. Більшість концепцій мають на меті розвиток велосипедного руху, розбудову велосипедної інфраструктури, поширення культури використання велосипеда, як міського транспортного засобу та підвищення безпеки велосипедистів [1-13]. У більш широкому сенсі, концепція або стратегія розвитку велосипедного транспорту має містити принципи його розвитку та практичні кроки для розбудови велосипедної інфраструктури (ВІ). На даний момент в Україні не існує рекомендацій або нормативних документів щодо комплексного планування велосипедної мережі (ВМ), а це призводить до того, що ініціатива розвитку велосипедної інфраструктури залишається без уваги або реалізується хаотично і не має комплексного характеру.

Таким чином, розробка механізму розбудови велосипедної мережі є актуальним напрямом досліджень, результати якого дозволять ефективніше реалізувати міські цільові програми розвитку велосипедного транспорту та розробляти плани транспортної мережі, які відповідають вимогам державних будівельних норм і потребам користувачів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Задача просування зелених видів транспорту та розвиток велосипедного транспорту у містах зазначена у пріоритетному напрямі 4 «Безперешкодна мобільність та міжрегіональна інтеграція» Транспортної стратегії України на період до 2030 року, затвердженій постановою Кабінету Міністрів України (КМУ) №430-р від

30.05.2018 р.. Зниження викидів шкідливих речовин, збереження, захист, поліпшення і відновлення якості повітря, зниження шумового забруднення міського середовища та охорона здоров'я людини є умовами «Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони», що ратифіковано згідно Закону України № 1678-VII від 16.09.2014 «Про ратифікацію Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони». Доцільність урахування велосипедного транспорту при плануванні та забезпечення злагожденості всіх видів транспорту, в тому числі велосипедистів, також зазначена у Лейпцизькій хартії сталого європейського міста [14]. Вимога щодо врахування велосипедного руху при плануванні міської мобільності та при проектуванні міської інфраструктури визначено Генеральною дирекцією з питань пересування та транспорту Європейської комісії [15].

Запропоновані у роботі методики дослідження попиту на пересування велосипедним транспортом та визначення привабливості маршрутів велосипедного руху були використані при виконанні науково-дослідної роботи (НДР) «Інтервальна технологія проектування транспортних систем міст та регіонів», № держреєстрації 0115U003268, методика мікрорайонування – у НДР «Визначення потреб населення міста Суми у пересуваннях громадським транспортом та розрахунок параметрів функціонування схеми руху маршрутів зі змінами», № держреєстрації 0116U003918, та методика геокодування даних – у НДР «Провести дослідження та виконати прогнозування автотранспортних потоків на мережі автомобільних доріг загального користування державного значення», № держреєстрації 0114U004631.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності створення та розвитку мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем використання велосипедного транспорту. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз наявних принципів та методів планування велосипедної мережі;
- обґрунтувати теоретичну модель попиту на поїздки велосипедним транспортом;
- сформулювати теоретичні основи визначення раціональної траси маршруту руху велосипедиста;
- розробити методику збору даних в містах з малою часткою виявленого попиту на велосипедний транспорт;
- провести моделювання функціонування велосипедного транспорту в м. Харків;
- визначити вид функції корисності шляху руху велосипедиста;
- розробити методику планування мережі інфраструктури велосипедного транспорту та здійснити її практичне застосування.

Об'єкт дослідження – процес формування мережі велосипедної інфраструктури у містах з низьким рівнем його використання.

Предмет дослідження – вплив характеристик вулично-дорожньої мережі міста на планування інфраструктури велосипедного транспорту.

Методи дослідження. Під час вивчення наявних підходів і інструментів планування велоінфраструктури були використані аналіз, дедуктивний метод та метод кейс-стаді. Для обґрунтування теоретичної моделі попиту на пересування велосипедом використовувалися методи теорії ймовірностей та математичної статистики, гіпотетичний та індуктивний методи. При оцінці параметра накопиченого зусилля велосипедиста застосовувалися закони механіки, формалізація, порівняння, комп'ютерне моделювання. Для розробки теоретичних основ визначення оптимальної траси маршруту руху велосипедиста використовувались аналітичне моделювання та моделі дискретного вибору.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що

- *вперше отримано* кількісну оцінку фізичної роботи при русі на велосипеді та встановлено її вплив на вибір шляху руху, що на відміну від існуючих методів дозволило врахувати її в моделі вибору велосипедистом шляху поїздки;

- *удосконалені* методи визначення швидкості руху велосипедиста, що на відміну від існуючих враховує фізичне навантаження при русі на велосипеді;
- *дістали подальший розвиток* моделі формування попиту на пересування в місті шляхом врахування просторових закономірностей використання велосипедного транспорту.

Практичне значення результатів дослідження обумовлюється розробленою методикою визначення фізичної складності шляху при русі на велосипеді; сформованим та реалізованим автоматизованим алгоритмом визначення місткості транспортних районів на основі їх просторових характеристик та геокодування шляху руху велосипедистів, отриманих за допомогою GPS трекера.

Отримані результати були використані при:

- розробці Плану сталої міської мобільності м. Житомира;
- розробці концепції розвитку велосипедного руху і розбудови велосипедної інфраструктури м. Харкова;
- формуванні схеми мережі маршрутів велосипедного транспорту м. Полтава;
- у навчальному процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) під час навчання студентів факультету «Транспортні системи» шляхом застосування розробленої методики формування матриці кореспонденцій велосипедного транспорту, яка необхідна для реалізації розподілу велосипедного транспорту по мережі.

Практичне значення отриманих результатів підтверджується відповідними актами впровадження на рівні виконавчих комітетів Харківської та Житомирської міських рад, громадської організації «Citylab» (м. Полтава).

Усі положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто і наведені у роботах [16 – 28]. У тих наукових роботах, які опубліковані у співавторстві, особистий вклад здобувача полягає у наступному: досліджено параметри дорожньої мережі, які впливають на витрати енергії велосипедистом при русі [16]; запропоновано математичку модель визначення часу в дорозі при

русі на велосипеді з урахуванням впливу топографії [17]; запропоновано методику моделювання топографії вулично-дорожньої мережі за допомогою методів комп'ютерного моделювання геоінформаційних систем [18]; досліджено моделі попиту на велорух [21]; запропоновано методику валідації даних про рух велосипедистів, отриманих за допомогою мобільних додатків та проведено регресійний аналіз результатів дослідження пересувань велосипедом [22]; досліджено фактори, що впливають на вибір шляху руху велосипедиста [24 - 26]; проведено практичне застосування алгоритму моделювання альтернатив [27].

Апробація результатів дисертації. Матеріали та результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались і були схвалені на:

- The Georgia Planning Association Annual Conference “GPA-2013” (Columbus, Georgia, US, 2013);
- 3-ій міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту і культури дорожнього руху» (м. Харків, 2013);
- науково-практичній конференції ХНАДУ «Новітні технології в автомобілебудівництві на транспорті» (м. Харків, 2015);
- 3-ій міжнародній конференції молодих вчених ЕМТ-2013 «Інженерна механіка та транспорт» (Львівська політехніка, м. Львів, 2013 р.);
- 3-му симпозиумі Європейської асоціації з досліджень у галузі транспорту «hEART 2014» (м. Лідс, Великобританія, 2014 р.);
- 79-й, 81-й науково-технічній та науково-методичній конференції ХНАДУ (м. Харків, 2014-2016 рр.);
- 6-й, 8-й, 9-й міжнародних науково-практичних конференціях «Велофорум» (м. Полтава, м. Харків, м. Миколаїв, 2013, 2016, 2017 рр.);
- Міжнародній велосипедній конференції «Скорочуючи відстань між наукою і практикою» (Мангайм, Німеччина, 2017 р.)

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 13 наукових праць, зокрема: 6 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у закордонному виданні, 5 тез доповідей, отримано 1 авторське свідоцтво.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи становить 143 сторінки, 34 рисунка та 27 таблиць, 6 додатків на 31 сторінці, список використаних джерел включає 141 найменувань, розміщених на 18 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАЯВНИХ ПІДХОДІВ ДО ПЛАНУВАННЯ ВЕЛОІНФРАСТРУКТУРИ В МІСТАХ

Протягом останніх десятиліть у багатьох країнах динамічно розвивається велосипедний транспорт (ВТ). Це особливо стосується європейських країн, які багато уваги приділяють забезпеченню сталості розвитку міст, у чому ВТ відіграє важливу роль. Питання сталого розвитку міст постає особливо гостро в умовах глобальної урбанізації - понад 75% населення ЄС і майже 70% населення України проживає в містах [29]. Велосипедний транспорт сприяє вирішенню низки проблем, що існують у сучасних містах, а саме: надмірне завантаження міських вулиць, забруднення навколишнього середовища, у тому числі шумове, та низький рівень активності населення, що призводить до ожиріння і поширення серцево-судинних хвороб [30]. Порівняно з автомобілем, велосипед займає до 20 разів менше простору для паркування, а його габарити під час руху дозволяють ефективніше використовувати міський простір. Велосипедний транспорт розглядається в якості елемента активної мобільності, відіграє важливу роль у політиці превентивної медицини та охорони здоров'я. Дослідження показують, що попри інші варіанти підвищення активності, саме пересування пішки і на велосипеді мають найбільший позитивний вплив на фізичне здоров'я [31-33]. Велосипед не створює викидів в атмосферу в процесі його експлуатації, на відміну від неелектрифікованого моторизованого транспорту, і таким чином є одним з найбільш екологічно сталих видів транспорту. Дослідження у Ванкувері (Канада) показали, що будівництво двокілометрового велосипедно-пішохідного маршруту призвели до скорочення використання моторизованого транспорту і знизили викиди забруднюючих речовин (зокрема, CO₂) від транспорту на 22,9% [34].

Попри переваги велосипедного транспорту, велосипедисти належать до вразливих учасників дорожнього руху [35], тобто є такими, хто з більшою ймо-

вірністю отримає серйозні травми чи загине у разі дорожньо-транспортної пригоди (ДТП), та такими, що не захищені корпусом транспортного засобу. Проте дослідження показують, що збільшення кількості велосипедистів призводить до підвищення їхньої безпеки [36-38]. Аналіз у міст США показав, що у містах з вищою часткою велосипедистів показники аварійності є, в цілому, суттєво нижчими, [39] зокрема через те, що щільніша дорожня мережа одночасно створює сприятливе середовище для велосипедистів та призводить до нижчої швидкості автомобільного руху, що відповідно є безпечніше. З цього можна зробити висновок, що збільшення кількості велосипедистів не лише сприяє вирішенню загальноміських проблем, що спричинені моторизованим транспортом, а й підвищує безпеку велосипедистів, які уже рухаються містом. Таким чином, збільшення кількості користувачів та, відповідно, частки велосипедного транспорту в загальній сукупності транспортних кореспонденцій є актуальними задачами транспортного планування міст.

У той самий час, підвищення комфорту і безпеки пересування є важливим для підвищення привабливості використання велосипедного транспорту. Цього можна досягти у результаті створення якісної велосипедної інфраструктури. Дослідження у сорока американських містах показало, що у містах з наявною велосипедною інфраструктурою (велосипедні доріжки і велосипедні смуги) частка поїздок велосипедним транспортом у загальній кількості поїздок населення вищі, ніж у містах з незначною велоінфраструктурою [40]. Проте процес розвитку системи велосипедного транспорту та формування велосипедної мережі може базуватися на різних підходах до планування та створення велоінфраструктури.

1.1 Наявні підходи до планування велосипедної інфраструктури в містах

Європейська федерація велосипедистів виділяє три типи міст у сфері розвитку велосипедного руху, в залежності від частки велосипедного транспорту у

загальному розподілі поїздок та наявного рівня інституційного розвитку промоції велосипедного руху. Згідно з цією класифікацією, міста поділяються на початківців (starters), висхідних (climbers) та чемпіонів (champions) [41]. Більшість українських міст належать до міст-початківців, тобто, таких, де частка велопоїздок у загальному розподілі поїздок становить менше 10% [42, 43], а велосипедна інфраструктура відсутня або знаходиться у незадовільному стані. Найбільша проблема таких міст полягає в абсолютній непридатності для велосипедного руху і, відповідно, задачею міст-початківців мають бути створення відповідних умов для забезпечення безпечного і комфортного руху велосипедистів [44].

Наявна нормативно-правова база в Україні, яка регламентує планування або використання велосипедної інфраструктури, обмежується Правилами дорожнього руху (ПДД) [45], Державними будівельними нормами (ДБН) [46-51] та документами, що можуть бути прийняті органами місцевого самоврядування, а саме, правила благоустрою територій, концепції, міські цільові програми та інші, які зазвичай не містять детальних вимог до планування і розбудови мережі велосипедного транспорту [52]. При плануванні та проектуванні мережі ключові настанови та обов'язкові вимоги висуваються саме ДБН. Відповідно до змісту документів, вимоги, що у них представлені, можна класифікувати наступним чином:

- терміни та визначення понять;
- загальні вимоги;
- умови проектування;
- форми організації велосипедного руху;
- планувальні параметри;
- забезпечення безпеки руху;
- вимоги до дорожнього покриття.

Зростаючий інтерес до планування і проектування велосипедного руху в українських містах призвів до того, що у 2015-2018 роках було розроблено і прийнято низку змін у нормативно-правові документи. Оновлені документи ви-

знають велосипед транспортним засобом і рекомендують враховувати велосипедний рух при планування мережі вулиць і доріг населених пунктів [47]. Термін «велосипедна інфраструктура» не використовується у ДБН, натомість виділяються наступні форми організації руху: велосипедні доріжки, велосипедні смуги та змішані велосипедно-пішохідні доріжки.

Згідно з ДБН В. 2. 3 – 5 – 2018 [49], велосипедна доріжка – «це доріжка з покриттям поза межами проїзної частини вулиці та/або дороги», яка відокремлена від тротуару або пішохідної доріжки і пристосована для руху на велосипеді. За формою організації руху, велосипедні доріжки поділяють на односторонні та двосторонні. Велосипедна смуга – це «смуга, призначена для руху велосипедистів у межах проїзної частини вулиці та/або дороги, яка виділена за допомогою дорожньої розмітки або конструктивно».

Велосипедні доріжки включені до класифікації вулиць і доріг, що визначають їхнє основне призначення як «проїзд на велосипедах по вільних від інших видів транспортного руху трасах до місць відпочинку, громадських центрів, а у найзначніших і значних містах - зв'язок у межах планувальних районів» [47]. Попри те, що ДБН В. 2. 3 – 5 – 2018 не надає визначення велосипедним доріжкам, вимоги до їхньої організації свідчать про те, що йдеться саме про відокремлену інфраструктуру, яка організовується у різних рівнях з дорожньою інфраструктурою для автотранспорту. Таким чином, під «мережею велосипедного транспорту» мається на увазі саме «мережа відокремлених доріжок». ДБН також регламентують мінімальні вимоги щодо рівня попиту на велосипедну інфраструктуру. Велосипедні доріжки варто проектувати вздовж автомобільних доріг на ділянках, де розрахункова пікова інтенсивність руху велосипедистів за п'ять років в одному напрямку руху складає 50 од/год., або якщо приведена інтенсивність руху автомобілів складає від 4000 авт./доб., а загальна інтенсивність руху велосипедистів і мопедів складає понад 400 од./доб. При меншій інтенсивності руху дозволяється проектувати суміщені вело-пішохідні доріжки за параметрами велосипедних доріжок [51]. Стосовно організації велосипедної мережі у просторі

рекомендується передбачати велосипедні доріжки «за напрямками найбільш інтенсивних транспортних і пішохідних потоків», відповідно, уздовж основних магістральних автомобільних шляхів.

Зі змісту нормативних документів, які стосуються планування велосипедної інфраструктури України, можна зробити висновок, що вони радше здебільшого регламентують норми проектування окремих ділянок доріг, аніж принципи планування комплексної мережі, орієнтуються на існуючий попит, стимулюють відокремлення велосипедного потоку від автомобільного, проте допускають поєднання велосипедної і пішохідної інфраструктури.

Попри те, що загальні принципи планування велосипедної інфраструктури не формалізовані, можна виділити деякі ключові засади планування. Велосипедні доріжки і смуги передбачаються тільки у містах з уже розвиненим велосипедним рухом. За функціональним призначенням, відповідно до класифікації, велосипедні доріжки розглядаються як набір незв'язаних велосипедних трас, облаштованих відповідно до попиту. Найголовнішим є те, що дорожньо-будівні норми не розглядають ВТ як систему і не передбачають планування єдиної мережі. Таким чином, затверджене у нормативно-правовій базі України планування велосипедного транспорту протирічить досягненню мети зі збільшення частки пересування велосипедним транспортом у містах і обмежує функціональні переваги велосипедного транспорту перед іншими видами транспорту, зокрема, можливість пересуватися від дверей до дверей. Задля розробки принципів планування велосипедної інфраструктури і вимог щодо розбудови велосипедної мережі необхідно дослідити принципи формування велосипедної інфраструктури в інших країнах.

Найбільший досвід розвитку ВТ накопичили економічно розвинені країни світу. Для дослідження велосипедних політик і методів планування в роботі прийнятий метод «кейс-стаді». Кейс-стаді, або монографічне дослідження, – це «дослідницька стратегія, спрямована на виявлення і експлікацію цілісної системи внутрішніх і зовнішніх зв'язків, що перетворюють певний фрагмент суспільної реальності на самостійне соціальне явище, одиницю соціального аналізу»

[53]. Метод наукового дослідження кейс-стаді дозволяє дослідити явище, що не є описаним або формалізованим, якою і є ситуація з формуванням велосипедної мережі.

Для поглибленого аналізу було обрано кейси Нідерландів, Данії, Німеччини та США. За даними Європейської федерації велосипедистів, Нідерланди та Данія змагаються за перше місце за індексом велосипедизації [54]. Кейс Німеччини є особливо цікавим через це те, що східна Німеччина протягом 1949–1990 років знаходилася у складі Германської демократичної республіки (ГДР) і розвивалася відповідно до завдань просторового розвитку, схожого на той, що відбувався на території України у радянські роки. Стосовно міжнародного досвіду планування велосипедної інфраструктури, найбільш часто відокремлюють голландський та німецький підходи, у зв'язку з чим є цікавим дослідження і порівняння цих двох кейсів у першу чергу. На відміну від трьох перелічених країн, рівень використання велосипедного транспорту в Україні є низьким. Тому, з метою аналізу планувальних практик країни з невисоким та зростаючим рівнем велосипедизації, було розглянуто кейси США.

Нідерланди були першою країною, яка сформулювала власні принципи формування велосипедної мережі. Перший комплексний план розвитку велосипедного руху було опубліковано у 1999 році [55]. Найбільш всебічний підхід до планування інфраструктури представлений у «Настановах з проектування велосипедного руху» Нідерландів. Згідно з Настановами, велосипедна мережа повинна бути суцільною, прямолінійною, безпечною, комфортною та привабливою. Параметрами для оцінки велосипедної мережі [56] є зв'язність, прямолінійність, безпека, комфорт та привабливість.

Під зв'язністю йдеться про те, що мережа складається з цілісних маршрутів, якими можна пересуватися безперервно, на відміну від розділеної на окремі ділянки. Під прямолінійністю йдеться про прямолінійність за відстанню і прямолінійність за часом. Прямолінійність за відстанню може бути оцінена за допомогою коефіцієнту непрямолінійності мережі, а прямолінійність за часом можна оцінювати за кількістю перехресть, на яких велосипедист не має пріоритету, або

за кількістю вимушених зупинок на 1 км шляху. Згідно з Настановами [55], затримки, викликані необхідністю знизити швидкість, не повинні перевищувати 15% часу в дорозі. При цьому розрахункові швидкості приймаються рівними 30 км/год. Для відокремленої інфраструктури і 20 км/год. для внутрішньодорожньої інфраструктури.

Показником оцінки безпеки велосипедної мережі є ймовірність ДТП. Найбільшим джерелом небезпеки ДТП з велосипедистом є взаємодія з моторизованим транспортом, тому така взаємодія повинна бути мінімізована. У разі істотної різниці швидкісного режиму видів транспорту вони повинні бути розділені фізично, а фізичне середовище має бути організоване з урахуванням вимог безпеки велосипедистів. Показниками комфорту велосипедного руху є відсутність затримок при пересуванні, досить широкий проїзд, гладке дорожнє покриття, мінімізація несприятливого впливу ухилів, мінімізація негативного впливу моторизованого транспорту і погоди. Під привабливістю велосипедної мережі йдеться про соціальну безпеку, а саме: маршрути повинні бути освітленими, без візуальних бар'єрів, а простір – доглянутим і комфортним. Для підвищення привабливості шляху може знадобитися фізично розділити транспортні потоки, навіть якщо різниця у швидкості незначна.

Більшість голландських міст розвивають ВМ на основі велосипедної стратегії міста. Для розробки мережі проводиться аналіз ключових точок відправлення і прибуття велосипедистів, таких як робочі місця, навчальні заклади і транспортні вузли. Іноді використовують транспортні моделі, проте найчастіше використовують аналітичні методи на основі експертних оцінок. Наявність конфліктних точок між автомобільним і велосипедним транспортом зазвичай має негативні наслідки для велосипедистів, призводить до загрози ДТП і затримок руху. Тому голландські міста прагнуть розділяти велосипедні і автомобільні потоки [57].

Одним із найперших прикладів розвитку велосипедної інфраструктури як комплексної мережі було застосовано у голландському місті Делфт у 1979 році. Планом розвитку велосипедного руху м. Делфт була запропонована велосипедна

мережа, що складалася з трьох рівнів: міська мережа, районна мережа та квартальна мережа. Міська мережа представляє собою сітку, яка з'єднує основні напрямки в межах міста з відстанню між ребрами 400-600 м. Організація мережі включала будівництво великих мостів та іншої інфраструктури для перетину бар'єрів, таких як залізниці та річки. Районна мережа - це сітка 200-300 м, що пов'язує мережу міського рівня, а також стратегічні точки в межах округу, такі як школи. Для цього використовувалися менш дорогі та менш складні засоби, такі як вело-смуги і малі мости. Квартальна мережа забезпечує зв'язки у житлових районах з маршрутами вищого рівня [58]. Важливо відмітити, що на момент створення плану 75% ділянок запропонованої мережі вже були облаштовані велосипедною інфраструктурою [59], тож відповідно, задачею плану було не створення велосипедної мережі з нуля, а забезпечення її зв'язності та інтегрованості.

Аналіз нормативно-правової і регулятивної бази Нідерландів показав, що дотримуються принципу просторового відокремлення велосипедистів від автомобільних та пішохідних потоків, маючи безпеку велосипедистів на першому місці. У списку пріоритетів за безпекою слідують, у порядку спадання: зв'язність, прямолінійність, комфорт та привабливість велосипедної інфраструктури. Але ці принципи є радше цілями, до яких варто рухатись при розвитку ВМ, ніж основою при прийнятті рішень, які є необхідними для досягнення позитивних результатів у містах з незначною часткою велоруку.

Німеччина також досягла значних результатів в розвитку велосипедного руху, з 1970 по 1997 рік сумарний пробіг велотранспорту виріс з 17 до 24 мільярдів км [60], а частка велосипедних поїздок виросла з 9,5% в 2002 році до 14,5% в 2013 році [61]. Ключовим документом з розвитку ВТ і планування велосипедної інфраструктури в Німеччині є Національний велосипедний план. Відповідно до нього базовими принципами розвитку ВІ є:

- адекватне та безпечне розміщення окремих елементів дизайну (інфраструктури);
- забезпечення візуального контакту (видимості) між всіма учасниками дорожнього руху;

- врахування, а не виключення проблемних ділянок мережі;
- забезпечення безпеки дорожнього руху та плавного руху транспорту за рахунок дизайну інфраструктури;
- врахування інтересів пішоходів;
- забезпечення єдності дизайну і функціонального використання велосипедної інфраструктури [41].

До технічних документів, що регламентують вимоги до будівництва велосипедної інфраструктури у Німеччині належать «Настанови з проектування інтегрованої мережі», «Настанови з проектування та будівництва доріг» (розділи «Облаштування», «Перехресні ділянки» та «З'єднання»), «Настанови з проектування та будівництва міських доріг» та «Рекомендації з організації руху велосипедного транспорту» [62,63]. Відповідно до німецьких Рекомендацій з організації руху велосипедного транспорту, процес планування велосипедної інфраструктури має складатися з семи етапів, що представлені на рисунку 1.1 [63].

Згідно з німецькими «Директивами щодо комплексного формування вулично-дорожньої мережі» (RIN), при плануванні ВМ потрібно покращувати сполучення між центральними пунктами, враховуючи внутрішньотериторіальні інтереси громад, оскільки вони визначають цілеспрямоване повсякденне пересування велосипедом [64]. Дані настанови слугують хорошим орієнтиром в сфері проектування велосипедної інфраструктури, проте не надають повної інформації щодо процесу формування плану ВМ у реальних умовах наявної ВДМ та забудови. Відповідно до них, «при перенесенні плану ВМ на наявну ВДМ, необхідно змодельовати цю ВДМ з її транспортними перешкодами (наприклад, тривалість поїздки, тривалість очікування на перехрестях, підйоми тощо)». Втім, настанови не надають методики моделювання та критеріїв ефективності оцінки мережі.

Аналіз нормативно правової бази США дозволив виділити три основних документи, що використовують містобудівники при розробці велосипедної інфраструктури:

- Настанови з розвитку велосипедних споруд, Асоціації американських державних автомобільних доріг і транспортних посадових осіб (AASHTO) [65];
- Настанови щодо універсальних засобів регулювання дорожнього руху (MUTCD) [66];
- Рекомендації з проектування міських велошляхів, Національної асоціації міських чиновників у сфері транспорту (NACTO) [67].

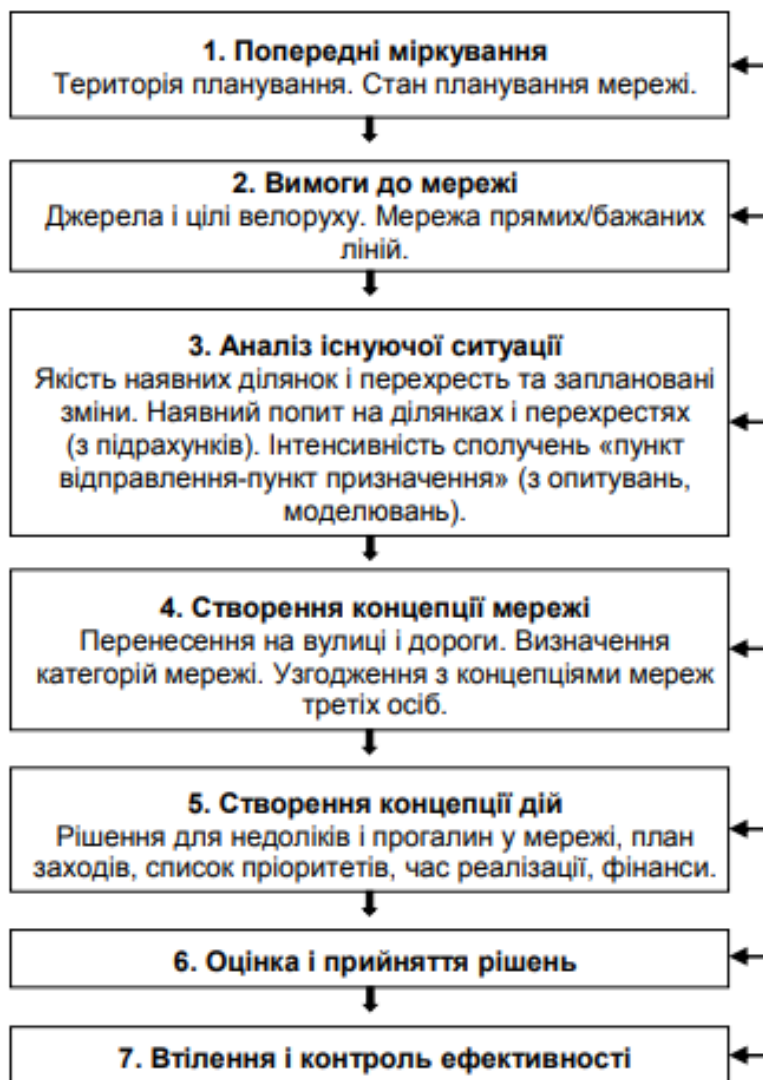


Рисунок 1.1 – Процес планування мережі ВТ для цілеспрямованого повсякденного велоруху [63]

Федеральне управління автомобільних доріг організувало роботу інформаційного центру з питань пішохідного та велосипедного руху [68]. Відповідно до рекомендацій центру, до методів оцінки ефективності ВМ у США належать рівень і якість сервісу [69], індекс безпеки перехрестя [70], кількість ДТП з пішоходами та велосипедистами [68].

Настанови з розвитку велосипедних споруд [65] охоплюють основні елементи процесу планування велосипедної інфраструктури, переважно фокусуючись на безпеці велосипедистів, а також надають деякі технічні принципи щодо дизайну інфраструктури. Цей документ передбачає, що кінцевою метою планування розвитку ВІ є зробити всі дороги доступними і придатними для велосипедистів, за винятком тих, де їзда на велосипеді заборонена. Однак, оскільки ця мета не може бути досягнута негайно, документ пропонує при ухваленні рішень з влаштування ВІ враховувати такі фактори: потреби користувачів, інтенсивність руху моторизованих транспортних засобів, склад транспортного потоку (наприклад, легкові, вантажні, автомобілі, автобуси тощо) та його швидкість, обмеження і фізичні бар'єри, зв'язок із землекористуванням і доступ до ключових центрів тяжіння, прямої маршруту, логічність розміщення маршруту, кількість перехресть та їх організацію, естетику навколишньої місцевості, щільність велосипедних доріжок, безпеку і загальну доцільність.

Інструментами технічного аналізу для прийняття рішень про розвиток ВІ є [65]:

- збір даних і аналіз велосипедного потоку;
- аналіз рівня сервісу або індекс сумісності;
- аналіз безпеки за допомогою індексу безпеки перехрестя,
- геоінформаційні системи (ГІС);
- аналіз витрат і переваг.

Аналіз показав, що, хоча настанови [65] і містять цінні рекомендації щодо планування велосипедної інфраструктури, але методи для визначення пріоритетів планування обмежені і залишають безліч питань серед проектувальників. Ці

методи не охоплюють всіх факторів, які повинні бути враховані при розробці велосипедних доріжок, особливо тих, які стосуються вибору конкретних місць прокладення велосипедних маршрутів, а саме: обмеження і фізичні бар'єри, прямоту маршруту, естетику, відстань між велодоріжками або щільність їх розміщення.

Настанови щодо універсальних засобів регулювання дорожнього руху [66] – це офіційний документ Федерального управління автомобільних доріг США, який визначає стандарти розміщення технічних засобів регулювання велосипедного руху. Документ не надає рекомендацій про те, де розміщувати велосипедну інфраструктуру, але регламентує правила про те, як інтегрувати ці об'єкти в дорожню мережу.

Рекомендації з проектування міських велошляхів [67] містять ряд рекомендацій щодо розміщення велосипедних доріжок, удосконалення перехресть, розміщення знаків і розмітки, а також інших аспектів розвитку ВІ, що супроводжуються ілюстраціями прикладів велосипедної інфраструктури з різних міст. Загальний аналіз показав, що планування велосипедної інфраструктури на національному рівні має радше рекомендаційний характер, а планувальні принципи варіюються на локальному рівні, оскільки у США планувально-будівельні нормативи можуть відрізнити в залежності від штату.

На відміну від децентралізованих США, Данія є найменшою з представлених в аналізі країн. Близько 25% населення Данії проживає у столиці Копенгагені [71], який в значній мірі формує велосипедну політику країни. Головна мета велосипедної політики Копенгагена – дати велосипедистам стільки ж вуличного простору, скільки й іншим видам транспорту, щоб вони могли їздити у справах, на закупи, між роботою та домівкою – такий принцип називається «велосипедна мережа від дверей до дверей» [72]. Це означає реорганізацію вуличного простору з метою надання місця велосипедному руху за рахунок простору для автомобільного транспорту [73, 74].

Данський архітектор Ян Гейл відзначає, що переважно велосипедна інфраструктура Копенгагена представлена у вигляді велосипедних доріжок, які прокладено між тротуарами і автомобільними смугами або паркувальними смугами.

Останній тип велосипедної інфраструктури, за словами данського архітектора, так і називається – «копенгагенський» [72].

Ключовими принципами, що зазначені у Плані розвитку велосипедного руху Копенгагена, є [75]:

- комфорт пересування, який включає наявність паркування і якість велосипедних шляхів;
- швидкість пересування, що означає найменший можливий час в дорозі між пунктами відправлення і прибуття, за рахунок розбудови мережі з можливістю скорочення шляху;
- відчуття безпеки, яке забезпечується заходами з безпеки дорожнього руху.

У плані велосипедної мережі має використовуватися функціональна класифікація, де транспортна мережа міста поділена на транспортні маршрути з високою інтенсивністю транспортного потоку і місцеві (підвізні) маршрути, що доставляють велосипедистів з транспортних маршрутів до їхніх пунктів призначення. Важливою є наявність зв'язної транспортної мережі, що відповідає основним цілям велосипедного пересування. У великих містах (large urban areas) може бути корисним створювати окрему транспортну сітку «мережі для поїздок на роботу на велосипеді», що дозволяє пряме і комфортне сполучення на великі відстані. Транспортна мережа має здебільшого складатися з відокремлених велосипедних доріжок, велосипедних смуг уздовж доріг і, можливо, велосипедних шляхів на дорогах з низькою інтенсивністю руху [76].

Основними вимогами до велосипедної мережі з данської точки зору є [74]:

- зв'язність;
- швидкість руху, яка визначається допустимою швидкістю руху і затримками на перехрестях;
- пропускна здатність перехресть і велосипедних доріжок;
- безпека. Забезпечення відокремлених велосипедних шляхів за можливості або мінімізація конфлікту в місцях перетину велосипедів з іншими видами транспорту;

- доступність;
- погодні умови – забезпечення захисту від вітру;
- навігація – легкість орієнтування;
- освітлення;
- розташування велосипедних сервісів, таких як, вода, насос, карта веломаршрутів тощо;
- розташування станцій технічного обслуговування.

Ці умови облаштування ВІ доповнюють сформульовані в інших країнах вимоги щодо створення мережі велошляхів та є корисними для працівників органів місцевого самоврядування, які відповідають за розвиток велосипедного транспорту в місті. Що стосується загального аналізу технології розвитку велосипедної мережі, який застосовують у Німеччині, Данії, Нідерландах і США, то він показав, що наявні базові принципи планування велосипедної інфраструктури можна поділити на:

Принцип просторового розділення – розмежування учасників дорожнього руху в просторі. Реалізується за рахунок створення відокремленої інфраструктури для велосипедистів, пішоходів, автомобільного транспорту (Нідерланди, Данія).

Принцип інтеграції (поєднання, послідовності, комбінації) – інтеграція велосипедного транспорту в мережу міста. Реалізується за рахунок комбінації типів інфраструктури та форм пересування (Німеччина).

Принцип виключення – заборона руху велосипедистам з метою відстоювання інтересів певних учасників дорожнього руху (Україна). Прикладом реалізації цього принципу можна вважати заборону планування інфраструктури на ділянках з великим кутом підйому чи спуску. При цьому необхідно розділяти поняття типи велосипедних шляхів та елементи велосипедної дорожньої інфраструктури. Це призводить до значних складнощів у просуванні ВТ в українських містах та вимагає розробки обґрунтованої методики послідовного формування

ВІ з урахуванням накопиченого в економічно розвинених країнах досвіду досягнення високих показників використання велосипедного транспорту для пересувань містом.

З метою формування настанов для планування велосипедної мережі в українських містах також необхідно розглянути інструменти формування велосипедної мережі, що розроблені на даний момент.

1.2 Інструменти формування велосипедної мережі

Основною задачею при формуванні плану велосипедної мережі слід вважати визначення найбільш доцільних шляхів пересування велосипедистів. Ця задача потребує вирішення двох питань – визначення альтернативних маршрутів руху велосипедистів та розподілу велопотоків між альтернативами. При вирішенні першого питання в умовах існуючої забудови і, відповідно, певної ВДМ, необхідно використовувати спеціальні інструменти, які дозволяють прокласти велосипедні шляхи.

Найбільш доступним з них є графоаналітичний метод, який описала Бондаренко [77]. Він є частиною загальної схеми роботи над концепцією розвитку велосипедного транспорту. Схема роботи включає: попереднє планування роботи, складання вимог до мережі, аналіз наявної ситуації, створення концепції мережі, визначення супутніх та інформаційних заходів, створення плану дій, оцінку і прийняття рішень, втілення і контроль ефективності. Створення концепції мережі складається з п'яти етапів. На першому етапі на карту місцевості наносять типи землекористування, що відображають мету поїздки: селітебні райони різної щільності, промислові райони, заклади освіти, адміністративні будівлі, станції приміського і міжміського транспорту тощо. Після цього визначають їхні умовні центри тяжіння і наносять на карту двома різними кольорами центри відправлення і центри прибуття. При цьому, при виборі місця розташування центра тяжіння враховується точка доступу, наприклад, вхід у парк або прохідна заводу.

На третьому етапі центри відправлення з'єднуються повітряними шляхами з центрами прибуття. Далі в місцях високої щільності повітряних ліній прокладаються основні повітряні велосипедні шляхи. На останньому, п'ятому етапі повітряні шляхи переносяться на ВДМ, рисунок 1.2.



Рисунок 1.2– Графоаналітичний метод створення велосипедної мережі

Недоліком цього методу є низька точність вхідних і вихідних даних. Фактично, кілька осіб - проектувальників мережі – приймають рішення щодо значущості того чи іншого центру тяжіння, а сформовані основні повітряні шляхи не відображають попит на ВТ і мають однакову вагу. Зрештою, приймається припущення, що велосипедні поїздки розподіляються рівномірно за метою поїздки і незалежно від відстані, що є грубим припущенням. Описана методика підходить для планування велосипедної мережі невеликих територій до 8 км в діаметрі з незначною кількістю альтернативних шляхів, де припущення про рівномірний розподіл поїздок є допустимим, а мережа, що планується, може бути наближена до карти найкоротших шляхів. Для планування велосипедної мережі середніх і великих міст необхідно використовувати метод, що враховує територіальну нерівномірність попиту та особливості вибору маршруту велосипедистами.

Ще одним інструментом визначення раціонального трасування ВМ є використання методу теплових карт, який являє собою двовимірне представлення даних, у яких значення представлені кольорами, в залежності від масштабу. Іншими словами, тепла карта надає візуальне представлення інформації про інтенсивність велосипедного потоку. Прикладом використання методу теплових карт для візуалізації велосипедних шляхів є Глобальна тепла карта Страва

(Strava Global Heat Map) [78]. Сервіс Strava – це мобільний додаток, який дозволяє відстежувати спортивну або іншу активність (включаючи велосипедні поїздки) через систему географічного позиціонування (GPS), який отримав широке розповсюдження серед користувачів велосипедного транспорту завдяки запропонованим для його користувачів сервісам. За рахунок поєднання агрегації даних про рух користувачів та методу теплових карт, Глобальна тепла карта Страва зображає мережу велосипедних шляхів, ієрарховану в залежності від частоти використання ділянки мережі (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3– Теплова карта активності користувачів Strava у Львові

До переваг використання даного методу при формуванні велосипедної мережі можна віднести те, що він базується на виявлених вподобаннях велосипедистів і відображає реальні траси маршрутів, а також надає певну ієрархію велосипедних шляхів в залежності від інтенсивності їх використання. Критика цього методу полягає в упередженості вибірки, яка базується на користувачах Strava,

які часто є спортсменами. Використання цього методу для планування мережі в містах з низькою часткою велосипедистів є сумнівним через надто малу загальну кількість користувачів, яка в умовах вибірки програмного продукту може стати статистично незначущою і виникає ризик того, що надто мала кількість активних користувачів може визначати основні шляхи руху. Також теплова карта дає інформацію про лише існуючі шляхи і не дає можливості оцінити актуальність маршруту для новоствореної інфраструктури.

Яконо та інші [79, 80] для формування ВМ пропонують використовувати індекс доступності, який заснований на гравітаційній моделі.

$$A_i = \frac{\sum_{j=1} E_j e^{-\beta x_{ij}}}{E} \quad (1.1)$$

де A_i – доступність зони відправлення i ;

x_{ij} – відстань (або час) поїздки між зонами i та j ;

E_j – кількість активностей (можливостей) в зоні прибуття j ;

E – сумарна кількість активностей всіх зон, що досліджуються;

β – параметр функції тяжіння.

Даний метод дозволяє врахувати вплив землекористування та економічних активностей територій, дозволяючи планувати велосипедну інфраструктуру, що пролягає по найкоротшому шляху через найбільш привабливі зони. Під привабливими зонами розуміють такі, що мають найбільшу кількість активностей. Автори відзначають, що, попри перспективність розвитку цього підходу, неточності та припущення під час моделювання швидкості руху велосипедистів потребують доопрацювання.

Хан та інші [81] запропонували використовувати регіональний індекс доступності для немоторизованого транспорту (пішохідного та велосипедного одночасно), використовуючи логарифмічну суму моделей дискретного вибору. Для

опису моделі використовувалися демографічні дані та характеристики забудованого навколишнього середовища.

Основним недоліком моделей [78-81] є відсутність рішення щодо маршруту руху велосипедиста, через що його не можна використовувати для планування велосипедної мережі, і він має бути поєднаний з іншими інструментами. Даний метод ігнорує вимогу щодо зв'язності велосипедної мережі і радше визначає території потенційної активності. Дані методи можуть підійти для планування позадорожньої велосипедної інфраструктури або бути використані на стадії визначення пріоритетів при розвитку велосипедної мережі.

Індекс придатності велоруку (ІПВ, англ. VCI) та рівень велосипедного сервісу також може бути використаний при формуванні велосипедної мережі. Вперше концепція індексу придатності вулично-дорожньої мережі для розвитку велосипедного руху була запропонована у США у 1998 році [68]. ІПВ дозволяє оцінити можливість розмістити користувачів автомобілів і велосипедів на ділянках вулично-дорожньої мережі. ІПВ може використовуватися задля оцінки функціональної експлуатації наявних доріг, при розробці проектів доріг або сегментів, на яких передбачається велосипедний рух, та для оцінки довгострокових транспортних планів, що мають на меті розвиток велосипедного транспорту.

Для розрахунку індексу використовується формула (1.2) [69]:

$$VCI = 3,67 - 0,966BL - 0,410BLW - 0,498CLW + 0,002CLV + 0,0004OLV + 0,022PD + 0,506PKG - 0,264AREA + AF \quad (1.2)$$

де BL – наявність велосипедної смуги або асфальтованого узбіччя (0 – ні, 1 – так);

BLW – ширина велосипедної смуги або асфальтованого узбіччя, м;

CLW – ширина крайньої правої полоси, м;

CLV – інтенсивність руху по крайній правій полосі в одному напрямку, авт./год.;

OLV – інтенсивність руху по іншим полосам в тому ж напрямку, авт./год.;

PD – швидкість руху 85% потоку, км/год.;

PKG – наявність паркувальної смуги з більш ніж 30% завантаженістю (0 – ні, 1 – так);

AREA – тип землекористування прилеглої території (1 – селітебна, 0 – інша);

AF – розрахункова величина:

$$AF = t_t + t_p + t_{rt} \quad (1.3)$$

де t_t – корегувальний коефіцієнт інтенсивності вантажного транспортного потоку;

t_p – корегувальний коефіцієнт оберту паркувального місця;

t_{rt} – корегувальний коефіцієнт для інтенсивності правого повороту.

ІПВ відображає рівень комфорту велосипедиста на основі експлуатаційних характеристик проїжджої частини та навколишнього середовища. Що нижчим є значення ІПВ, то вищим є рівень комфорту велосипедиста [69] (таблиця 1.1). Даний метод дозволяє оцінити якість і придатність обраного фрагменту ВДМ для пересування велосипедним транспортом, але не дозволяє сформувати нову мережу потенційних велосипедних шляхів, що була би придатна для безперервного руху.

Таблиця 1.1 – Відповідність між індексом придатності велоруку та рівнем обслуговування

Рівень обслуговування	ІПВ	Рівень придатності
A	$\leq 1,50$	Надзвичайно високий
B	1,51 – 2,30	Дуже високий
C	2,31 – 3,40	Достатньо високий
D	3,41 – 4,40	Достатньо низький
E	4,41 – 5,30	Дуже низький

F	>5,30	Надзвичайно низький
---	-------	---------------------

Ще одним інструментом формування велосипедної мережі є імітація транспортних потоків велосипедного транспорту, або моделювання шляху руху велосипедиста. Найпростішим методом визначення оптимального шляху руху велосипедиста є метод найкоротших відстаней. Перевагою даного методу є легкість збору і використання даних через те, що поведінкові особливості не приймають участі в аналізі. Водночас, недоліком даного методу є низька відповідність результатів процесу обрання шляху руху. Не дивлячись на те, що відстань поїздки є важливим фактором вибору маршруту, велосипедистам притаманно обирати довші шляхи руху, якщо це дозволяє уникнути великих перепадів висот, взаємодії з моторизованим транспортом, небезпечних ділянок або поворотів тощо [82 – 84]. Внаслідок цього, для моделювання розподілу велосипедних потоків у мережі було створено більш складні моделі, які враховують інші фактори, окрім відстані. Найбільш простою з них може вважатися біноміальна модель вибору шляху руху авторів Ергот та інших [85]. Замість того, щоб визначити єдиний маршрут для велосипедиста, автори пропонують визначати набір альтернативних маршрутів, з яких велосипедист може вибрати один відповідно до його/її особистих переваг, залежно від його/її сприйняття часу подорожі у порівнянні з іншими критеріями вибору маршруту, що розглядаються в індексі придатності. Таким чином, модель дозволяє обрати маршрут, який мінімізує витрати часу або максимізує комфорт, виражений через індекс придатності маршруту:

$$\min t(p) = \sum_{i \in p} t_i \quad (1.4)$$

$$\max s(p) = \frac{\sum_{i \in p} t_i s_i}{t(p)}, p \in P \quad (1.5)$$

де t_i – час в дорозі на ділянці i ;

s_i – рівень придатності ділянки i для велосипедного руху;

p – шлях руху, що складається з набору ділянок i ;

P – набір всіх шляхів.

Попри те, що ця модель враховує час у дорозі, який є більш значущим фактором для велосипедистів, ніж відстань [86], при розрахунку показника часу використовується припущення про середню постійну швидкість руху велосипедиста, у результаті чого показник часу є пропорційний відстані.

Найбільшу популярність у моделюванні велосипедного транспорту набули моделі дискретного вибору, які базуються на теорії випадкової корисності [87, 88]. Ця теорія враховує те, що велосипедист (пасажир, водій) має неповну інформацію щодо факторів, які впливають на вибір i , відповідно, функція корисності (U) повинна враховувати ці випадковості.

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (1.6)$$

де V_{in} – детерміністична частина функції корисності,

ε_{in} – випадковий параметр, що відображає невизначеність.

При цьому передбачається, що обирається та альтернатива, яка має найбільшу корисність. Ймовірність цього вибору (P) рахують за формулою:

$$P(i|C_n) = P[U_{in} \geq U_{jn} \forall j \in C_n] = P[U_{in} = \max_{j \in C_n} U_{jn}] \quad (1.7)$$

де i – індекс альтернативного варіанту шляху пересування;

n – індекс велосипедиста;

C_n – набір альтернатив.

Для оцінки впливу факторів на рішення про маршрут руху може використовуватися спрощена бінарна логіт-модель, прикладом якої є модель вибору шляху велосипедистами для австралійського міста Блісбон [89]:

$$P_a = \frac{\exp(U_a)}{\exp(U_a) + \exp(U_b)} \quad (1.8)$$

де P_a – ймовірність того, що альтернатива a буде обрана;

U_a – значення корисності, пов'язане з використанням альтернативи a ;

U_b – значення корисності, пов'язане з використанням альтернативи b ;

Загальний лінійний вид отриманої функції корисності:

$$U_i = \phi_1 \cdot X_{1_i} + \phi_2 \cdot X_{2_i} + \dots + \phi_n \cdot X_{n_i} + \dots, \quad (1.9)$$

де n – індекс атрибута;

X_{ni} – значення атрибута n для альтернативи i ;

ϕ_n – коефіцієнт функції корисності з атрибутом n .

Модель є теоретичною та не реалізована в кінцевий продукт, придатний для оцінки імовірності вибору шляху. Кінцевим продуктом моделі є визначення коефіцієнтів важливості факторів моделі, але методика визначення загальної значущості фактора є дещо сумнівною: респондент оцінює 7 параметрів шляху бальною оцінкою зі шкалою від 1 (найменш значимий) до 10 (найбільш значимий), при чому оцінка не може повторюватися. Проте навіть теоретичне використання бінарної логіт-моделі для моделювання шляху вибору викликає сумніви. Обмеженням використання логіт-моделі є припущення про те, що велосипедист обирає між двома альтернативами, у той час як вибір маршруту представляє собою складну систему з великою кількістю альтернатив.

Для врахування більшої кількості альтернатив використовуються мультиномінальні моделі. Прикладом мультиномінальної моделі вибору шляху руху є моделі Цюріха [90], Сан-Франциско [91], Онтаріо [92, 93] та Сієтла [82, 83]. На відміну від бінарної логіт-моделі, мультиномінальна логіт-модель дозволяє враховувати i набір альтернативних варіантів, що дозволяє більш реалістично відтворити умови вибору шляху руху. Всі моделі базуються на загальному вигляді мультиномінальної логіт моделі:

Однією з властивостей родини логіт-моделей є вимога щодо незалежності альтернатив від інших, що унеможливує розрахунок моделей, що містять поді-

бні альтернативи, в яких корелюють похибки [94]. Для вирішення цього обмеження, моделі [92 – 93] використовували параметр довжини шляху (path-size factor), який має вид:

$$PS_{in} = \sum_{a \in \Gamma_i} \frac{l_a}{L_i} \frac{1}{\sum_{j \in C_n} \delta_{aj} \frac{L_i^{*}}{L_j}}, \quad (1.10)$$

де Γ_i – відрізки альтернативи i ;

l_a – довжина відрізка a ;

L_i – загальна довжина альтернативи i ;

δ_{aj} – дорівнює 1, якщо j включає в себе відрізок a ;

У моделі Сіетла [82, 83] для виконання вимоги щодо незалежності альтернатив використовується модифікований метод маркування шляху, при якому функція ймовірності вибору шляху приймає вигляд:

$$PS_{in} = \sum_{a \in \Gamma_i} \frac{l_a}{L_i} \frac{1}{\sum_{j \in C_n} \left(\frac{L_i}{L_j}\right)^y \delta_{aj}}, \quad (1.11)$$

де y – позитивний параметр масштабу, щоб додатково завантажити дуже довгі маршрути в наборі альтернатив.

При формуванні альтернативних шляхів поїздки в моделі Онтаріо [92, 93], аби обмежити набір альтернатив, автори використовували гіпотезу, що велосипедист буде обирати шлях, ґрунтуючись на комбінації дальності (найкоротший шлях або час у дорозі) і безпеки (взаємодія з трафіком, швидкість руху). Таким чином, набір альтернативних шляхів включав 2 шляхи з меншою дальністю поїздки, ніж реалізована поїздка, і 2 шляхи з більш високими характеристиками безпеки (включаючи наявність інфраструктури). Недолік моделі є в тому, що вона не враховує час у дорозі для велосипедиста.

Суттєвою різницею запропонованих моделей є використання різних характеристик альтернатив, які використовувалися для визначення привабливості

альтернативи шляху для велосипедистів. Так, модель Цюріха [90] враховує такі фактори, як довжина маршруту, довжина максимального підйому, кількість світлофорних об'єктів та середній кут поздовжнього ухилу. Модель Сан-Франциско [91] враховує довжину звичайних доріг, протяжність руху в протилежному напрямку, протяжність шляху по дорогах I класу (виділені велошляхи), протяжність шляху по дорогах II класу (велосмуги), протяжність шляху по дорогах III класу (смуги спільного руху), загальну кількість поворотів, загальний набір висоти. Модель Онтаріо [92, 93] враховує протяжність, швидкість моторизованого транспорту, інтенсивність руху, різницю висот, наявність велоінфраструктури. Модель для Сієтла [82, 83] включає такі фактори, як довжину маршруту, кількість світлофорів, кількість знаків «стоп», загальну кількість поворотів, кількість лівих поворотів, процент ухилу дороги (через відстань шляху) і різні типи велосипедної інфраструктури. Для збору характеристик параметрів всіх моделей використовувалась інформація про пересування велосипедистів, зібрана за допомогою трекінгу GPS-даних.

Попри використання схожого математичного апарату, звертає на себе увагу значна різниця між параметрами, які досліджувалися, що свідчить про необхідність вивчення поведінки велосипедистів у кожному конкретному місті, в якому створюється велосипедна інфраструктура.

Аналіз математичних методів моделювання велосипедного транспорту показав, що, в цілому, їх можна поділити на директивні та об'єктивні.

Директивні (моделі доступності, рівень сервісу) засновані на принципі покращення інфраструктури, підвищення безпеки, а не привабливості маршруту чи ділянки з точки зору користувача. Дані моделі не відображають попит, а орієнтуються лише на пропозицію.

Об'єктивні моделі спрямовані на аналіз поведінки (вподобань) велосипедиста. Їх можна поділити на моделі висловлених вподобань і виявлених вподобань [95]. Перші оцінюють вподобання велосипедистів на основі опитування щодо їх історичної або потенційної поведінки [82 – 84, 96 – 99], а останні аналі-

зують маршрути та характеристики шляху велосипедистів на основі спостережень за велосипедистами та намагаються оцінити вплив факторів на вибір шляху руху.

При моделюванні висловлених вподобань дослідником або експертною групою формується набір параметрів і певний набір значень кожного параметра, який використовується при опитуванні населення для визначення закономірностей вибору маршруту. Перевагою методу дослідження намірів є те, що він дозволяє включити в процес оцінки безліч параметрів і навіть потенційні фактори, наприклад, наявність велосипедної інфраструктури. Але при цьому, внаслідок того, що респондент не має досвіду використання пропонованих альтернатив або параметра, відповіді далеко не завжди відповідають реальному ставленню до цих альтернатив, що може призводити до спотворення результатів дослідження.

Для отримання більш правдоподібних результатів використовуються методи вивчення виявленого вибору, суттю якого є збір і аналіз даних про фактично прийняте велосипедистом рішення щодо варіантів шляху пересування. До таких методів належать: методи підрахунку транспортних потоків [100, 101], метод ментальних карт [102, 103] і методи збору даних за допомогою GPS [90 – 92, 104]. Для обробки результатів дослідження виявлених вподобань останнім часом все більшого розповсюдження отримують моделі дискретного вибору шляху пересування. Ці моделі забезпечені власним математичним апаратом оцінки значущості коефіцієнтів моделі, що надає змогу отримати об'єктивну оцінку ставлення велосипедистів до параметрів альтернативних шляхів пересування.

Таким чином, найбільш цікавими з точки зору визначення шляхів прокладення велосипедної мережі є об'єктивні моделі вибору шляху руху, побудовані на основі виявлених вподобань, які забезпечують врахування особливостей поведінки велосипедистів у конкретному місті, але потребують подальшого дослідження. Одним із найважливіших завдань моделей вибору шляху є формування набору параметрів, які впливають на привабливість маршруту та оцінка їхнього значення. При цьому необхідно дослідити, які характеристики зовнішнього середовища впливають на вибір шляху велосипедистами.

Останнім часом багато дослідників зосередили увагу на тому, що стимулює або перешкоджає людям користуватися велосипедом [84 ,86, 82-83, 105]. Одне з найбільш всеосяжних досліджень на цю тему було проведено в м. Ванкувер, Канада [84]. Метою дослідження «Їзда на велосипеді у містах» було виявити потенційні причини, що мотивують або, навпаки, стримують мешканців міст від поїздок на велосипеді. Обидва типи факторів (мотивуючі та стримуючі) були розміщені в таких категоріях:

- транспортні засоби;
- розмітка і знаки;
- перехрестя;
- відстань;
- пагорби і сполучення;
- дорожнє покриття і технічне обслуговування;
- естетика і доступність;
- координованість з громадським транспортом;
- соціальна взаємодія;
- безпека;
- погодні умови і темний час доби;
- законодавство;
- інформація і засоби заохочення.

Корисність даного дослідження полягає в тому, що автор на рівноправній основі включив всі фактори, які впливають на прийняття рішення щодо велосипедного транспорту, і оцінив позитивні і негативні елементи в кожній з категорій. Респонденти відзначили, що велосипедні шляхи, розташовані поза проїзною частиною, є дуже бажаними, оскільки вони забезпечують відокремлення відділення від автомобільного потоку, шуму та забруднення повітря. Велосипедисти також відзначили, що шлях повинен бути не горбистим, освітленим і забезпечувати прямий доступ до кінцевого пункту призначення.

Дослідження показало, що легкість використання велосипеда знаходиться у числі найважливіших факторів, що стимулюють людей до їзди на велосипеді,

разом із безпекою та естетикою навколишньої природи. Дивним виявилось те, що фізична складність поїздки була відзначена як така, що має незначний вплив, особливо серед найбільш активних велосипедистів. Це може бути пояснено тим, що легкість маршруту буде заохочувати людей до їзди на велосипеді, проте фізична складність маршруту не змусить велосипедистів перестати їздити на велосипеді. Крім того, активні велосипедисти розвивають м'язову силу, що може пояснити, чому фізичні труднощі для них менш не є стримуючим фактором, на відміну від інших.

Багато дослідників вважають, що час у дорозі є важливим фактором для велосипедних поїздок [84, 86, 104, 106, 107]. Проте Сенер [106] і Сміт [107] стверджують, що, хоча час у дорозі є дуже важливим для їзди на велосипеді, він має суттєве значення тільки для трудових поїздок. Вінтерс [84] у своєму дослідженні зазначає, що 30 хвилин є оптимальним часом поїздки для більшості респондентів. Водночас, Сенер [106] відзначає, що на підставі анкетування, проведеного у штаті Техас, США, час у дорозі є більш важливим для молодих людей (18-34): на відміну від літнього населення, молоді люди вважають коротші поїздки кращими.

Топографія є ще одним важливим фактором, зазначеним дослідниками. Згідно з дослідженням, проведеним в місті Остін, штат Техас, жінки, які використовують велосипед для поїздок на роботу, воліють уникати горбистих маршрутів, в той час як чоловіки вибирають круті і помірно круті схили. Водночас, жінки, які подорожують з рекреаційними цілями, вважають за краще маршрути з помірними пагорбами, а чоловіки в значній мірі обирають круті пагорби, а не пласкі маршрути [106].

І Сміт [107], і Вінтерс [84] відзначають топографію як найбільш важливий фактор при поїздках на роботу. Ці результати суперечать тим, які представлені в [106]. Проте дослідження у Техасі [106] використовувало переваги обраних шляхів, що були висловлені велосипедистами, у той час як дослідження у Портленді [83] проаналізувало фактичні дані, зібрані за допомогою GPS. Можна припустити, що люди можуть повідомити, що вони віддають перевагу більш складному

маршруту через їхнє бажання бути у хорошій формі, але насправді вони не завжди вибирають горбистий рельєф.

Відмінності у виборі, представлені вище, показують, що і час у дорозі, і топографія є дуже важливими для велосипедистів і це варто враховувати при плануванні велосипедної мережі.

1.3 Мета і постановка задачі дослідження

Розвиток мережі велосипедного транспорту завжди відбувається в умовах існуючої міської забудови, з урахуванням чого прокладення інфраструктури велотранспорту завжди буде супроводжуватися питаннями нестачі простору для розміщення ВІ, особливо у найбільш завантаженій центральній частині міст. Рекомендувати в таких умовах конкретні проектні рішення, без врахування місцевих особливостей, не може жодна наукова робота. Внаслідок цього, дослідження з розробки концепції створення та розвитку мережі велосипедного транспорту в містах повинне не лише забезпечити проектувальників альтернативними рішеннями, з яких вони можуть обрати деякий прийнятний варіант, а, в першу чергу, дати відповіді на всі ті питання, що мають або можуть виникнути у процесі розробки планів розвитку міської системи велосипедного транспорту. Це означає необхідність створення концепції, яка буде містити в собі всі рівні обґрунтувань для прийняття відповідних рішень: від конкретних методик виконання окремих етапів планування ВМ до базових принципів її формування. У цьому випадку, при відсутності відповіді на конкретне питання з планування ВМ на рівні методики, проектувальник має можливість обрати раціональне рішення з використанням вказівок більш високого рівня – правил або принципів формування веломережі.

Ще однією особливістю об'єкта дослідження даної роботи є те, що українським містам на момент написання роботи притаманний доволі низький рівень

використання велосипедів при виконанні рутинних міських пересувань та, у багатьох випадках, практично нульовий рівень розвитку веломережі. З одного боку, це ускладнює питання раціоналізації мережі велосипедного транспорту внаслідок проблем з обґрунтованим визначенням ставлення велосипедистів до параметрів велошляхів. З іншого боку, з врахуванням бюджетних обмежень міста та необхідності поступової адаптації населення до змін у міському житті, це диктує необхідність послідовного розвитку ВМ у декілька етапів, що необхідно враховувати при розробці концепції, адже тоді постає питання, яку частину велоінфраструктури слід реалізовувати у першу чергу, яку у другу, і так далі.

Об'єктом дослідження даної роботи мають стати процеси створення та розвитку веломережі в одному з українських міст, яке має відповідати декільком вимогам. По-перше, воно має бути достатньо крупним, оскільки саме у великих та крупних містах ця задача набуває загального характеру, у зв'язку з обмеженістю міського простору та появою проблем з організацією дорожнього руху. Розроблені для великих та крупних міст принципи створення міської ВІ легко можуть бути використані у середніх або малих містах у спрощеному варіанті.

Формування концепції розвитку мережі велосипедного транспорту як системи поглядів на цей процес, з точки зору її потенційних користувачів та місцевих управлінь, має розпочинатися з розробки принципів її формування, які відповідають умовам життя в українських містах та на основі яких мають обиратися та реалізовуватися більш конкретні завдання концепції.

Найбільш важливим питанням концепції є достовірне відображення потенційного попиту на пересування за допомогою велосипедів, який є набагато складнішим, ніж моделювання фактичного попиту на пересування. Це вимагає пошуку таких вихідних даних, які є надійною основою для прогнозування майбутнього попиту. Найдоцільнішим варіантом розрахунків у цьому випадку є використання постійних та найбільш прогнозованих пересувань у місті: трудових та учбових, які, до того ж, є найбільш привабливими для потенційних велосипедистів на початкових етапах розвитку міського велоруху.

Раціональна веломережа обов'язково повинна враховувати ставлення велосипедистів до умов руху на маршруті. Це ставлення повинне стати основним фактором, який визначає напрямки трас веломережі, з урахуванням територіальних обмежень, які накладає на транспортну інфраструктуру міська забудова. Сучасна транспортна наука надає декілька варіантів формалізації ставлення велосипедистів до параметрів альтернативних шляхів прямування. При виборі раціонального варіанту дослідження слід враховувати, що велосипедний транспорт має дуже високу ступінь свободи у виборі шляху, проте це не означає, що велосипедист буде весь час використовувати різні шляхи для сполучення між тими самими об'єктами. Після короткого вивчення велосипедистом альтернатив велосипедист часто приходиться до практично постійного використання однієї альтернативи. Узагальнення ставлення до параметрів шляху в цьому випадку можливо лише через забезпечення широкого набору респондентів та супроводження процесу дослідження шляхом перевірки результатів моделювання на фактичному матеріалі, обсяг якого є дуже обмеженим у містах з низьким рівнем користування велосипедом.

Одним із параметрів, що характеризують велосипедні маршрути та, безумовно, здійснюють вплив на поведінку велосипедиста, є рівень фізичного навантаження на нього під час поїздки. Це підтверджується не стільки попередніми дослідженнями, скільки тим фактом, що велосипедний транспорт зовсім не використовується в містах, розташованих в гірській місцевості, наприклад, у Тбілісі (Грузія), де велосипедистів чекають дуже значні фізичні навантаження [108].

Складність кількісної оцінки цього фактору та суттєва залежність результатів його дослідження від конкретних географічних умов розташування міста призвела до того, що на цей час відсутні переконливі свідчення, формалізовані на рівні математичної моделі, про реальний ступінь впливу рівня фізичного навантаження на велосипедиста та на вибір ним шляху прямування. Але нова концепція розвитку велотранспорту в місті, з метою забезпечення їй загального характеру, обов'язково повинна дати відповідь на це питання для конкретного мі-

ста та забезпечити дослідження в рамках реалізації концепції в інших містах відповідним методичним інструментарієм, який дозволяє надати кількісну оцінку ступеня впливу цього фактору на поведінку велосипедистів.

Вирішення питань, поставлених у даному підрозділі дисертаційної роботи, дозволить досягти загальної мети дослідження, тобто, формування концепції розвитку мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем його використання, що є властивим для більшості міст України.

Висновки до першого розділу

1. Сучасний стан планування велосипедної інфраструктури в Україні характеризується комплексом містобудівної документації, яка орієнтується на створенні велосипедних шляхів виключно за наявності достатньої кількості велосипедистів та враховує обмеження середовища, але не забезпечує орієнтацію на зв'язність мережі.

2. Аналіз наявних у світі підходів до планування велосипедної інфраструктури показав, що вибір варіанту розташування дорожньої інфраструктури переважно ґрунтується на двох підходах. Перший -коли рішення приймається проектувальником з розрахунком на те, що, якщо побудувати інфраструктуру, то нею будуть користуватися, тож рішення тут приймається з урахуванням наявної інтенсивності велосипедного руху. Другий підхід ґрунтується на аналізі поведінки велосипедистів з подальшим розташуванням інфраструктури відповідно до найбільш значущих чинників, обраних велосипедистами, та є більш перспективним для використання у містах з невеликою часткою велосипедного транспорту.

3. Організація роботи велосипедного транспорту в містах зі значною часткою велосипедного руху та тривалою історією розвитку ВІ показав, що у таких випадках завжди існує набір принципів, на яких була побудована система велотранспорту в місті, та які необхідно враховувати при плануванні мережі велосипедного транспорту. При цьому принципи, розроблені у різних містах та

держав, мають багато протиріч та часто не супроводжуються відповідним механізмом формування системи велосипедного транспорту, заснованому на цих принципах.

4. Основною задачею при формуванні велосипедної мережі слід вважати визначення найбільш доцільних шляхів пересування велосипедистів. Ця задача потребує вирішення двох питань: визначення альтернативних маршрутів руху велосипедистів та розподіл велопотоків між альтернативами.

5. На цей час існує багато критеріїв оцінки якості маршрутів велосипедного руху та факторів, що спонукають мешканців міст до користування велосипедом або, навпаки, відштовхують від цього, але з метою обґрунтованого формування велоінфраструктури в місті, слід дати кількісну та об'єктивну оцінку всім факторам, що супроводжують велосипедиста протягом поїздки.

6. Необхідно не лише розробляти принципи, а й пропонувати конкретні інструменти (методики) для формування мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем його використання.

Результати досліджень були опубліковані в роботах [17, 19, 21, 23-28].

Розділ 2

ФОРМУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПЛАНУВАННЯ
ВЕЛОІНФРАСТРУКТУРИ В МІСТАХ

Управління системою міста має вирішувати одночасно дві задачі: задовольняти існуючі потреби населення або окремих його категорій та реалізовувати стратегічну політику розвитку міста, що призведе до покращення якості та умов життя у довгостроковій перспективі. З точки зору велосипедного транспорту це означає, що має відбуватися не тільки створення умов для безпечного пересування існуючих велосипедистів, але й збільшення частки використання велосипедного транспорту, як елементу покращення умов для всього населення. Розбудова велосипедної мережі вирішує наступні задачі: забезпечення умов для пересування існуючих користувачів, ефективне використання загальноміського простору, збільшення частки сталих пересувань. Таким чином, розвиток велосипедного транспорту є доцільною метою транспортного планування міста.

Аналіз літературних джерел, представлений в першому розділі, показав, що процес планування мережі велосипедного транспорту не є формалізованим і відбувається у різний спосіб, залежно від існуючих умов міста і від цілей та досвіду проектувальника.

2.1 Розробка принципів планування мережі велосипедного транспорту

Кожна людина потенційно є одночасно і пішоходом, і велосипедистом, і користувачем автомобіля або громадського транспорту. Людина в першу чергу потребує реалізації поїздки, а вже в другу обирає спосіб пересування. Для реалізації поїздки конкретним видом або комбінацією видів транспорту використовується транспортна мережа. Відповідно, на процес рішення про спосіб пересу-

вання впливає доступність транспортної опції, тобто, не тільки наявність велосипеда чи автомобіля, а й наявність мережі, наприклад, проходження маршруту громадського транспорту в зонах відправлення і прибуття.

Транспортна мережа – це набір вузлів (наприклад, точок тяжіння), поєднаних зв'язками (дуг між точками). У такому випадку для різних видів транспорту дугами будуть виступати ділянки інфраструктури, придатної для руху відповідним видом транспорту. При цьому дуги мережі можуть проходити як по вулицям, які поєднують елементи різних або навіть всіх мереж, так і бути абсолютно відокремленими. Наприклад, громадський транспорт (рис. 2.1) може проходити по мережі автомобільних доріг (рис. 2.2) або по абсолютно окремим шляхам (швидкісний трамвай, метрополітен).

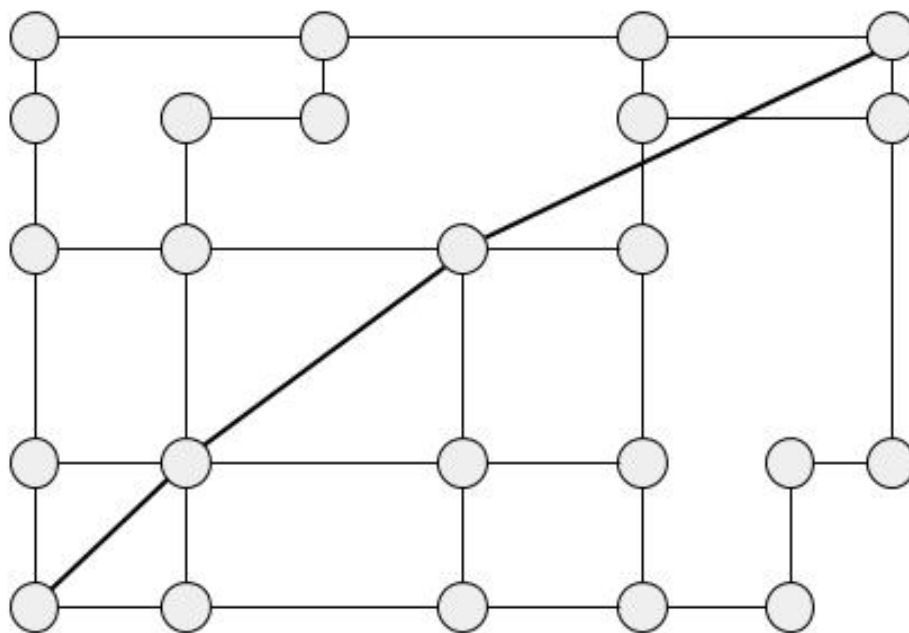


Рисунок 2.1 – Граф мережі ліній громадського транспорту

Таким чином, ділянка ВДМ може рахуватися такою, що належить до складу мережі певного виду транспорту в тому випадку, якщо через неї проходять дуги цієї мережі і вона придатна для використання цим видом транспорту. Хорошим прикладом цього визначення є пішохідна мережа (рис. 2.3). у той час, як у містах України мережа пішохідних шляхів є дуже розвиненою, вона часто

сприймається як щось натуральне і типове, проте це так само окрема мережа, яка має свої переваги і обмеження. Через те, що більшість автомобільних доріг дублюється пішохідними доріжками або тротуарами, ми звикли сприймати, що будь-який простір є придатним для пішохідного руху і, відповідно, не виникає потреба в плануванні мережі пішохідних шляхів. Через високу щільність цих шляхів, навіть якщо певна ділянка виключена з мережі (наприклад, у результаті зміни організації дорожнього руху), то зазвичай достатньо близько пролягає альтернативний шлях. Натомість країни розвинуеного автомобілекористування, такі як США або Об'єднані Арабські Емірати (ОАЕ), є прикладом ситуації, коли автомобільна мережа є значно більш розвинена, ніж пішохідна. Велика кількість доріг не дублюється тротуарами, а магістральними шляхами (intercity highways) заборонено пересуватися пішки. І хоча мережа пішохідних шляхів в Україні є зазвичай більш розвиненою, ніж мережа автомобільних шляхів, аналогічним прикладом розділення може бути лінія метрополітену. Попри те, що тунель метро дозволяє пересуватися пасажиром громадського транспорту, цей зв'язок відсутній у пішохідній мережі через непридатність пересування пішки.

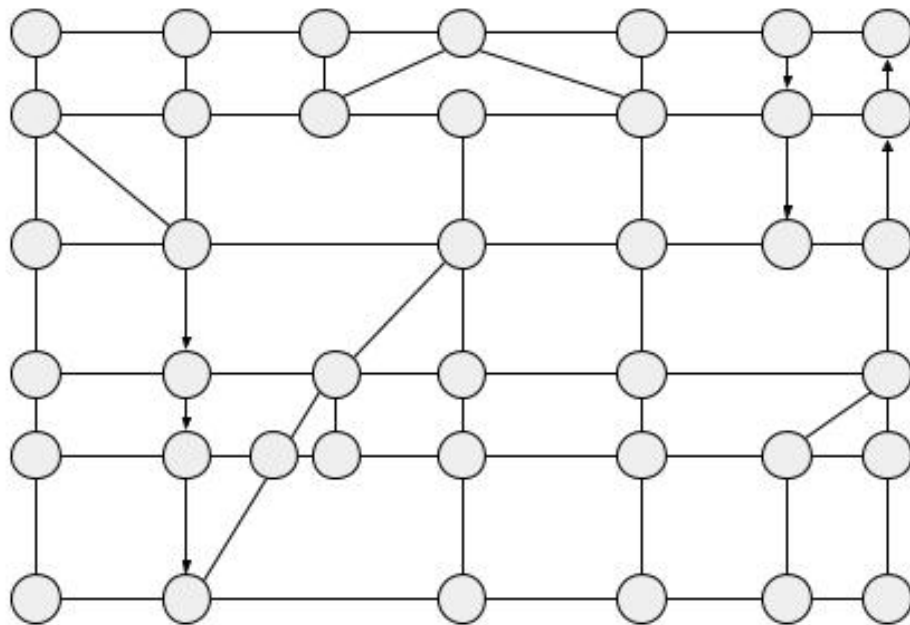


Рисунок 2.2 – Граф мережі автомобільних шляхів

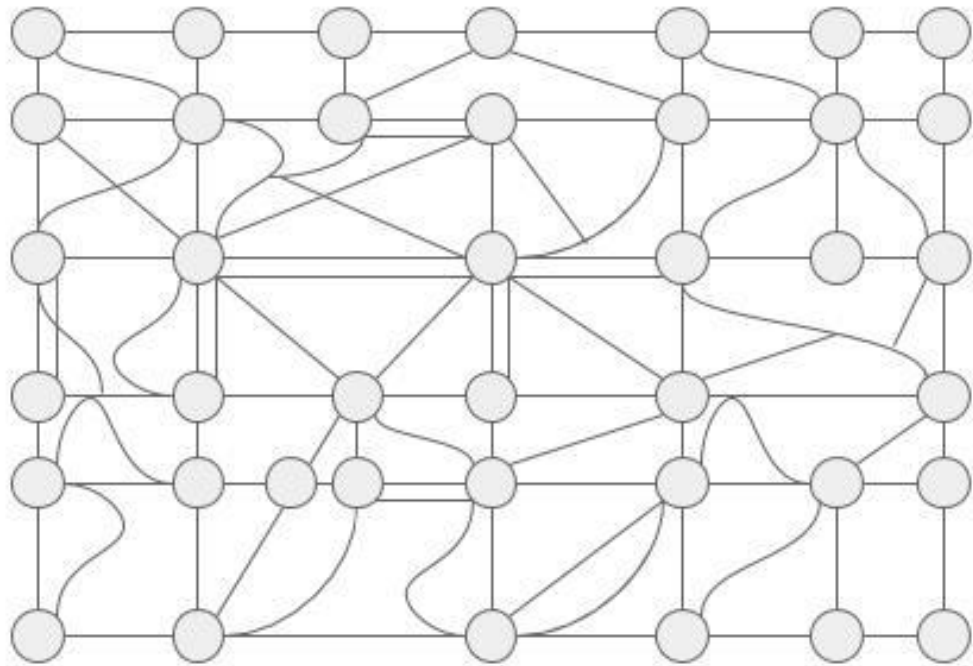


Рисунок 2.3 – Граф мережі пішохідних шляхів

Кожний тип мережі має певні вимоги, обумовлені особливостями виду транспорту. Наприклад, через те, що пішоходи займають найменший простір з усіх форм пересування, особливістю пішохідних мереж є те, що вони можуть бути дуже компактні (стежки і доріжки до 0,5 м шириною), щільні, і можуть поєднувати всі або майже всі точки тяжіння. Недоліком пішого пересування є низька швидкість і фізичне навантаження пересування, що не дозволяє долати великі відстані, підсилюючи вимоги до прямолінійності мережі.

Згідно з Довідником велосипедного руху Європейської Комісії [109], пропускна здатність смуги руху шириною 3,5 м, що є стандартною шириною смуги руху в Україні згідно з ДБН, на годину для різних видів транспорту становить: трамвай – 22 тис. осіб/год, пішки – 19 тис. осіб/год, велосипед – 14 тис. осіб/год, автобус – 9 тис. осіб/год, легковий автомобіль – 2 тис. осіб/год. З врахуванням середньої швидкості кожного з перелічених видів транспорту стає очевидним, що велосипед забезпечує не лише високу енергоефективність пересувань, але й високу ефективність з точки зору використання міської території при прийнятній швидкості руху.

Велосипедний транспорт, у свою чергу, є одним з найбільш енергоефективних видів транспорту, а в умовах міста з високою щільністю забудови і транспортних мереж має найменший час на пересування «від дверей до дверей» на відстані до 8 км. Велосипедний транспорт є ефективним з точки використання транспорту: габарити велосипеда дозволяють пересуватися на дуже вузьких ділянках, шириною від 1 м. На відміну від пішого руху, велосипедист середнього рівня фізичної підготовки може рухатися, у середньому, у діапазоні 15-22 км/год, що відповідає середній швидкості нешвидкісного громадського транспорту.

Проте при плануванні розвитку інфраструктури велосипедного транспорту в містах та формалізації принципів її формування слід приймати до уваги те, що велосипедна мережа має набір специфічних характеристик. Так, мережа велосипедного транспорту (рис. 2.4) – це сукупність елементів інфраструктури, придатної для безперешкодного пересування на велосипеді. При цьому важливо відмітити саме можливість безперешкодного руху, який виражається через дотримання принципу зв'язності мережі. Перехід через пішохідний перехід або проведення велосипеда в громадському транспорті не прирівнюється до пересування велосипедом і, відповідно, є переходом до використання іншого виду транспорту. Необхідність спішитися означає, що мережа не є зв'язною.

Особливість того, що велосипед приводиться в дію силою людини, окрім позитивних результатів, накладає низку обмежень на велосипедиста, які необхідно враховувати при плануванні велосипедної мережі. Хоча дослідження показують, що відстань, яку долає велосипедист, не є єдиним фактором вибору маршруту, необхідність долати додаткову відстань через обмеження організації дорожнього руху чи природні бар'єри може суттєво знизити привабливість велосипеда, як виду транспорту. Планувальник має використовувати той факт, що велосипедист може рухатися по достатньо вузьким шляхам, щоб надавати максимально прямолінійне сполучення за рахунок ділянок, які не використовуються більш габаритним транспортом. Це також стосується вимоги до організації зрозумілого маршруту з доцільною кількістю поворотів. Варто пам'ятати, що вело-

сипедист є чутливим до необхідності зупинятися через те, що неможливо підтримувати баланс на велосипеді в стоячому стані. Тому при формуванні мережі необхідно намагатися зменшити на шляху велосипедистів кількість ділянок, які будуть змушувати їх зупинятися.

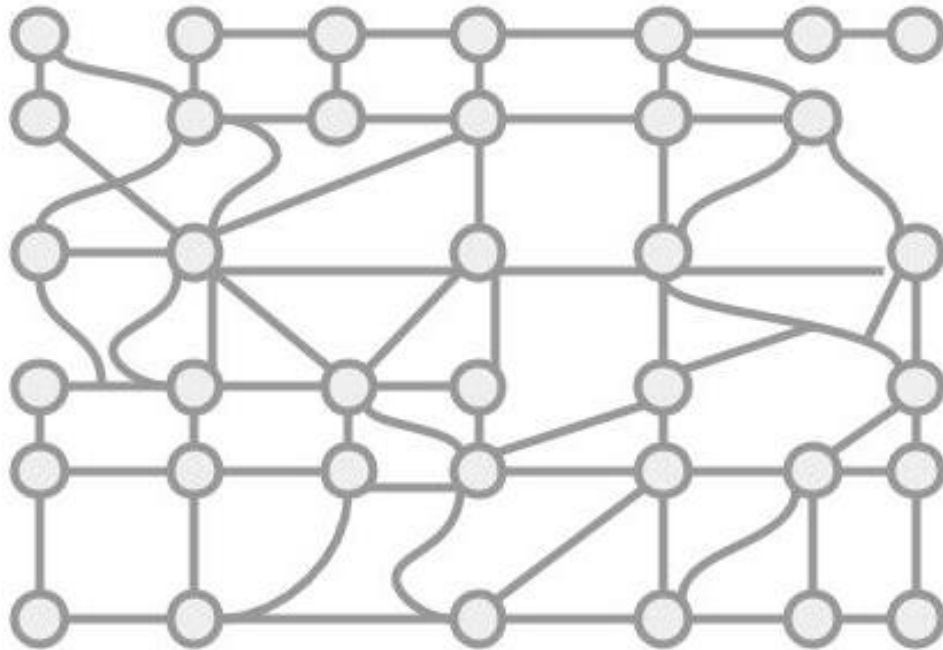


Рисунок 2.4 – Граф мережі велосипедних шляхів

Проте більше, ніж безпосередньо відстань, яку долає велосипедист, на фізичне навантаження під час руху впливають дорожні умови, особливо ухил дорожньої мережі. Дослідження показують, що ухил понад 4% створює суттєве навантаження на велосипедиста, а ділянки з ухилом понад 6% не придатні для регулярних (неспортивних) велосипедних поїздок [83]. Врахування рівня фізичної роботи, необхідної для здійснення поїздки, має реалізовуватися за рахунок вибору найбільш придатних шляхів проходження велосипедних маршрутів та інтеграції з громадським транспортом у місцях, де в цьому є відповідна потреба. Практичні рекомендації і методика розрахунку фізичної роботи при русі на велосипеді представлена більш детально в наступних розділах цієї роботи.

Задля максимізації вибору велосипедного транспорту, мережа має бути доступна для велосипедистів, прив'язана до місць призначення користувачів та відповідати меті поїздки. Під доступністю мається на увазі, що мережа не обмежується ключовими зв'язками на рівні міста, які зазвичай відповідають найвищій концентрації транспортних потоків, але знаходяться на певній відстані від безпосередніх точок відправлення і призначення велосипедиста. Цей принцип має реалізовуватися за рахунок різних рівнів ієрархії мережі. Аналогічно до шляхів систем автомобільного та громадського транспорту, можна виділити такі обов'язкові категорії, як швидкісне міжміське сполучення, швидкісне міське сполучення та нешвидкісне сполучення. Ієрархія і трасування мережі також має відповідати меті поїздки. Окрім того, що велосипед є видом транспорту для реалізації щоденних поїздок, їзда на велосипеді, подібно до пішохідного руху, може бути метою поїздки, або принаймні компонент фізичного навантаження може грати роль у виборі цього виду транспорту. Таким чином, велосипедні маршрути доцільно розділяти на утилітарні та рекреаційні. Неврахування категорії користувачів і цілей пересування при створенні велосипедної інфраструктури може призвести до того, що вона буде неефективно використовуватися. Так, наприклад, поєднання утилітарного велосипедного маршруту з пішохідним рухом може призвести до конфліктних ситуацій через високу різницю швидкостей, зумовлену тим, що утилітарні користувачі намагаються скоротити час поїздки. Натомість поєднання спортивної велосипедної інфраструктури з утилітарною міською може призвести до дискомфорту пересування велосипедистів, знову через різницю швидкостей. Групи користувачів можуть відрізнятися за демографічними, соціально-економічними, географічними показниками, за типом велосипеда тощо. Задоволення потреб користувачів різних категорій має досягатися за рахунок аналізу форм пересування, об'єктів тяжіння, які пов'язує інфраструктура, інтенсивності руху та іншого. Рівень інтеграції з іншими транспортними системами можливий за умови врахування особливостей пересування кожним видом транспорту. Так, наприклад, швидкісне велосипедне сполучення можна поєдну-

вати з нешвидкісною автомобільною мережею або ГТ, а нешвидкісне велосипедне – з неінтенсивним пішохідним рухом. Головним критерієм вибору має бути можливість забезпечення, в першу чергу, можливості безпечно, а в другу чергу, комфортно пересуватися ділянкою мережі. При цьому варто пам'ятати, що можливість використання інфраструктури інших видів транспорту велосипедним транспортом ще не означає, що вона придатна для велосипедного руху, особливо для різних цільових груп користувачів.

Перед тим, як переходити до вибору типу велосипедної інфраструктури і форми організації руху, відповідно до [49], необхідно скласти граф комплексної транспортної мережі, відповідно до якої будуть визначатися транспортні системи, які мають бути розміщені на окремій ділянці вулиці (рис. 2.5).

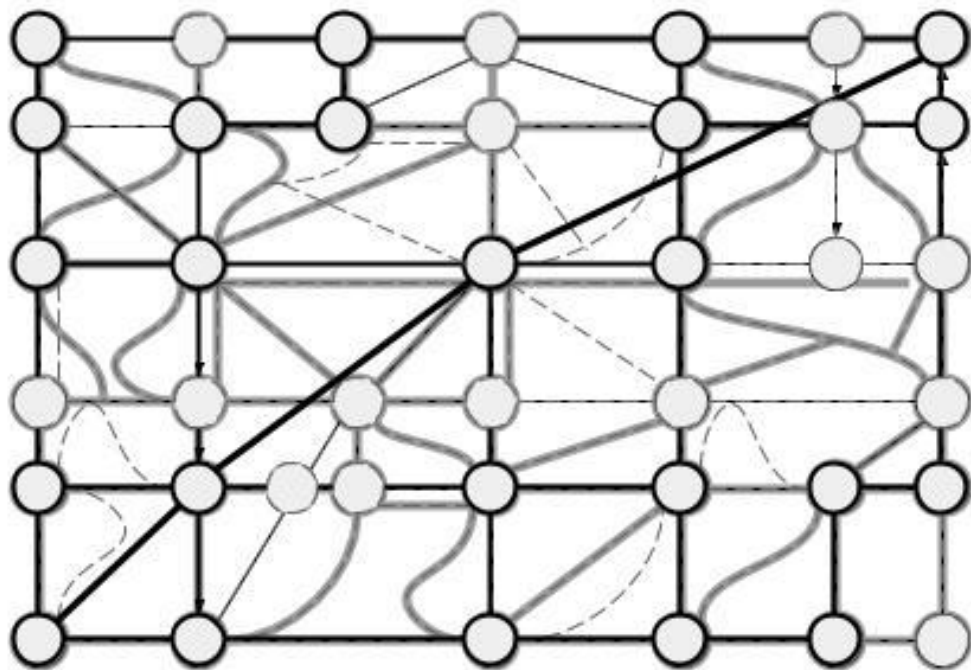


Рисунок 2.5 – Граф комплексної транспортної мережі

При плануванні поперечного розрізу ділянки вулично-дорожньої мережі, або, іншими словами, профілю вулиці, має розглядатися можливість і форма одночасного поєднання різних транспортних функцій у просторі. На цьому етапі визначаються форми організації руху. Проте без визначення загального виду

(форми, організації) мережі рішення будуть точковими і, в результаті, не придатними для користування. Таким чином, необхідно розділяти процеси планування мережі системи транспорту і вибору форми організації руху. Однією з задач цієї роботи є розробити методику планування мережі інфраструктури велосипедного транспорту та здійснити її практичне застосування.

Навіть враховуючи, що розбудова велосипедної інфраструктури є значно дешевшою за інші проекти транспортної інфраструктури, щорічні бюджетні обмеження не дозволяють здійснити одночасне впровадження всієї мережі на базі існуючої інфраструктури інших видів транспорту, а тим паче при розбудові нової. Ці обмеження диктують необхідність врахування поетапного створення веломережі. При цьому слід прагнути максимальної ефективності ВІ, під якою розуміється різниця між результатами створення нового фрагменту веломережі та витратами на її створення.

Результати створення ВІ мають дуже широкий спектр навіть для однієї з зацікавлених сторін – міської влади, яка за допомогою ВМ скорочує цілий перелік негативних наслідків функціонування індивідуального моторизованого транспорту та забезпечує мешканців міста новими засобами задоволення потреб у пересуванні та відпочинку. Всі ці результати належать до соціальних факторів, які дуже складно оцінити кількісно. До того ж всі вони не носять фінансового характеру, тож спроби приведення до грошового виміру мають достатньо суб'єктивний та маніпулятивний характер.

Для оцінки результатів створення деякої ВІ слід використовувати ту особливість розглянутої задачі, що всі можливі позитивні результати розвитку нової веломережі досягаються за рахунок переходу мешканців міста з інших видів транспорту на велосипедний. Тобто максимальний позитивний результат створення ВІ досягається при максимальній кількості велосипедистів, що нею користуються.

Складність використання стандартного показника ефективності транспортних систем [118] для оцінки ефективності веломережі полягає в тому, що результати використання ВІ та витрати на її створення мають різний фізичний сенс

та різні одиниці виміру, різну кількість велосипедистів, що скористаються ВІ за деякий проміжок часу, та різні грошові витрати на створення інфраструктури. Ця складність долається за рахунок заміни різності між результатами та витратами на ділення результатів на витрати. Показником ефекту від впровадження велосипедної мережі можна вважати кількість велосипедистів, показником ефективності інфраструктурних рішень – кількість населення, що отримало доступ до користування велосипедною мережею [110], а показником ефективності використання коштів – відношення витрат до кількості потенційних користувачів. В містах з малою часткою велосипедокористування неможливо орієнтуватися на маршрути руху існуючих користувачів через те, що їх недостатньо. При створенні велосипедної мережі необхідно орієнтуватися на потенційний, а не на існуючий попит. ВІ має проходити шляхами, що відповідають найбільшій ефективності, яка представлена інтенсивностями руху, при чому орієнтуватися на майбутнє, а не існуюче користування. Проте в містах з низьким рівнем користування велосипедним транспортом виникає проблема визначення трас пролягання таких шляхів. Замір існуючих інтенсивностей може надати хибну або недостатню інформацію про шляхи пролягання маршрутів велосипедистів. Для вирішення цієї проблеми виникає потреба у створенні прогнозованої моделі руху велосипедного транспорту, яка буде враховувати потенційний попит.

2.2 Теоретичні основи формування моделі попиту на велосипедні поїздки

Моделювання попиту на поїздки містить два питання, які на даний момент ще не мають загальноприйнятого вирішення для велосипедного транспорту. Першим питанням є обґрунтований вибір методики моделювання попиту на поїздки велосипедом, другим є підхід до мікрорайонування території міста з точки зору моделі велосипедного руху та необхідність його формалізації для забезпечення можливості використання в будь-якому українському місті.

При вирішенні першого питання в містах з малою часткою велоруку за основу при формуванні підходу до визначення попиту на велосипедний транспорт доцільно прийняти чотирьохетапну транспортну модель. Це обумовлено тим, що чотирьохетапна процедура побудована на виявленні причин виникнення попиту, що є обов'язковим для виконання принципів створення ВІ, сформульованих в попередньому підрозділі. Альтернативним чотирьохетапній процедурі підходом є використання наявних потоків досліджуваного виду транспорту в якості вихідної інформації, що, вочевидь, не є найкращою основою для вивчення потенційного попиту на велосипедний транспорт в українських містах внаслідок дуже низького рівня розвитку велосипедного транспорту.

Чотири основні етапи, які виконуються в обраному підході до моделювання попиту на поїздки, полягають у наступному:

- визначення необхідності пересування і його цілі (генерація поїздок);
- визначення місць початку і завершення пересування (розподіл поїздок в матриці кореспонденцій);
- вибір способу пересування (вид транспорту);
- вибір маршруту руху (розподіл поїздок по мережі).

Структура процесу моделювання представлена на рисунку 2.6. На кожному кроці в моделі передбачаються її верифікація та калібрування, що означає включення ітераційних процедур і повернення, при необхідності, до попередніх кроків. Як правило, в моделі закладається можливість прогнозування ситуації на майбутні періоди.

Числовим виразом моделі попиту на велосипедний транспорт є матриця кореспонденцій (МК), яка являє собою квадратну матрицю, кількість рядків і стовпців у якій дорівнює кількості транспортних районів (ТР) в місті. Кожна клітинка матриці відображає кількість пересувань між районами відправлення і прибуття, які виконуються в той період часу, який описується матрицею кореспонденцій. Заповнення МК вирішується на основі таких показників, як доступність зони призначення, тобто відстані між зонами відправлення та призначення

або часу в дорозі, і кількості активностей (можливостей) в зоні прибуття, з врахуванням сумарної кількості активностей всіх досліджуваних зон, а також параметру функції тяжіння.

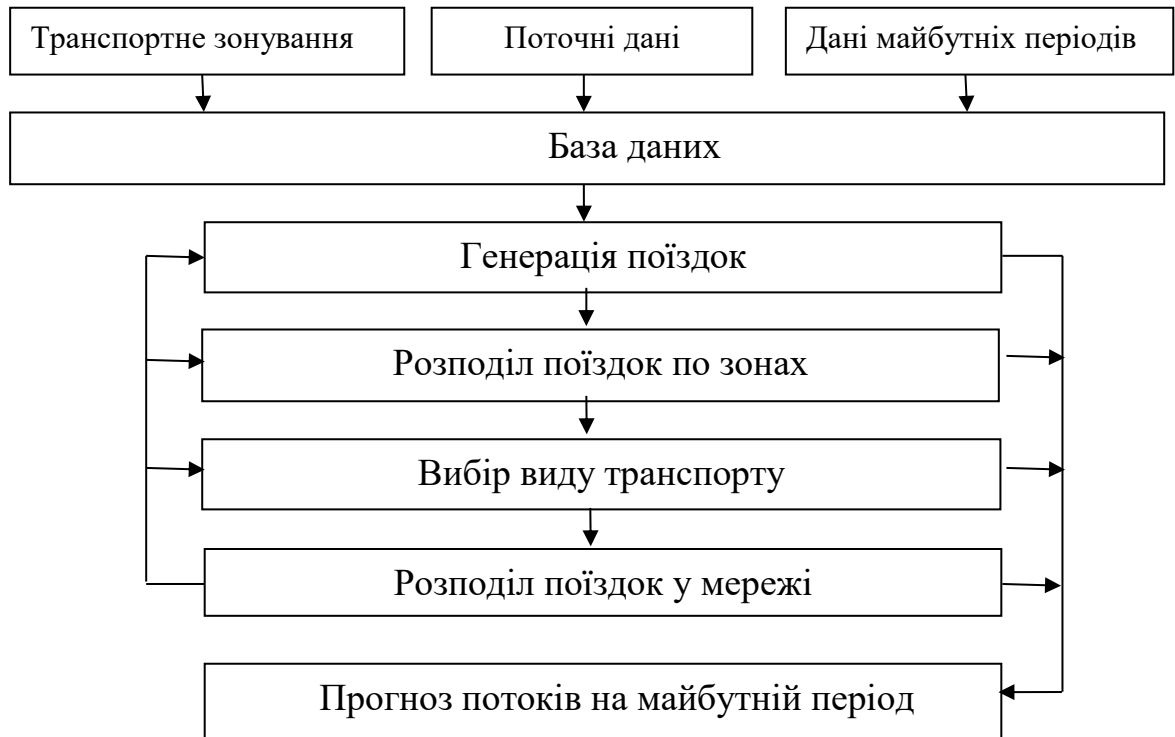


Рисунок 2.6 – Структура класичної чотирьохетапної транспортної моделі

При розрахунку МК можна використовувати емпіричні або теоретичні моделі. Незважаючи на потенційно більш високу надійність і точність, емпіричні моделі засновані на дуже трудомісткій процедурі збору даних, мають істотні обмеження по методам збору інформації про пересування, а також невиправдано трудомісткі для оцінки типу пересувань з низькою інтенсивністю. Крім того, вони завжди описують тільки фактичний попит на пересування і не дуже добре пристосовані до його прогнозування в майбутньому, особливо якщо в майбутньому істотно змінюються умови функціонування транспортної системи, що і відбувається при створенні ВІ.

У свою чергу апріорні теоретичні моделі ґрунтуються на відомих для кожного району обсягах відправлення і прибуття учасників руху, які потім розподіляються по МК на основі прийнятої гіпотези. Теоретичні моделі дають зовні

правдоподібний розподіл кореспонденцій в матриці, але не можуть претендувати на високу точність при порівнянні з фактичними кореспонденціями [111]. Однак при формуванні концепції розвитку велотранспорту в містах з низьким рівнем його використання і, по суті, відсутністю фактичної МК, апріорні моделі можуть надати необхідну для планування інформацію про потенційні напрямки поїздок велосипедистів.

Серед апріорних моделей можна виділити рівноважну, ентропійну та гравітаційну моделі. Різниця між цими моделями полягає в прийнятих гіпотезах щодо закономірностей формування кореспонденцій. Рівноважна модель заснована на припущенні про повну залежність поведінки індивідуума в транспортній системі міста від поведінки інших учасників транспортного процесу. Рівноважним називається стан, в якому жоден з учасників руху не може зменшити свої індивідуальні витрати на пересування за рахунок зміни пари «житло – робота», шляху проходження або способу пересування. Дане припущення є малореалістичним при моделюванні велосипедного транспорту, оскільки прийняття рішення про його використання практично не залежить від рішень інших учасників використовувати ті чи інші види транспорту.

Ентропійна модель заснована на припущенні про аналогії процесів, що відбуваються всередині транспортних систем, з термодинамічними. Тут використовується припущення, прямо протилежне попередньому – про повністю випадкову поведінку пасажирів у транспортній системі. Тоді величини кореспонденцій визначаються за принципом максимізації ентропії, згідно з яким система з найбільшою ймовірністю приймає максимально стійкий стан з мінімумом витрат внутрішньої енергії. Даний підхід також не може бути застосовний до моделювання попиту на велосипедний транспорт, оскільки поведінка пасажирів не може бути повністю випадковою. Сама по собі наявність велосипеда у жителя міста не може бути випадковою і є результатом свідомо прийнятого рішення.

Остання в класі апріорних моделей – гравітаційна модель, заснована на припущенні про подібність взаємодії між транспортними районами міста з дією закону всесвітнього тяжіння. В якості мас в пасажирській транспортній системі

виступають місткості транспортних районів відправлення та прибуття, а в якості опору – відстань, час або сукупність показників, представлених у вигляді сумарних витрат. З огляду на основну особливість системи велосипедного транспорту, а саме високу чутливість до дальності поїздки, обумовлену використанням фізичної енергії велосипедиста для руху, гравітаційна модель є найбільш придатною для моделювання кореспонденцій велосипедного транспорту.

У цьому випадку кількість велосипедних поїздок між парою транспортних районів i та j розраховується як:

$$d_{ij} = k \cdot P_i \cdot Q_j \cdot f(c_{ij}), \quad (2.1)$$

де d_{ij} – кількість велосипедних поїздок з району i в район j ;

P_i – обсяг виїзду з району i ;

Q_j – обсяг в'їзду до району j ;

k – калібрувальний параметр;

$f(c_{ij})$ – функція повних витрат пасажирів на пересування з району i в район j , виражена деяким розподілом.

Визначення повних транспортних витрат залежить від завдань дослідження і доступної інформації та може включати в себе відстань між транспортними районами, час у дорозі, вартість, доступність або комбінацію цих та інших показників. Функція розподілу витрат може приймати різний вигляд, але найчастіше представлена сімейством гама-розподілу [112].

Розподіл витрат на пересування може приймати будь-який варіант гама-розподілу від експоненціального до нормального розподілу. Особливістю експоненціального закону є те, що результат подальших спостережень не залежить від моменту початку спостереження. При експоненціальному законі безперервна величина розподілена рівномірно на інтервали, якщо всі її можливі значення знаходяться на цьому інтервалі і щільність розподілу ймовірностей є постійною. Цей закон є характерним для піших пересувань.

Для опису витрат моторизованих видів транспорту також може бути придатним нормальний закон розподілу. Нормальний закон розподілу підходить для опису випадкової величини, яка є сумою багатьох випадкових складових. При цьому, яким би законам розподілу не були підпорядковані окремі елементарні складові помилки, особливості цих розподілів у сумі великого числа доданків нівелюються, і сума є такою, яка може бути описана нормальним законом. Основне обмеження, що накладається на підсумовуванні помилки, полягає в тому, щоб вони всі рівномірно відігравали в загальній сумі відносно малу роль.

Якщо випадкова величина розподілена за нормальним законом, то функція витрат набуває вигляду

$$f(c_{ij}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(c_{ij}-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.2)$$

де c_{ij} – відстань між транспортними районами;

μ – математичне сподівання випадкової величини відстані між ТР;

σ – стандартне відхилення відстані.

Особливості пересування ВТ, які відрізняють його від піших та моторизованих пересувань, вимагають обов'язкового встановлення виду функції розподілу витрат на пересування за допомогою натурних спостережень при моделюванні МК велотранспорту в містах з незначним рівнем його використання.

При плануванні мережі велосипедного транспорту в цих умовах доцільно виходити з потенційно можливого, а не реального попиту. Тому при оцінці попиту на велосипедний транспорт доцільно формувати матриці велосипедних кореспонденцій на основі загальних кореспонденцій в межах раціональності використання велосипеда для здійснення поїздки:

$$d_{ij} = D_{ij} \cdot k_{ij}, \quad (2.3)$$

де d_{ij} – кількість велосипедних кореспонденцій з району i в район j ;

D_{ij} – загальна кількість кореспонденцій з району i в район j ;

k_{ij} – коефіцієнт приведення до велосипедних кореспонденцій:

$$k_{ij} = w_n/w_{ij}, \quad (2.4)$$

де w_{ij} – ймовірність реалізації кореспонденцій, отримана на основі теоретичної моделі;

w_n – ймовірність реалізації кореспонденцій, що визначається на основі емпіричної функції розподілу.

Емпірична функція розподілу може визначатися або на основі дальності велосипедної поїздки, або на основі деякої іншої відстані між пунктами відправлення та прибуття. Це може бути пряма «повітряна» відстань, відстань по магістральним вулицям і т.ін.

$$w_n = f(l_n), \quad (2.5)$$

$$w_{ij} = f(l_{ij}) \quad (2.6)$$

де l_n – дальність велосипедної поїздки, км;

l_{ij} – інша відстань між ТР, км.

Описана вище послідовність дій щодо визначення попиту на пересування на велосипедах забезпечує можливість обґрунтованого прийняття рішень та є методикою, що надає відповіді на перше питання моделювання попиту на пересування.

Вирішення другого питання моделювання попиту на велотранспорт – розбиття території міста на ТР – має реалізовуватися за рахунок формалізованого алгоритму формування ТР, заснованим на загальнодоступних даних, який дозволяє виконати всі вимоги з мікрорайонування. Цей алгоритм має бути реалізований у відповідному програмному забезпеченні, що має гарантувати уникнення

суб'єктивності в ухваленні рішень.

Підхід до формування ТР істотно залежить від завдань моделювання, а також від якості доступної інформації про об'єкт дослідження. Представлені на цей час алгоритми були розроблені для моделювання систем велосипедного транспорту, до яких ставиться вимога високої деталізації демографічних даних, які не доступні на даний момент в Україні. Тому в даній роботі як основу для нового алгоритму доцільно використовувати метод дезагрегування території.

Наявні вказівки до транспортного мікрорайонування міста, розроблені в країнах колишнього Радянського Союзу, які не вимагають високої деталізації демографічних даних, також не можуть бути використані при створенні ВІ міста, оскільки були призначені в основному для моделювання роботи громадського транспорту міст і не враховують особливостей індивідуального транспорту взагалі та велосипедного транспорту зокрема.

У вітчизняній і зарубіжній літературі можна виділити різні вимоги при визначенні транспортних районів:

1. Однорідність формування / тяжіння поїздок [113 – 118];
2. Суміжність і увігнутість зони [116 – 118];
3. Компактність форми району [114 – 118];
4. Винятковість, замкнутість (уникнення потрапляння району всередину іншого району або острівців) [116 – 118];
5. Баланс щодо зародження поїздок (невеликі середньоквадратичні відхилення між районами) [116 – 118];
6. Узгодження меж транспортних районів з адміністративними, політичними або статистичними межами [114 – 119];
7. Врахування фізичних бар'єрів [116 – 118];
8. Врахування вподобань осіб, що приймають рішення щодо кількості транспортних районів [116, 117, 119];
9. Уникання проведення кордону району по основним дорогам [119]

10. Вибір розміру району так, щоб помилка агрегування в результаті припущення, що всі поїздки концентруються в центрі тяжіння району, була невелика (географічна точність) [119];

11. Мінімізація внутрішньорайонних поїздок [114, 119];

12. Максимізація статистичної точності осередків матриці кореспонденцій [120, 121].

Наявні методи мікрорайонування можна розділити на методи агрегування і методи дезагрегування. До методів агрегування, тобто об'єднання території за певними загальними характеристиками, відносяться ієрархічний метод формування демографічних зон, який активно застосовується департаментами планування США і Великобританії. Він заснований на автоматизованій процедурі зонування, вперше запропонованій Опеншаурером ще в 1977 році, і згодом вдосконалений для обробки великих масивів даних [120, 121]. Агрегування ТР за допомогою кластерного аналізу [122] ґрунтується на тому, що формується n -ний набір кластерів. Кожен кластер являє собою групу зон з аналогічними демографічними характеристиками. Функція початкового припущення полягає у визначенні зон, які є найбільш несхожими, і формує ТР на основі кластерів. Формуються ТР і за допомогою статистичних даних, доступних для території. Наприклад, у роботі [123] використовуються дані про щільність відправлень-прибуттів, і межа району визначається в місцях найменшої щільності.

До методів дезагрегування території можна віднести формування ТР на основі полігонів Тіссена. Приклад використання методу для моделювання системи пасажирського громадського транспорту представлений в роботі [124]. Згідно з методом аналізу бар'єрів, межа району проводиться по межі бар'єру.

Основна з проблем, що виникають при формуванні ТР, проявляється в конфлікті кордонів і місткостей ТР. З одного боку, чим більше територія ТР, тим вище похибка просторового розподілу, пов'язана з припущенням, що всі поїздки зароджуються в єдиному центрі тяжкості ТР. Це призводить до того, що внутрішньорайонні поїздки не можуть бути враховані, оскільки вони зароджуються і

поглинаються в одній і тій самій точці. При цьому виникає велика похибка в розподілі поїздок по мережі для варіантів шляху, які розташовані близько до реальних пунктів відправлення і прибуття, оскільки модель більш ймовірно завантажує дороги з більш високою ієрархією. З іншого боку, велика кількість маленьких за місткістю ТР призводить до втрати статистичної точності в зв'язку з тим, що матриці кореспонденцій часто формуються на основі вибіркового дослідження. Тоді збільшення кількості маленьких ТР призводить до збільшення кількості осередків матриці кореспонденцій з нульовими значеннями і зменшення ширини довірчого інтервалу оцінки транспортних потоків. Для подолання цієї проблеми в роботі розроблена автоматизована процедура формування ТР, яка дозволяє досліднику оптимізувати кількість і розмір транспортних районів, використовуючи єдині критерії формування кордонів, але задаючи різні межі інтервалів площі та чисельності населення без збільшення трудомісткості моделювання.

Запропонований алгоритм передбачає формування ТР в два етапи: на першому етапі відбувається дезагрегування об'єкта дослідження на основі просторових і демографічних особливостей території, а на другому відбувається коригування меж ТР на основі умов, заданих дослідником, в залежності від цілей моделювання та результатів вибіркового обстеження.

Оскільки ТР – це найменша географічна одиниця транспортної моделі, для якої передбачається, що всі поїздки зароджуються в умовному центрі ТР, то його територія повинна бути однорідною з транспортної точки зору, а кордони повинні забезпечувати рівномірну пішохідну доступність центру ТР. Крім того, межі також повинні забезпечувати рівну пішохідну доступність до центрів сусідніх ТР, які вони розділяють. У цьому випадку втрати точності представлення території міста сукупністю транспортних районів будуть мінімальні.

Дотримання вимоги однорідності території ТР добре забезпечується вибором ділянок одного типу землекористування для нього, наприклад, на основі даних генерального плану або зонінгу. Карта землекористування може бути використана як растровий файл для роботи в ГІС системі, з урахуванням чого процес

мікрорайонування території міста при створенні моделі велосипедного транспорту перетворюється на інженерну задачу, яка може бути алгоритмізована.

При поділі територій одного типу землекористування на кілька ТР спочатку, виходячи із заданої максимально допустимої площі ТР, необхідно визначити мінімальну кількість ТР, на які повинна бути поділена однорідна територія, що розглядається:

$$n_{TPi} = TRUNK \left(S_i / S_{TPmax} \right), \quad (2.7)$$

де n_{TPi} – кількість ТР на котрі повинна бути поділена S_i од.;

S_i – площа території одного типу землекористування, котра повинна бути поділена на ТР, $S_i > S_{TPmax}$, км²;

S_{TPmax} – максимально припустима площа ТР, приймається на основі досліджень, км²;

TRUNK – математична функція, яка повертає цілу частину аргументу.

Після цього мають бути визначені межі нових транспортних районів, як правило, шляхом ділення на рівні ділянки вздовж більшої централі однорідної території. Для проведення границь ТР також можуть бути використані найбільш вузькі місця у середині її території та фізичні бар'єри, такі як річки та інші водойми, залізничні колії або магістралі загальноміського значення.

Оскільки в результаті автоматизованого дезагрегування можуть утворитися мікрорайони, які не представляють цінності для процесу моделювання, необхідно провести ряд операцій з видалення уламкових полігонів, надто маленьких чи надто великих полігонів, наприклад, за допомогою інструментів «Вирівняти за формою», «Злиття» або «Розбити полігон», доступних в пакеті ArcGIS. Діапазон розміру ТР визначається на основі обстежень закономірностей.

У результаті обґрунтування кроків щодо мікрорайонування території міста з метою створення моделі попиту на пересування велосипедним транспортом у

містах з невеликою часткою його використання, створено алгоритм мікрорайонування, який програмно реалізований в ArcGIS 10.2 і представлений на рис. 2.7.

Після того, як ТР сформовані, необхідно провести збір даних, які дозволять розрахувати кількість відправлень і прибуттів для кожного транспортного району. Для моделей трудових і учбових поїздок, які розглядаються у даній роботі такими даними є статистична інформація про кількість населення, у тому числі працездатного, рівень зайнятості, кількість робочих місць. Методики збору і обробки даних представленні у третьому розділі.

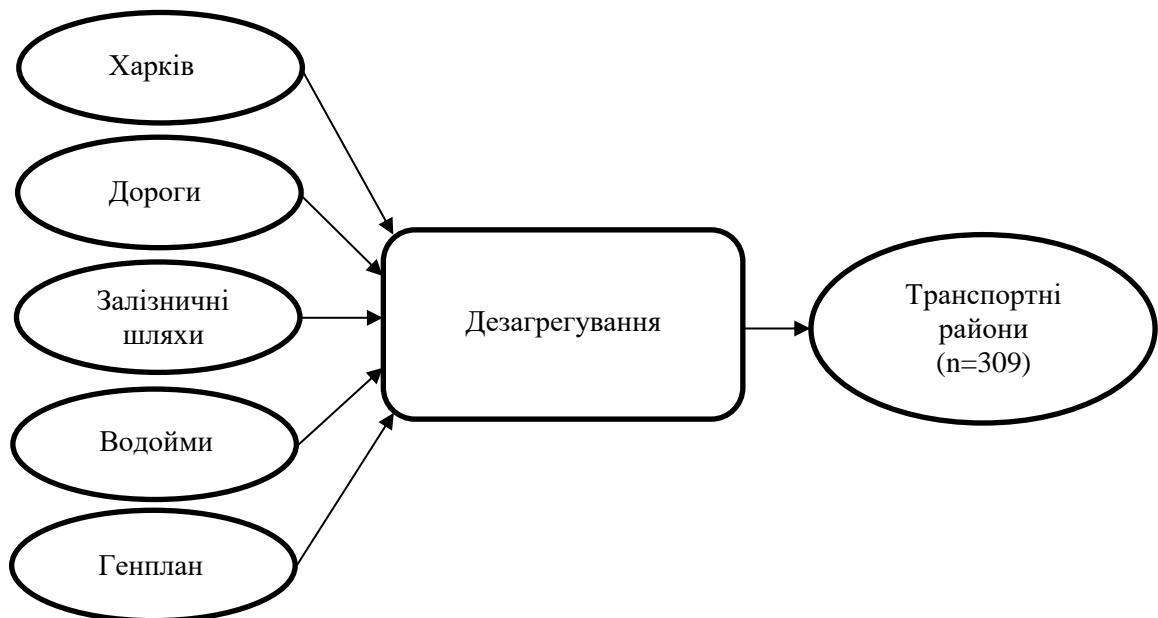


Рисунок 2.7 – Блок-схема формування транспортних районів

Після того, як матриці велосипедних кореспонденцій сформовані, можна переходити до четвертого етапу чотирьохетапної транспортної моделі – розподілу по мережі. Для цього необхідно сформулювати теоретичну модель визначення маршруту руху велосипедистами.

2.3 Формування теоретичних основ визначення оптимальної траси маршруту руху

Велосипедний транспорт є одним з індивідуальних видів транспорту, в якому в найбільшому ступені проявляються їх властивості, основною з яких є свобода вибору шляху прямування при здійсненні пересувань. У цьому сенсі серед міських способів реалізації потреб у пересуванні він поступається лише пішому руху, який має мінімальну кількість перешкод у міському просторі.

У цьому випадку поведінку велосипедиста при виборі маршруту руху можна вважати раціональною, тобто такою, при якій рішення про маршрут руху приймається на момент прийняття позитивного рішення щодо здійснення поїздки і може незначно відрізнитися в процесі рутинних пересувань. Більш того, раціональна поведінка передбачає, що обраний шлях має якийсь набір характеристик, які роблять цей маршрут більш привабливим за інші.

Однак планувальник розвитку ВІ при цьому не може володіти повною інформацією про мотиви велосипедиста у виборі альтернативного шляху або щодо конкретної транспортної ситуації, що укладається у місті в момент руху велосипедиста (наприклад, погодні умови). Також існують фактори, що не можуть бути описані в статичних моделях на даному етапі розвитку науки. До таких, в першу чергу, належать якісні показники, які не мають кількісного виміру, наприклад, настрої або фізичний стан велосипедиста. Це призводить до наявності невизначеної (випадкової) складової в функції, що описує корисність пересування, яка повинна враховуватися при моделюванні поведінки велосипедиста.

Опис та прогнозування раціональної поведінки велосипедиста можливо реалізувати за допомогою теорії випадкової корисності, згідно з якою корисність альтернативи i в наборі альтернатив C_n для велосипедиста n може бути виражена як:

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in}, \quad (2.8)$$

де V_{in} – детерміністична складова корисності;

ε_{in} – випадкова складова корисності.

При цьому детерміністична складова може бути представлена як

$$V_{ij} = \sum_k \beta_k x_{ijk} = \beta x_{ij}, \quad (2.9)$$

де β – вектор параметрів; x_{ij} – вектор характеристик велосипедиста i и властивостей альтернативи j ; $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, J$ (n – кількість велосипедистів, J – кількість альтернатив, що пронумеровані вільним чином).

Враховуючи (2.9), функція корисності набуває наступного векторного вигляду:

$$U_{ij} = x_{ij}\beta + \varepsilon_{ij}. \quad (2.10)$$

Згідно з даною функцією буде обрана альтернатива з максимальною корисністю i , відповідно, ймовірність того, що альтернатива n буде обрана велосипедистом, дорівнює

$$P_{ij} = P\{U_{ij} \geq U_{ir}, \forall r = 1, \dots, J\}, \quad (2.11)$$

де U_{ir} – поточне значення корисності з набору альтернатив.

Підставлення (2.10) у (2.11) дозволяє отримати наступну залежність для ймовірності вибору:

$$P_{ij} = P\left\{\begin{array}{l} \varepsilon_{ir} - \varepsilon_{ij} \leq x_{ij}\beta - x_{ir}\beta, \\ \forall r = 1, \dots, J \end{array}\right\}. \quad (2.12)$$

Представлення виразу (2.12) в інтегральному вигляді дозволяє перейти до вирішення задачі визначення коефіцієнтів функції.

$$P_{ij} = \int_D f(\varepsilon_{ij}) d\varepsilon_{ij}, \quad (2.13)$$

де $d = \varepsilon_{ir} - \varepsilon_{ij} \leq x_{ij}\beta - x_{ir}\beta$ – бінарна функція, яка приймає значення 0 або 1;

$f(\varepsilon_i)$ – щільність випадкової складової виразу (2.10).

Мультиномінальна логіт-модель має закрити форму інтеграла і заснована на припущенні, що похибки ε є незалежними і однаково розподіленими відповідно до розподілу екстремальних значень типу I (розподіл Гумбеля).

$$F(\varepsilon_{ij}) = e^{-e^{-\varepsilon_{ij}}}. \quad (2.14)$$

Функція щільності розподілу похибок при цьому має вигляд

$$f(\varepsilon_{ij}) = e^{-\varepsilon_{ij}} \cdot e^{-e^{-\varepsilon_{ij}}}. \quad (2.15)$$

Після виконання математичних перетворень стандартна логіт-модель отримує такий вигляд:

$$P_{ij} = \frac{e^{x_{ij}\beta}}{\sum_{r=1}^J e^{x_{ir}\beta}}. \quad (2.16)$$

Представлена мультиномінальна логіт-модель заснована на припущенні про незалежність ймовірності вибору альтернати від сторонніх альтернатив. Таке припущення означає, що відношення ймовірностей двох альтернатив залежить тільки від характеристик цих альтернатив і не залежить від характеристик інших альтернатив:

$$\frac{P_{ij}}{P_{ir}} = \frac{e^{x_{ij}\beta}}{e^{x_{ir}\beta}} = e^{\beta(x_{ij}-x_{ir})}. \quad (2.17)$$

Функція корисності у виразі (2.17) представлена у загальному вигляді. Для отримання значень коефіцієнтів моделі необхідно сформулювати адитивну модель певних факторів, які надають кількісну характеристику альтернативним варіантам шляху прямування велосипедиста.

На першому етапі моделювання формується широкий перелік можливих характеристик альтернатив, який зазвичай скорочується на другому етапі моделювання після оцінки значущості факторів. Попередні дослідження в цій сфері дозволяють відокремити більш-менш стандартний набір кількісних факторів, що враховуються велосипедистами при виборі альтернативного шляху для пересування. Це зазвичай загальна протяжність маршруту, загальна кількість регульованих перехресть та загальна кількість лівих поворотів на маршруті, середньозважена швидкість руху потоку моторизованого транспорту вздовж маршруту, середньозважений рівень щільності вуличних паркувань та наявність велосипедної інфраструктури. У зв'язку з тим, що на момент збору даних загальна довжина велосипедної дороги в Харкові була меншою, ніж 1 км, такий фактор, як наявність ВІ, не було включено до моделі.

Наведений в даному дослідженні перелік доповнюється показником сумарної фізичної роботи, який може мати відчутний вплив на вибір велосипедистом того або іншого шляху. Виконаний в першому розділі аналіз існуючих моделей вибору велосипедистом шляху проходження показав, що при оцінці факторів, що впливають на привабливість маршруту велосипедного транспорту, значущим фактором виявилася фізична складність маршруту. Більшість моделей велосипедного транспорту не враховують цей фактор, а деякі включають показники зміни топографії маршруту, наприклад, величину найбільшого підйому, зміну висот або протяжність підйому. Незважаючи на те, що кут нахилу дороги впливає на складність підйому, реалістичність його використання в моделях вибору шляху викликає сумніви. Наприклад, такий показник, як абсолютна зміна висоти між початковою і кінцевою точкою маршруту, може бути незначним або дорівнювати нулю, в той час як сам маршрут проходить по спусках і підйомах. Виходячи

з цього, виникла потреба визначення показника, який більш об'єктивно відображає суб'єктивну складність маршруту для велосипедиста.

В результаті, з врахуванням сумарної фізичної роботи, загальна функція корисності велосипедного пересування в даній роботі має такий вигляд:

$$U_{in} = \beta_L \cdot L_{in} + \beta_I \cdot I_{in} + \beta_K \cdot K_{in} + \beta_V \cdot V_{in} + \beta_D \cdot D_{in} + \beta_W \cdot W_{in} + \varepsilon_{in}, \quad (2.18)$$

де β – коефіцієнт значущості відповідного параметру;

L_{in} – загальна протяжність маршруту, км;

I_{in} – загальна кількість регульованих перехресть на маршруті, од.;

K_{in} – загальна кількість лівих поворотів на маршруті, од.;

V_{in} – середньозважена швидкість руху потоку моторизованого транспорту вздовж маршруту, км/год.;

D_{in} – середньозважений рівень щільності вуличних паркувань;

W_{in} – сумарна фізична робота, кДж.

$$p_{in} = \frac{e^{(\beta_L \cdot L_{in} + \beta_I \cdot I_{in} + \beta_K \cdot K_{in} + \beta_V \cdot V_{in} + \beta_D \cdot D_{in} + \beta_S \cdot W_{in} + \varepsilon_{in})}}{\sum_{n=1}^{c_n} e^{(\beta_L \cdot L_{jn} + \beta_I \cdot I_{jn} + \beta_K \cdot K_{jn} + \beta_V \cdot V_{jn} + \beta_D \cdot D_{jn} + \beta_S \cdot W_{jn} + \varepsilon_{jn})}} \quad (2.19)$$

Що стосується сумарної фізичної роботи, то цей показник є достатньо складним з точки зору можливостей визначення його величини для альтернативних варіантів шляху прямування, тому необхідно сформулювати методику розрахунку на основі доступних планувальнику характеристик рельєфу місцевості вздовж маршруту.

Методичною основою для формування методики розрахунку сумарної фізичної роботи велосипедиста під час руху є роботи Віта і Вільсона, Вільсона і Пападопулоса [125, 126], у яких вивчається співвідношення між швидкістю руху на велосипеді та фізичної потужністю людини. Автори припускають, що необхідна потужність, аби дотримуватися певної швидкості на велосипеді, може бути

оцінена на основі фізичних законів. Потужність, необхідна для руху на велосипеді, є функцією опору повітря, опору коченню і схилових сил опору і виражається рівнянням:

$$N_w = [K_A(V + V_w)^2 + mg(s + C_R)]V, \quad (2.20)$$

де N_w – потужність велосипедиста, Вт;

K_A – коефіцієнт аеродинамічного опору, кг/м;

V – швидкість руху велосипедиста, м/с;

V_w – швидкість зустрічного вітру, м/с;

m – маса велосипеда, що рухається, розраховується як сума маси велосипедиста і велосипеда, кг;

g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

s – поздовжній ухил дороги, %;

C_R – коефіцієнт опору коченню.

В цьому випадку потужність W_w є потужністю, що підводиться до ведучого колеса і яка дещо менша, ніж енергія, що виробляється велосипедистом. Ця різниця виникає через неефективність передачі енергії, проте Вілсон [126] вважає, що потужність велосипедиста є досить розумним наближенням до потужності колеса. Зважаючи на високу ефективність конструкції сучасних велосипедів, можливо погодитися з Вілсоном та прийняти, що потужність тягового колеса є приблизно рівною потужності велосипедиста та що саме вона в подальшому буде називатися потужністю велосипедиста.

Згідно з [125], коефіцієнт аеродинамічного опору K_A залежить від габаритів велосипедиста, його положення на велосипеді, одягу, температури, тиску і вологості повітря. У той час як умови оточуючого середовища можуть варіюватися в залежності від регіону, сезону, або навіть часу доби, одяг велосипедиста і його посадка залежить від категорії велосипедиста і велосипеда. Для міського утилітарного велосипедиста, який їде у вертикальній посадці і не носить спеціалізований одяг, при стандартній щільності повітря на рівні моря та температурі

повітря 15° С коефіцієнт аеродинамічного опору дорівнює приблизно 0,387 [126, 127].

Швидкість зустрічного вітру V_w залежить від його абсолютної швидкості та напрямку вітру, швидкості та положення велосипеда стосовно напрямку вітру. Для реалізації цілей даного дослідження, швидкість зустрічного вітру варто виключити, оскільки він не є постійною величиною. Проте при застосуванні моделі до конкретної географічної області детальне дослідження напрямку і швидкості вітру може бути враховане. Рівняння (2.20) можна переписати з урахуванням цього припущення.

$$N_w = [K_A V^2 + mg(s + C_R)]V. \quad (2.21)$$

Потужність, необхідна для подолання опору поздовжнього ухилу дороги, залежить від загальної маси (суми мас велосипедиста і велосипеда, помножена на гравітаційне прискорення), величини ухилу і коефіцієнта опору коченню. Згідно з [126], коефіцієнт опору коченню залежить від типу шин, тиску в них і дорожнього покриття. Приклади значень коефіцієнта опору коченню, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнту опору коченню для різних типів велосипедів*

Показник	Тип велосипеда				
	Утилітар-ний	Спортив-ний	Гоноч-ний	Місь-кий	Турис-тичний
Маса велосипеда, кг	15	11	9	20	15
Маса велосипедиста, кг	77	75	75	77	75
Коефіцієнт опору коченню, C_R	0,008	0,004	0,003	0,003	0,002

*Частково запозичене з [126].

У цьому дослідженні, виходячи з припущення, що для міських поїздок використовується міський велосипед, коефіцієнт C_R приймається рівним 0,003. Інший коефіцієнт може бути використаний, якщо вважається, що використання іншого типу велосипедів більш ймовірне.

Залежність (2.20) може розраховуватися для конкретного випадку, а може і для усереднених значень характеристик велосипедиста. Також може використовуватися кілька таблиць характеристик для різних цільових груп, однак це суттєво ускладнює процедуру моделювання. Після визначення значень змінних, потужність W_w , необхідна для підтримки середньої швидкості руху (визначається виходячи зі спостережень або цілей дослідження), розраховується на основі рівняння (2.20) і порівнюється з максимальною потужністю велосипедиста (приймається дослідником). Якщо $W_w > W_{max}$, то V перераховується із заданою потужністю $W_w = W_{max}$ на основі рівняння:

$$V_i = \frac{N_{max}}{K_A V^2 + mg(s_i + C_R) C \frac{1}{K_C + 1}} \quad (2.22)$$

Час проходження ділянки визначається на основі отриманої швидкості:

$$t_i = \frac{l_i}{V_i}, \quad (2.23)$$

де t_i – час проходження ділянки дороги, сек.;

l_i – довжина ділянки, м.

Тоді фізична робота велосипедиста на ділянці мережі визначається як

$$w_{in} = N_{in} \cdot t_i. \quad (2.24)$$

З врахуванням цього сумарна фізична робота на маршруті дорівнює

$$W_j = \sum w_{in}. \quad (2.25)$$

Ця величина може бути використана для розрахунку ймовірності вибору велосипедистом шляху пересування містом за допомогою мультіноміальної моделі дискретного вибору (2.16), (2.17). Сформований перелік показників, які характеризують альтернативні шляхи прямування велосипедиста, може вважатися достатньо вичерпним для проведення експериментальних досліджень з визначення ставлення велосипедистів до параметрів шляху прямування містом.

Ще одним, дуже важливим при визначенні ймовірності вибору шляху пересування, питанням є формування набору потенційних альтернатив для шляху пересування, для яких визначається ймовірність. Пошук альтернативних варіантів маршруту для велосипедного транспорту ускладнюється великим рівнем свободи велосипедистів при виборі шляху із врахуванням того, що в процесі формування набору потенційних альтернатив також важливими є конкретні умови пересування між кожною парою транспортних районів. Це питання буде розглянуте у наступному розділі роботи.

2.4 Обґрунтування методики дослідження фактичного вибору маршруту велосипедистами

Дослідження фактичного вибору маршруту має на меті визначення кількісних характеристик ставлення велосипедистів до параметрів альтернативних шляхів прямування. У цьому напрямі постають три питання, які потребують окремого обґрунтування. По-перше, це спосіб збору даних про фактично обрані велосипедистами шляхи пересування, по-друге, визначення переліку потенційних факторів, які впливають на цей вибір, та по-третє, формування набору альтернатив для порівняння з фактично обраною альтернативою.

Найбільш перспективним методом збору даних про рух велосипедистів в цей час є використання мобільних додатків. На відміну від традиційного опитування, він надає реальну інформацію про фактично здійснені поїздки, а не думку

респондентів щодо штучно підібраних альтернатив. Завдяки соціальній активності більшості велосипедистів та швидкому розповсюдженню інформації серед велосипедної спільноти, він охоплює значну кількість його членів та є досить привабливим з точки зору доступу до даних. Проте репрезентативність цих даних досі не була підтверджена, що обумовлено неформальним способом відбору респондентів у вибіркочуву сукупність велосипедистів.

Для забезпечення репрезентативності даних, зібраних за допомогою мобільного додатку, необхідно проводити додаткові дослідження, які мають підтвердити достатність прогностичних властивостей моделей вибору шляху пересування, побудованих на їх основі. Звичайним способом такої перевірки є зіставлення розрахункових даних з фактичними. В даному випадку фактичними даними про переваги велосипедистів у виборі напрямів руху можуть вважатися велопоходи на вулицях міста. Тому для забезпечення можливості використання у розрахунках даних про фактично здійснені поїздки, отриманих за допомогою мобільного додатку, необхідно зіставити велопоходи, розраховані за допомогою таких моделей, з даними, отриманими за допомогою датчиків підрахунку кількості велосипедистів.

Перелік факторів, які можуть бути використані для опису альтернативних маршрутів прямування велосипедистів, має спиратися на попередні дослідження, враховувати особливості велосипедного транспорту та гарантувати достатньо повний перелік характеристик альтернатив, якими керуються більшість велосипедистів у ситуації вибору маршруту прямування.

Велосипедний транспорт суттєво відрізняється за швидкісними та іншими характеристиками від моторизованого транспорту, тому перелік факторів, що характеризують альтернативні маршрути руху, в першу чергу, слід формувати з тих факторів, що безпосередньо впливають на комфорт та безпеку руху велосипедистів і, відповідно, формують привабливість того чи іншого маршруту. До факторів, що характеризують комфорт, можна віднести кількість світлофорних об'єктів та кількість поворотів (лівих та правих). До факторів, що характеризу-

ють безпеку велосипедиста можна віднести швидкість моторизованого транспорту та щільність паркування вздовж траси маршруту. Щільність паркувань визначається як питома частина траси маршруту із паркуваннями вздовж неї у загальній протяжності маршруту і має на меті врахування досить небезпечних для велосипедистів обставин, що створюються паркуваннями. Згідно з ПДР [45], за відсутності спеціалізованої інфраструктури велосипедист має рухатися в крайній правій смузі. В разі організації вуличного паркування велосипедний рух також здебільшого організовується у межах червоних ліній з краю проїзної частини. Таким чином, в умовах відсутності велосипедної інфраструктури виникає щонайменше три ситуації конфлікту велосипедного транспорту з автомобілем, спричинені паркуваннями. Перший варіант зображує ситуацію, коли права смуга щільно запаркована автомобілями і таким чином умовно утворює звуження ВДМ. В такому випадку велосипедист має рухатися у наступній смузі руху, проте щільно притиснувшись до паркувальної смуги задля уникнення конфлікту з автомобілями, що рухаються. Найбільшу загрозу представляють дверцята припаркованих автомобілів, які відкриваються, що створює аварійну ситуацію і призводить до зіштовхнення і падіння велосипедиста. Тяжкість таких ДТП залежить від швидкості велосипедиста. Друга ситуація доречна при високій і середній щільності паркування, при якій велосипедист рухається, як і в попередньому прикладі, зліва від паркувальної смуги. При цьому загрозу становлять автомобілі, що заїжджають на чи виїжджають з місця паркування. В даному випадку загрозу велосипедисту створює можливість зіткнення з автомобілем, що здійснює паркування. Тяжкість ДТП також, в першу чергу, залежить від швидкості руху велосипедиста через те, що автомобіль рухається з невеликою швидкістю. В третьому випадку представлена ситуація, коли паркування вздовж дороги є не щільним, а скоріш випадковим. Відповідно, велосипедист рухається в крайній смузі і, в разі наявності припаркованого авто, має обїзжати його, виїжджаючи в другу смугу. В такому випадку, окрім перелічених вище, ще виникає ризик зіткнення з автомобілями, що рухаються в другій смузі, тож виникає потреба подивитись назад

перед здійсненням маневру, а це відволікає від візуального контакту з припаркованим автомобілем. Тяжкість ДТП в такому випадку залежить і від швидкості велосипеда (ризик зіткнення з припаркованим авто), і від швидкості автомобільного потоку (ризик зіткнення з авто, що рухається).

Окремої уваги заслуговують фізична робота, яка характеризує рівень навантаження на велосипедиста при русі на велосипеді, і необхідність використання цієї складової докладно описана у попередньому матеріалі.

Перелічені фактори отримані шляхом аналізу теоретичних основ пересування велосипедистів, проте мають бути перевірені методами якісних досліджень поведінки велосипедистів, наприклад, методом глибинних інтерв'ю. Глибине інтерв'ю – це метод якісних соціологічних досліджень, який дозволяє виявити ще невідомі факти або з'ясувати деталі [53]. Особливістю глибинних інтерв'ю є тривалість, нестандартність питань, індивідуальний підхід та підвищена увага до респондента.

Формування набору альтернатив є найбільш складною задачею при дослідженні ставлення велосипедистів до параметрів шляху прямування. Це обумовлене значним впливом альтернатив на результати оцінки параметрів, значною кількістю альтернативних шляхів у реальному житті та складністю врахування способу прийняття велосипедистом конкретних рішень при поїздках. Для формування набору альтернатив у нинішній час використовуються різні методи, до числа яких входять алгоритми пошуку детермінованого найкоротшого шляху, стохастичного найкоротшого шляху, методи обмеженого вибору і ймовірнісні методи [128]. Всі ці методи не мають достатнього обґрунтування їхнього застосування, а лише надають деякі можливості досліднику для формування набору альтернативних варіантів веломаршруту.

Детерміновані методи пошуку найкоротшого шляху поділяються на алгоритми пошуку найкоротших k шляхів (наприклад, алгоритм Дійкстри, алгоритм Флойда–Уоршелла [128]), маркування шляху, виключення ребер графу і штрафнування ребер графа.

Алгоритми пошуку k шляхів забезпечують пошук заданої кількості найкоротших шляхів між парами ТР, можливо, з обмеженням на максимальне відхилення від найкоротшого з них. Це найбільш простий підхід до формування альтернатив, який надає суттєво різні набори шляхів, що дуже залежать від відстані між пунктами відправлення та прибуття, ступеню розгалуженості ВДМ в околицях найкоротшого шляху та зовсім не гарантує отримання реального результату навіть при активному використанні дослідником керуючих параметрів: кількості альтернатив у наборі та припустимого відхилення довжини шляху від найкоротшого варіанту.

Метод маркування вперше було запропоновано Бен-Аківою [8, 7]. У цьому методі кожен маркер відображає параметр шляху, наприклад, відстань, час, кількість перехресть і т.і., який мінімізується для знаходження найкоротшого шляху по кожному параметру. Цей метод є привабливим з точки зору простоти програмної реалізації, він також забезпечує високу зручність отриманого набору альтернативних шляхів для подальшої статистичної обробки та робить цей набір зрозумілим для дослідника. Дослідник впливає на результати моделювання лише на етапі формування переліку оціночних параметрів шляху, що одночасно визначає і кількість альтернатив у наборі, що формується. На жаль, цей метод навіть приблизно не гарантує того, що велосипедист дійсно в такому порядку розглядає альтернативи, що приводить до значних амплітуд у зміні параметрів альтернативних шляхів і може значно спотворити результати статистичної оцінки ставлення велосипедистів до параметрів шляху прямування.

Метод виключення ребер графа представляє собою пошук найкоротшого маршруту між пунктами відправлення та прибуття після виключення всіх ділянок, які були використані в попередньому пошуку та привели до визначення найкоротшого маршруту. Цей метод є досить радикальним, адже альтернативи можуть відрізнятися одна від одної лише на частині траси шляху прямування, але в даному випадку ділянки, що використовувалися, будуть абсолютно видалені, що призведе до формування нереалістичних альтернатив.

Метод штрафування реалізується за тим же принципом, що і метод виключення, проте ділянки (від однієї до всіх на черговому шляху) не видаляються, а тільки отримують значення штрафу, що позбавляє його недоліків попереднього підходу. Штрафування надає достатньо широкі можливості досліднику для управління процесом формування альтернативних шляхів прямування, є зрозумілим способом, близьким до логіки учасників руху та є найбільш ефективним при розгляді відносно невеликої кількості респондентів. Даний метод може бути ефективно реалізовано в програмному забезпеченні ГС. Він детально описаний у наступному розділі.

Висновки по другому розділу

1. Мережа велосипедного транспорту має плануватися таким чином, щоб забезпечувати реалізацію ключових принципів планування велосипедної мережі до яких належать: максимальна прямолінійність шляхів пролягання маршруту; забезпечення зв'язності мережі, яка характеризується можливістю реалізувати поїздку без необхідності переходу до інших форм пересування; орієнтованість на мету поїздки і типи користувачів, яка реалізується за рахунок комбінації форм організації руху і виділення різних рівнів ієрархії мережі; врахування рівня фізичної роботи, необхідної для реалізації поїздки за рахунок вибору шляху проходження велосипедного маршруту і інтеграції з громадським транспортом; забезпечення безпеки руху велосипедиста; організація доступності мережі для велосипедистів у безпосередній близькості до об'єктів тяжіння та максимізація ефективності створення фрагменту веломережі за рахунок її пріоритизації.

2. Для реалізація принципів формування велосипедної мережі доцільно використовувати чотирьохетапну транспортну модель, тому що вона побудована на виявленні причин виникнення попиту і дозволяє моделювати потенційний по-

пит, що особливо актуально для систем з низьким рівнем велокористування. Транспортні кореспонденції визначаються на основі даних про місткість транспортних районів, що відповідає принципу орієнтованості на місця призначення та дозволяє сформулювати зв'язну мережу на основі даних про транспортні потоки.

3. Розроблений алгоритм автоматизованного мікрорайонування дозволяє враховувати особливості пересувань велосипедом. З метою врахування масштабу прийняття рішення велосипедиста про дальність поїдки, необхідно використовувати обмеження транспортного району за розміром відповідно до точки вогнутості щільності розподілу поїздок за відстанню.

4. Мультиномінальна модель дискретного вибору є єдиним інструментом оцінки вибору велосипедистом шляху руху. Параметри моделі мають визначатися для кожного міста окремо в залежності від особливостей поведінки велосипедистів.

5. Важливим елементом руху велосипедиста є фізичне навантаження, змодельоване завдяки розрахунку сумарної фізичної роботи, необхідної для подання маршруту. Моделювання фізичної роботи враховує зміни характеристик ВДМ, у тому числі топографії, і дозволяє отримати оцінку швидкості руху, наближеної до умов руху на велосипеді.

6. Необхідною задачею дискретного вибору є формування набору альтернатив, які є незалежними, що вирішується методом штрафування існуючих елементів інфраструктури з побудовою альтернатив за функцією найкоротшої відстані.

Результати досліджень були опубліковані в роботах [16 – 21, 23, 27 – 28].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ВЕЛОСИПЕДНОГО ТРАНСПОРТУ В М. ХАРКІВ

3.1 Характеристика об'єкту проведення експериментальних досліджень

В якості об'єкта проведення експериментальних досліджень було обрано місто Харків, яке є великим адміністративним центром з населенням близько півтора мільйона жителів на початок 2018 року, та яке працює над створенням Програми розвитку велосипедної інфраструктури і має високу ймовірність використання результатів дослідження.

З одного боку, у Харкові приймаються деякі міри по розвитку велосипедного руху, наприклад, регулярно проводяться заходи з промоції, прокладено велосипедну доріжку довжиною 7 км, облаштовано 12 станцій громадського велопрокату Nextbike, а також рішенням міської ради прийнято Концепцію розвитку велосипедного руху та облаштування велосипедної інфраструктури у м. Харкові.

Проте ці заходи мають не дуже великий вплив на кількість велосипедистів, зокрема через те, що не реалізуються комплексні інфраструктурні рішення з метою покращення безпеки і комфорту велосипедистів. Велосипедна доріжка вздовж Білгородського шосе через суміщення з пішохідним потоком використовується здебільшого з рекреаційними цілями, а станції велопрокату не поєднані відповідною дорожньою інфраструктурою і інколи розміщені на тротуарах, не надаючи безпосереднього доступу до ВДМ через відгородження забором (вул. Ярослава Мудрого, пл. Конституції). У результаті, частка велосипедних поїздок в загальному розподілі залишається дуже малою. Попри те, що спеціальні дослідження з визначення частки велопоїздок не проводилися, підрахунки велосипедистів показують, що їх частка в загальному транспортному потоці є дуже низькою.

Попри те, що в 2016 році було прийнято Концепцію розвитку велосипедного транспорту в місті Харкові, вона не містить в собі схеми розташування велосипедних маршрутів і детального плану впровадження. У той же час щорічний масовий захід «Велодень» збирає понад 10 тис. учасників, що є найбільшою кількістю в Україні. Регулярні велосипедні заходи і активне використання велосипедного транспорту з рекреаційними цілями засвідчує, що в Харкові є латентний попит на пересування велосипедом.

Місто Харків повністю відповідає вимогам до об'єкту даного дослідження, оскільки досі знаходиться на досить низькому рівні інтенсивності використання громадянами велосипедів для щоденних пересувань та розвитку ВМ, і має значний потенціал розвитку, оскільки як місцева влада, так і більшість мешканців бажають забезпечити повсюдне використання велосипедів у Харкові.

Розвиток веломережі має відповідати інтересам та побажанням як велосипедистів, так й інших мешканців міста. Та, якщо в інтересах планувальників мають враховуватись обмеження для створення ВІ, то інтереси учасників велосипедного руху мають бути безпосередньою основою для визначення напрямів розвитку ВІ. Для виявлення найважливіших факторів, що впливають на рішення щодо частоти використання та ставлення до вибору маршруту руху велосипедистів, необхідно провести якісні дослідження думки користувачів.

В ході проведення експериментальних досліджень в м. Харкові використовувалися різні методи збору даних, зокрема:

- опитування населення для визначення латентного попиту на пересування велосипедом і збору інформації про наявні поїздки велосипедом;
- глибокі інтерв'ю з користувачами з метою оцінки ставлення до процесу і факторів вибору шляху руху;
- збір даних виявленого попиту про шляхи пересування велосипедистів на основі GPS-треків.

Визначення мінімального достатнього обсягу вибірки здійснюється за величиною граничної помилки вибірки:

де μ – стандартна помилка вибірки, розраховується як:

$$\mu = \sqrt{\frac{w(1-w)}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)}, \quad (3.1)$$

де w – частість;

t – квантиль критерію Стюдента, що відповідає рівню довірчої ймовірності 0,95 ($t=1,96$);

N – кількість одиниць у генеральній сукупності;

Δ – розмір граничної похибки математичного сподівання ($\Delta=0,05$);

m – частота.

$$n = \frac{t^2 N w (1-w)}{N \Delta^2 + t^2 w (1-w)}, \quad (3.2)$$

Розмір генеральної сукупності для розрахунку був прийнятий рівним кількості населення міста Харків у 2015 році, що відповідає часу початку збору даних.

$$w_i = \frac{m_i}{\sum m_i}, \quad (3.3)$$

В табл. 3.1 представлені характеристики вибірки досліджень, що були проведені в рамках експериментальної частини наукової роботи. Методики досліджень і їх використання детально представлені в наступних розділах роботи.

Таблиця 3.1 – Обсяг вибірки експериментальних досліджень

Вид дослідження	Метод	Ймовірність потрапляння в заданий інтервал	Кількість спостережень	Довірчий інтервал
Опитування	кількісний	95%	320	5,5%
GPS-треки	кількісний	90%	56	11%
Глибинні інтерв'ю	якісний	-	9	-

3.2 Експериментальні дослідження попиту на велосипедний транспорт

У підрозділі 2.2. були визначені всі кроки, які є необхідними для створення повноцінної моделі потреб населення у пересуваннях велосипедом для міст з низьким рівнем використання велосипедів, і обґрунтовано процес формування мережі на базі чотирьохетапної транспортної моделі. Це обумовлено тим, що чотирьохетапна процедура побудована на виявленні причин виникнення попиту, що є обов'язковим для виконання принципів створення велоінфраструктури. На рис. 3.1 представлено загальний підхід до моделювання даної задачі, який відображає основні етапи, тип емпіричних даних, що використовувалися, і результат кожного етапу.

1	2	3	4
<p>Формування поїздок</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Автоматизований алгоритм формування TP ▪ Визначення кількості мешканців ▪ Визначення к-ті робочих місць <p>Емпіричні дані:</p> <ul style="list-style-type: none"> • дані про виборців, • демографічна піраміда 	<p>Розподіл поїздок</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Формування матриці кореспонденцій на основі гравітаційної моделі 	<p>Вибір виду транспорту</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Визначення виду функції розподілу велосипедних поїздок від відстані ▪ Перетворення матриці загальних кореспонденцій в велосипедні <p>Емпіричні дані:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Результати опитування 	<p>Розподіл по мережі</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Визначення параметрів функції корисності ▪ Експериментальні дослідження вибору шляху пересування <p>Емпіричні дані:</p> <ul style="list-style-type: none"> • глибини інтерв'ю • GPS треки маршрутів руху
<p>Результат:</p> <p>1. Місткості TP по відправленням і прибуттям</p>	<p>Результат:</p> <p>1. Матриця загальних транспортних кореспонденцій</p>	<p>Результат:</p> <p>1. Матриця велосипедних кореспонденцій</p>	<p>Результат:</p> <p>1. Інтенсивність руху велотранспорту</p>

Рисунок 3.1 – Чотирьохетапна модель трудових пересувань велосипедним транспортом

Перший етап на цьому шляху присвячений визначенню загального попиту на пересування містом, з якого на наступному етапі моделювання виокремлюється потенціальна частина велосипедних поїздок. Розширення сфери використання велосипедів у першу чергу реалізується через перехід на велосполучення при виконанні трудових або учбових пересувань, тому саме на них повинна бути орієнтована модель потреб населення міста у пересуваннях за допомогою велосипедного транспорту.

Етап формування поїздок передбачає визначення місткостей транспортних районів з відправлення та прибуття. Для її виконання в дослідженні використане програмне забезпечення ArcGIS, що дозволило автоматизувати процес транспортного мікрорайонування, вирішити поточні питання, що виникають при розділенні території міста на сукупність ТР. В даному програмному забезпеченні реалізується наступна послідовність виконання розрахунків, яка засновується на існуючих геодезичних даних та може бути відтворена в інших містах України:

1. Визначення меж транспортних районів.
2. Геокодування адрес будівель з прив'язкою до виборчих діляниць.
3. Визначення центральної координати виборчої діляниці.
4. Присвоєння значення кількості населення, що проживає на території.
5. Інтерполяція даних для визначення кількості населення у вікових межах від 14 до 100 років.
6. Акумуляція даних про кількість населення для кожного транспортного району.
7. Визначення центроїду транспортного району (центральна координата).
8. Процедура просторової привязки населення ВД до ТР.

За результатами реалізації алгоритму мікрорайонування було отримано 233 ТР. Проте в результаті цього процесу було отримано велику кількість малих транспортних районів, зокрема, мінімальна площа транспортного району становить 0,238 км², що призводить до наявності районів, менших за 500 м в діаметрі, тому було прийнято рішення про групування надто малих транспортних районів.

В результаті групування було отримано 140 ТР. Загальна характеристика ТР до та після групування представлена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Характеристика транспортних районів

Показник	Значення показника до групування	Значення показника після групування
Кількість	233	140
Мінімальна площа, км ²	0,238	0,784
Максимальна площа, км ²	3,985	3,985
Сумарна площа, км ²	332,309	332,309
Середня площа, км ²	1,426	2,373
Середньоквадратичне відхилення	0,943	0,612

Після формування меж ТР необхідно визначити місткості ТР по відправленню і прибуттю. Через те, що інформація про населення необхідного рівня деталізації є недоступною, для отримання даних про кількість населення, що проживає на території ТР було використано дані про кількість зареєстрованих виборців. На території Харкова зареєстровано 608 виборчих дільниць (ВД), додаток А містить інформацію про кількість зареєстрованих виборців по кожній дільниці відповідно до даних центральної виборчої комісії. Для отримання найточнішої просторової інформації було проведено геокодування кожної адреси, що відповідає межах дільниць відповідно до [129] (рисунок 3.2 – б). Через те, що межі ТР не відповідають межах ВД, необхідно було прив'язати географію дільниці до ТР. Для цього за допомогою пошуку центральної координати було визначено умовний центроїд ВД (рисунок 3.2 – в). Кожному центроїду ВД призначалася кількість населення відповідно до даних додатка А. На останньому етапі визначався центроїд ТР, якому за допомогою інструмента просторової прив'язки (Spatial Join) призначалася чисельність населення відповідно до суми чисельності ВД, що знаходяться в межах ТР (рисунок 3.2 – г).

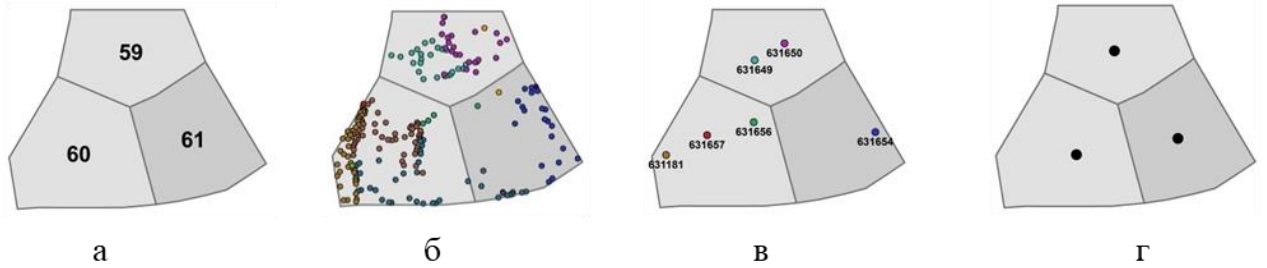


Рисунок 3.2 – Процедура геокодування даних про населення ТР

Оскільки дані про виборців включають в себе інформацію про зареєстроване населення старше 18 років, а згідно з Правилами дорожнього руху пересуватися велосипедом можуть особи, що досягли 14 річного віку, виникла необхідність визначити чисельність населення від 14 до 18 років. Для цього було використано демографічну піраміду Харківської області (рисунок 3.3).

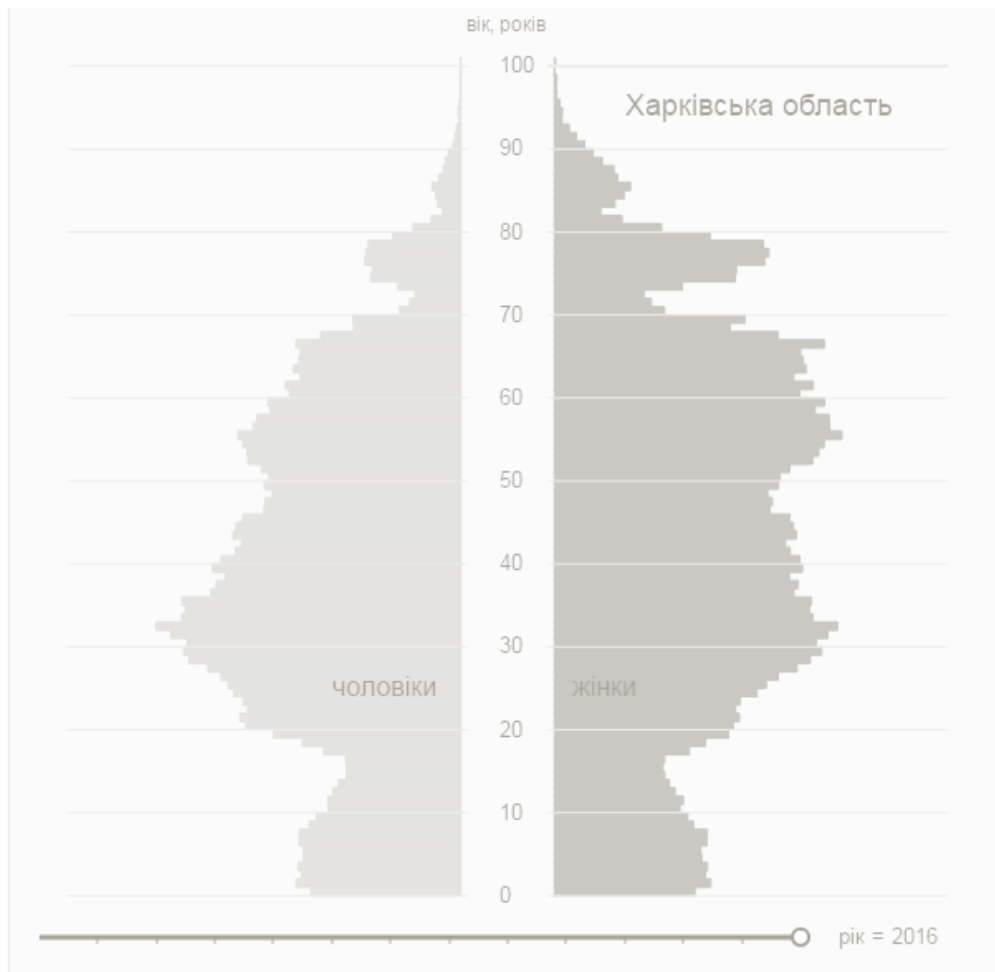


Рисунок 3.3 – Демографічна піраміда Харківської області

В результаті геокодування інформації про чисельність населення отримано місткість ТР по відправленню (додаток Б) і карту щільності населення ТР (рис. 3.4).

Перед формуванням МК, необхідно привести чисельність населення всіх ТР до кількості робочих місць у місті. Зазвичай це робиться на основі припущення про приблизно однаковий питомий зміст кількості працюючого населення на всій території міста. В цьому випадку спочатку визначається коефіцієнт приведення чисельності населення до кількості працюючого населення в цілому по місту.

$$k_n = \frac{\sum_i^{N_{TR}} D_i}{\sum_i^{N_{TR}} A_i}, \quad (3.1)$$

де k_n – коефіцієнт приведення сумарної чисельності працездатного населення до сумарної кількості робочих місць у транспортних районах;

N_{TR} – кількість транспортних районів, на які поділена територія міста, од.;

D_i – кількість робочих місць у i -му ТР (місткість ТР з прибуття), люд.;

A_i – чисельність населення у i -му ТР (місткість ТР з відправлення), люд.;

$$k = \frac{437215}{888080} = 0,492315$$

В результаті геокодування інформації про кількість робочих місць отримано місткість ТР по прибуттю (додаток Б). Наступним кроком моделювання попиту на пересування є розподіл отриманих на попередньому кроці місткостей ТР по матриці пасажирських кореспонденцій. Цей етап виконується на основі загальних закономірностей розселення населення по території міст [112], для яких, однак, необхідно визначити параметри, що характерні для конкретного об'єкту

дослідження. Отримані дані про місткість транспортних районів дозволяють розрахувати загальноміські матриці трудових кореспонденцій міста Харкова за допомогою гравітаційної моделі (2.1) з функцією витрат, розрахованою за (2.2), яка забезпечує розподіл відстаней між ТР - рис. 3.5.

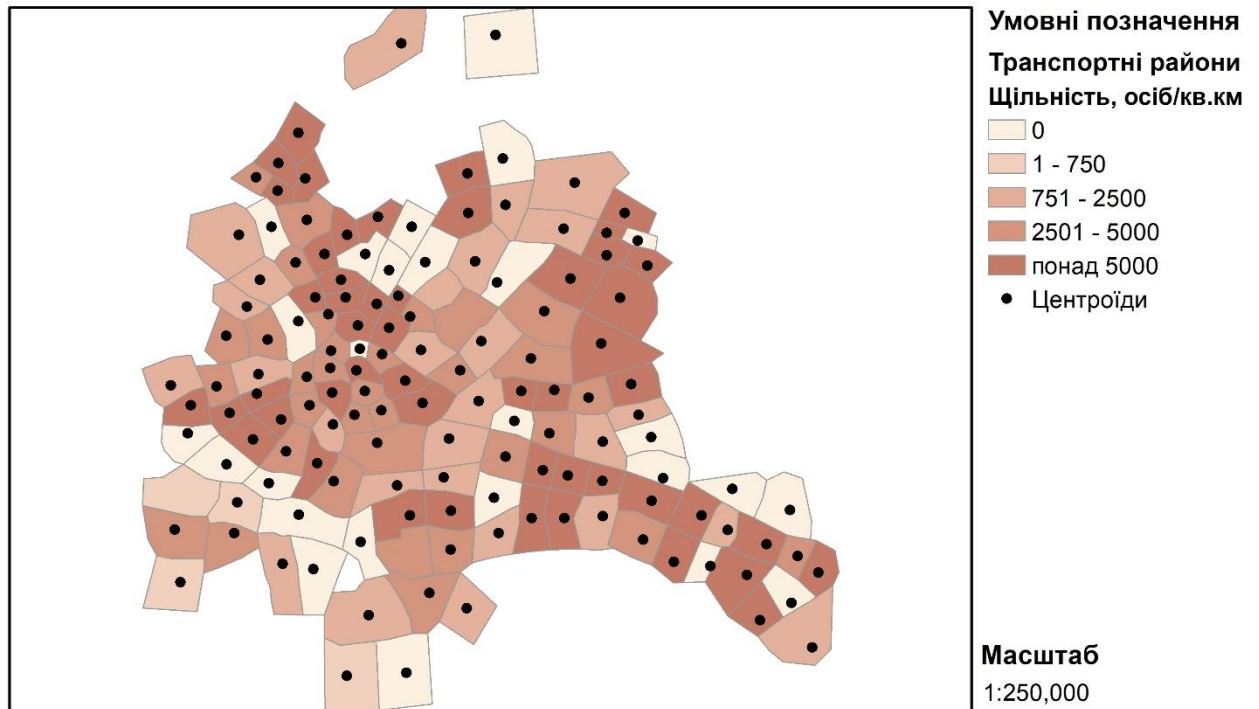


Рисунок 3.4 – Розподіл щільності населення м. Харкова по транспортним районам

Враховуючи високу ймовірність здійснення поїздок на велосипеді на короткі відстані, відстані внутрішньорайонних поїздок d_{int} прийнято для розрахунку, як половину середньої відстані від трьох найменших відстаней в районі.

$$d_{int} = \frac{1}{2} \cdot \sum_i^3 l_{imin} \quad (3.2)$$



Рисунок 3.5 – Базовий розподіл транспортних кореспонденцій

Наступним кроком чотирьохетапної моделі є вибір виду транспорту. На цьому етапі необхідно перейти від загальної матриці транспортних кореспонденцій до матриці велосипедних кореспонденцій. Для вирішення цієї задачі найбільшу популярність отримали моделі дискретного вибору, які дозволяють оцінити ймовірність обрання того чи іншого виду транспорту в залежності від різних параметрів вибору (грошова вартість здійснення поїздки певним видом транспорту, час поїздки, наявність доступу до того чи іншого виду транспорту тощо). Найбільш розповсюдженим є оцінка висловлених вподобань щодо потенційної поведінки [84, 99]. Проте такий підхід не підходить для міст з низьким рівнем використання велосипедного транспорту. По-перше, через те, що частка велосипедних поїздок є дуже малою, для отримання статистично значущих характеристик вибору на рівні транспортного району необхідно провести дослідження з дуже великим обсягом вибірки. По-друге, отримана в результаті цієї процедури матриця кореспонденцій буде відповідати існуючому попиту, проте не дозволить оцінити потенційний попит через те, що люди, які не користуються велосипедом, не мають досвіду для оцінки параметрів переміщення велосипедом, тож неможливо оцінити ймовірність використання ними велосипедного тра-

нспорту. Тому, з метою впровадження третього етапу чотирьохетапної моделі, перехід від загальної матриці кореспонденцій до матриці велосипедних кореспонденцій було здійснено за рахунок трансформації загальної матриці кореспонденцій у відповідності до функції розподілу за відстанню, притаманної для велосипедних поїздок. Функція розподілу була отримана за допомогою соціологічного дослідження серед мешканців міста Харкова, яке було проведене у 2015 році за допомогою розповсюдження спеціально розроблених анкет. Приклад анкети дослідження представлений на рисунку 3.6.

Для визначення виду функції розподілу кількості поїздок від відстані із загальної сукупності відповідей були відібрані тільки ті, де велосипед був вказаний як транспортний засіб при поїздки на роботу. При цьому, оскільки респонденти в анкеті вказують всі види транспорту, якими вони переміщуються на роботу, були відібрані всі респонденти, у яких зустрічалися такі комбінації видів транспорту:

- велосипед;
- велосипед, пішки;
- індивідуальний транспорт, велосипед;
- індивідуальний транспорт, велосипед, пішки;
- громадський транспорт, велосипед;
- громадський транспорт, велосипед, пішки;
- громадський транспорт, індивідуальний транспорт, велосипед;
- громадський транспорт, індивідуальний транспорт, велосипед, пішки;
- громадський транспорт, індивідуальний транспорт, службовий транспорт, велосипед, пішки;
- громадський транспорт, службовий транспорт, велосипед;
- громадський транспорт, службовий транспорт, велосипед, пішки;
- службовий транспорт, велосипед.

ТРАНСПОРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	
<p>Дорогие респонденты, данное исследование нацелено на изучение закономерностей выбора вида транспорта при поездке на работу жителями города Харькова и определения потенциала для развития велосипедного транспорта. Исследование проводится кафедрой Транспортных систем и логистики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета в рамках научной деятельности.</p>	
<p>1. Вы проживаете и/или работаете г. Харьков?</p> <p><input type="checkbox"/> Да <input type="checkbox"/> Нет</p>	<p>6. Имеете ли Вы доступ к велосипеду или готовы его купить?</p> <p><input type="checkbox"/> Да <input type="checkbox"/> Нет</p>
<p>2. Укажите Ваш пол</p> <p><input type="checkbox"/> женский <input type="checkbox"/> мужской</p>	<p>7. Какой вид транспорта вы используете для совершения трудовой поездки (возможно несколько ответов)</p> <p><input type="checkbox"/> общественный <input type="checkbox"/> индивидуальный <input type="checkbox"/> служебный <input type="checkbox"/> велосипед <input type="checkbox"/> пешком</p>
<p>3. Укажите Ваш возраст _____</p>	<p>8. Обозначьте ваш маршрут следования при трудовой поездке</p> <p>Пункт отправления: _____</p> <p>Пункт прибытия: _____</p>
<p>4. Род деятельности</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Учащийся, студент <input type="radio"/> Профессорско-преподавательский состав <input type="radio"/> Работник сферы обслуживания <input type="radio"/> Квалифицированный рабочий <input type="radio"/> Работник сельского хозяйства <input type="radio"/> Неработающий пенсионер <input type="radio"/> Свободные профессии <input type="radio"/> Военнослужащий, МВД <input type="radio"/> Руководитель, управленец <input type="radio"/> Неквалифицированный рабочий <input type="radio"/> Индивидуальное предпринимательство <input type="radio"/> Служащий, специалист <input type="radio"/> Другое: _____ 	<p>9. Хотели ли бы вы использовать велосипед для совершения трудовой поездки при наличии соответствующей инфраструктуры (велодорожки, парковки и т.д.)?</p> <p><input type="checkbox"/> да <input type="checkbox"/> нет <input type="checkbox"/> Другое: _____</p>
<p>5. Имеете ли Вы доступ к автомобилю и водительское удостоверение?</p> <p><input type="checkbox"/> Да <input type="checkbox"/> Нет</p>	<p>10. Как часто Вы используете велосипед для поездки на работу? (не принимая во внимание влияние погодных условий)</p> <p><input type="checkbox"/> Регулярно (более 3 раз в неделю) <input type="checkbox"/> Часто (от 1 до 3 раз в неделю) <input type="checkbox"/> Иногда (от 1 до 3 раз в месяц) <input type="checkbox"/> Редко (реже чем 1 раз в месяц) <input type="checkbox"/> Ни разу в текущем сезоне</p>
	<p>11. Хотели бы использовать велосипед как альтернативу общественному транспорту для подъезда к метро?</p> <p><input type="checkbox"/> да <input type="checkbox"/> нет <input type="checkbox"/> не использую метро <input type="checkbox"/> Другое: _____</p>
	<p>Спасибо за участие!</p>

Рисунок 3.6 – Приклад анкети для проведения натурних досліджень

Після відбору анкет з такими комбінаціями виду транспорту для аналізу залишилося 320 анкет. Оскільки в самій анкеті респонденти вказували тільки пункт відправлення і пункт прибуття, то для початку було необхідно визначити дальність поїздки, яке приймалося як найкоротша відстань по мережі.

У випадках, коли пункт відправлення або прибуття було вказано недостатньо точно (наприклад, пр. Науки), анкета виключалась із загальної вибірки. Результати розподілу кількості поїздок представлені в таблиці 3.3 та на рисунку 3.7. Для визначення виду функції розподілу використовувалася програма STATISTICA 10.

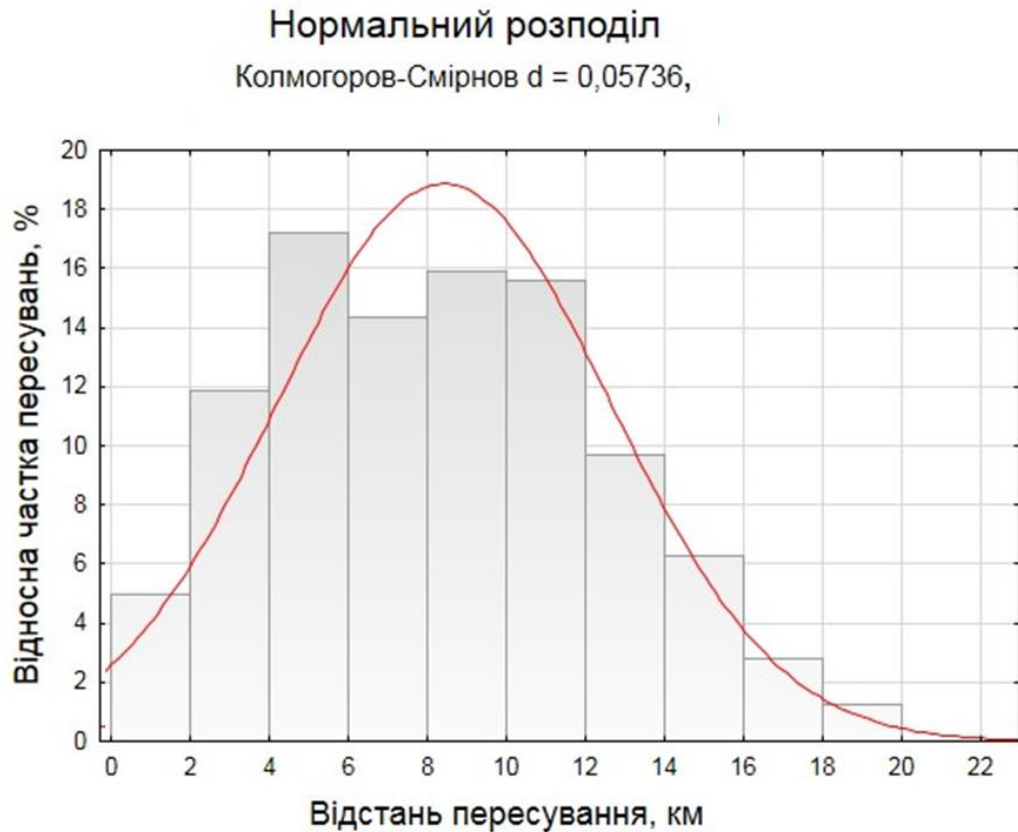


Рисунок 3.7 – Щільність розподілу дальності велосипедних кореспонденцій за результатами опитування

Дані таблиці 3.3 та рисунку 3.7 свідчать про високий ступінь відповідності отриманих результатів загальним тенденціям розподілу кореспонденцій [112], що додатково свідчить про достатній обсяг отриманої вибірки та дозволяє використовувати лише основні моменти гама-розподілу для визначенні кореспонденцій в матриці. Проте отримана за допомогою функції ймовірність попадання в заданий інтервал потребує коригування. Згідно з теоретичною моделлю, 2,32% кореспонденцій можуть бути здійснені на відстань нуль або менше км, що звичайно не відповідає дійсності, а оскільки найдовша поїздка, що була зафіксована в обстеженні, дорівнює 19,9 км, приймається обмеження діапазону здійснення поїздок до 20 км. З вищезазначеного необхідно провести коригування значень ймовірності потрапляння в інтервал.

$$w'_{n_i} = \frac{w_{n_i} \cdot 100}{\sum w_{n_i}}, \quad (3.3)$$

Для приведення загальної матриці до матриці велосипедного транспорту визначається значення коригуючого коефіцієнту для кожного інтервалу за формулою 2.4. Результати розподілу поїздок у матриці велосипедних кореспонденцій представлені на рис. 3.8.

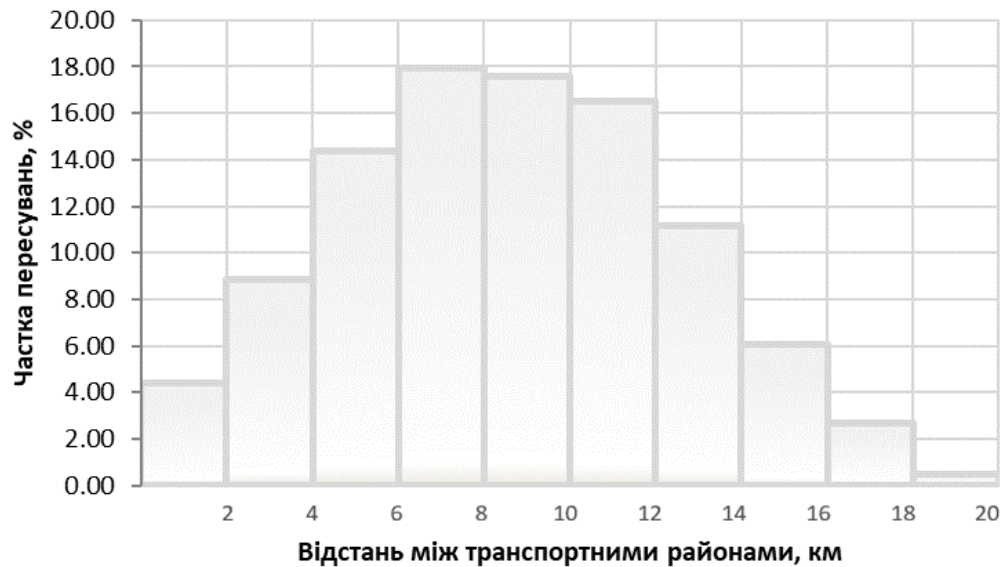


Рисунок 3.8 – Щільність розподілу відстаней поїздок матриці велосипедних кореспонденцій

Для отримання реалістичної матриці наявних велосипедних кореспонденцій необхідно помножити значення кожної клітинки на частку використання велосипедного транспорту, яка для м. Харкова становить близько 1% [9]. Проте це призведе до отримання великої кількості нульових клітинок матриці, що в результаті виключить частину транспортних районів із прогнозної моделі. Тому, з метою визначення потенційного попиту, для подальших розрахунків використовується матриця загальних трудових кореспонденцій розподілених по функції велосипедних поїздок, яка є основою для розрахунку потенційної інтенсивності велосипедних потоків.

Таблиця 3.3 – Результати розподілу дальності велосипедних поїздок

Показник	<= 0	0,01-2	2,01-4	4,01-6	6,01-8	8,01-10	10,01-12	12,01-14	14,01-16	16,01-18	18,01-20	понад 20 км
Спостережувана частота	0	16	38	55	46	51	50	31	20	9	4	0
Накопичена спостережувана частота	0	16	54	109	155	206	256	287	307	316	320	320
Спостережувана частість, %	0,00	5,00	11,88	17,19	14,38	15,94	15,63	9,69	6,25	2,81	1,25	0,00
Накопичена сп. частість, %	0,00	5,00	16,88	34,06	48,44	64,38	80,00	89,69	95,94	98,75	100,00	100,00
Очікувана частота	7,42	13,18	26,68	43,36	56,57	59,27	49,86	33,68	18,26	7,95	2,78	0,99
Накопичена оч. частота	7,42	20,61	47,29	90,64	147,21	206,48	256,34	290,01	308,27	316,23	319,01	320,00
Очікувана частість, %	2,32	4,12	8,34	13,55	17,68	18,52	15,58	10,52	5,71	2,49	0,87	0,31
Накоп. оч. частість, %	2,32	6,44	14,78	28,33	46,00	64,52	80,10	90,63	96,34	98,82	99,69	100,00
Різниця між спостереж. і очікуваною	-7,42	2,82	11,32	11,64	-10,57	-8,27	0,14	-2,68	1,74	1,05	1,22	-0,99

Таблиця 3.4 – Перехід від гравітаційної моделі до велосипедної моделі

Частість потрапляння в інтервал	<= 0	0-2	2,01-4	4,01-6	6,01-8	8,01-10	10,01-12	12,01-14	14,01-16	16,01-18	18,01-20	понад 20 км
Гравітаційна модель	0,00	8,77	13,31	12,77	13,39	13,12	12,34	9,48	7,03	4,50	5,28	0,00
Велосипедна модель	2,32	4,12	8,34	13,55	17,68	18,52	15,58	10,52	5,71	2,49	0,87	0,31
Велосипедна модель (скоригована)	0,00	4,23	8,56	13,91	18,16	19,02	16,00	10,81	5,86	2,55	0,89	0,00
Коригуючий коефіцієнт	0	0,48	0,64	1,09	1,36	1,45	1,30	1,14	0,83	0,57	0,17	0

Після отримання матриць велосипедних кореспонденцій можна переходити на останній етап чотирьохетапної транспортної моделі – розподіл по мережі. Для розподілу необхідно визначити числові значення параметрів вибору шляху руху. З цією метою необхідно дослідити закономірності руху велосипедистів по ВДМ м. Харкова.

Запропонований підхід також може бути застосований для визначення виду функції розподілу супротиву (*impedance function*) для розрахунку матриці кореспонденцій при формуванні моделей велосипедного транспорту в умовах розвиненого велосипедного руху.

3.3 Експериментальні дослідження маршрутів руху велосипедистів по вулично-дорожньої мережі м. Харкова

Особливостями руху велосипедного транспорту є те, що мережа, якою може пересуватися велосипед, є значно розгалуженішою, ніж мережа для автомобільного транспорту. Тому при моделюванні можливих шляхів руху велосипедиста, окрім ділянок ВДМ, пристосованих для руху автомобільного транспорту (окрім вулиць і доріг, рух якими заборонено для велосипедистів), необхідно включати такі елементи мережі, як доріжки, стежки, пішохідні та велосипедні мости та інші елементи. З врахуванням цього, при формуванні велосипедної моделі м. Харкова, транспортна мережа відображається за допомогою відкритих даних сервісу OpenStreetMap [130], який містить достатньо детальну інформацію про види наземних шляхів сполучення.

Рівень деталізації концепції розвитку мережі велосипедного транспорту, прийнятий в даній роботі, передбачає не лише формування принципів її створення та розвитку, а ще й розробку конкретних методик виконання окремих етапів, які можуть бути легко відтворені при застосуванні концепції в будь-якому місті України. Це передбачає необхідність максимальної формалізації дій з виконання кожної операції по отриманню нових даних або прийняттю чергових рішень. Ця задача значно полегшу-

ється завдяки сучасному рівню розвитку обчислювальної техніки та геоінформаційних систем (ГІС), використання яких можливе і як через комерційні продукти, так і через безкоштовні.

Головним етапом обробки отриманих даних, що описують фактичні пересування велосипедистів, є визначення параметрів обраних ними маршрутів, формування набору альтернатив обраному шляху та оцінка кількісної характеристики кожної альтернативи. Саме для цих цілей в найбільшому ступені придатні ГІС, які забезпечують дослідника широким переліком інструментів з формування шляхів пересування та визначення їхніх параметрів.

У даному дослідженні для роботи з географічними даними доріг використовувався модель форми даних OpenStreetMap, яка знаходиться у вільному доступі [130] і програмне забезпечення ArcGIS 10.2. Для роботи з ГІС спочатку треба створити транспортну модель, для якої сервіс OpenStreetMap надає дуже детальні *.shp (шейп-файли), у яких кожне перехрестя представлене у вигляді вузла графа мережі, а кожна ділянка дороги між перехрестями – у вигляді дуги графа. Основним недоліком даного матеріалу є те, що вона характеризує поверхню об'єкту дослідження лише у двомірному вимірі, без вказівки на висоту його розташування, що вимагає від розробника стратегії розвитку веломережі прийняття додаткових зусиль щодо визначення вертикальних координат точок поверхні в рамках створюваної концепції, оскільки перепади висот породжують серйозні перешкоди руху велосипедистів.

У цілому, в ГІС застосовуються різноманітні моделі об'єктів, що обумовлюється різноманітністю даних і завдань, що вирішуються за допомогою ГІС, а сама геоінформаційна система аналізу даних являє собою набір шарів, які взаємодіють між собою [131]. В процесі функціонування ГІС все різноманіття вхідних даних: інформація про об'єкти, їхні характеристики, форми зв'язку між об'єктами, різні описові відомості – перетворюється на єдину загальну модель (набір моделей), що зберігається в базі даних. У сукупності ці дані утворюють різноманітні моделі об'єктів, які задають інформаційну основу бази даних і визначають методи обміну даними в процесі експлуатації ГІС.

ГІС використовує різноманітні дані про об'єкти, характеристики земної поверхні, інформацію про форми і зв'язки між об'єктами, різні описові відомості. Моделі об'єктів ГІС, що зберігаються в базах даних, складаються з більш простих частин, які прийнято називати моделями даних. У свою чергу, моделі даних в ГІС мають складну багаторівневу структуру, в якій нижні рівні складаються з елементарних (атомарних) моделей даних. З елементарних моделей конструюються більш складні. Проблема організації бази даних в ГІС зводиться до вирішення ряду завдань, першим з яких є організація моделей об'єктів.

Оптимізація інформаційної основи і функціонування ГІС починається з аналізу базових моделей даних, що визначають структуру зв'язків в моделях і утворюють більш складні моделі для опису реальних об'єктів. Створена для транспортних цілей ГІС складається з декількох базових шарів, рисунок 3.9.



Рисунок 3.9– Структура ГІС (www.resources.arcgis.com)

Використання ГІС дозволяє задати атрибути ВДМ та формально описати параметри шляхів пересування велосипедистів, які потенційно здійснюють вирішальний

вплив на вибір конкретного шляху. Бази даних ГІС дозволяють здійснювати статистичний аналіз просторових даних та ефективно управляти параметрами системи, проте наповнення бази даних ГІС є кропіткою і ресурсномісткою задачею, особливо в умовах обмеженості даних, що спостерігається в українських містах. Саме тому вибір правильного набору параметрів є важливим кроком. Для перевірки набору факторів вибору маршруту руху, що наведені у підрозділі 2.4, було проведено контрольне якісне дослідження методом глибинних інтерв'ю. З метою проведення дослідження було створено три групи. До першого сегменту користувачів велосипеда відносяться «Спортсмени», які розглядають велосипед як спортивне знаряддя, беруть участь у професійних або любительських велосипедних перегонах, також активно використовуючи велосипед для щоденних поїздок та проїзду до місця роботи. До другого сегменту належать «Користувачі», які активно використовують велосипед для щоденних поїздок та переміщень, але не вважають себе спортсменами. Третій сегмент складають «Прибічники», які використовують велосипед для рекреаційних або спортивних цілей (наприклад, у парках або на прогулянках сім'ї), хоча б раз пробували пересуватися велосипедом по місту з нерекреаційною ціллю, але не використовують велосипед як транспортний засіб для міських подорожей.

У ході дослідження було виявлено, що «Прибічники» не є активними велосипедистами через надвисоку чутливість до безпеки руху, а всі учасники відмітили, що використовували би велосипед для міських поїздок за наявності велосипедної інфраструктури. Виявилось, що відсутня суттєва різниця у відповідях «Спортсменів» і «Користувачів». Всі респонденти стверджували, що загальний маршрут обирається до початку поїздки, і його можна трохи змінити через радше випадкові фактори (наприклад, дорожньо-транспортні пригоди). Фактори, які на думку респондентів враховуються при виборі маршрутів – це найкоротший шлях, пагорби, безпека та комфорт маршруту. При цьому «найкоротший шлях» в даному випадку – це суб'єктивна оцінка, і після перевірки він не обов'язково є абсолютно найкоротшим.

На думку респондентів, сприйняття безпеки можна характеризувати необхідністю робити повороти, потенційною можливістю потрапляння в двері припаркованого

механічного транспортного засобу або необхідністю проїхати вздовж припаркованого автомобіля в транспортному потоці. Комфорт пояснювався можливістю їздити по дорозі з правого боку, щоб уникнути взаємодії з автомобільним рухом, у той час як необхідність зупинитися на світлофорах відмічалась як показник дискомфорту. Таким чином, фактори, що впливають на вибір шляху руху, описані в підрозділі 2.4, були підтверджені під час якісного дослідження і були використані як параметри моделі корисності маршруту.

Для тестування гіпотези необхідно надати ВДМ атрибути відповідно до значень кожного параметра, після чого за допомогою трасування маршрутів руху, що обстежувалися, можна визначити параметри кожного маршруту та його альтернатив. Отримані результати можна використовувати для розрахунку функції привабливості велосипедного маршруту. Даний процес представлено графічно на рис. 3.10.

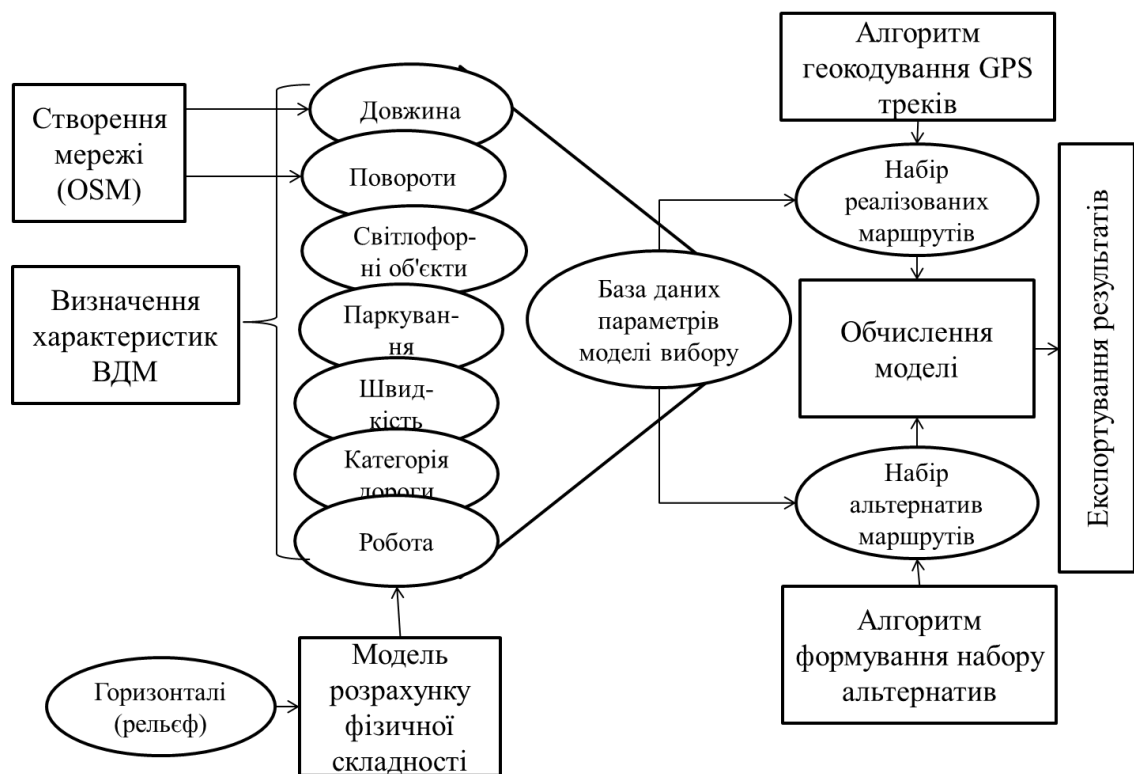


Рисунок 3.10 – Блок-схема процесу моделювання вибору шляху руху

Спочатку, за допомогою ГІС, необхідно задати атрибути кожного параметра мережі, з урахуванням того, що різні атрибути належать до різних верств транспортної моделі, таблиця 3.5.

Таблиця 3.5 – Характеристика параметрів моделі вибору велосипедистами маршрутів руху

Параметр	Тип форми шару GIS	Одиниця виміру
Протяжність маршруту	Полілінії – ребро графа	км
Кількість світлофорних об'єктів	Мультиточки	од.
Кількість лівих поворотів	Мультиточки – вузол графа	од.
Швидкість моторизованого транспорту	Полілінії – ребро графа	км/ч
Рівень щільності паркування	Полілінії – ребро графа	–
Фізична робота	Полілінії – ребро графа	кДж

Кожному ребру графа необхідно задати фактичні значення показників. Довжина кожної ділянки визначається за допомогою функції розрахунку геоданих модуля просторового аналізу ArcGIS. Швидкість моторизованого транспорту та рівень щільності паркування класифікуються за інтервальним принципом. Хоча швидкість моторизованого транспорту є кількісною характеристикою, вона є випадковою величиною та потребує занадто великих витрат на визначення її середнього значення на всій ВДМ міста. У той же час сервіс Google Maps за допомогою вкладки «Пробки» надає інформацію про швидкість руху транспортних засобів у двох режимах: на поточний час та прогноз швидкості на заданий момент часу протягом доби, в залежності від дня тижня. Ці дані отримуються безпосередньо від учасників руху та осереднюються для прогнозу, тобто є легко доступним та дуже репрезентативним матеріалом, якому властивий лише один недолік: інформація про швидкість відображається на сайті за допомогою чотирьох кольорів, тобто, у якісному, а не кількісному, вигляді. А при прогнозі, за рахунок усереднення ця шкала зазвичай скорочується до

трьох значень. Саме ця особливість й призвела до необхідності класифікувати швидкість транспортного потоку за інтервальним принципом, згідно з яким ділянкам присвоювалися відповідні значення на основі нижніх меж інтервалу, як представлено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Категорії швидкості моторизованого транспорту

Категорія	Нижня межа, км/год.
Низька	10
Середня	25
Висока	40

Що стосується щільності паркування, то її необхідно класифікувати внаслідок того, що кількісно оцінити її дуже складно, у той час як якісне уявлення про її щільність є загальноприйнятним показником, для якого в даній роботі прийнято 3 рівня варіювання, таблиця 3.7.

Таблиця 3.7– Категорії параметрів рівня щільності вуличного паркування

Категорія	Рівень щільності
1	Паркування заборонене
2	Середня щільність паркування
3	Висока щільність паркування

Особливої уваги з числа параметрів шляху потребує визначення фізичної роботи, необхідної для подолання шляху. Для її розрахунку використовувалася модель, представлена у другому розділі. Значення поздовжнього ухилу дороги, яке лежить в основі моделі, визначалося за наступною методикою.

Ухилом називають крутизну підйомів або спусків дороги. Величина ухилу може виражатися в градусах або в процентах. При проектуванні і експлуатації дороги

прийнято використовувати значення ухилу у відсотках або в проміле. Величина ухилу у відсотках визначається зі співвідношення:

$$s = \frac{h}{l} \cdot 100 \quad (3.4)$$

де s – поздовжній кут нахилу дороги, %;

h – різниця висот розташування точок початку та закінчення ділянки, м;

l – довжина підйому або спуску, м.

Сучасні геоінформаційні технології дозволяють отримувати карти висот на основі даних про рельєф місцевості. Програмний продукт ArcGIS використовує для визначення ухилу місцевості цифрову модель рельєфу. Даний метод порівнює значення координати z з рівнем горизонту для зони розміром 3x3 клітинки. Крутизна схилу кожної клітинки визначається, як максимальна зміна висоти до відстані між центральною клітинкою і вісьмома сусідніми клітинками. Даний метод широко використовується при аналізі придатності місцевості до деякого спеціального використання або при прогнозуванні потенційних загроз, але має ряд недоліків при визначенні ухилу дорожньої мережі, а саме, занадто високі вимоги до якості вихідних географічних даних та використання всієї місцевості в аналізі, тобто як клітинок, які знаходяться в межах дорожньої мережі, так і інших, що впливає на отриманий результат.

Величину ухилу для моделювання розташування трас пішохідного руху також запропоновано визначати в роботі [132]. Для цього карта рельєфу в горизонталях перетворюється на векторну планограму, на рельєф якої накладається сітка. У межах кожної ділянки визначається значення ухилу, яке може бути отримано зі співвідношення:

$$i = \frac{0,785 \cdot d \cdot h \cdot m}{S} \quad (3.5)$$

де h – шаг горизонталей;

S – площа ділянки;

m – кількість перетинів із стороною осередку;

d – довжина сторін ділянки.

Даний метод може застосовуватися при побудові вуличної мережі для пішого або велосипедного руху в умовах відсутності існуючої ВДМ або забудови. Однак моделювання велосипедної мережі переважно відбувається в умовах існуючої ВДМ і прилеглих до неї споруд. Для визначення ухилу дороги в умовах існуючої ВДМ було запропоновано методику моделювання топографії ВДМ. Для цього було використано програмне забезпечення ArcGIS for Desktop 10.2 та геодезична зйомка міста Харкова, рисунок 3.11. Перетворення геодезичної зйомки м. Харкова у горизонталі, необхідні для розрахунку, було оцифровано вручну для всієї території міста Харкова.



Рисунок 3.11– Фрагмент геодезичної зйомки міста Харкова

Оскільки при моделюванні ВДМ у місцях перетину вулиць дуже часто розбивається на ділянки, які не збігаються з точкою перетину дороги з горизонталлю, то використання формули (3.6) не завжди є можливим. Для того, щоб зберегти географію ВДМ і визначити середній рівень ухилу (s), необхідно перетворити залежність (3.6) наступним чином:

$$s = \frac{h \cdot n}{l} \cdot 100, \quad (3.6)$$

де n – кількість перетинів ВДМ горизонталлями.

Після розрахунку значень проценту кута нахилу проводиться класифікація вулиць в залежності від величини ухилу у відсотках для візуальної оцінки та перевірки результатів, рис. 3.12. За основу взята класифікація кута ухилу, описана в [18].



Рисунок 3.12 – Схема ухилів на ВДМ м. Харків

Топографічна модель умов руху велосипедного транспорту дозволяє класифікувати ВДМ міста за рівнем горбистості. Аналіз результатів моделювання ВДМ міста Харкова показав, що центральна частина має значні для велосипедного руху значення ухилу дороги. Такі вулиці, як Бурсацький спуск, Соборний спуск, Класичний провулок, вул. Маршала Бажанова та інші мають ухили дороги понад 6% великої протяжності, що є серйозною перешкодою для велосипедного руху, особливо для трудових поїздок. Водночас, ВДМ Харкова має достатній набір альтернативних зв'язків, які дозволяють вибрати прийнятні шляхи для велосипедного руху.

Топографічна модель, представлена цій роботі, дозволяє класифікувати ВДМ з точки зору її привабливості для велосипедистів, а також отримати чисельні значення величини ухилу дороги, які можуть використовуватися як вхідні параметри моделі велосипедного руху. Дана методика може знайти широке застосування в умовах України, оскільки передбачає використання даних доступних департаментам планування міст.

Після того, як всі параметри були загеокодовані, необхідно загеокодувати дані про маршрути руху велосипедистів в якості атрибутів ВДМ. Для цього було проведено збір даних методом виявлених вподобань, який детально описано у першому розділі. Серед наявних інструментів збору даних про маршрут було обрано найбільш об'єктивний і точний інструмент – фіксування GPS-треку маршруту руху. Цей метод надає найбільш точні дані про фактичний маршрут руху, порівняно, наприклад, з методом ментальних карт, де велосипедист може несвідомо помилково прокладати маршрут руху або свідомо коригувати його. Проте формування випадкової вибірки в даному випадку є складною задачею через те, що задачі дослідження вимагають максимально природних умов подорожі велосипедом, а в умовах, коли частка велосипедистів є малою, формування достатньої вибірки класичним методом є складною задачею. Альтернативним методом збору таких даних є збір історичних даних про маршрути руху велосипедистів, зафіксовані з використанням мобільного додатку. У такому випадку вибірка формується в природних умовах через те, що на момент здійснення поїздки учасник експерименту не знає про дослідження.

Критика даного методу полягає в тому, що під сумнів ставиться репрезентативність вибірки через те, що додаток більш схильні використовувати спортсмени. Враховуючи, що оцінити репрезентативність методу в м. Харкові важко через низький рівень користування велосипедним транспортом, було проведено дослідження за допомогою використання додатку Strava [78] в м. Дрезден, що характеризується високим рівнем користування велосипедним транспортом.

Для оцінки репрезентативності даних було проведено дослідження прогнозних властивостей моделей, побудованих на основі даних, отриманих за допомогою даної методики, відносно даних, отриманих за допомогою датчиків підрахунку кількості велосипедистів (рис. 3.13, 3.14).

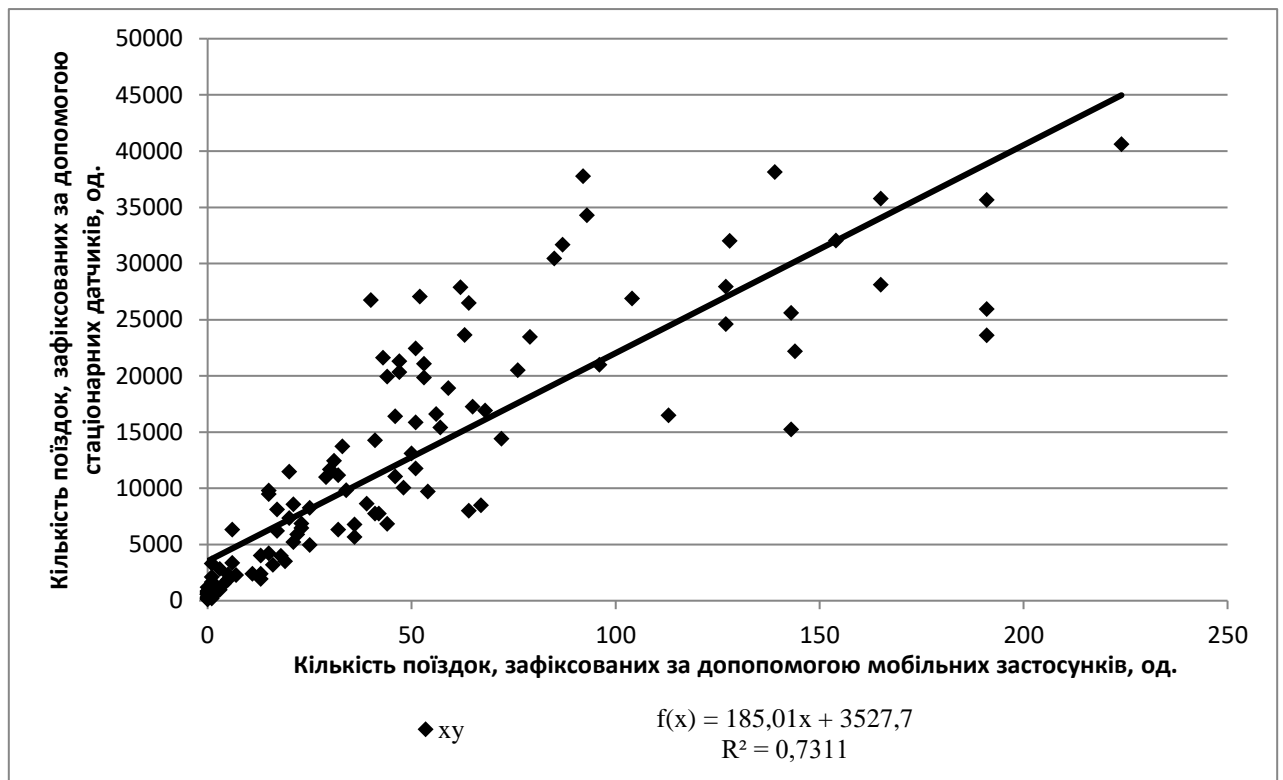


Рисунок 3.13 – Оцінка ступеню тісноти взаємозв'язку кількості поїздок, зафіксованих за допомогою мобільних застосунків та стаціонарних датчиків

Для проведення дослідження використовувався масив даних, отриманих від компанії Strava, що містив інформацію про всі зафіксовані поїздки за 2014-2015 рр. в

м. Дрезден [22]. За допомогою геоприв'язки всі треки були прив'язані до певної ділянки ВДМ. Для порівняння було використано дані про кількість велосипедистів, зафіксованих за допомогою стаціонарних датчиків, що розташовані в п'яти локаціях в м. Дрезден (рис.3.14). Після виключення статистичного вибросу було проведено обробку даних з метою визначення залежностей розподілу велосипедних поїздок, отриманих на основі мобільного додатку до даних підрахунку стаціонарних датчиків.

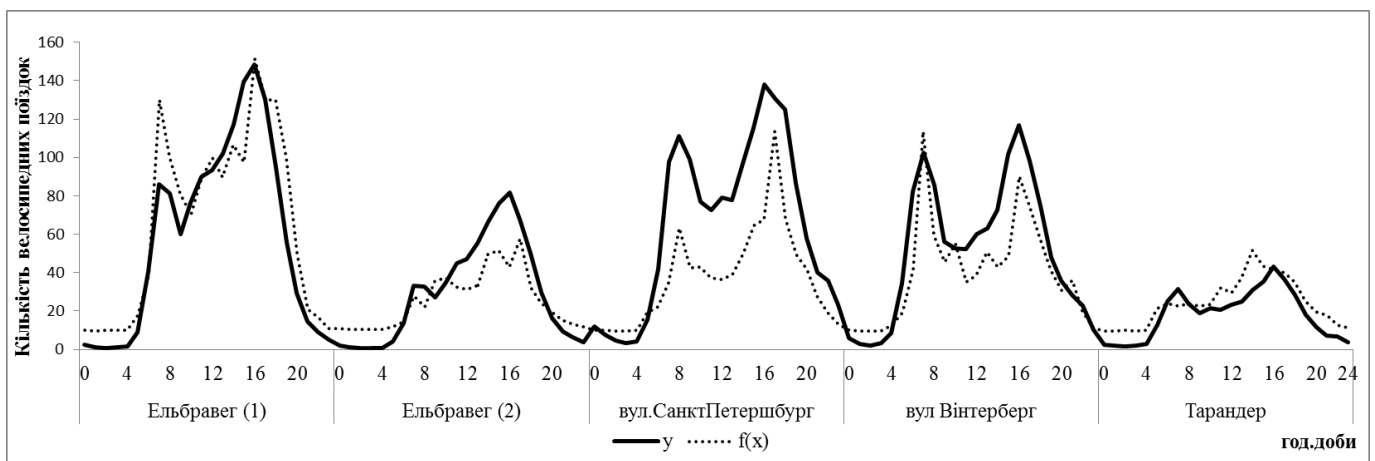


Рисунок 3.14 – Залежність середньодобового розподілу велосипедних поїздок в залежності від часу доби, м. Дрезден

Дослідження дозволило отримати хороші статистичні характеристики моделі залежності добового розподілу велосипедних поїздок ($r = 0,86$, $r^2 = 0,73$). В результаті чого було вирішено використовувати дані, зібрані за допомогою мобільних додатків, для дослідження закономірностей пересування велосипедистів.

Для збору даних про маршрути руху велосипедистів в м. Харків було використано мобільні додатки Endomondo і Strava, які дозволяють зафіксувати трасу пролягання маршруту (рис. 3.15).

Наступним етапом обробки результатів спостереження за поїздками велосипедистів м. Харкова є геокодування веломаршрутів, отриманих у результаті обстеження, яке виконується за допомогою спеціально розробленої методики, що наведена нижче.

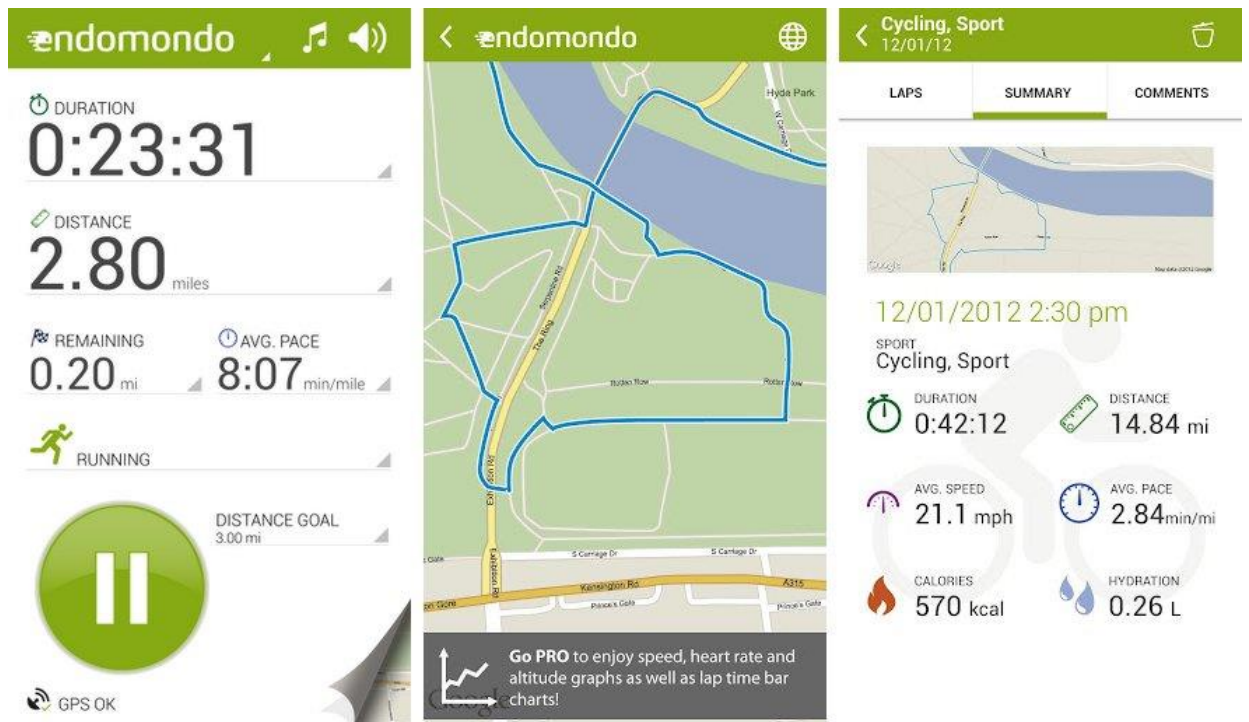


Рисунок 3.15 – Приклад інтерфейсу мобільного додатку для збору GPS-даних

Однією з проблем використання отриманих протягом спостережень даних є точна геолокація обраних маршрутів. Для геокодування маршруту, отриманого в результаті обстеження, уздовж маршруту формується набір точок з кроком 100 м. За допомогою алгоритму пошуку найкоротшої відстані формується найкоротший шлях між набором точок по заданій транспортній мережі. Алгоритм генерації обраної альтернативи у програмному продукті ArcGIS представлено на рис. 3.16.

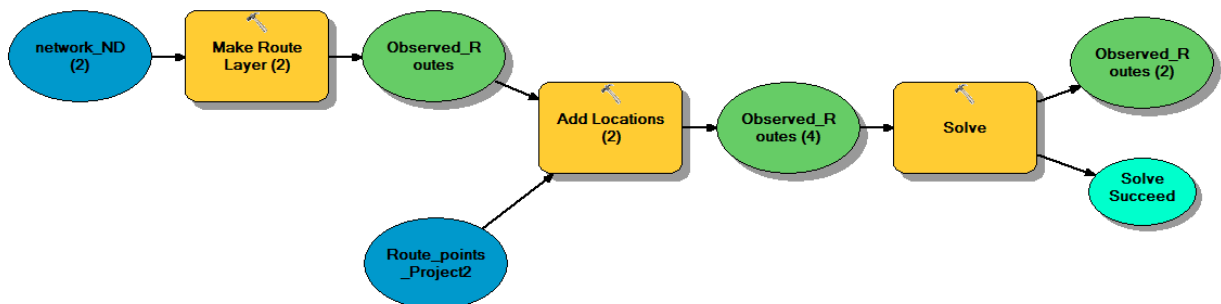


Рисунок 3.16– Блок-схема генерації обраної (базової) альтернативи

Отриманий шлях є обраною альтернативою (рис. 3.17), тобто приймається за основу набору. У результаті обробки даних загеокодовано 56 маршрутів унікальних користувачів, описова статистика яких представлена у табл. 3.8.



Рисунок 3.17 – Приклад маршруту, отриманого при обробці матеріалів спостережень

Таблиця 3.8 – Характеристика вибірки маршрутів руху велосипедистів

Характеристика вибірки	Значення
Кількість маршрутів, од.	56
Мінімальна довжина, м	2597
Максимальна довжина, м	18417
Середня довжина, м	9447

Аналіз мережі маршрутів, що потрапили в обстеження (рис. 3.18), дозволяє зробити висновок, що маршрути рівномірно розподілені по всій території м. Харкова

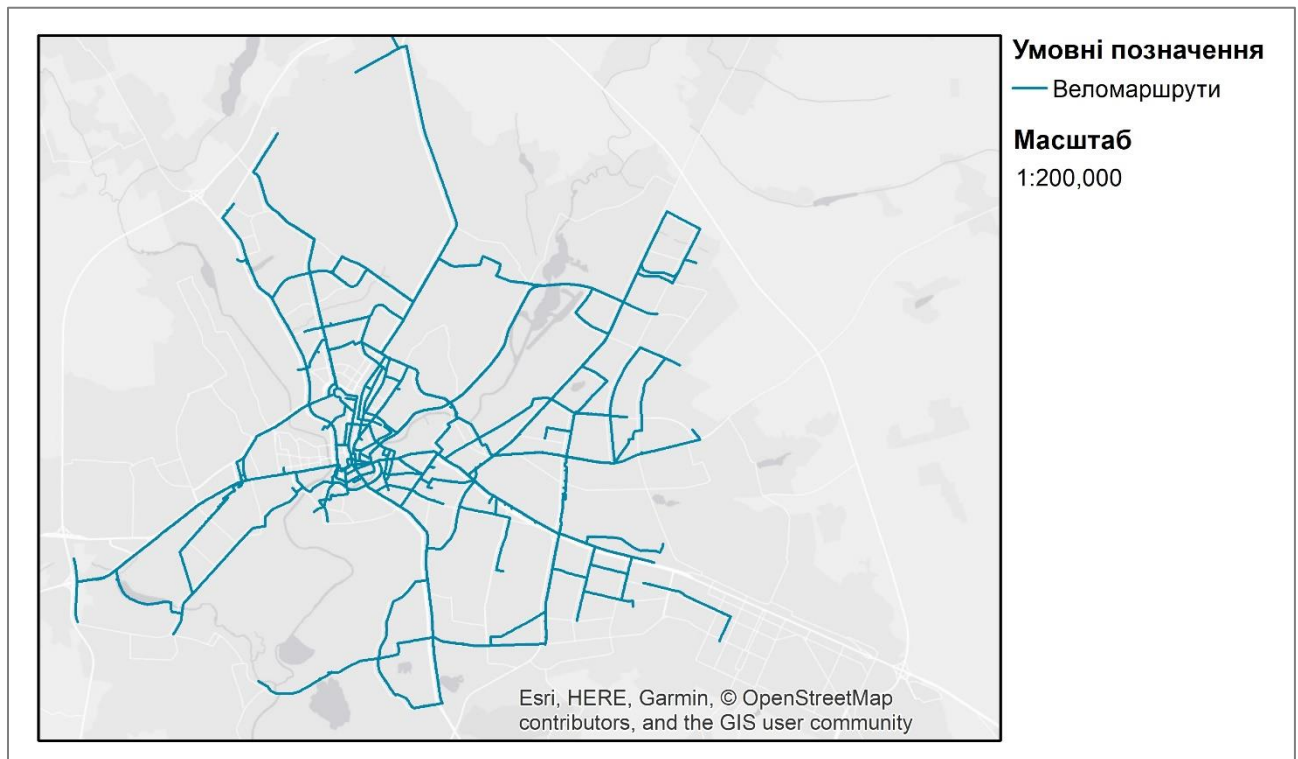


Рисунок 3.18 - Мережа маршрутів, що потрапили в обстеження

На наступному кроці було сформовано набори альтернатив для респондентів, що потрапили у кінцеву сукупність надійних спостережень, для чого спочатку було визначено місця формування і закінчення поїздки.

Оскільки насправді кількість альтернативних шляхів, що розглядаються велосипедистом, значно менша за абсолютну кількість альтернатив у складній ВДМ міста, для даного дослідження був обраний метод штрафування (зважування), для якого була розроблена наступна реалізація. Першою альтернативою приймається найкоротший маршрут між місцями формування і закінчення поїздки. При формуванні другої та наступних альтернатив, у разі, якщо ділянка мережі використовувалася при побудові попереднього альтернативного маршруту, довжина ділянки множиться на два. Для кожного респондента було доступно п'ять альтернатив, але не менше чотирьох

(у разі, якщо одна з альтернатив збігається з обраним маршрутом). Приклад формування набору альтернативних маршрутів прямування велосипедистів представлено на рис. 3.19. Загальна характеристика сформованих наборів альтернативних шляхів пересування наведена в таблиці 3.9 у порівнянні з фактично обраним маршрутом.

При цьому виявилось, що далеко не завжди доповнення альтернативи фактично обраному маршруту може приводити до погіршення параметрів шляху прямування велосипедистів. У даному випадку, це стосується такого показника, як щільність паркування.

Таблиця 3.9 – Описова статистика результатів формування альтернатив

Ознака	Обрана			Необрана		
	Середня	Медіана	Стандартне відхилення	Середня	Медіана	Стандартне відхилення
Протяжність маршруту, км	9,447	9,495	3,613	16,359	13,298	12,147
Щільність паркування, бал	1,43	1,33	0,41	1,232	1,107	0,267
Швидкість АТ, км/год.	34,29	35,44	4,66	36,375	37,842	2,470
Кількість поворотів, од.	14,29	10,00	11,13	24,257	23	15,82
Фізична робота, Дж	280,13	264,07	125,60	399,98	343,860	260,854
Категорія вулиці	6,52	6,40	3,38	3,279	2,817	1,612

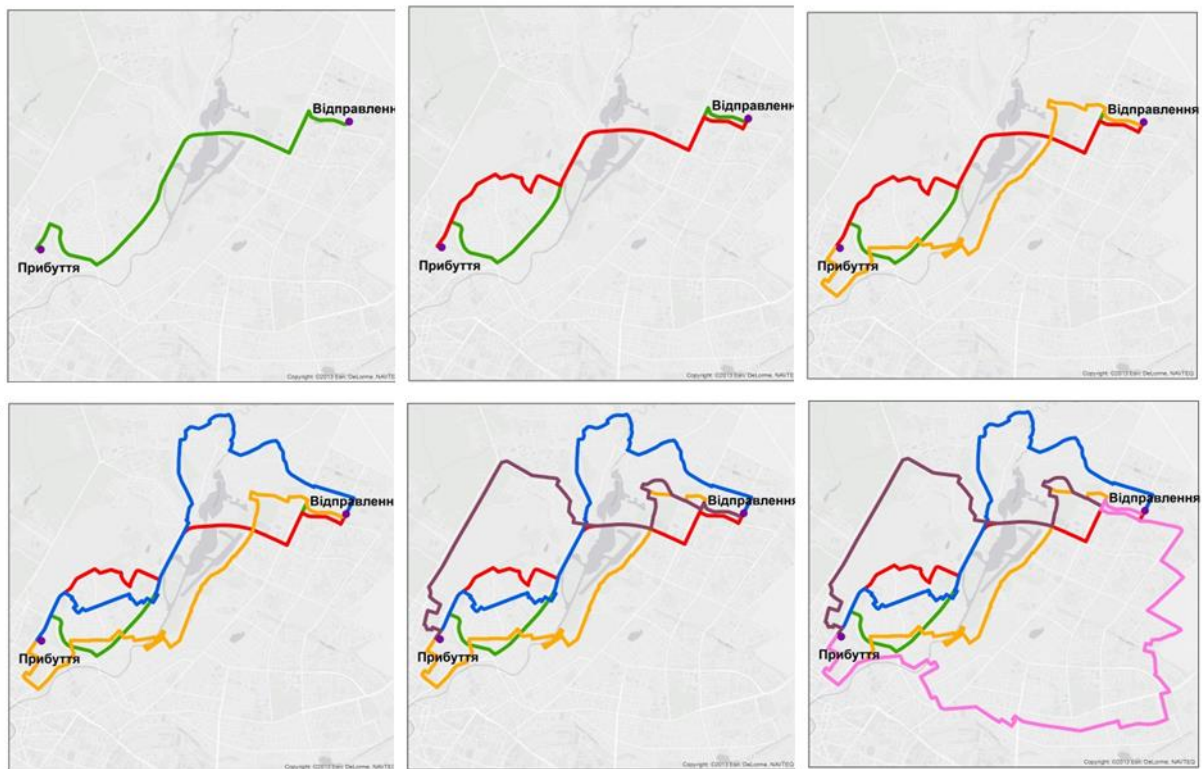


Рисунок 3.19 – Формування набору альтернатив для одного респондента

У результаті, обрана альтернатива – це маршрут, отриманий в результаті обстеження, а необрані – альтернативи отримані в результаті алгоритму побудови альтернатив. Після того, як результати параметрів для обраної і необраних альтернатив отримані, можна переходити до обрахунку значень коефіцієнтів значущості відповідних параметрів моделі.

3.4 Визначення математичного виду функції привабливості шляху проходження і ймовірності його вибору

Параметри моделі були обчислені за допомогою вільного програмного забезпечення BIOGEME 1.8 – це безкоштовне програмне забезпечення з відкритим кодом,

призначене для оцінки максимальної правдоподібності параметричних моделей в цілому і особливо моделей дискретного вибору. Специфікація моделі та функції вірогідності написані мовою програмування Python.

Для оцінки параметрів в BIOGEME необхідно сформувати базу даних альтернатив, що представляє собою файл, в якому кожний рядок містить однакову кількість числових даних і відповідає одному спостереженню. В нашому випадку кожний рядок відповідає унікальному велосипедисту і містить інформацію про шість альтернатив (один обраний маршрут і п'ять необраних).

Для визначення значущості параметрів було розраховано базову модель, описану в (2.18). Приклад програмного коду, що використовується задля оцінки коефіцієнтів, представлений в додатку Г.

Перший варіант розрахунку показав, що кількість регульованих перехресть є значущим фактором з позитивним знаком, іншими словами, що більше світлофорів, то вірогідніше обрання маршруту. Дане твердження контрінтуїтивне та протирічить результатам, отриманим під час якісного дослідження поведінки велосипедистів. Мало ймовірно, щоб велосипедист вибирав маршрути, що потребують більше зупинок. Додатковий аналіз показав, що, швидше за все, світлофори розташовані на головних вулицях, які забезпечують найпряміші маршрути, а також якість покриття яких краща за таку на альтернативних шляхах. Тому було зроблено припущення, що велосипедисти обирають головні вулиці, а не другорядні. Після цього категорія вулиці була додана до параметрів мережі, і процедура формування альтернатив була проведена знову. Параметр «Кількість світлофорів» був замінений «Довжиною маршруту», що проходить по дорозі категорії 1. Також, як показало попереднє дослідження, немає істотної різниці між кількістю лівих поворотів та загальною кількістю поворотів, тож обидва показники виявилися значущими. Скоригована функція корисності показана в рівнянні (3.7).

$$U_{in} = \beta_L \cdot L_{in} + \beta_I \cdot MS_{in} + \beta_K \cdot T_{in} + \beta_V \cdot V_{in} + \beta_D \cdot Pd_{in} + \beta_S \cdot W_{in} + \varepsilon_{in}, \quad (3.7)$$

де MS_{in} – довжина, що проходить по дорогам категорії 1.

Результати розрахунку представлені в табл. 3.10-3.15. Статистично значущими показниками виявилися: протяжність маршруту, кількість поворотів та категорія вулиць. Відповідно, доцільно провести оцінку коефіцієнтів параметрів тільки за статистично значущими показниками.

Попри очікування, результат розрахунку скоригованої базової моделі показав, що фізична робота є незначущим коефіцієнтом. Це може відбуватися за рахунок того, що в розрахунку фізичної роботи велику роль відіграє протяжність маршруту, таким чином, відбувається значна кореляція між цими двома показниками. Для перевірки необхідно провести розрахунок моделі, що не буде включати протяжність маршруту. Як видно з таблиці 3.14, за відсутності показника «Протяжність маршруту» фізична робота стає статистично значущою з від'ємним знаком.

Таблиця 3.10 – Статистика розрахунку за скоригованою базовою моделлю

Показник	Значення
Кількість параметрів	6
Логарифмічна правдоподібність	-21,637
Скоригований χ^2	0,720

Таблиця 3.11 – Результати розрахунку коефіцієнтів скоригованої моделі

Параметри моделі	Коефіцієнт	Стандартна помилка	t-тест	p-значення
Протяжність	-2,42	0,828	-2,92	0,00
Паркування	0,451	1,75	0,26	0,80
Швидкість	0,016	0,122	0,13	0,90
Поворот	0,323	0,116	2,79	0,01
Фіз. робота	0,005	0,015	0,35	0,73
Категорія вулиці	1,36	0,431	3,16	0,00

Таблиця 3.12 - Статистика розрахунку за варіантами моделі

Показник	Модель «Відстань – Повороти – Категорія вулиць»	Модель «Робота – Повороти – Категорія вулиць»	Модель «Відстань – Робота – Повороти – Категорія вулиць»
Кількість параметрів	3	3	4
Логариф, правдоподібність	-21,809	-41,284	-21,673
Скорегований χ^2	0,748	0,551	0,739

Таблиця 3.13 – Результати розрахунку коефіцієнтів моделі «Відстань – Повороти – Категорія вулиць»

Параметри моделі	Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-тест	p-значення
Протяжність	-2,51	0,742	-3,38	0,00
Поворот	0,351	0,111	3,15	0,00
Категорія вулиці	1,44	0,441	3,26	0,00

Таблиця 3.14 – Результати розрахунку коефіцієнтів моделі «Робота – Повороти – Категорія вулиць»

Параметри моделі	Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-тест	p-значення
Поворот	0,072	0,037	1,98	0,05
Фіз. робота	-0,019	0,005	-3,51	0,00
Категорія вулиці	1,02	0,203	5,03	0,00

Таблиця 3.15 – Результати розрахунку коефіцієнтів моделі «Відстань – Робота-Повороти – Категорія вулиць»

Параметри моделі	Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-тест	p-значення
Протяжність	-2,53	0,734	-3,45	0,00
Поворот	0,333	0,112	2,98	0,00
Фіз. робота	0,007	0,014	0,51	0,61
Категорія вулиці	1,36	0,433	3,14	0,00

Після підстановки значень коефіцієнтів скоригованої базової моделі в рівняння (2.18), модель набуває вигляду:

$$U_{in} = -0,0443 \cdot L_{in} + 0,224 \cdot I_{in} + 0,224 \cdot K_{in} - 0,155 \cdot V_{in} + 1,04 \cdot D_{in} + 0,00830 \cdot w_{in} + \varepsilon_{in}. \quad (3.8)$$

Модель «Відстань – Повороти – Категорія вулиць» при цьому має вид:

$$U_{in} = -2,51L_{in} + 1,44MS_{in} + 0,351T_{in} + \varepsilon_{in}. \quad (3.9)$$

Модель «Робота – Повороти – Категорія вулиць» має вид:

$$U_{in} = 1,02MS_{in} + 0,0722T_{in} - 0,0186W_{in} + \varepsilon_{in}. \quad (3.10)$$

А модель «Відстань – Робота – Повороти – Категорія вулиць»

$$U_{in} = -2,53L_{in} + 1,36MS_{in} + 0,333T_{in} + 0,00684W_{in} + \varepsilon_{in}. \quad (3.11)$$

У результаті розрахунку коефіцієнтів отримано функції корисності (3.8–3.11), які дозволяють сформулювати цільову функцію і реалізувати четвертий етап транспортної моделі розподіл по мережі. Доцільно провести розрахунок розподілу поїздок для всіх трьох випадків, щоб проаналізувати моделі вибору шляху руху.

Висновки по третьому розділу

1. Харків відповідає умовам функціонування об'єкта дослідження. Завдяки тому що місто Харків є найкрупнішим містом, це надає високу точність оцінки параметрів велосипедного руху.

2. При формуванні мікрорайонів для моделювання транспортної поведінки максимальний умовний діаметр району приймається у розмірі 2 км, максимальна умовна площа – 4 км. Це дозволяє врахувати особливості пересування велосипедистів, отримані в результаті експериментальних досліджень, які показали, що поїздки до 2 км є нетиповими для велосипедного транспорту.

3. Використання функції розподілу велосипедних поїздок за відстанню дозволило зробити перехід від матриці загальних кореспонденцій до матриці велосипедного руху.

4. Велосипедна мережа є однією з найрозгалуженіших транспортних мереж і, таким чином, велосипедист має набагато більше альтернатив шляхів руху, ніж водій особистого автомобіля або пасажир громадського транспорту. Рішення про вибір шляху може суттєво залежати від особистих переваг та характеристик велосипедиста, для визначення яких необхідний подальший аналіз поведінки велосипедистів.

5. Сучасні засоби збору інформації дозволяють отримати дані про фактичні маршрути пересування велосипедистів. Використання GPS-трекінгу дозволило отримати об'єктивні дані про маршрути порівняно з методами виявлених вподобань, які є суб'єктивними.

6. Дослідження показали, що вивчення факторів впливу вибору маршруту руху латентними користувачами є недоцільним через надвисокий вплив відчуття небезпеки при пересуванні велосипедом в існуючих умовах і недостатній досвід перебування в реальних умовах велосипедного руху. Водночас, для інших груп користувачів фактори впливу на вибір маршруту не відрізняються в залежності від приналежності до групи.

7. Особливості суб'єктивного сприйняття транспортної мережі та обмеженої обізнаності велосипедиста про альтернативи приводять до того, що велосипедист вибирає найбільш очевидний маршрут, наприклад, той, який пролягає по маршруту громадського транспорту. У такому випадку розвиток велосипедної інфраструктури в меншій мірі залежить від існуючих переваг, а в більшій – від рішення проектувальника мережі та наявності системи навігації.

8. Результати моделювання показали, що щільність паркування та довжина маршруту є найменшими важливими факторами вибору дорожнього руху велосипедиста, що підтверджує гіпотезу, що велосипедист вибирає маршрут не лише за довжиною.

Результати досліджень були опубліковані в роботах [17 – 20, 22, 27 – 28].

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ МЕРЕЖІ ВЕЛОСИПЕДНОГО ТРАНСПОРТУ

Результати виконання попередніх етапів дослідження дозволяють перейти до практичних кроків щодо оцінки умов функціонування велотранспорту, планування розвитку велоінфраструктури у м. Харків та створення на цьому прикладі відповідної концепції розвитку мережі велосипедного транспорту у містах з низьким поточним рівнем його використання.

Першим кроком на цьому шляху має стати прогнозування потенційних потоків велосипедного транспорту на основі розробленої у попередньому розділі моделі попиту на пересування в місті.

4.1 Аналіз велосипедних потоків і організації мережі велосипедних маршрутів

Для прогнозу потоків було обране програмне забезпечення (ПЗ) VISUM німецької компанії PTV VISION[®], яке є інструментом аналітичного прогнозування ТП та оцінки результатів транспортного обслуговування населення міст та регіонів. Це ПЗ забезпечує проектувальника широким інструментарієм для проведення розрахунків, але не надає жодних вказівок щодо переваг використання тієї чи іншої моделі при прогнозуванні ТП. Відповідальність за кінцевий вибір покладається виключно на інженера-проектувальника, для якого природним критерієм вибору моделі є точність відображення моделлю реального процесу.

У даному дослідженні питання щодо вибору ефективного інструменту моделювання найбільш гостро постає саме на етапі розподілу велосипедних пересувань транспортною мережею. Для цього розподілу ПЗ VISUM використовує різноманітні

моделі розрахунку ймовірності вибору учасником руху кожної з можливих альтернатив шляху пересування, які в даній роботі також розраховувалися у попередньому розділі.

Дискретне моделювання вибору велосипедистами шляху пересування привело до отримання декількох моделей вибору з приблизно однаковими статистичними характеристиками. Це є позитивним результатом для даного дослідження, оскільки відображає загальні тенденції, що виникають під час застосування інструменту дискретного моделювання вибору, оскільки для нього характерним є високий ступінь коливань рівня значущості факторів при переборі варіантів їхнього поєднання у моделі при незначній різниці у загальних статистичних характеристиках моделі. Це обумовлено механізмом отримання коефіцієнтів моделі за допомогою методу максимізації функції правдоподібності, який, не має такого методичного забезпечення, як регресивний аналіз, та достатньо обґрунтованого пояснення результатів моделювання. Втім, на момент написання роботи, дискретне моделювання можна вважати практично єдиним механізмом отримання виду функції корисності (привабливості) альтернативних шляхів пересування для індивідуального транспорту, оскільки розроблені у останні роки інші варіанти моделювання вибору шляху [133, 134] призначені для опису поведінки пасажирів громадського транспорту.

Саме такий результат, внаслідок застосування декількох приблизно рівнозначних моделей, був отриманий у попередньому розділі роботи. Це забезпечує сформовану концепцію розвитку ВТ необхідним рівнем узагальнення процесу планування, тому що вимагає отримання розв'язку цього питання у рамках даного дослідження для досягнення кінцевого результату.

Оскільки кінцевою метою моделювання зазвичай є найточніше відтворення властивостей об'єкту моделювання, кінцевий вибір моделі варто виконувати на основі порівняння розрахункових та фактичних значень велопотоків. Для цього у ПЗ VISUM необхідно розрахувати велосипедні потоки за допомогою кожної з трьох моделей з таким набором факторів:

1. Відстань – Кількість поворотів – Категорія вулиць.
2. Робота – Кількість поворотів – Категорія вулиць.

3. Відстань – Робота – Кількість поворотів – Категорія вулиць.

Окремим випадком моделювання велосипедних потоків є їхній розподіл у транспортній мережі за ознакою найкоротшої відстані, яка повинна надати відповідь на питання щодо потенційно можливих напрямів руху велосипедистів у місті та забезпечити можливість для виконання одного з основних принципів побудови веломережі, сформованих на попередніх етапах роботи. Характеристика всіх моделей, що мають використовуватися для визначення велосипедних потоків у ВДМ м. Харків, наведена у таблиці 4.1, а результати розрахунків за цими моделями відображені на рис. 4.1.

Таблиця 4.1 – Альтернативні моделі вибору велосипедистами шляху пересування в м. Харків

Назва моделі	Функція корисності
1. Модель «Найкоротша відстань»	$R = \min \sum l_{ij}$
2. Модель «Відстань – Повороти – Категорія вулиць»	$U_{in} = -2,51L_{in} + 1,44MS_{in} + 0,351T_{in} + \varepsilon_{in}$
3. Модель «Робота – Повороти – Категорія вулиць»	$U_{in} = 1,02MS_{in} + 0,0722T_{in} - 0,0186W_{in} + \varepsilon_{in}$
4. Модель «Відстань – Робота – Повороти – Категорія вулиць»	$U_{in} = -2,53L_{in} + 1,36MS_{in} + 0,333T_{in} + 0,00684W_{in} + \varepsilon_{in}$

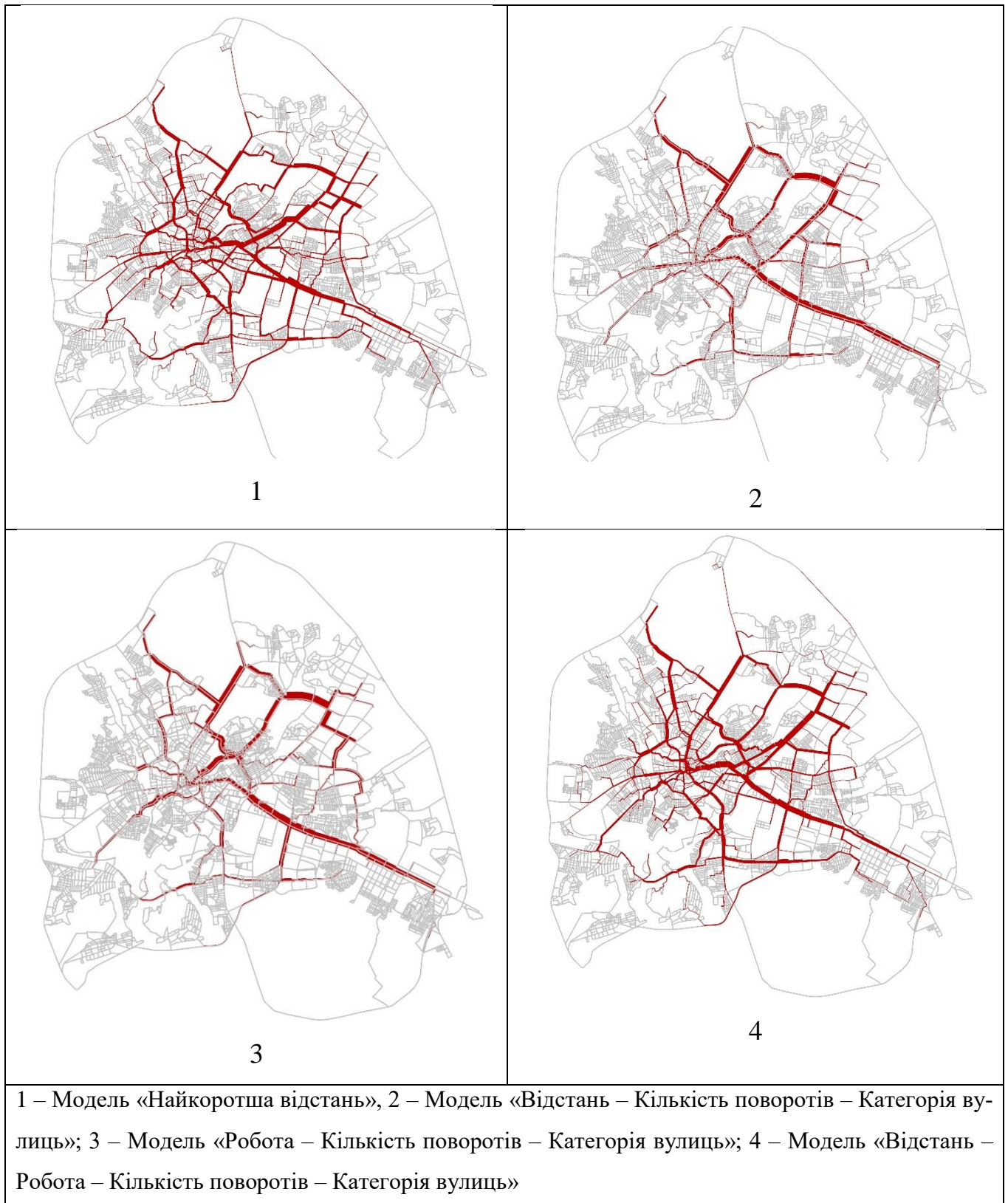


Рисунок 4.1 – Результати моделювання велосипедних потоків у ВДМ м. Харків

Для оцінки властивостей аналізованих моделей були використані результати весняного підрахунку кількості велосипедистів у м. Харків, що проводився у травні 2015 року на місцях, які відображені на рисунку 4.2.

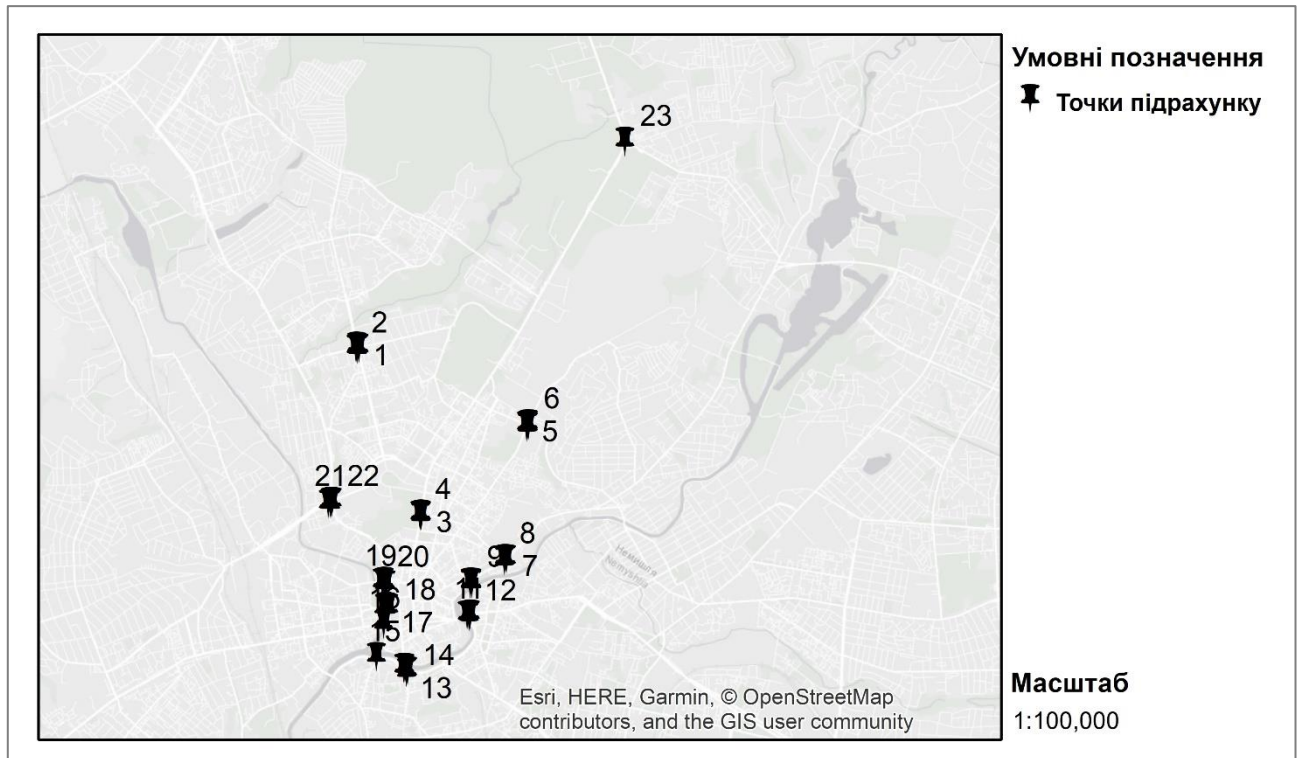


Рисунок 4.2 – Місця розташування точок підрахунку велосипедистів

Обстеження проводилось громадською організацією «Міські Реформи» у ранковий в травні 2016 р. в середу у піковий період з 17 до 19 та охопило 19 місць, переважно перехрестя – таблиця 4.2, рис. 4.2. Ці місця оточують яскраво виражену центральну частину міста Харкова, з природними межами по Саржиному яру, річкам Лопань та Харків, а також Журавлівському спуску. Цей вибір є цілком природним для Харкова та вже використовувався у попередніх дослідженнях з транспортного планування [135].

Тривалість спостережень за кожним об'єктом складала не менше, ніж 2 години. Для підвищення надійності результатів спостережень підрахунок велосипедистів обліковцем у реальному часі паралельно дублювався відеоспостереженням. Після

отримання результатів спостережень, вони були перераховані у погодинні значення та порівняні з результатами моделювання, що представлено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.2 – Порівняння результатів моделювання з результатами підрахунку

Контрольна точка	Результат підрахунку, вел.	Модель 1, вел.	Модель 2, вел.	Модель 3, вел.	Модель 4, вел.
1	228	24114	33593	27934	27986
2	126	3042	5252	20301	4699
3	119	13852	39599	26898	26004
4	65	1775	2323	77	1445
5	98	22440	60146	78967	24711
6	54	10179	4190	5937	2993
7	80	11245	64713	80717	19444
8	25	244	1725	0	274
9	55	8272	55719	70038	16619
10	71	33130	30284	20952	15064
11	154	20504	44659	43769	35533
12	46	1821	17488	35850	4871
13	31	7377	7417	3734	5939
14	57	11531	18315	32486	4958
15	116	4375	16703	27730	10467
16	133	18467	42633	23005	20304
17	92	16464	12946	20937	9895
18	42	3802	2475	970	2203
19	84	16358	14807	17176	9578
20	39	11337	24639	44035	19066
21	85	20453	27674	37580	22639
22	60	10661	41939	10911	8747
23	131	9229	30119	30214	10761

При порівнянні результатів моделювання велопотоків у ПЗ VISUM з їхніми фактичними значеннями слід розуміти, що відповідність абсолютних значень не є принциповим, оскільки у моделі велопотоки розраховані для суттєво вищого рівня використання велосипедів у місті, ніж наявний. Найбільш точною є модель 4 (табл. 4.3), з множинним коефіцієнтом кореляції $r = 0,63$. Варто відзначити, що для підвищення точності транспортних моделей застосовується калібрування матриці кореспонденцій на основі транспортних потоків. Втім, оскільки метою моделювання потоків було визначення найбільш наближеної до реальності моделі, калібрування у даному випадку не проводилося.

Таблиця 4.3 – Регресійна статистика

Показник	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
Множинний коефіцієнт кореляції	0,46	0,33	0,18	0,63
Коефіцієнт детермінації	0,21	0,11	0,03	0,40
Нормований коефіцієнт детермінації	0,17	0,07	-0,01	0,37
Стандартна похибка	7592,32	18595,13	23287,90	7723,04
Спостереження	23	23,00	23,00	23

Отримані у результаті розрахунків велопотоки є достатньо ґрунтовною інформацією для наступного етапу планування розвитку ВІ – визначення ієрархії її розбудови. Але при їх використанні слід враховувати, що розраховані вони за умови повної відсутності ВІ та створення її окремих елементів буде приводити до зміни розподілу велопотоків по у транспортній мережі міста.

4.2 Визначення пріоритетності розвитку велосипедної мережі в міському середовищі

Пріоритетність розвитку велосипедної мережі у місті має забезпечувати можливість поступового створення велоінфраструктури з одночасним виконанням принципу зв'язності веломережі.

Такий підхід забезпечує можливість розвитку ВІ в об'єктивних умовах обмеженості міських ресурсів протягом постійного періоду часу, за який зазвичай приймають один рік. Кожного року місто повинне визначитися з тим, на які цілі воно має спрямувати місцеві доходи. Найчастіше величина міського бюджету є недостатньою для одночасного створення всієї ВІ, крім того, це складно технологічно, оскільки вимагає обмежень руху на відповідних ділянках ВДМ, а отже, необхідна пріоритизація маршрутів у мережі.

Тому наявність етапів розбудови ВМ є об'єктивною реальністю, що супроводжує розвиток велосипедного руху в місті. Для цих етапів обов'язковою є визначеність розміру видатків на їх реалізацію, які формуються виходячи з можливостей міського бюджету. Ці видатки мають функціональний зв'язок з довжиною веломережі, що може бути створена за виділені кошти відповідно до типу велосипедної інфраструктури. Так як ВІ має декілька різновидів, то точніше можна сказати, що для кожного її типу достатньо точно відома питома величина витрат на створення одиниці довжини веломережі. З можливих типів ВІ, що описані у даному підрозділі пізніше, можуть бути сформовані альтернативні набори ділянок веломережі, що можуть бути створені за виділені кошти та забезпечити максимальне виконання принципу зв'язності ВІ.

Виходячи із загальних принципів прийняття рішень у сфері транспорту на основі порівняння результатів реалізації заходів та витрат на них, описані вище умови поетапного розвитку ВІ надають змоги стверджувати, що витрати на кожний етап є заздалегідь відомими та для прийняття вірного рішення залишається визначитися з оцінкою результатів реалізації різних варіантів створення веломережі. При цьому

слід розуміти, що довжина веломережі, яка створюється, ніяким чином не відображає результати реалізації етапу, а є лише функцією від видатків на її створення та типу ВІ. Результати розбудови ВІ повинні відображати реальні зміни стану ініціатора реалізації заходів, яким у випадку створення веломережі завжди виступає міська влада, тож і результати повинні знаходитися у сфері її інтересів.

Однак використання лише кількості залучених до велоруку мешканців міста є недостатньо повним відображенням результатів створення ВІ. Це спричинено стратегічними цілями розвитку міста, у яких велотранспорт відіграє роль конкурента стосовно інших видів транспорту, та розвиток якого значно покращує умови міського життя в цілому. Це стається за рахунок високої енергоефективності та екологічності велотранспорту у порівнянні з моторизованими видами транспорту. До того ж він вимагає значно менше міського простору для задоволення потреб населення у пересуваннях, ніж моторизований транспорт.

Таким чином, збільшення кількості велосипедистів у місті призводить до покращення умов міського життя завдяки скороченню кількості користувачів моторизованих видів транспорту та відповідного зниження навантаження на ВДМ, разом із підвищенням швидкості сполучення при пересуваннях містом. При цьому скорочення кількості користувачів моторизованих видів транспорту можливо вважати рівним кількості велосипедистів, що будуть користуватися новоствореною ВІ, та для якої на попередніх етапах дослідження були визначені обґрунтовані оцінки.

Але оскільки йдеться про транспортний процес, лише кількості нових велосипедистів для оцінки наслідків розвитку ВМ буде недостатньо. Позитивні результати зміни моторизованого способу пересування на велосипедний рух також залежать і від відстані, на яку пересувається учасник руху: що більшою є відстань поїздки, то більшим є навантаження на ВДМ, що спричиняє учасник руху.

Узагальнюючим показником, що характеризує екологічні та енергетичні витрати на пересування, є транспортна робота, яка вимірюється у пасажирокилометрах. При її визначенні також припустимим є припущення про достатньо точне відображення транспортної роботи, що виконувалася для переміщення мешканців міста мо-

торизованими видами транспорту, тією транспортною роботою, що виконується новими велосипедистами. Це припущення базується на ствердженні, що зміна способу виконання трудового або учбового пересування не змінює його напрямку, тобто, місце проживання та роботи (навчання), тобто, основна складова відстані пересування – відстань між пунктами відправлення та прибуття по повітряній лінії – залишається незмінною.

З урахуванням вищевикладеного найбільш об'єктивним відображенням позитивних результатів розвитку веломережі є збільшення транспортної роботи, що виконується велосипедистами у місті. Результати розрахунку транспортних потоків надають необхідні дані про очікувану інтенсивність руху велосипедистів за певний період часу, що вкупі з довжиною ділянок мережі дозволяє визначити велосипедну транспортну роботу для всіх альтернативних варіантів реалізації кожного етапу розбудови ВІ та обрати найбільш ефективний з них.

Варіанти ВІ, що можуть бути використані для розбудови веломережі, можна класифікувати за наступними ознаками:

- за типом інфраструктури (велодоріжка, велосмуга тощо);
- за метою (транспортні, рекреаційні);
- за функціональним призначенням (магістральні, міські).

Функціональні характеристики можливих варіантів ВІ наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Типи велосипедних маршрутів за функціональним призначенням

Інтенсивність руху велосипедистів	Категорія за функціональним призначенням
Висока	основні
середня	другорядні
низька	підвізні

Таблиця 4.5 – Типи велосипедної інфраструктури в залежності від інтенсивності руху велосипедного і моторизованого транспорту

Інтенсивність руху велосипедистів	Інтенсивність руху автомобільного транспорту		
	висока	середня	низька
висока	велодоріжка	велосмуга	змішаний рух з АТ (30 км/год)
середня	велодоріжка	велосмуга	змішаний рух з АТ (30 км/год)
низька	суміщення з пішохідним рухом	змішаний рух з АТ (30 км/год)	змішаний рух з АТ (30 км/год)

Дані таблиці 4.4 надають достатньо повну інформацію для формування альтернативних фрагментів веломережі в рамках кожного етапу її розвитку з використанням принципів створення та розвитку ВІ.

Основним засобом виконання принципу зв'язності ВІ є поетапна розбудова лише цілісних фрагментів веломережі, які характеризуються тим, що велосипедист може проїхати між будь-якими двома точками мережі виключно по ділянках, що складають розглянутий фрагмент веломережі. Для цих фрагментів є достатньо багато варіантів реалізації, при цьому всі вони знаходяться між двома крайніми (з точки зору території, що ними охоплюється) випадками: просторовим фрагментом та лінійним (транспортний коридор). Перший охоплює веломережею деякій окремий район міста, наприклад, його центральну частину, або певний житловий масив. Транспортний коридор зазвичай формується вздовж однієї транспортної магістралі та призначений з'єднувати різні райони міста між собою.

З результатів розрахунку велопотоків (рис. 4.1), випливає, що, з точки зору обраного критерію – величини транспортної роботи на фрагменті веломережі, що створюється, – на початкових етапах розвитку веломережі у містах з невеликою часткою використання велосипедів, більш ефективними є транспортні коридори.

Для визначення транспортного коридора було використано методи гео-просторового аналізу. Для кожного коридора було розраховано умовну привабливість, що базується на середньому значенні потенційних інтенсивностей руху велосипедистів. Відповідно до значень умовної привабливості було визначено пріоритет впровадження елемента мережі (табл. 4.6, рис. 4.3). Рішення щодо переважного типу велосипедної інфраструктури на кожній ділянці приймалося на основі рекомендацій ДБН та табл. 4.5.

Таблиця 4.6 – Визначення пріоритета реалізації впровадження веломережі

Коридор	Довжина, км	Умовна привабливість	Пріоритет реалізації
1	8,361	29644	1
2	8,542	14038	9
3	6,583	25219	2
4	3,869	17230	5
5	2,455	12310	16
6	4,903	11231	17
7	3,015	17310	4
8	2,638	19400	3
9	4,013	3283	29
10	1,539	12674	15
11	0,6	4099	28
12	2,476	16309	6
13	5,13	7105	23
14	3,151	13547	12
15	1,494	15302	8
16	0,695	9200	21
17	1,091	10227	20
18	2,61	12967	14
19	1,394	6655	25
20	1,164	13555	11
21	4,206	5955	26
22	2,592	10640	18

Закінчення таблиці 4.6 – Визначення пріоритета реалізації впровадження веломережі

23	1,907	13949	10
24	4,009	10348	19
25	1,011	6857	24
26	2,652	16140	7
27	0,592	5817	27
28	6,78	13235	13
29	2,019	8266	22

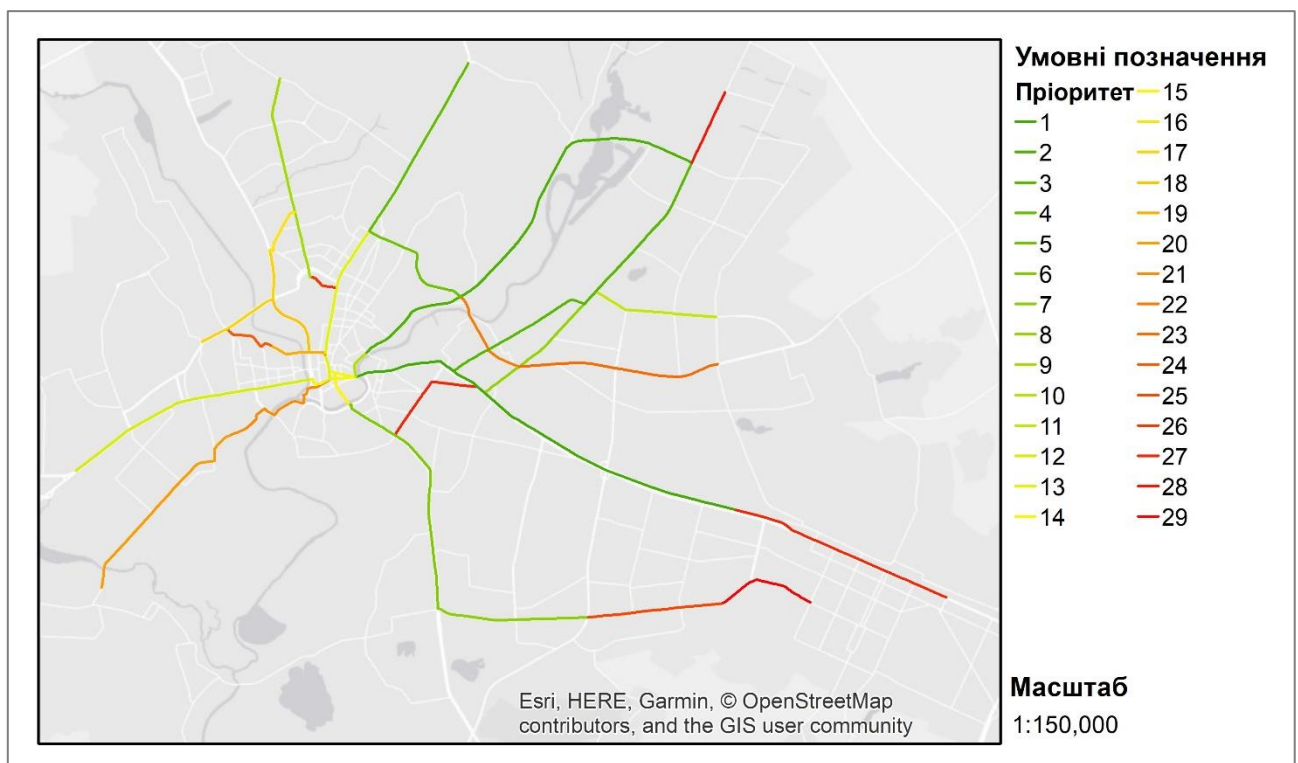


Рисунок 4.3 – Пріоритетність впровадження мережі

За допомогою схеми бажаного типу інфраструктури представленого в табл. 4.5, було визначено переважний тип велоінфраструктури для кожного коридору та розраховано очікувану вартість впровадження мережі (табл. 4.7). Для розрахунку вартості використовувалися дані про тип інфраструктури ділянки та середню

вартість погонного метру велоінфраструктури відповідного типу на основі даних для м. Львів [1].

Ефективність впровадження велосипедної мережі можливо оцінити за кількістю її можливих користувачів. Дослідження латентного попиту на використання велосипеда за умови створення інфраструктури показало, що 80% опитаних хотіли б частіше використовували велосипед ніж вони використовують його зараз, в той час як 20% опитаних не хотіли б використовувати велосипед для поїдок з утилітарною метою навіть за наявності велосипедної інфраструктури.

Таблиця 4.7 – Вартість впровадження мережі

Коридор	Довжина, км	Пріоритет реалізації	Переважаючий тип інфраструктури	Вартість пкм, тис. грн	Вартість, тис. грн
1	8,361	1	велодоріжка	2184	18260,4
2	8,542	9	велодоріжка	2184	18655,7
3	6,583	2	велодоріжка	2184	14377,3
4	3,869	5	велодоріжка	2184	8449,9
5	2,455	16	велодоріжка	2184	5361,7
6	4,903	17	велодоріжка	2184	10708,2
7	3,015	4	велодоріжка	2184	6584,8
8	2,638	3	велодоріжка	2184	5761,4
9	4,013	29	велосмуга	655,2	2629,3
10	1,539	15	велодоріжка	2184	3361,2
11	0,6	28	велодоріжка	555	333,0
12	2,476	6	велосмуга	2184	5407,6
13	5,13	23	велосмуга	2184	11203,9
14	3,151	12	велодоріжка	655,2	2064,5
15	1,494	8	велодоріжка	2184	3262,9
16	0,695	21	велосмуга	2184	1517,9
17	1,091	20	велодоріжка	655,2	714,8
18	2,61	14	велодоріжка	2184	5700,2

Закінчення таблиці 4.7 – Вартість впровадження мережі

19	1,394	25	велосмуга	655,2	913,3
20	1,164	11	велодоріжка	2184	2542,2
21	4,206	26	велосмуга	2184	18260,4
22	2,592	18	велодоріжка	2184	9185,9
23	1,907	10	велодоріжка	2184	5660,9
24	4,009	19	велодоріжка	655,2	1249,5
25	1,011	24	велосмуга	2184	8755,7
26	2,652	7	велодоріжка	655,2	662,4
27	0,592	27	велосмуга	2184	5792,0
28	6,78	13	велодоріжка	2184	1292,9
29	2,019	22	велосмуга	655,2	4442,3

У таблиці 4.8 представлено розподіл учасників дослідження за категоріями в залежності від ступеня використання велосипеда для щоденних, не рекреаційних поїздок.

Таблиця 4.8 – Розподіл учасників дослідження за категоріями

Категорії респондентів	Регулярно (більше 3 разів на тиждень)	Часто (від 1 до 3 разів на тиждень)	Іноді (від 1 до 3 разів на місяць)	Рідко (рідше за 1 раз на місяць)	Жодного разу в сезоні
Чоловіки, %	44,9	17,4	10,6	6,1	21,0
Жінки, %	13,3	16,3	13,9	8,4	48,2
Загалом, %	36,7	17,1	11,4	6,7	28,1

Для визначення латентного попиту на використання велосипедної інфраструктури було виокремлено користувачів, які виявили бажання використовувати велосипедний транспорт за умови наявності інфраструктури. До латентних користувачів можна віднести осіб, що мають доступ до велосипеда або готові його купити, але які наразі не використовують велосипед для щоденних поїздок взагалі або користуються велосипедом рідше, ніж 1 раз на місяць. Для аналізу латентних користувачів були

виключені відповіді учасників, що вже активно використовували велосипедний транспорт, через те, що, очевидно, відсутність інфраструктури не є перешкодою для них. Дослідження показало, що серед потенційних (латентних) користувачів жінки дещо більше схильні використовувати велосипед (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Латентний попит на велосипедний транспорт у залежності від наявності велоінфраструктури

Респонденти	Так, хотів би використовувати велосипед за наявності інфраструктури	Ні, не хотів би використовувати велосипед за наявності інфраструктури
Чоловіки, %	77,3	22,7
Жінки, %	83,7	16,3
Загалом, %	80,1	19,9

Згідно з даними Національної служби статистики станом на 2015 рік, 52% домогосподарств в Україні мають у власності велосипед [136], при цьому середній розмір домогосподарства у Харківській області становить 2,44 особи [137]. Відповідно до даних Головного управління статистики у Харківській області, населення міста Харків станом на 1 січня 2016 року (що відповідає періоду проведення опитання) становило 1449,7 тис. осіб [138]. Таким чином, можна припустити, що близько 754 тис. харків'ян мають доступ до велосипеда. Згідно з Правилами дорожнього руху, рухатися по проїзній частині на велосипедах дозволяється особам, які досягли 14-річного віку [45]. Враховуючи, що частина велосипедної мережі може проходити по проїзній частині, доцільно врахувати це обмеження. Оскільки частка дітей від 0 до 14 років становила 14,2% [137], латентний попит на велоінфраструктуру для міста Харкова (Y) можна розрахувати за залежністю (4.1):

$$Y = H_i \cdot \omega \cdot H_x \cdot k_r \quad (4.1)$$

де H_i – населення території, що проживає на території i , тис. ос.,
 ω_i – частка населення, які мають у власності велосипед,

H_x – частка населення, що має право керувати велосипедом згідно з законодавством,

k_r – частка населення, яка хотіла би використовувати велосипед за наявності інфраструктури.

$$Y = 1449,7 \cdot 0,52 \cdot 0,858 \cdot 0,801 = 518,1 \text{ тис.ос.}$$

Хоча латентний, тобто, попит на велосипедну інфраструктуру для міста Харків становить 518,1 тис. осіб, це не означає, що, по-перше, всі потенційні користувачі будуть використовувати велосипедний транспорт щодня, і, по-друге, що велосипедна інфраструктура буде збудована одночасно. Для того, щоб оцінити ефективність поетапного впровадження велосипедної мережі, було оцінено кількість населення, для яких зросте доступність велосипедної інфраструктури після впровадження кожного етапу, тобто населення, яке проживає у радіусі 500 м від ділянки велосипедної мережі. Такий радіус обумовлений тим, що . це пішохідна відстань, яку долають більшість населення, аби дістатися до транспортної мережі будь-якого транспорту Для цього за допомогою ArcGIS навколо кожної ділянки коридору, що відповідає певному етапу реалізації, було створено буферну зону радіусом 500 м (рис. 4.4).

За допомогою інструментів просторового аналізу, у результаті та накладання шару з даними про транспортні райони та шару буферної зони, була отримана щільність населення для території перекриття транспортних районів і буферного простору (рис. 4.5).

Це дозволило розрахувати кількість населення за категоріями, що потрапляють у зону доступу до ділянки велосипедної інфраструктури (табл. 4.10). Кількість потенційних користувачів визначалося аналогічно загальноміським показникам за залежністю (4.1).

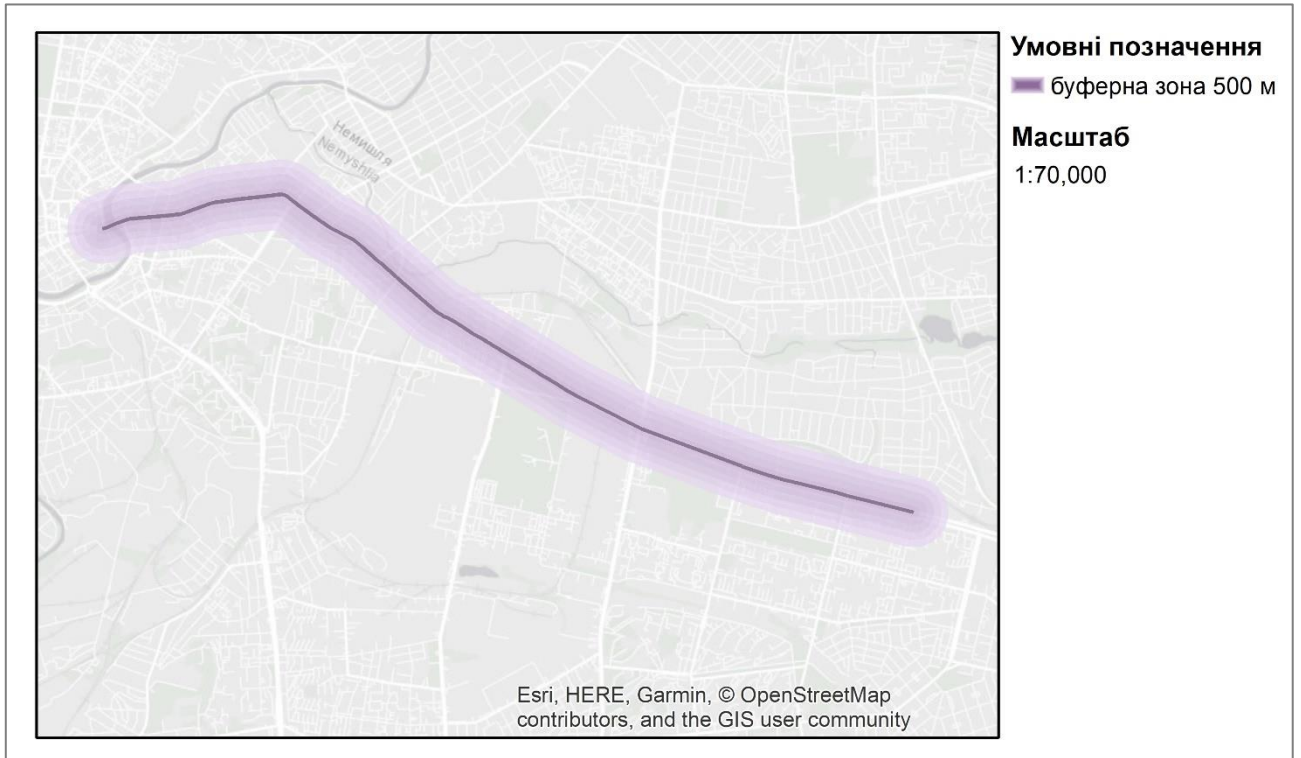


Рисунок 4.4 Буферна зона навколо велосипедного коридора першого пріоритету

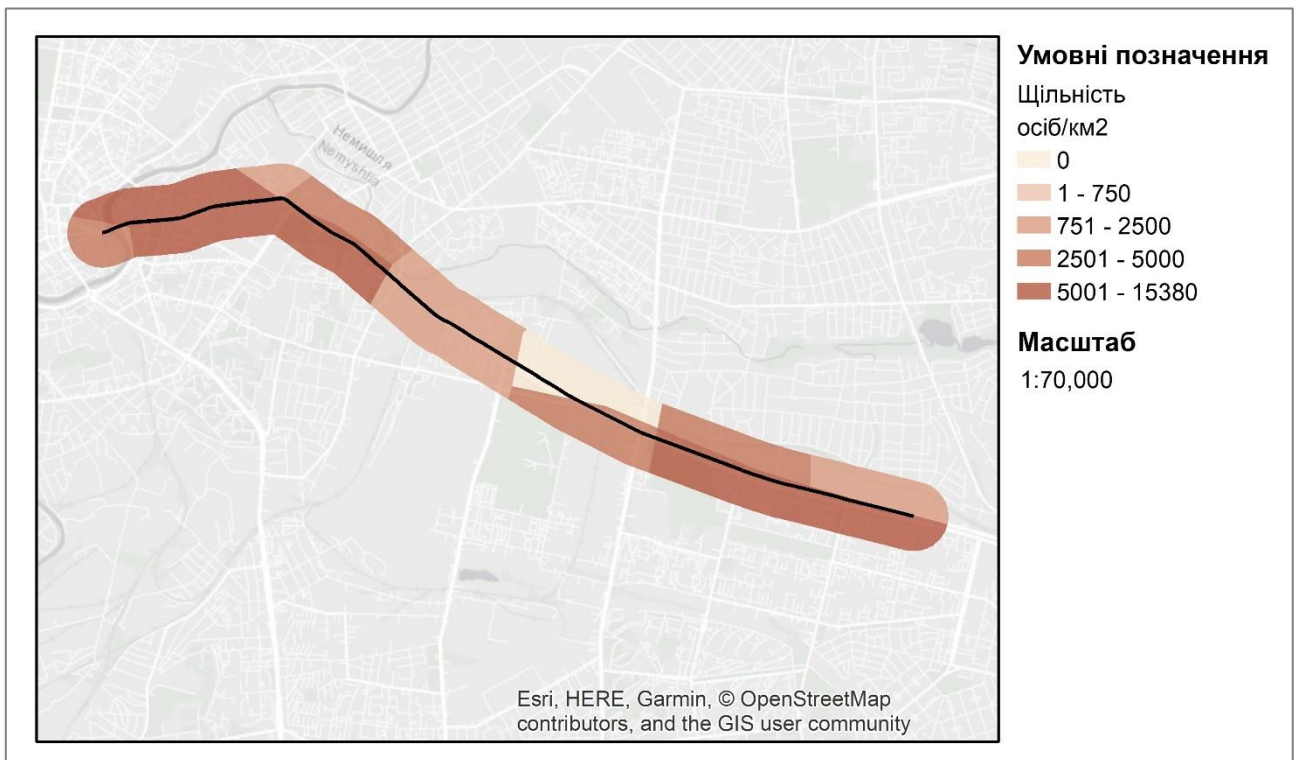


Рисунок 4.5 – Щільність населення транспортних районів у буферній зоні коридору першого пріоритету

Таблиця 4.10 – Ефективність велотранспортних коридорів

Кори- дор	Довжина, км	Пріо- ритет реалі- зації	Населення старше 14 років у ра- діусі 500 м, ос.	Працю- юче насе- лення у радіусі 500 м, ос.	Латент- них ко- ристува- чів у ра- діусі 500 м, ос.	Латентних ко- ристувачів се- ред працюю- чого населення у радіусі 500 м, ос.
1	8,361	1	28585	11220	11891	4668
2	8,542	9	37760	14823	15708	6166
3	6,583	2	28560	11212	11881	4664
4	3,869	5	5374	2109	2236	877
5	2,455	16	9228	3623	3839	1507
6	4,903	17	15696	6163	6530	2564
7	3,015	4	11254	4418	4682	1838
8	2,638	3	6642	2607	2763	1085
9	4,013	29	25125	9863	10452	4103
10	1,539	15	3224	1266	1341	526
11	0,6	28	13626	5349	5668	2225
12	2,476	6	23453	9206	9756	3830
13	5,13	23	15336	6020	6380	2505
14	3,151	12	4576	1796	1904	747
15	1,494	8	2879	1130	1198	470
16	0,695	21	6168	2421	2566	1007
17	1,091	20	4872	1913	2027	796
18	2,61	14	4055	1592	1687	662
19	1,394	25	3974	1561	1653	649
20	1,164	11	9206	3614	3830	1503
21	4,206	26	9028	3544	3756	1475
22	2,592	18	3764	1478	1566	615
23	1,907	10	15405	6048	6408	2516
24	4,009	19	2016	791	839	329
25	1,011	24	15164	5953	6308	2476
26	2,652	7	4683	1839	1948	765
27	0,592	27	32754	12857	13626	5349
28	6,78	13	10255	4026	4266	1675
29	2,019	22	6802	2670	2830	1111
Усього:			359 464	141 114	149 537	58 703

Таким чином, враховуючи кількість потенційних користувачів, які отримають доступ до велосипедної інфраструктури, можливо оцінити ефективність поступової розбудови мережі велосипедних маршрутів. Зокрема, Вулиця Московський проспект отримав перший пріоритет. У разі створення велосипедної інфраструктури на ній, доступ до веломережі отримають майже 12 тис. латентних користувачів, серед яких 4,6 тис. – люди, які будуть їхати на роботу. Другим пріоритетом стала вулиця Академіка Павлова (від вул. Героїв Праці до Московського проспекту) з 11,9 тис. латентних користувачів та 4,6 тис. мешканців, що зможуть використовувати цей маршрут для поїздок на роботу чи навчання. Варто відмітити, ділянку по вул. Академіка Павлова від вул. Якіра до вул. Московський, що хоча займає 3 місце у рейтингу обслуговування лише 2,7 тис. користувачів, які живуть безпосередньо навколо нього. Проте ця ділянка має високі прогнозовані велосипедні потоки є важливою з точки зору зв'язності мережі та забезпечує поєднання маршрутів першого і другого пріоритетів.

Варто зазначити, що впровадження окремих ділянок мережі не дозволить досягти значень максимальної кількості користувачів, тому важливо дотримуватися принципів описаних в другому розділі даної роботи. Фактичний рівень користування інфраструктурою залежить від низки характеристик, зокрема, від якості сполучення, безпеки організації перехресть, наявності допоміжної інфраструктури в пунктах призначення, соціального сприйняття культури пересуватися велосипедом, персонального відчуття безпеки та індивідуальних характеристик мети й умов поїздки різних користувачів. Проте даний підхід дозволяє зробити кількісну оцінку ефективності впровадження велосипедної мережі, що буде реалізована у комплексі з іншими заходами, в рамках стратегії розвитку велосипедного руху в містах з низьким рівнем його використання.

4.3 Розробка практичних рекомендацій

Розвиток велосипедного транспорту є визнаним у світі інструментом покращення транспортної ситуації у містах, підвищення сталості та ефективності транспортної системи. У процесі реалізації стратегії розвитку велосипедного транспорту міста зазвичай переслідують дві принципові цілі: надання безпечних і комфортних умов пересування наявних велосипедистів та сприяння підвищенню попиту на велосипедний транспорт. Враховуючи, що підвищена вразливість велосипедного транспорту є найбільшим демотивуючим фактором для потенційних велосипедистів, створення велосипедної інфраструктури сприяє досягненню обох цілей стратегічного розвитку велосипедного транспорту. Таким чином, процес формування мережі велосипедного транспорту є актуальною проблемою, що постає перед українськими містами.

Особливістю українських міст, зокрема, середніх і великих, є низький поточний рівень використання велосипеда. Це унеможливує використання наявних методів планування велосипедної інфраструктури, які базуються на визначенні встановлених шляхів пересування велосипедистів, оскільки ці дані мають низьку репрезентативність. В умовах українських міст, планування велосипедної інфраструктури має відбуватися на основі концепції розбудови мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем його використання, що представлена у цій роботі.

Важливим є вибір відповідного типу інфраструктури. Організація велосипедних смуг може покращити сприйняття безпеки велосипедистами, надати інформацію про можливу наявність велосипедиста водіям моторизованого транспорту та підвищити частоту здійснення поїздок досвідченими велосипедистами або стимулювати зацікавлення нових, більш впевнених велосипедистів. Однак, вплив на заохочення значної кількості нових велосипедистів, ймовірно, буде обмеженим, оскільки нові або недосвідчені велосипедисти все ще будуть почуватися некомфортно через близькість до інтенсивного руху моторизованого транспорту, особливо якщо відсутня відповідна інфраструктура та немає спеціальних маршрутів для велотранспорту [138,

140]. Водночас, недоцільно застосоване відмежування веломаршрутів може привести до негативних наслідків. Прикладом такої ситуації є мережа відокремлених маршрутів протяжністю 200 км, розроблена у 1980-х роках у Мілтон-Кейнсі у Великобританії. Хоча мережа була повністю відокремлена від дорожньої системи, опитування користувачів показали, що мережа забезпечувала низьку особисту безпеку, була погано розроблена та погано обслуговувалася. Маршрути проходили через території зелених насаджень, які не сприяли відчуттю безпеки у користувачів, і їх було важче утримувати, ніж ті, що пролягали вздовж головних доріг. Мережа використовувалася здебільшого для випадкових рекреаційних поїздок, аніж для їзди на велосипеді на роботу чи з роботи щодня [141].

Маючи на меті збільшити використання велосипедів, аби максимізувати ефективність використання коштів при формуванні мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем його використання, розроблені наступні рекомендації:

1. При побудові мережі велосипедних маршрутів, розглядати та враховувати сукупність елементів вулично-дорожньої мережі, що відповідає особливостям руху велосипедом, а саме: вулиці, дороги, проїзди, стежки тощо, - що може бути використано як ребра транспортного графу при формуванні мережі.

2. Проводити збір актуальних даних про дорожньо-транспортні умови, що можуть впливати на привабливість шляху для велосипедиста.

3. Зважаючи на зростання попиту на дані щодо користувачів велосипедів у майбутньому, запровадити регулярний та статистично репрезентативний збір даних щодо користувачів велотранспорту на місцевому рівні, зокрема, на основі регулярних опитувань та спостережень (дослідження висловлених та виявлених вподобань).

4. Використовувати відкриті дані про маршрути пересування наявних велосипедистів методами дослідження виявлених вподобань, зокрема за допомогою методики, що запропонована в цій роботі;

5. Визначити траси пролягання маршрутів руху велосипедистів та реалізувати їх, враховуючи функцію корисності маршрутної мережі для наявних велосипедистів, а також масштабуючи потенційну привабливість маршруту, враховуючи потенціальний потенційний попит з території навколо.

6. Впроваджувати велосипедну мережу, починаючи з маршрутів, що мають найбільшу потенційну ефективність, яка виражена кількістю латентних користувачів у зоні доступності велосипедного маршрута, максимально дотримуючись принципів розбудови велосипедної мережі та відповідно до обсягів фінансування.

7. Збирати дані щодо користування збудованими маршрутами, задля контролю ефективності та для використання у подальшому плануванні велосипедної мережі та для подальшого аналізу розподілу поїздок і транспортних потоків.

Таким чином, формування мережі велосипедного транспорту можна впроваджувати з такою послідовністю:

1. Формування та визначення ключових параметрів ВДМ;
2. Збір емпіричних даних щодо наявних маршрутів руху регулярних і нерегулярних велосипедистів у місті;
3. Визначення функції корисності маршруту;
4. Розподіл велосипедних потоків у мережі;
5. Визначення основних коридорів – маршрутів руху;
6. Пріоритизація розбудови мережі;
7. Створення плану реалізації.

Така послідовність розбудови велосипедної мережі і впровадження велосипедної інфраструктури була впроваджена при формуванні маршрутної мережі велосипедного транспорту для м. Полтава у рамках розробки Концепції розвитку велосипедної інфраструктури м. Полтава на 2016–2020 рр. У результаті було побудовано план-графік впровадження велосипедної інфраструктури. Концепція розвитку мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем його використання була впроваджена при розробці плану сталої міської мобільності м. Житомир у рамках проекту «Інтегрований розвиток українських міст», що впроваджується Німецьким товариством міжнародного співробітництва (GIZ). Висновки, отримані у результаті цієї дисертаційної роботи, застосовані у Концепції розвитку велосипедного руху та облаштування велосипедної інфраструктури у м. Харків [9].

Висновки по четвертому розділу

1. Моделювання потоків велосипедного транспорту дозволяє отримати інтенсивність руху потенційних велосипедистів, які можуть бути використані для планування мережі велосипедного транспорту навіть в містах з низьким існуючим рівнем використання велосипеда.

2. З розглянутих моделей велосипедного транспорту для міста Харкова найбільш точною виявилася модель 4, яка включає параметри Відстань – Робота – Кількість поворотів – Категорію вулиць. При валідації моделі, відповідно до даних підрахунку велосипедистів, модель 4 показала коефіцієнт кореляції 0,63 за умови, що калібрування моделі не відбувалось.

3. Методика визначення пріоритетності впровадження мережі велосипедного транспорту дозволяє оцінити послідовність реалізації велосипедної інфраструктури, що буде максимізувати ефективність від її впровадження та допомагати з визначенням переважного типу інфраструктури.

4. Ефективність впровадження велосипедної мережі може бути оцінена кількістю її потенційних користувачів. Для Харкова латентний попит на велоінфраструктуру становить 518,1 тис. осіб при повному покритті міста велосипедною мережею і 149,5 тис. осіб при створенні мережі основних маршрутів представлених у роботі.

5. Загальна вартість реалізації мережі основних маршрутів становить 166,174 млн. грн (станом на 2018 рік), що дорівнює 114,6 грн на мешканця міста або 1111 грн на одного потенційного користувача

6. Формування велосипедної мережі для міст з низьким рівнем використання велосипедного транспорту може впроваджуватися за наступною методикою: формування та визначення ключових параметрів ВДМ; збір емпіричних даних щодо наявних маршрутів руху регулярних і нерегулярних велосипедистів в місті; визна-

чення функції корисності маршруту; розподіл велосипедних потоків у мережі; визначення основних коридорів – маршрутів руху; пріоритизація розбудови мережі та створення плану реалізації.

Результати досліджень були опубліковані в роботах [19].

ВИСНОВКИ

1. Аналіз європейських принципів розвитку велосипедної інфраструктури показав, що велосипедний транспорт розглядається, у першу чергу, як інструмент вирішення транспортних проблем міст і має розвиватися незалежно від наявного попиту на велотранспорт. Аналіз нормативних та законодавчих документів України щодо планування та будівництва велосипедної інфраструктури показав недостатність настанов та практичних рекомендацій з планування єдиної мережі та вказує на потребу формалізувати процес планування велосипедної мережі, доцільність дослідження впливу дорожньо-транспортних характеристик на закономірності пересування велосипедистів в містах з низьким рівнем користування велосипедним транспортом та доцільність розробки методики формування мережі інфраструктури велосипедного транспорту і практичного його застосування в українських містах.

2. Визначення маршрутів велосипедної мережі в містах з низькими інтенсивностями велосипедного руху можливе за рахунок використання прогнозних моделей попиту на велосипедний транспорт, найбільш придатною з яких є чотириетапна транспортна модель, у якій етап розподілу визначення кількості велосипедних поїздок реалізується за рахунок формування матриці загальних кореспонденцій та застосування до неї функції розподілу велосипедних поїздок за відстанню. Дослідження функції розподілу для м. Харків показали, що поїздки розподілені за нормальним законом в межах від 2 км до 20 км, середня відстань поїздки $\bar{x}=8,42$ км, дисперсія $D[\bar{x}]=17,89$.

3. Використання мультиномінальної логіт-моделі дискретного вибору з шістьма параметрами дозволяє сформувати цілісну теоретичну модель визначення оптимальної траси маршруту руху велосипедиста, що відповідає принципам розбудови велосипедної мережі: прямолінійність, зв'язність, орієнтація на мету, мінімізація фізичної роботи і безпека руху. Визначення параметрів ВДМ, що відображають зазначені принципи на основі якісних досліджень поведінки велосипедистів, показали, що

фактори вибору маршруту руху не залежать від інтенсивності користування велосипедом і можуть бути виражені через такі показники, як довжина маршруту, кількість поворотів, кількість регульованих перехресть, швидкість моторизованого транспорту, щільність паркування, категорія дороги та фізична робота велосипедиста. Врахування розподілу фізичних сил при русі на велосипеді в залежності від дорожніх умов дозволило отримати кількісну оцінку фізичної роботи при русі на велосипеді та застосувати її для визначення раціональної траси маршруту руху велосипедиста.

4. З метою уникнення упередженості, що виникає при фіксації висловлених вподобань в умовах, коли учасники не мають досвіду стосовно предмета дослідження, було розроблено методику збору даних, про виявленні вподобання велосипедистів за допомогою мобільних додатків з фіксацією GPS-координат. Регресійний аналіз залежності добового розподілу велосипедних поїздок у просторі на основі даних, зібраних за розробленою методикою показав, що вона може використовуватися у містах з малою часткою виявленого попиту на велосипедний транспорт ($r = 0,86$, $r^2 = 0,73$) і створює надійну основу для розподілу велосипедних потоків по мережі.

5. Моделювання велосипедного транспорту має проводитися з врахуванням максимально детального відображення вулично-дорожньої мережі, що можливо завдяки використанню геоінформаційних технологій. Використання методів просторового аналізу дозволило сформулювати набір маршрутів, що містять запропонований набір параметрів функції корисності та провести моделювання функціонування велосипедного транспорту в місті Харків.

6. На основі експериментальних досліджень в м. Харкові виявлено, що найбільш статистично значущими факторами моделі вибору маршруту є довжина маршруту, кількість поворотів та категорія дороги. Фізична складність маршруту є статистично значущим фактором за умови, що довжина маршруту не враховується, через те, що ці два фактори мають високий рівень кореляції один з одним. Проведено порівняльний аналіз чотирьох моделей розподілу велосипедних поїздок мережею, який показав, що найбільш прийнятною є модель, яка враховує відстань, категорію дороги, кількість поворотів та фізичну складність маршруту ($r = 0,63$, без калібрування).

Отримані результати надали кількісну оцінку потенційних велосипедних потоків для визначення ієрархії маршрутів велосипедної мережі та пріоритетності її розбудови.

7. Запропонована методика формування мережі інфраструктури велосипедного транспорту та розроблена методика визначення пріоритетності формування велосипедної інфраструктури дозволяє приймати об'єктивні рішення на кожному етапі планування розбудови веломережі в містах з низьким рівнем використання велосипедного транспорту та максимізувати ефективність її впровадження. Впровадження мережі основних маршрутів у м. Харків надасть доступ до велосипедної інфраструктури 359,5 тис. мешканців з яких 149,5 тис. осіб є потенційними користувачами мережі. Загальна вартість реалізації мережі основних маршрутів становить 166,174 млн. грн, що дорівнює 114,6 грн на мешканця міста або 1111 грн на одного потенційного користувача.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про Концепцію розвитку велосипедного руху і облаштування велосипедної інфраструктури у м. Львові : Ухвала Львівської міської ради від 03.06.2010 № 3552 [Електронний ресурс] / Офіційний сайт Львівської міської ради. – Режим доступу : \WWW/ URL: [https://www8.city-adm.lviv.ua/inteam/uhvaly.nsf/\(SearchForWeb\)/3FDC6B7F91114C50C225773E004C4AA5?OpenDocument&fbclid=IwAR0gsMqDdoMxBIBpEagOS0ILhZocDrmeyQRLDSFe4Rc_-JUwaY2WXH-ROE](https://www8.city-adm.lviv.ua/inteam/uhvaly.nsf/(SearchForWeb)/3FDC6B7F91114C50C225773E004C4AA5?OpenDocument&fbclid=IwAR0gsMqDdoMxBIBpEagOS0ILhZocDrmeyQRLDSFe4Rc_-JUwaY2WXH-ROE) – Назва з екрану.
2. Про затвердження Концепції розвитку велосипедної інфраструктури міста Луцька : Рішення Луцької міської ради від 26.09.2012 № 32/21 [Електронний ресурс] / Офіційний сайт Луцької міської ради. – Режим доступу : \WWW/ URL: <https://www.lutskrada.gov.ua/documents/pro-zatverdzhennya-koncepciyi-rozvitku-velosipednoyi-infrastrukturi-mista-lucka>. – Назва з екрану.
3. Про затвердження «Програми розвитку велосипедного руху у м. Вінниця 2013-2020 роки» : Рішення Вінницької міської ради від 31.05.2013 № 1290 [Електронний ресурс] / Офіційний сайт Вінницької міської ради. – Режим доступу : \WWW/ URL: <http://www.vmr.gov.ua/Docs/CityCouncilDecisions/2013>. – Назва з екрану.
4. Про затвердження Концепції розвитку молодіжного спорту, велосипедного руху і облаштування велосипедної інфраструктури у м. Одесі на 2013-2018 роки : Рішення Одеської міської ради від 18.07.2013 № 3654-VI [Електронний ресурс] / Офіційний сайт міста Одеса. – Режим доступу : \WWW/ URL: http://omr.gov.ua/images/File/DODATKI2013/GORSOVET/3654_.docx. – Назва з екрану.
5. Про затвердження Концепції розвитку велосипедної інфраструктури міста Миколаєва : Рішення Миколаївської міської ради від 11.10.2016 № 9/8 [Електронний ресурс] / Офіційний сайт Миколаївської міської ради. – Режим доступу : \WWW/ URL: <https://mkrada.gov.ua/documents/25181.html>. – Назва з екрану.

6. Про Програму розвитку велосипедної інфраструктури та популяризації велосипедного руху в місті Івано-Франківську на 2015-2020 роки : Рішення Івано-Франківської міської ради від 03.12.2014 № 1582-50 [Електронний ресурс] / Нормативні акти Івано-Франківської міської ради. – Режим доступу : \WWW/ URL: <http://www.namvk.if.ua/dt/14722/>. – Назва з екрану.

7. Про затвердження Програми розвитку велоінфраструктури в місті Рівному на 2014-2019 роки : Рішення Рівненської міської ради від 26.12.2013 № 3644 [Електронний ресурс] / Офіційний сайт Рівненської міської ради та її виконавчого комітету. – Режим доступу : \WWW/ URL: <http://www.city-adm.rv.ua/RivnePortal/Services/FeedDocumentFile.ashx?id=2939>. – Назва з екрану.

8. Про проект Концепції розвитку велосипедного руху і облаштування велосипедної інфраструктури у м. Чернігові : Рішення виконавчого комітету Чернігівської міської ради від 04.08.2014 № 223 [Електронний ресурс] / Офіційний веб-портал Чернігівської міської ради. – Режим доступу : \WWW/ URL: <http://www.chernigiv-rada.gov.ua/document/rishennya-vikonkomu/5408>. – Назва з екрану.

9. Про затвердження Концепції розвитку велосипедного руху та облаштування велосипедної інфраструктури у м. Харкові : Рішення Харківської міської ради від 26.10.2016 № 397/16 [Електронний ресурс] / Офіційний веб-портал Чернігівської міської ради. – Режим доступу : \WWW/ URL: <http://www.city.kharkov.ua/ru/document/kontseptsiya-rozvitku-velosipednogo-rukhu-i-oblashtuvannya-velosipednoi-infrastrukturi-u-m-kharkovi-50008.html>. – Назва з екрану.

10. Про затвердження Програми розвитку велосипедної інфраструктури міста на 2016-2020 роки : Рішення Тернопільської міської ради від 03.03.2016 №7/6/65 (зі змінами) [Електронний ресурс] / Офіційний сайт Тернопільської міської ради. – Режим доступу : \WWW/ URL: <http://rada.te.ua/ekonomika/galuzevi-programi/galuzevi-programi-chinni-u-2018-rotsi/4250.html>. – Назва з екрану.

11. Про затвердження Концепції розвитку велосипедного руху і облаштування велосипедної інфраструктури в м. Миргород на 2015-2020 роки : Рішення Миргородської міської ради від 11.12.2015 № 9 [Електронний ресурс] / Місто-курорт

Миргород – сайт Миргородської міської ради. – Режим доступу : \WWW/ URL: http://myrgorod.pl.ua/files/images/Velo/rishennya_velokonc.pdf. – Назва з екрану.

12. Львів – велосипедна столиця України / [під ред. Брандта М., Мерфорта М, Вагнера А.]. – Ешборн: Німецьке Товариство Міжнародного Співробітництва, 2014. – 28 с.

13. Про затвердження Концепція розвитку велосипедної інфраструктури в місті Києві : Рішення Київської міської ради від 08.02.2018 № 7/4071 [Електронний ресурс] / Офіційний інтернет-сайт Київської міської ради. – Режим доступу : \WWW/ URL: http://kmr.ligazakon.ua/SITE2/1_docki2.nsf/alldocWWW/54733CB8088FBFBFC22582CE00370471?OpenDocument. – Назва з екрану.

14. Лейпцизька хартія «Міста Європи на шляху сталого розвитку» (переклад) [Електронний ресурс] / Зустріч міністрів з питань міського розвитку і територіальної єдності, м. Лейпциг, 24-25 травня 2007 р. – Режим доступу : \WWW/ URL: http://2.auc.org.ua/sites/default/files/leypcizka_hartiya.pdf. – Назва з екрану.

15. План розвитку єдиного європейського транспортного простору на шляху до конкурентоспроможної та ресурсоефективної транспортної системи : Біла книга Європейської Комісії (переклад) [Електронний ресурс] / Сайт ГО «Товариство учасників руху». – Режим доступу: \WWW/ URL: http://tur.org.ua/sites/default/files/white_book_transport_2050_ukr_0.pdf. – Назва з екрану.

16. Токмиленко Е.С. Влияние вертикального профиля дороги на затраты энергии при движении на велосипеде / Е.С. Токмиленко, П.Ф. Горбачёв // Містобудування та територіальне планування.– К., КНУБА, 2012. – Вип. 45, в 3 частинах. – ч. 3. – С. 141–145.

17. Горбачёв П.Ф. Модель выбора маршрута велосипедного транспорта с целью минимизации времени в пути / П.Ф. Горбачёв, Е.С. Токмиленко// Вісник Харківського національного автомобільнодорожнього університету– 2013. – № 61-62. – С. 218–222.

18. Горбачёв П.Ф. Топографическая модель условий движения велосипедного транспорта в центральной части г. Харькова / П.Ф. Горбачёв,

Е.С. Токмиленко, С.В. Козлов // Автомобільний транспорт. –Харків – 2014. - Вип. 34. – с. 79-82.

19. Чернишова О.С. Мультиномінальна логіт модель вибору шляху велосипедистами // Автомобільний транспорт. Збірник наукових праць., Вип. 38, Харків, 2016. – с. 21-25

20. Чернышева Е.С. Алгоритм автоматизированного микрорайонирования при моделировании транспортных систем // Комунальне господарство міст. Вип.130. – Х.: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2016. – с. 76-80.

21. Любий Є.В. Транспортне планування міст: сучасні інструменти транспортного моделювання автотранспортних систем / Є.В. Любий, Н.В. Пономарьова, О.С. Чернишова // Комунальне господарство міст. Випуск 128. – Х.: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2016. – С. 76 – 82.

22. Lissner, S. Cycling Data App Data – An Exploratory Data Analysis of GPS Data in Cycling / S. Lissner, A. Francke, O. Chernyshova, T. Becker. // International Transportation 69 – 2017 – no. 1 – p.48-52.

23. Tokmylenko O. New approach to bicycle infrastructure planning. Collection of scientific works. Innovative technologies and perspective in development of transportation, automotive and road construction industries (in foreign languages). Kharkov 2013. p.120-123

24. Токмиленко Е.С. Планирование велосипедной инфраструктуры для обеспечения безопасности и комфорта движения / Токмиленко Е.С., Горбачев П.Ф. // Матеріали 3-ї міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорта і культури дорожнього руху» – Харків: ХНАДУ, 2013 – с. 196-197

25. Tokmylenko O.S. Methods of bicycle users' survey // Міжнародна конференція молодих вчених Інженерна механіка та транспорт. – Львів: Національний університет «Львівська Політехніка», 2013 – с.111 - 112

26. Tokmylenko O. Review of the Factors that Affect Motivation to Bicycle / O. Tokmylenko, A. Yakovlev // Integration processes and innovative technologies. Achievements and prospects of engineering sciences (in foreign languages): Collections of Scientific Works, issue 3. KhNAHU. – Kharkiv 2014. p. 102 – 104

27. Горбачов П.Ф. Формування набору альтернатив моделей дискретного вибору шляху прямування велосипедним транспортом / Горбачов П.Ф., Чернишова О.С. // Наукові праці міжнародної науково-практичної конференції «Новітні технології в автомобілебудівництві на транспорті», 15-16 жовтня 2015 р. – Х.: ХНАДУ, 2015. – с. 68 – 69.

28. А.с. Методика визначення привабливості маршрутів велосипедного транспорту / О.С. Чернишова (Україна). – № 66185; зареєстровано 21.06.2016.

29. Ukraine – Urbanization Review (Working Paper ACS15060) / [R.C. Paula, Q. Escobar, L. Eduardo, etc.]. – Washington: World Bank Group, 2015 – 218 p.

30. Litman T. Evaluating active transport benefits and costs: guide to valuing walking and cycling improvements and encouragement programs / T. Litman. – Victoria: Transportation Research Record, 1994 – P.134-140.

31. Sevick M.A. Cost-Effectiveness Of Lifestyle And Structured Exercise Interventions In Sedentary Adults: Results Of Project “ACTIVE” / M.A. Sevick, A.L. Dunn, M. S. Morrow et al // Journal of Preventive Medicine. – 2000. – Vol. 19, No. 1 – P. 1-2.

32. Pucher J. Walking and Cycling to Health: A Comparative Analysis of City, State, and International Data / J. Pucher, R. Buehler, D. Bassett, L. Andrew // American Journal of Public Health. – 2010. – Vol. 100/10.– P. 1986-1992.

33. Bassett D. Active Transportation and Obesity in Europe, North America, and Australia / D. Bassett, J. Pucher, R. Buehler, D.L. Thompson et al. // ITE Journal. – 2011. – Vol. 81/8. – P. 24-28.

34. Douglas N.V. The Impact of Active Transportation Infrastructure on Travel-based Greenhouse Gas Emissions and Energy: A Longitudinal Before-After Study of Vancouver’s Comox Helmcken Greenway : Project for Master of Arts : Planning, Vancouver. – 65 p.

35. Safe and healthy walking and cycling in urban areas [Електронний ресурс] // Report and presentations of the PEP workshop, 24-25 September 2009, Pruhonice / World Bank Group. – Pruhonice: WBG, 2009. – Режим доступу: \WWW/ URL: <https://thepep.unecce.org/events/safe-and-healthy-walking-and-cycling-urban-areas-pruhonice>.

36. Geyer J. The Continuing Debate about Safety in Numbers – Data from Oakland / J. Geyer, N. Raford, D. Ragland, T. Pham // Berkeley, University of California, Traffic Safety Center. – 2006. – Vol. 3 – P. 2616.

37. Jacobsen P. Safety in Numbers: More Walkers and Bicyclists, Safer Walking and Bicycling / Peter Jacobsen // Injury Prevention. – 2003. – Vol. 9. – P. 205-209.

38. Robinson D. Safety in Numbers in Australia: More Walkers and Bicyclists, Safer Walking and Bicycling / Dorothy Robinson // Health Promotion Journal of Australia. – 2005. – Vol. 16, No. 1 – P. 47-51.

39. Marshall E.W. Evidence on Why Bike-Friendly Cities Are Safer for All Road Users / Wesley E. Marshall, Norman W. Garrick // Environmental Practice. – 2011. – Vol 13/1. – P. 16-27.

40. Buehler R. Cycling to work in 90 large American Cities: new evidence on the role of bike paths and lanes / R. Buehler, J. Pucher // Transportation. – 2011. – vol. 39. – P. 409-432.

41. National Cycling Plan 2020 Joining forces to evolve cycling / [Federal Ministry of Transport]. – Germany: Building and Urban Transport, 2013. – 43 p.

42. Чугунова Д. Як мешканці пересуваються містом [Електронний ресурс] / Чугунова Дарина // Матеріали 10 міжнародної конференції «Велофорум 2018», 5-7 жовтня 2018 р., м. Івано-Франківськ, Україна. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://veloforum.org/виставка-плакатів-на-велофорумі-2018/>. – Назва з екрану.

43. Мирошниченко О. Прихований попит на велоінфраструктуру [Електронний ресурс] / Оксана Мирошниченко, Денис Моляка // Матеріали 10 міжнародної конференції «Велофорум 2018», 5-7 жовтня 2018 р., м. Івано-Франківськ, Україна. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://veloforum.org/виставка-плакатів-на-велофорумі-2018/>. – Назва з екрану.

44. Dufour D. PRESTO Cycling Policy Guide-General Framewo / D. Dufour. – EU's Intelligent Energy, 2010. – 18 p.
45. Правила дорожнього руху : Закон від 10.10.2001 № 1306. [Електронний ресурс] / Офіційний портал Верховної Ради України. – Режим доступу : \WWW/ URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF> – Назва з екрану.
46. ДБН В.2.3-218-192:2005 Споруди транспорту. Перехрещення та примикання автомобільних доріг в одному рівні. Методи проектування та організації дорожнього руху. – Введ. 2006-06-01. – К. : Видавництво «Укрдортехнологія», 2005. – 33 с.
47. ДБН 360-92 Державні будівельні норми України. Містобудування. Планування та забудівля міських та сільських населених пунктів. – Введ. 2002-04-19. – К. : Видавництво «Укрархбудінформ», 2002. – 126 с.
48. ДБН Б. 2.2-5:2011. Благоустрій територій. – Введ. 2012-09-01. – К. : Видавництво «Укархбудінформ», 2012. – 44 с.
49. ДБН В.2.3-5:2018. Вулиці та дороги населених пунктів. – Введ. 2018-09-01. – К. : Видавництво «Укрархбудінформ», 2002. – 60 с.
50. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. – Введ. 2006-05-06. – К. : Видавництво «Київсоюзшляхпроект», 2006. – 217 с.
51. ДБН В.2.3-4:2015. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. – Введ. 2016-04-01. – К. : Видавництво «Укрархбудінформ», 2015. – 113 с.
52. Про місцеве самоврядування в Україні : Закон від 21.05.1997 № 280/97-ВР. [Електронний ресурс] / Офіційний портал Верховної Ради України. – Режим доступу : \WWW/ URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/280/97-%D0%B2%D1%80> – Назва з екрану.
53. Якісні дослідження в соціологічних практиках : навчальний посібник / [під ред. Н. Костенко, Л. Скокової]. – К.: Інститут соціології НАНУ, 2009. – 400 с.
54. Mispelon C. ECF cycling barometer technical document / Chloe Mispelon. – Brussels: ECF, 2013 – 5 p.

55. The Dutch Bicycle Master Plan: Description and Evaluation in an Historical Context / [T. Welleman ed.]. – Hague: Ministry of Transport, Public Works and Water Management Directorate-General for Passenger Transport, 1999. – 129 p.
56. Design Manual for Bicycle Traffic / [Rik de Groot ed.] – Ede: CROW, 2006. – 388 p.
57. Cycling in the Netherlands / [M. Fruianu, G. Munck ed.] – Den Haag: Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Directorate-General for Passenger Transport, 2009. – 35 p.
58. Goeverden V. The Dutch Reference Study: Cases of intervention in bicycle infrastructure reviewed in the framework of bikeability (report) / V. Goeverden, T. Godefrooij. – Delft: Delft University of Technology, 2011. – 99 p.
59. Evaluation of the Delft Bicycle Network plan: final summary report / [A. Wilminck, J.B. Hartman ed.]. – Hague: Dutch Ministry of Transport and Public Works, 1987. – 63 p.
60. Dekoster J. Cycling: the way ahead for towns and cities / J. Dekoster, U. Schollaert. – Bruxelles: European Community, 1999. – 63 p.
61. Küster F. Cycling Solutions: Why Germany Has All the Answers / [Електронний ресурс] / Fabian Küster. – European Cyclists' Federation, 2013. – Режим доступу : \WWW/ URL: <https://ecf.com/news-and-events/news/cycling-solutions-why-germany-has-all-answers> – Назва з екрану.
62. Guidelines for the design of urban streets (English translation 2012) [Електронний ресурс] / RASSt. – Cologne: FGSV, 2006. – Режим доступу : \WWW/ URL: <https://www.fgsv.de>. – Назва з екрану.
63. Рекомендації з організації руху велосипедного транспорту ERA / [під керівництвом Пю Гвязда, Т. Брахера]. – Кельн: FGSV, 2010. – 105 p.
64. Forschungsgesellschaft F. Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN) [Електронний ресурс] / Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen. – Режим доступу : \WWW/ URL: https://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publikationen/downloads/200901_Fr_GS_RIN_Luflinien_Bewertung.pdf. – Назва з екрану.

65. Guide for the Development of Bicycle Facilities / [4th ed. / American Association of State Highway and Transportation Officials]. – Washington: AASHTO, 2012. – 17 p.

66. Manual on uniform traffic control devices for streets and highways (MUTCD) / [2009th ed. / U.S. Federal Highway Administration, American Traffic Safety Services Association, American Association of State Highway and Transportation Officials]. – Washington: U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, 2010. – 864 p.

67. NACTO Urban Bikeway Design Guide [Електронний ресурс] / National Association of City Transportation Officials. – 2012. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://nacto.org/cities-for-cycling/design-guide>. – Назва з екрану.

68. Harkey D.L. Development of bicycle compatibility index: a level of service concept : Final Report FHWA-RD-98-072 / David L. Harkey, Donald W. Reinfurt, Matthew Knuiman. – Chapel Hill: University of North Carolina, Highway Safety Research Center, 1998. – 116 p.

69. The bicycle compatibility index. Level of service concept. Implementation Manual : FHWA-RD-98-095 [Електронний ресурс] / Federal Highway Administration. – Режим доступу: \WWW/ URL: <https://safety.fhwa.dot.gov/tools/docs/bci.pdf>. – Назва з екрану.

70. Ilie A. The use of the bicycle compatibility index in identifying gaps and deficiencies in bicycle networks / Ilie A., Oprea C., Costescu D., Roşca E., Dinu O., Ghionea F. // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, 20th Innovative Manufacturing Engineering and Energy Conference IManEE 2016. – IOP Publishing, 2016. – 9 p. – (DOI:10.1088/1757-899X/161/1/012097).

71. Офіційний сайт Данії [Електронний ресурс] / Ministry of Foreign Affairs of Denmark. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://denmark.dk>. – Назва з екрану.

72. Гел Й. Міста для людей / Йен Гел. – [переклад з англ. О. Любарської]. – К.: Основи, 2018. – 280 с.

73. Bringing Cycling to Life: The LifeCycle Best Practice Handbook [Електронний ресурс] / [R. Rzewnicki, C. Koellinger ed.]. – Режим доступу: \WWW/ URL: http://http://www.cyklokonference.cz/cms_soubory/rubriky/175.pdf. – Назва з екрану.

74. Focus on Cycling: Copenhagen Guidelines for the Design of Road Projects [Електронний ресурс] / City of Copenhagen. – 2011. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://www.cycling-embassy.dk/2014/04/10/new-publication-from-the-city-of-copenhagen/>. – Назва з екрану.

75. Good, better, best – The city of Copenhagen’s bicycle strategy 2011-2025 / [The City of Copenhagen Technical and Environmental Administration]. – Copenhagen: TEA Traffic Department, 2011. – 16 p.

76. Håndbog i cykeltrafik: en samling af de danske vejregler på cykelområdet. Celis Consult [Електронний ресурс] / [C. Consult / Celis Consult ed.]. – 2014. – Режим доступу: \WWW/ URL: http://www.celis.dk/Haandbog_i_Cykeltrafik_Web_High.pdf. – Назва з екрану.

77. Бондаренко І. Комфортне місто: Як спланувати велосипедну інфраструктуру / Бондаренко Ірина, Загреба Віктор. – К.: Асоціація велосипедистів Києва, 2014. – 64 с.

78. STRAVA : Карта активності [Електронний ресурс] / Strava web-site. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://www.strava.com/heatmap/>. – Назва з екрану.

79. Iacono M. Measuring non-motorized accessibility: issues, alternatives, and execution / Iacono M., Krizek K.J., El-Geneidy A. // Journal of Transport Geography. – 2010. – Vol. 18, Issue 1. –P. 133-140.

80. El-Geneidy A. Predicting bicycle travel speeds along different facilities using GPS data: a proof of concept model [Електронний ресурс] / El-Geneidy A., Krizek K.J., Iacono M. // TRB 86th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM. – Washington: TRB, 2007. – 13 p. – (Режим доступу: \WWW/ URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.526.2095&rep=rep1&type=pdf>. – Назва з екрану).

81. Khan M. Models for anticipating non-motorized travel choices, and the role of the built environment / Khan M., Kockelman K.M., Xiong X. // Transport Policy. – 2014. – vol. 35. – P. 117-126.

82. Broach J. Bicycle route choice model developed using revealed preference GPS data [Электронный ресурс] / Broach J, Gliebe J, Dill J. // TRB 90th Annual Meeting Compendium of Papers DVD. – Washington: TRB, 2011. – 14 p. – (Режим доступа: \WWW/ URL: https://ppms.trec.pdx.edu/media/project_files/TRB2011_Bicycle%20route%20choice%20model%20developed%20using%20revealed%20preference%20GPS%20data.pdf. – Назва з екрану).

83. Broach J. Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data / Broach J, Dill J, Gliebe J. // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2012. – vol. 35, issue 10. – P. 1730-1740.

84. Winters M.L. Improving public health through active transportation: understanding the influence of the built environment on decisions to travel by bicycle: thesis for PhD : Population and Public Health / Meghan Lesley Winters. – Vancouver, 2011. – 175 p.

85. Ehrgott M. A bi-objective cyclist route choice model / Ehrgott M., Wang J.Y., Raith A., Van Houtte C. // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2012. – vol. 46, issue 4. – P. 652-663.

86. Stinson M.A. Commuter bicyclist route choice: Analysis using a stated preference survey / M.A. Stinson, C.R. Bhat // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2003. – vol. 1828. – P. 107-115.

87. Ben-Akiva M. Discrete choice analysis: theory and application to travel demand / Moshe Ben-Akiva, Steven R. Lerman. – [1st ed.]. – Cambridge: The MIT Press, 1985. – 384 p.

88. Ben-Akiva M. Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions // Handbook of transportation science / Ben-Akiva M, Bierlaire M. – New York: Springer, 1999. – P. 5-33.

89. Yang C. Route Choice Behaviour of Cyclists by Stated Preference and Revealed Preference [Электронный ресурс] / Yang C, Mesbah M. // 36th Australasian Transport Research Forum, 2-4 October 2013. – Brisbane: ATRF, 2013. – 17 p. – (Режим доступа: \WWW/ URL: https://atrf.info/papers/2013/2013_yang_mesbah.pdf. – Назва з екрану).

90. Menghini G. Route choice of cyclists in Zurich / G. Menghini, N. Carrasco, Нью Schüssler, K.W. Axhausen // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2010. – vol. 44, issue 9. – P. 754-765.
91. Hood J. A GPS-based bicycle route choice model for San Francisco, California / J. Hood, E. Sall, B. Charlton // *Transportation letters*. – 2011. – vol. 3, issue 1. – P. 63-75.
92. Casello J. Modeling Cyclists' Route Choice Based on GPS Data / J. Casello, V. Usyukov // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2014. – vol. 2014(2430). – P. 155-161.
93. Usyukov V. Development of a Cyclists' Route-Choice Model: An Ontario Case Study: Thesis for MSc : Civil Engineering / Vladimir Usyukov. – Waterloo, Ontario, 2013. – 105 p.
94. Шандор З. Эконометрический ликбез: ограниченные зависимые переменные : Мультиномиальные модели дискретного выбора / Золт Шандор // *Квантиль*. – 2009. – № 7. – С. 9-36.
95. Wardman M. A comparison of revealed preference and stated preference models of travel behaviour / M. Wardman // *Journal of Transport Economics and Policy*. – 1988. – Vol. 22, No. 1. – P. 71-91.
96. Barnes G. Estimating bicycling demand / G. Barnes, K. Krizek // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2005. – vol. 1939(1). – P. 45-51.
97. Akar G. Influence of individual perceptions and bicycle infrastructure on decision to bike / G. Akar, K.J. Clifton // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2009. – vol. 2140(1). – P. 165-172.
98. Stinson M.A. Commuter bicyclist route choice: Analysis using a stated preference survey / M.A. Stinson, C.R. Bhat // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2003. – vol. 1828. – P. 107-115.
99. Sener I.N. An analysis of bicycle route choice preferences in Texas, US / I.N. Sener, N. Eluru, C.R. Bhat // *Transportation*. – 2009. – vol. 36(5). – P. 511-539.

100. Rybarczyk G. Bicycle travel demand forecasting using geographic information systems and agent based modeling : thesis for PhD : Geography / Greg Rybarczyk. – Michigan, 2010. – 114 p.

101. Hankey S. Estimating use of non-motorized infrastructure: Models of bicycle and pedestrian traffic in Minneapolis, MN / [S. Hankey, G. Lindsey, X. Wang et. al.] // Landscape and Urban Planning. – 2012. – Vol. 107, Issue 3. – P. 307-316.

102. Aultman-Hall L. Analysis of bicycle commuter routes using geographic information systems: implications for bicycle planning / L. Aultman-Hall, F.L. Hall, B.B. Baetz // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 1997. – vol. 1578(1). – P. 102-110.

103. Hyodo T. Modeling of bicycle route and destination choice behavior for bicycle road network plan / T. Hyodo, N. Suzuki, K. Takahashi // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2000. – vol. 1705(1). – P. 70-76.

104. Parkin J. Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal / J. Parkin, J. Rotheram // Transport Policy. – 2010. – vol. 17(5). – P. 335-341.

105. Halldórsdóttir K. Modelling mode choice in short trips – shifting from car to bicycle [Электронный ресурс] / Halldórsdóttir K., Christensen L., Jensen T.C., Prato C.G. // Proceedings of the European Transport Conference 2011. – Lyngby: DTU, 2011. – P. 1-22. – (Режим доступа: \WWW/ URL: <http://orbit.dtu.dk/files/7742744/MI09ii.pdf>. – Назва з екрану).

106. Sener I.N. An analysis of bicyclists and bicycling characteristics: Who, why, and how much are they bicycling / .N. Sener, N. Eluru, C.R. Bhat // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2009. – vol. 2134. – P. 1-29.

107. Smith D.T. Safety and locational criteria for bicycle facilities. user manual volume I: Bicycle facility location criteria / Smith, Daniel T. – Washington: Federal Highway Administration, 1975. – 242 p. – (No. FHWA-RD-75-113).

108. Giely J.-M. Tbilisi Sustainable Urban Transport Strategy 2015-2030 [Электронный ресурс] / Jean-Manuel Giely // Municipal Development Fund of Georgia. –

(Режим доступу: \WWW/ URL: [http://mdf.org.ge/storage/assets/file/documents%202016/murtazi/Strategic%20Paper%20Report%20PDF%20Geo\(18_03_2016\)/Strategic%20Paper%20Report%20final%20ENG.pdf](http://mdf.org.ge/storage/assets/file/documents%202016/murtazi/Strategic%20Paper%20Report%20PDF%20Geo(18_03_2016)/Strategic%20Paper%20Report%20final%20ENG.pdf). – Назва з екрану).

109. Národná stratégia rozvoja cyklistickej dopravy a cykloturistiky v Slovenskej republike / [Druhé vydanie]. – Ljubljana: Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja Slovenskej republiky. – 48 p.

110. Рихтер К.Ю. Транспортная эконометрия / К.Ю. Рихтер. — М.: Транспорт, 1982. – 317 с.

111. Любий Є.В. Визначення попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / Любий Євген Володимирович. – Харків, 2012. – 191 с.

112. Свічинський С.В. Формування функцій розселення міського населення для визначення потреб у перевезеннях громадським транспортом: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / Свічинський Станіслав Валерійович. – Харків, 2015. – 223 с.

113. Baass K.G. Design of zonal systems for aggregate transportation planning models / K.G. Baass // Transportation Research Record. – 1980. – vol. 807. – P. 1-6.

114. Chang K.. Effects of zoning structure and network detail on traffic demand modeling / Chang K., Khatib Z., Ou Y. //Environment and Planning B: Planning and design. – 2002. – vol. 29, №. 1. – P. 37-52.

115. Ding C. Impact analysis of spatial data aggregation on transportation forecasted demand: a GIS approach / C. Ding // 32nd Urban and Regional Information Systems Association Conference. – Milwaukee: URISA, 1994. – P. 362-375.

116. Ding C. GIS-based traffic analysis zone design / Ding C., Choi K., Kim T.J. // Proceedings of the 3rd International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management. – Atlanta: CUPUM, 1993.

117. O'Neill W.A. Developing optimal transportation analysis zones using GIS / W.A. O'Neill // Proceedings of the 1991 Geographic Information Systems (GIS) for Transportation Symposium. – 1991. – Vol. 61, No. 12. – P. 33-36.

118. Ortuzar J.D. Modelling Transport / J.D. Ortuzar, L.G. Willumsen. – [Third Edition]. – Chichester: Wiley, 2006. – 499 p.
119. Crevo C.C. Impacts of zonal reconfigurations on travel demand forecasts / C.C. Crevo // Transportation Research Record. – 1991. – vol. 1305. – P. 72-80.
120. Openshaw S. Optimal zoning systems for spatial interaction models / S. Openshaw // Environment and Planning A. – 1977. – vol. 9, №. 2. – P. 169-184.
121. Openshaw S. Algorithms for reengineering 1991 Census geography / S. Openshaw, L. Rao // Environment and Planning A. – 1995. – vol. 27, №. 3. – P. 425-446.
122. Bennion M. W. Building transportation analysis zones using geographic information systems / Bennion M. W., O'Neill W.A. // Transportation research record. – 1994. – vol, 1429. – P. 49-56
123. Binetti M. Effects of traffic analysis zones design on transportation models / Binetti M., Ciani E. // Proceedings of the 9th Meeting of the Euro Working Group on Transportation. – Bari: IASI, 2002. – P. 813-823.
124. Wang S. Transit Traffic Analysis Zone Delineating Method Based on Thiessen Polygon / S. Wang, L. Sun, J. Rong, Z. Yang // Sustainability. – 2014. – vol. 6, № 4. – P. 1821-1832.
125. Whitt F.R. Bicycling science / Whitt F.R., Wilson D.G. – Cambridge: The MIT Press, 1982. – 364 p.
126. Wilson D.G. Bicycling science / Whitt, F.R., Papadopoulos J. – Cambridge: The MIT Press, 2004. – 477 p.
127. US Standard Atmosphere [Електронний ресурс] / Santa Cruz Institute for Particle Physics. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://scipp.ucsc.edu/outreach/balloon/atmos/1976%20Standard%20Atmosphere.htm>. – Назва з екрану.
128. Ortuzar J.D. Modelling Transport / J.D. Ortuzar, L.G. Willumsen. – [Fourth Edition]. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 586 p.
129. Про утворення виборчих дільниць в межах міста Харкова : постанови Харківської міської виборчої комісії Харківської області від 29.09.2010 № 11 [Електронний ресурс] / Офіційний сайт Харківської міської ради. – Режим доступу : \WWW/

URL: <http://www.city.kharkov.ua/uk/document/pro-utvorenniya-viborchih-dilnits-v-mezhah-mista-harkova-41699.html>. – Назва з екрану.

130. Geofabrik Downloads [Електронний ресурс] / Geofabrik GmbH and OpenStreetMap Contributors. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://download.geofabrik.de/europe.html>. – Назва з екрану.

131. Spatial Analysis Using ArcGIS 10.1 : Training manual. – University of Maryland Libraries, 2013. – 33 p.

132. Сосновский В.А. Прикладные методы градостроительных исследований : учеб. пособие / Сосновский В.А., Русакова Н.С. – М.: Архитектура-С, 2006. – 112 с.

133. Горбачов П.Ф. Концепція формування систем маршрутного пасажирського транс-порту в містах: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.01 / Горбачов Петро Федорович. – Харків, 2009 – 370 с.

134. Свічинська О.В. Удосконалення моделей вибору шляху пересування пасажирів в маршрутних системах міст: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / Свічинська Ольга Володимирівна. – Харків, 2015. – 198 с.

135. Колій О.С. Рациональне розташування зупиночних пунктів автобусних та тролейбусних маршрутів відносно регульованих перехресть : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01 «Транспортні системи» / Колій Олександр Сергійович. – Харків, 2017. – 20 с.

136. Ціщик Р.В. Аналіз регіональної диференціації домогосподарств України та пошук шляхів подолання асиметрій їх соціально-економічного розвитку / Р.В. Ціщик, Н.В. Котис // Економічний аналіз. – 2016. – Том 24, № 1. – С. 82-91.

137. Соціально-демографічні характеристики домогосподарств України у 2015 році : статистичний збірник / [відповідальний за випуск І. І. Осипов]. – К.: ДП «Інформаційно-аналітичне агентство», 2015. – 84 с.

138. Чисельність населення на 1 січня 2016 року [Електронний ресурс] / Головне управління статистики у Харківській області.. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://kh.ukrstat.gov.ua/2016-rik-chyselnist-naselennia/2096-arkhiv-chyselnist-naselennia-u-sichni-2016-roku>. – Назва з екрану.

139. Krizek K.J. What is at the end of the road? Understanding discontinuities of on-street bicycle lanes in urban settings / K.J. Krizek, R.W. Roland // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2005. – vol. 10. – P. 55-68.

140. Clayton W. Exploring changes to cycle infrastructure to improve the experience of cycling for families / W. Clayton, C. Musselwhite // *Journal of Transport Geography*. – 2013. – vol. 22. – P. 54-61.

141. Franklin J. Two decades of the Redway cycle paths in Milton Keynes. [Электронный ресурс] / J. Franklin // *Traffic Engineering and Control*. – 1999. –Режим доступа: \WWW/ URL <http://www.cyclecraft.co.uk/digest/2decades.html>. – Назва з екрану.

ДОДАТОК А
ІНФОРМАЦІЯ ПРО КІЛЬКІСТЬ ЗАРЕЄСТРОВАНИХ ВИБОРЦІВ

Таблиця А.1 – Чисельність зареєстрованих виборців в м. Харків

Номер виборчої ділянки	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)	Номер виборчої ділянки	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)
631177	1119	631460	2171
631178	1674	631461	2347
631179	1542	631462	2280
631180	2349	631463	2453
631181	1937	631464	2348
631182	2053	631465	2453
631183	1996	631466	2419
631184	1940	631467	2135
631185	2214	631468	1763
631186	2000	631469	2151
631187	1672	631470	1937
631188	1409	631471	1821
631189	1276	631472	1979
631190	2369	631473	2018
631191	1247	631474	2053
631192	2220	631475	2122
631193	2024	631476	2058
631194	1927	631477	1601
631195	1348	631478	2068
631196	2250	631479	2059
631197	2307	631480	2272
631198	2389	631481	2024
631199	2183	631482	1771
631200	1330	631483	1819
631201	1574	631484	2263
631202	1408	631485	1950
631203	1836	631486	1878
631204	1689	631487	2053
631205	1761	631488	2061
631206	1531	631.489	2216
631207	1561	631490	2085
631208	1447	631491	1959
631209	923	631492	2008
631210	2385	631493	1940
631211	2316	631494	1918
631212	1608	631495	1881

Продовження таблиці А.1 – Чисельність зареєстрованих виборців в м. Харків

Номер виборчої ділянки	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)	Номер виборчої ділянки	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)
631213	1298	631496	2163
631214	1223	631497	2307
631215	2222	631498	2313
631216	2077	631499	2290
631217	1757	631500	2150
631218	2020	631501	1969
631219	2160	631502	2199
631220	2082	631503	1805
631221	2248	631504	1865
631222	964	631505	2115
631533	2322	631506	2199
631534	2212	631507	2130
631535	2299	631508	1822
631536	2271	631509	2208
631537	2346	631510	2053
631538	2116	631511	1817
631539	2413	631512	2042
631540	2298	631513	2265
631541	2268	631514	2133
631542	2004	631515	2323
631543	2374	631516	2389
631544	2329	631517	2226
631545	1970	631518	2184
631546	2109	631519	1953
631547	2324	631520	2240
631548	2195	631521	2085
631549	2067	631522	2318
631550	2164	631523	2306
631551	2312	631524	2292
631552	2267	631591	2251
631553	2150	631592	1778
631554	2320	631593	1530
631555	2453	631594	2125
631556	2292	631595	2371
631557	2411	631596	2331
631558	2367	631597	2306
631559	2405	631598	2356
631560	2310	631599	2335
631561	2367	631600	2167

Продовження таблиці А.1 – Чисельність зареєстрованих виборців в м. Харків

Номер виборчої дільниці	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)	Номер виборчої дільниці	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)
631562	2187	631601	2237
631563	2237	631602	1966
631564	2386	631603	2291
631565	2407	631604	2092
631566	2374	631605	2283
631567	2350	631606	2066
631568	2260	631607	2088
631569	2114	631608	2316
631570	2427	631609	1481
631571	2162	631610	1962
631572	2106	631611	2128
631573	2375	631612	2114
631574	2369	631613	1933
631575	2165	631614	1724
631576	2296	631615	2200
631577	2388	631616	2386
631578	2087	631617	1905
631579	2219	631618	710
631580	2268	631619	973
631581	2062	631620	1483
631582	2124	631621	1412
631583	2086	631622	2322
631692	1444	631623	2330
631693	781	631624	2375
631231	1905	631625	2113
631232	1873	631626	1870
631233	1970	631627	1521
631234	1837	631628	2281
631235	1963	631629	2179
631236	2243	631630	2159
631237	2420	631631	1714
631238	2199	631632	2061
631239	2113	631633	2161
631240	2374	631634	1593
631241	1911	631635	2098
631242	1937	631636	2113
631243	1981	631637	2086
631244	2058	631638	2206
631245	2103	631639	2318

Продовження таблиці А.1 – Чисельність зареєстрованих виборців в м. Харків

Номер виборчої дільниці	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)	Номер виборчої дільниці	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)
631246	1913	631640	1672
631247	2376	631641	2004
631248	1332	631642	1576
631249	2406	631643	2328
631250	2078	631694	970
631251	2029	631695	1829
631252	1677	631376	2146
631253	1761	631377	2075
631254	2437	631378	2417
631255	2138	631379	2316
631256	2361	631380	2378
631257	2448	631381	1439
631258	2567	631382	1654
631259	1728	631383	1260
631260	986	631384	2091
631261	1592	631385	2350
631262	1496	631386	2230
631263	2159	631387	2320
631264	1863	631388	2297
631265	1978	631389	2382
631266	1857	631390	2424
631267	2002	631391	2028
631268	1925	631392	2228
631269	2135	631393	1743
631270	2049	631394	2431
631271	2130	631395	1911
631272	1969	631396	2008
631273	2009	631397	1346
631274	1890	631398	1620
631275	2176	631399	2112
631276	2265	631400	1488
631277	2341	631401	1659
631278	2323	631402	1984
631279	2275	631403	2297
631280	2188	631404	2199
631281	1611	631405	2079
631282	1862	631406	2194
631283	1774	631407	2232
631284	1906	631408	2281

Продовження таблиці А.1 – Чисельність зареєстрованих виборців в м. Харків

Номер виборчої дільниці	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)	Номер виборчої дільниці	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)
631285	1419	631409	2167
631286	2045	631410	315
631287	1953	631649	1309
631288	2040	631650	1291
631289	2030	631651	2295
631290	1893	631652	1528
631291	2077	631653	2187
631292	2270	631654	2083
631293	1409	631655	1373
631294	1758	631656	1080
631295	2191	631657	2275
631296	2279	631658	2287
631297	2213	631659	1767
631298	2105	631660	1386
631299	1981	631661	2255
631300	1832	631662	2205
631301	2050	631663	1982
631690	1131	631664	2125
631691	2309	631665	604
631316	1819	631666	1265
631317	1849	631667	510
631318	1965	631668	1926
631319	1599	631669	2147
631320	2204	631670	2332
631321	2183	631671	2187
631322	2313	631672	2179
631323	2188	631673	2347
631324	2181	631674	2138
631325	2071	631675	2267
631326	2260	631676	2318
631327	2148	631677	2325
631328	1618	631678	2391
631329	1458	631679	2162
631330	2413	631680	2235
631331	2251	631681	2359
631332	1968	631682	2455
631333	2387	631683	1851
631334	2295	631684	1713
631335	1944	631685	1722

Продовження таблиці А.1 – Чисельність зареєстрованих виборців в м. Харків

Номер виборчої ділянки	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)	Номер виборчої ділянки	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)
631336	2201	631089	2216
631337	2135	631090	2055
631338	1974	631091	2013
631339	2149	631092	2012
631340	2048	631093	2058
631341	1862	631094	2048
631342	2299	631095	2210
631343	2220	631096	2182
631345	2084	631097	2204
631346	2004	631098	2075
631347	140	631099	2262
631348	1722	631100	2054
631349	1661	631101	2357
631350	2216	631102	2231
631351	2249	631103	2121
631352	1931	631104	2152
631353	1659	631105	2058
631354	2317	631106	2089
631355	2092	631107	2230
631356	1732	631108	2407
631357	2267	631109	2196
631358	2224	631110	1939
631359	1799	631111	2211
631360	1684	631112	2354
631361	1815	631113	2283
631362	2048	631114	1878
631363	1600	631115	2331
631364	1837	631116	1867
631365	1543	631117	2114
631366	1980	631118	2133
631367	2149	631119	1870
631368	1982	631120	1977
631369	1683	631121	2136
631370	1770	631122	1754
631371	1883	631123	2355
631372	1995	631124	2025
631415	1464	631125	1965
631416	1806	631126	1881
631417	2287	631127	1963

Продовження таблиці А.1 – Чисельність зареєстрованих виборців в м. Харків

Номер виборчої дільниці	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)	Номер виборчої дільниці	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)
631418	1673	631128	1951
631419	1363	631129	1840
631420	1198	631130	1633
631421	1246	631131	1938
631422	840	631132	1617
631423	2115	631133	1535
631424	2215	631134	1948
631425	1251	631135	1628
631426	2305	631136	1502
631427	2339	631137	2150
631428	1922	631138	2077
631429	1925	631139	2101
631430	2329	631140	2063
631431	1952	631141	2289
631432	2255	631142	1961
631433	2357	631143	2277
631434	2071	631144	1994
631435	1817	631145	2214
631436	2046	631146	2003
631437	1967	631147	2122
631438	2119	631148	2038
631439	2389	631149	2069
631440	2143	631150	2343
631441	2149	631151	2246
631442	2302	631152	2325
631443	2290	631153	2367
631444	1457	631154	2271
631445	1544	631155	2016
631446	1911	631156	2008
631447	2241	631157	1363
631448	2281	631158	1251
631449	2090	631159	2170
631450	2131	631160	2272
631451	1362	631161	2053
631452	2072	631162	2092
631453	1865	631163	2238
631454	2049	631164	1800
631455	2119	631165	1433
631456	2196	631166	1854

Закінчення таблиці А.1– Чисельність зареєстрованих виборців в м. Харків

Номер виборчої ділянки	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)	Номер виборчої ділянки	Чисельність виборців (без урахування виборців з відміткою про вибуття з відповідної території)
631457	2384	631696	1124
631458	2196	631697	889
631459	2197	631698	1350

ДОДАТОК Б
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСПОРТНИХ РАЙОНІВ

Таблиця Б1 – Характеристика транспортних районів

Номер ТР	Площа, км ²	Насе- лення, осіб	Зайняте населення, осіб	Щіль- ність, осіб/км ²	Відпра- влень, осіб	Прибуття, осіб
1	1,87	6301	2474	3374	2713	3471
2	1,35	2079	816	1535	895	2638
3	4,46	5122	2011	1149	2205	3387
4	1,96	1678	659	856	722	4349
5	1,72	4860	1908	2829	2093	5705
6	1,13	4423	1736	3900	1904	2985
7	1,11	17583	6902	1589	7570	2821
8	1,56	0	0	0	0	3068
9	0,99	8804	3456	8883	3791	3508
10	1,38	0	0	0	0	3415
11	1,09	16144	6338	1476	6951	2267
12	2,21	9052	3554	4099	3897	3875
13	0,74	9733	3821	1320	4190	2937
14	1,39	0	0	0	0	3590
15	0,46	2458	965	5306	1058	1490
16	0,86	2214	869	2571	953	3513
17	2,29	0	0	0	0	5229
18	1,34	2277	894	1699	980	3177
19	1,29	15075	5917	1171	6489	6784
20	1,86	2368	930	1274	1020	6076
21	2,53	10162	3989	4009	4375	5718
22	2,39	5341	2097	2237	2299	4634
23	2,60	0	0	0	0	3944
24	2,81	5041	1979	1795	2171	4489
25	1,23	10552	4142	8588	4542	2137
26	1,58	0	0	0	0	3271
27	2,40	14412	5657	6001	6204	3365
28	1,77	16201	6360	9160	6975	2603
29	0,79	2282	896	2887	983	793
30	0,69	6717	2637	9713	2891	922
31	1,21	15575	6115	1290	6706	1423

Продовження таблиці Б1 – Характеристика транспортних районів

Номер ТР	Площа, км2	Насе- лення, осіб	Зайняте населення, осіб	Щіль- ність, осіб/км2	Відпра- влень, осіб	Прибуття, осіб
32	1,24	15810	6206	1280	6806	1542
33	1,90	29598	11619	1560	12743	1664
34	4,37	8876	3485	2033	3821	2141
35	4,95	0	0	0	0	3902
36	2,96	0	0	0	0	2741
37	2,00	2039	800	1018	878	2531
38	5,14	4037	1585	785	1738	5260
39	2,74	2391	939	873	1029	3582
40	4,15	51953	20394	1252	22365	4534
41	3,94	47509	18650	1206	20453	4158
42	1,14	23479	9217	2057	10108	1131
43	3,18	47781	18757	1503	20570	3704
44	1,22	21824	8567	1783	9395	1329
45	0,45	7279	2858	1604	3134	606
46	0,56	0	0	0	0	624
47	1,57	28756	11289	1828	12380	1513
48	3,50	15918	6248	4554	6852	5162
49	2,93	14617	5738	4981	6293	4737
50	1,05	6824	2679	6482	2938	1866
51	2,33	5355	2102	2303	2305	4921
52	1,18	3143	1234	2654	1353	4019
53	2,01	17074	6702	8497	7350	7402
54	1,27	8766	3441	6876	3774	6683
55	0,68	2051	805	3001	883	5691
56	1,10	7047	2766	6413	3034	6651
57	0,90	2503	983	2780	1077	6599
58	0,76	3893	1528	5126	1676	13303
59	0,75	2692	1057	3608	1159	7761
60	0,85	3474	1364	4070	1496	5942
61	0,80	2157	847	2691	929	5272
62	2,83	2258	887	797	972	6983
63	1,16	0	0	0	0	2031
64	2,15	6145	2412	2855	2645	3689
65	1,95	0	0	0	0	2753

Продовження таблиці Б1 – Характеристика транспортних районів

Номер ТР	Площа, км2	Насе- лення, осіб	Зайняте населення, осіб	Щіль- ність, осіб/км2	Відпра- влень, осіб	Прибуття, осіб
66	1,57	2499	981	1592	1076	2955
67	1,93	22110	8680	1146	9519	3199
68	1,95	0	0	0	0	3308
69	1,88	1838	722	977	791	4235
70	2,21	13583	5332	6133	5848	3963
71	3,64	16387	6433	4507	7055	12953
72	2,18	7149	2807	3283	3078	5408
73	2,39	9369	3678	3914	4034	3552
74	2,01	6753	2651	3353	2907	2657
75	1,92	3503	1375	1824	1508	2466
76	2,10	30217	11862	1440	13009	2645
77	1,97	15816	6209	8048	6809	2178
78	2,37	3915	1537	1651	1686	2192
79	1,27	10905	4281	8554	4695	1632
80	1,31	16428	6449	1258	7072	1382
81	1,20	18390	7219	1538	7917	1345
82	3,80	3656	1435	961	1574	1066
83	1,70	21278	8353	1253	9160	993
84	1,58	0	0	0	0	818
85	1,55	8843	3471	5700	3807	777
86	1,13	4950	1943	4378	2131	621
87	2,74	17289	6787	6304	7443	1437
88	2,31	19114	7503	8280	8228	1997
89	2,32	10858	4263	4682	4675	2032
90	1,82	15939	6257	8775	6862	1418
91	1,88	14062	5520	7489	6053	1331
92	0,95	0	0	0	0	773
93	1,23	2540	997	2068	1094	885
94	1,95	12146	4768	6216	5229	1420
95	2,88	0	0	0	0	1535
96	2,06	0	0	0	0	1483
97	1,08	6583	2585	6099	2834	1646
98	1,79	4957	1945	2766	2134	2473
99	1,48	3937	1546	2664	1695	1822

Продовження таблиці Б1 – Характеристика транспортних районів

Номер ТР	Площа, км2	Насе- лення, осіб	Зайняте населення, осіб	Щіль- ність, осіб/км2	Відпра- влень, осіб	Прибуття, осіб
100	2,38	3866	1518	1628	1665	2572
101	1,90	29710	11663	1561	12791	1877
102	1,37	1632	641	1189	703	1355
103	2,12	0	0	0	0	1866
104	1,93	0	0	0	0	1683
105	2,40	4700	1845	1956	2023	2566
106	2,83	9071	3561	3203	3905	3248
107	4,81	3691	1449	768	1589	5431
108	3,14	0	0	0	0	4367
109	2,82	4452	1748	1579	1916	3903
110	3,23	0	0	0	0	6083
111	4,08	0	0	0	0	3909
112	4,13	1783	700	432	768	3862
113	1,62	10171	3993	6296	4379	4775
114	1,34	0	0	0	0	2724
115	1,77	7786	3056	4400	3352	4506
116	1,06	2126	835	2009	915	5416
117	1,01	4029	1582	3985	1735	5027
118	1,13	10147	3983	9011	4368	3983
119	2,94	2092	821	712	900	2825
120	2,94	8386	3292	2856	3610	3153
121	2,04	9297	3650	4561	4003	2493
122	3,09	998	392	322	430	4130
123	2,07	956	375	461	411	2946
124	2,27	0	0	0	0	3900
125	1,81	11614	4560	6433	5000	3489
126	1,65	0	0	0	0	2331
127	1,49	13687	5373	9157	5892	2383
128	0,97	14517	5699	1502	6250	2707
129	1,79	4146	1628	2312	1785	3697
130	1,38	4817	1891	3489	2074	2455
131	2,22	2311	907	1042	995	2742
132	2,13	0	0	0	0	7415
133	0,66	2079	816	3159	895	5624

Закінчення таблиці Б1 – Характеристика транспортних районів

Номер ТР	Площа, км2	Насе- лення, осіб	Зайняте населення, осіб	Щіль- ність, осіб/км2	Відпра- влень, осіб	Прибуття, осіб
134	0,33	0	0	0	0	4537
135	0,94	7211	2830	7681	3104	2482
136	0,78	2088	820	2676	899	2951
137	1,03	6892	2706	6693	2968	6456
138	0,94	4679	1837	5003	2014	3110
139	0,87	2222	872	2549	957	6155
140	0,91	5872	2305	6420	2528	1738

ДОДАТОК В
ГРАФІЧНЕ ВІДОБРАЖЕННЯ ПОСЛІДОВНОСТІ ДІЙ ПРОЦЕСУ МОДЕЛЮ-
ВАННЯ

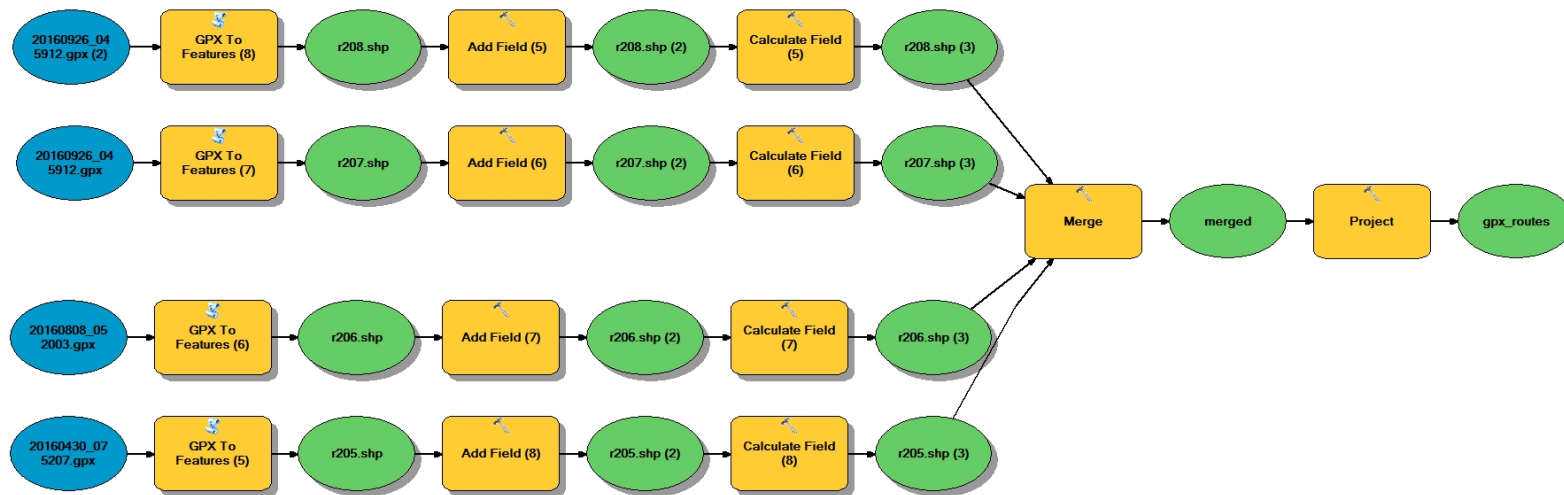


Рисунок В.1 – Блок-схема геокодування GPS-треків

ДОДАТОК Г
ПРОГРАМНИЙ КОД ДЛЯ РОЗРАХУНКУ МУЛЬТИНОМІНАЛЬНОЇ
ЛОГІТ МОДЕЛІ

[Choice]

CHOICE

[Beta]

// Name Value LowerBound UpperBound status (0=variable, 1=fixed)

B_Len 0 -10 10 0

B_Speed 0 -10 10 0

B_tr 0 -10 10 1

B_Pa 0 -10 10 0

B_Work 0 -10 10 0

B_Main 0 -10 10 0

[Utilities]

// Id Name Avail linear-in-parameter expression (beta1*x1 + beta2*x2 + ...)

1 A1 av1 B_Len * Total_Leng1 + B_Speed * Total_Spee1 + B_tr * Count_1 + B_Pa * Total_Park1 + B_Work * Total_Work1 + B_Main * Total_Main1

2 A2 av2 B_Len * Total_Leng2 + B_Speed * Total_Spee2 + B_tr * Count_2 + B_Pa * Total_Park2 + B_Work * Total_Work2 + B_Main * Total_Main2

3 A3 av3 B_Len * Total_Leng3 + B_Speed * Total_Spee3 + B_tr * Count_3 + B_Pa * Total_Park3 + B_Work * Total_Work3 + B_Main * Total_Main3

4 A4 av4 B_Len * Total_Leng4 + B_Speed * Total_Spee4 + B_tr * Count_4 + B_Pa * Total_Park4 + B_Work * Total_Work4 + B_Main * Total_Main4

5 A5 av5 B_Len * Total_Leng5 + B_Speed * Total_Spee5 + B_tr * Count_5 + B_Pa * Total_Park5 + B_Work * Total_Work5 + B_Main * Total_Main5

6 A6 av6 B_Len * Total_Leng6 + B_Speed * Total_Spee6 + B_tr * Count_6 + B_Pa * Total_Park6 + B_Work * Total_Work6 + B_Main * Total_Main6

[Expressions]

// Define here arithmetic expressions for name that are not directly

// available from the data

one = 1

[Model]

// \$MNL stands for "multinomial logit model",

\$MNL

ДОДАТОК Д
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник міського голови з питань
діяльності виконавчих органів влади
Житомирської міської ради



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Найменування пропозиції, яка впроваджена

Концепція розвитку мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем його використання.

Ким запропоновано

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), кафедра транспортних систем і логістики, автор – Чернишова О.С.

Де, коли, для яких цілей впроваджено

Вказана концепція була впроваджена при розробці плану сталої міської мобільності міста Житомир в рамках проекту «Інтегрований розвиток українських міст», що реалізується німецьким товариством міжнародного співробітництва (GIZ) ГмбХ.

Напрямки, результати, ефективність впровадження

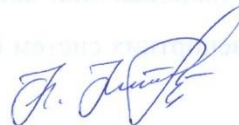
При розробці мультимодальної транспортної моделі м. Житомир використано розроблений в роботі алгоритм автоматизованого мікрорайонування. Запропонована класифікація велосипедних маршрутів дозволила розроби-

ти ієрархію маршрутної мережі, сформувавши перелік та визначити переважні типи велосипедної інфраструктури для міста Житомира. В результаті використання методики визначення пріоритетності розбудови мережі велосипедних маршрутів отримано графік впровадження та макро оцінку вартості реалізації проектів будівництва велосипедної інфраструктури. Отримані результати використанні для формування графіку фінансування та плану впровадження.

Висновки, зауваження, пропозиції

Отримані результати можуть бути використані при розробці концепції розвитку велосипедного транспорту для м. Житомир. Розроблена методика може бути використана при формуванні мережі велосипедних маршрутів з метою розбудови інфраструктури в містах з низьким рівнем використання велосипедного транспорту.

Директор департаменту економічного
розвитку міської ради м. Житомир



Костриця М.М.

"04" вересня 2018р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор департаменту у справах
сім'ї, молоді та спорту Харківської
міської ради



Чубаров О.С.

" _____ 2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Найменування пропозиції, яка введена

Концепція розвитку мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем його використання.

Ким запропоновано

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), кафедра транспортних систем і логістики, автор – Чернишова О.С.

Де, коли, для яких цілей введено

Вказана концепція була введена під час розробки Концепції розвитку велосипедного руху і облаштування інфраструктури у м. Харкові, що була затверджена рішенням № 397/16 дев'ятої сесії Харківської міської ради сьомого скликання від 26.10.2016 р.

Напрямки, результати, ефективність введення

При розробці мультимодальної транспортної моделі м. Харкова використано розроблений в роботі алгоритм автоматизованого мікрорайонування. Розроблені принципи формування велосипедної мережі для міст з низьким

рівнем використання велосипедного транспорту було враховано під час розробки Концепції розвитку велосипедного рух та облаштування м. Харків, Запропонована класифікація велосипедних маршрутів дозволила розробити ієрархію маршрутної мережі, сформувати перелік та визначити переважні типи велосипедної інфраструктури для міста Харкова. В результаті використання методики визначення послідовності впровадження велосипедної мережі отримано графік реалізації велосипедних маршрутів та макро оцінку вартості реалізації проекту для формування графіку фінансування.

Висновки, зауваження, пропозиції

Розроблена методика може бути використана при розробці міських концепцій та цільових програм для визначення місцезорозташування бажаної велосипедної інфраструктури, для визначення пріоритетності та розрахунку кошторису на проектування ділянок мережі.

Заступник директора департаменту у справах
сім'ї, молоді та спорту
Харківської міської ради



Хмельницький С.С.

"20" серпня 2018 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Голова громадської організації

«CITY LAB» м. Полтава

Козиренко Д.С.

2016р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Найменування пропозиції, яка впроваджена

Методика визначення послідовності розбудови велосипедної мережі і впровадження велосипедної інфраструктури.

Ким запропоновано

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), кафедра транспортних систем і логістики, автор – Чернишова О.С.

Де, коли, для яких цілей впроваджено

Вказана методика була впроваджена при формуванні маршрутної мережі велосипедного транспорту для м. Полтави в рамках розробки Концепції розвитку велосипедної інфраструктури м. Полтава на 2016-2020 рр.

Напрямки, результати, ефективність впровадження

Розроблені принципи формування велосипедної мережі для міст з низьким рівнем використання велосипедного транспорту було враховано під час розробки концепції розвитку велосипедної інфраструктури м. Полтава на 2016-2020 рр. Запропонована класифікація велосипедних маршрутів дозволила розробити ієрархію маршрутної мережі, сформуванати перелік та визначити переважні типи велосипедної інфраструктури для міста Полтава. В

результаті використання методики визначення послідовності впровадження велосипедної мережі отримано графік реалізації велосипедних маршрутів та макро оцінку вартості реалізації проекту для формування графіку фінансування.

Висновки, зауваження, пропозиції

Розроблена методика може бути використана при формуванні мережі велосипедних маршрутів з метою розбудови інфраструктури в містах з з низьким рівнем використання велосипедного транспорту.

Керівник проєктів



Садовнікова І. В.

"24" травня 2016 р.

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

„ЗАТВЕРДЖУЮ”
Проректор,
проф. _____ Клець Д.М.
« 12 » _____ 2018 р.



АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи Чернишової О.С.
«Концепція розвитку мережі велосипедного транспорту в містах з низьким
рівнем його використання», яка представляється на здобуття наукового сту-
пеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.22.01 – «Транспортні сис-
теми»**

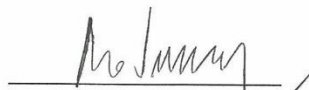
Комісією в складі завідувача кафедри транспортних систем і логістики, д.т.н., проф. Горбачова П.Ф., заступника завідувача кафедри транспортних систем і логістики, к.т.н., доц. Любого Є.В., доцента кафедри транспортних систем і логістики, к.т.н., доц. Свичинського С.В. складено акт про те, що результати кандидатської дисертації Чернишової Олени Сергіївни у вигляді методик моделювання попиту на поїздки велосипедом та мікрорайонування території міста з точки зору руху велосипедистів, впроваджено у навчальний процес кафедри транспортних систем і логістики при викладанні дисципліни «Транспортні системи» у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті для студентів, які навчаються за спеціальністю 275 – «Транспортні технології».

Зав.кафедрою ТСЛ,
д.т.н., професор



П.Ф. Горбачов

Заст. зав. кафедрою ТСЛ,
к.т.н., доцент



Є.В. Любий

К.т.н., доцент



С.В. Свичинський

ДОДАТОК Е
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРО-
БАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

14. Токмиленко Е.С. Влияние вертикального профиля дороги на затраты энергии при движении на велосипеде / Е.С. Токмиленко, П.Ф. Горбачёв // Містобудування та територіальне планування. – К., КНУБА, 2012. – Вип. 45, в 3 частинах. – ч. 3. – С. 141–145.

15. Горбачёв П.Ф. Модель выбора маршрута велосипедного транспорта с целью минимизации времени в пути / П.Ф. Горбачёв, Е.С. Токмиленко // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету – 2013. – № 61-62. – С. 218–222.

16. Горбачёв П.Ф. Топографическая модель условий движения велосипедного транспорта в центральной части г. Харькова / П.Ф. Горбачёв, Е.С. Токмиленко, С.В. Козлов // Автомобільний транспорт. – Харків – 2014. – Вип. 34. – С. 79-82.

17. Чернишова О.С. Мультиномінальна логіт модель вибору шляху велосипедистами // Автомобільний транспорт. – Харків – 2016. – Вип. – 38. – С. 21-25

18. Чернышева Е.С. Алгоритм автоматизированного микрорайонирования при моделировании транспортных систем // Комунальне господарство міст. – Х.: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. – 2016. – Вип.130. – С. 76-80.

19. Любий Є.В. Транспортне планування міст: сучасні інструменти транспортного моделювання автотранспортних систем / Є.В. Любий, Н.В. Пономарьова, О.С. Чернишова // Комунальне господарство міст. – Х.: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2016. – Вип. 128. – С. 76 – 82.

20. Lissner, S. Cycling Data App Data – An Exploratory Data Analysis of GPS Data in Cycling / S. Lissner, A. Francke, O. Chernyshova, T. Becker. // International Transportation (69) – 2017. – no. 1 – P. 48-52.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

21. Tokmylenko O. New approach to bicycle infrastructure planning. Collection of scientific works. Innovative technologies and perspective in development of transportation, automotive and road construction industries (in foreign languages). – Kharkov. – 2013. – P.120-123

22. Токмиленко Е.С. Планирование велосипедной инфраструктуры для обеспечения безопасности и комфорта движения / Токмиленко Е.С., Горбачев П.Ф. // Матеріали 3-ї міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту і культури дорожнього руху» – Харків: ХНАДУ. – 2013. – С. 196-197

23. Tokmylenko O.S. Methods of bicycle users' survey // Міжнародна конференція молодих вчених Інженерна механіка та транспорт. – Львів: Національний університет «Львівська Політехніка». – 2013. – С.111 - 112

24. Tokmylenko O. Review of the Factors that Affect Motivation to Bicycle / O. Tokmylenko, A. Yakovlev // Integration processes and innovative technologies. Achievements and prospects of engineering sciences (in foreign languages): Collections of Scientific Works. Kharkiv: KhNAHU. – 2014. – issue 3. – P. 102 – 104

25. Горбачов П.Ф. Формування набору альтернатив моделей дискретного вибору шляху прямування велосипедним транспортом / Горбачов П.Ф., Чернишова О.С. // Наукові праці міжнародної науково-практичної конференції «Новітні технології в автомобілебудівництві на транспорті», 15-16 жовтня 2015 р. – Х.: ХНАДУ. – 2015. – С. 68 – 69.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. А.с. Методика визначення привабливості маршрутів велосипедного транспорту / О.С. Чернишова (Україна). – № 66185; зареєстровано 21.06.2016.

Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на:

2. Bicycle Trip Assignment: Energy Consumption as Travel Cost Variable. щорічній конференції Асоціації планувальників штату Джорджія “GPA-2013” (Колумбія, Джорджія, США, 2013). Форма участі – очна.

3. Планирование велосипедной инфраструктуры для обеспечения безопасности и комфорта движения. 3-я міжнародна науково-практична конференція «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту і культури дорожнього руху» (м. Харків, 2013). Форма участі – очна.

4. Формування набору альтернатив моделей дискретного вибору шляху прямування велосипедним транспортом. Науково-практична конференція присвячена 85-річчю заснування ХНАДУ (м. Харків, 2015). Форма участі – очна.

5. Methods of bicycle users' survey. 3-я міжнародна конференція молодих вчених ЕМТ-2013 «Інженерна механіка та транспорт» (Львівська політехніка, м. Львів, 2013 р.). Форма участі – очна.

6. Development of discrete choice models for public transit route system. 3-ій симпозиум Європейської асоціації з досліджень у галузі транспорту «hEART 2014» (м. Лідс, Великобританія, 2014 р.). Форма участі – очна.

7. Визначення попиту на пересування велосипедним транспортом. 79-а науково-технічній та науково-методичній конференції ХНАДУ (м. Харків, 2015 рр.).

8. Методика визначення меж і місткості транспортних районів. 80-а науково-технічній та науково-методичній конференції ХНАДУ (м. Харків, 2016 рр.).

9. Визначення попиту на велорух: методи і рекомендації. 6-а міжнародна науково-практична конференція «Велофорум» (м. Полтава, 2013, рр.).

10. Аналіз концепцій розвитку велосипедного руху в українських містах. 8-а міжнародна науково-практична конференція «Велофорум» (м. Харків, 2016 рр.).

11. Формування маршрутної веломережі за допомогою транспортного моделювання. 9-а міжнародних науково-практичних конференціях «Велофорум» (м. Миколаїв, 2017 рр.).

12. Revealed preference route choice model for cyclists in Kharkiv, Ukraine. Міжнародна велосипедна конференція «Скорочуючи відстань між наукою і практикою» (Мангайм, Німеччина, 2017 р.)

Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась на сумісному науковому семінарі кафедр транспортних технологій, транспортних систем і логістики, а також організації і безпеки дорожнього руху ХНАДУ (м. Харків, 05.10.2018 р.).