

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ЧЕРНИШОВА ОЛЕНА СЕРГІЇВНА

УДК 656.183

ФОРМУВАННЯ МЕРЕЖІ ВЕЛОСИПЕДНОГО ТРАНСПОРТУ В МІСТАХ
З НИЗЬКИМ РІВНЕМ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

Спеціальність 05.22.01 – Транспортні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Горбачов Петро Федорович,
Харківський національний автомобільно-
дорожній університет, завідувач
кафедри транспортних систем і логістики.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Аулін Віктор Васильович
Центральноукраїнський національний
технічний університет, професор кафедри
експлуатації та ремонту машин

кандидат технічних наук,
Могила Ігор Андрійович
Львівське комунальне підприємство
«Львівелектротранс», керівник відділу
розвитку.

Захист відбудеться «20» березня 2019 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.02 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Автореферат розісланий «15» лютого 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.П. Смирнов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. 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 власний 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.

Але на даний момент в Україні не існує загальних рекомендацій або нормативних документів щодо комплексного планування велосипедної мережі, а це призводить до того, що ініціатива розвитку велосипедної мережі досить часто залишається без уваги або реалізовується хаотично та не забезпечує цілісного характеру розвитку систем велосипедного транспорту міст. Це вказує на те, що розробка методичних основ розбудови велосипедної мережі є актуальним напрямком досліджень, результати якого дозволять ефективніше реалізовувати міські цільові програми розвитку велосипедного транспорту та розробляти плани транспортної мережі, які відповідають як вимогам державних будівельних норм, так 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 «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 із Законом України № 1678-VII від 16.09.2014, а також пункту «Забезпечення відкритості, безпеки, життєстійкості і екологічної стійкості міст і населених пунктів» Програми сталого розвитку ООН.

Запропоновані у роботі методики дослідження попиту на пересування велосипедним транспортом та визначення корисності маршрутів велосипедного руху були використані при виконанні науково-дослідної роботи (НДР) «Інтервальна технологія проектування транспортних систем міст та регіонів», № держреєстрації 0115U003268, методика мікрорайонування – в 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 – в 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).

Особистий внесок здобувача. Усі положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто і наведені у роботах [1-13]. 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 [1]; запропоновано математичку модель визначення часу в дорозі при русі на велосипеді з урахуванням впливу топографії [2]; запропоновано методику моделювання топографії вулично-дорожньої мережі за допомогою методів комп'ютерного моделювання геоінформаційних систем [3]; досліджено моделі попиту на велорух [6]; запропоновано методику валідації даних про рух велосипедистів, отриманих за допомогою мобільних додатків та проведено регресійний аналіз результатів дослідження пересувань велосипедом [7]; досліджено фактори, що впливають на вибір шляху руху велосипедиста [9, 11]; проведено практичне застосування алгоритму моделювання альтернатив [12];

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

- щорічній конференції Асоціації планувальників штату Джорджія "GRA-2013" (Колумбія, Джорджія, США, 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-й міжнародній конференції молодих вчених ЕМТ-2013 «Інженерна механіка та транспорт» (Львівська політехніка, м. Львів, 2013 р.);
- 3-му симпозіумі 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету та основні задачі, визначено об'єкт і предмет дослідження, наведено наукову новизну, теоретичне і практичне значення отриманих результатів.

Перший розділ дисертації присвячений аналізу існуючих принципів планування велосипедної інфраструктури, математичних методів моделювання велосипедного транспорту та аналізу критеріїв вибору маршруту руху велосипедиста.

Джерелом інформації для вивчення вказаних питань стали роботи таких дослідників, як Aultman-Hall L., Axhausen K.W., Broach J., Casello J., Dill J., El-Geneidy A.M., Gliebe J., Hankey S., Hood J., Hyodo T., Khan M., Krizek K.J., Landis B., Menghini G., Ortuzar J.D., Parkin J., Prato C., Rybarczyk G., Wilson D.G., Winters M.L., Yang C. та ін.

Взаємодія велосипедного транспорту з автотранспортними потоками є одним з найбільших джерел небезпеки для велосипедиста, тому питання відокремлення конфліктуючих транспортних потоків (VELO, авто та пішохідних) або їхня інтеграція є одним з найактуальніших питань у розвитку велосипедного руху. Створення інтегрованої, послідовної і зв'язної велосипедної мережі є одним з підходів до вирішення питання безпеки велосипедистів.

Планування велосипедної мережі може реалізовуватися графоаналітичним методом, методом теплових карт, за допомогою індексу доступності, індексу придатності велоруку та методами математичного моделювання. Математичні моделі можна умовно поділити на директивні та об'єктивні. Перші оцінюють вподобання велосипедистів на основі опитування, щодо їхньої минулої або потенційної поведінки, останні аналізують маршрути та характеристики шляху велосипедистів на основі спостережень та намагаються описати вплив факторів на вибір маршруту. Останнім часом розповсюдження отримали моделі дискретного вибору шляху на основі виявлених вподобань.

Одним із найважливіших завдань моделей вибору шляху є формування набору параметрів, які впливають на корисність маршруту, та оцінка їх значення.

При цьому дуже мало відомо відносно того, які характеристики зовнішнього середовища впливають на вибір шляху велосипедистами.

У **другому розділі** дисертаційної роботи формалізовано поняття мережі велосипедного транспорту, розроблено принципи її формування, обґрунтовано теоретичні основи формування моделі попиту на велосипедні поїздки, сформовано теоретичну модель визначення оптимальної траси маршруту руху та обґрунтовано методику дослідження фактичного вибору маршруту велосипедистами.

Мережа велосипедного транспорту – це сукупність елементів інфраструктури придатної для безперешкодного пересування на велосипеді. Відповідно до особливостей пересування велосипедом обґрунтовано ключові принципи 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.

Запропонована у даній роботі концепція розвитку мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем його використання базується на дослідженні поведінки і формалізації закономірностей руху існуючих велосипедистів, розробці транспортної моделі з розподілом транспортних кореспонденцій на основі закономірностей вибору шляхів руху велосипедистами та формуванні мережі велошляхів на основі даних такого розподілу. Відповідно до цієї концепції мережа велосипедного транспорту має плануватися з урахуванням потреб користувачів, у послідовності, яка відповідає найбільшому потенційному попиту на велосипедний транспорт.

У містах з низьким рівнем використання велосипедного транспорту формування мережі доцільно проводити 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 першому етапі формується матриця загальних кореспонденцій одним з існуючих методів та визначається базовий розподіл транспортних кореспонденцій всіма видами транспорту.

Транспортне мікрорайонування виконане за спеціально розробленим алгоритмом автоматизованого виділення однорідних територій, який дозволяє враховувати особливості пересування велосипедом. З метою врахування порогу прийняття рішення велосипедиста про дальність поїдки, необхідно використовувати обмеження по розміру транспортного району відповідно до точки вгнутості щільності розподілу поїздок за відстанню.

При плануванні мережі велосипедного транспорту доцільно виходити з потенційно можливого, а не реального попиту. Тому при оцінці попиту на велосипедний транспорт (1) доцільно формувати матриці велосипедних кореспонденцій на основі загальних кореспонденцій в межах раціональності використання велосипеда для здійснення поїздки.

$$d_{ij} = D_{ij} \cdot k_{ij}, k_{ij} = w_n/w_{ij}, w_n = f(l_n), w_{ij} = f(l_{ij}), \quad (1)$$

де d_{ij} – кількість велосипедних кореспонденцій з району i в район j ; D_{ij} – кількість загальних кореспонденцій з району i в район j ; k_{ij} – коефіцієнт приведення до велосипедних кореспонденцій; w_{ij} – імовірність реалізації кореспонденцій, отримана на основі теоретичної моделі; w_n – імовірність реалізації кореспонденцій на основі емпірично отриманої функції розподілу; l_n – дальність велосипедної поїздки, км; l_{ij} – відстань між транспортними районами (ТР), км.

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.

Раціональність 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 мультиномінальною 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. Для оцінки значущості кожного з показників необхідно надати кількісні оцінки факторам, для чого в кожній категорії були виділені параметри шляху руху, які можуть бути виражені кількісно, а саме:

- безпека: швидкість моторизованого транспорту, кількість лівих поворотів; загальна кількість поворотів, щільність вуличного паркування, частка шляху, що проходить по фізично відокремленій інфраструктурі;
- складність маршруту: протяжність, фізичне навантаження;
- комфорт: кількість регульованих перехресть.

Для формалізації показника фізичного навантаження (накопиченого зусилля) необхідно розглянути, як відбувається процес приведення велосипеда в

рух за допомогою фізичної сили людини. Потужність, необхідна для руху на велосипеді, є функцією опору повітря, опору коченню, і схилових сил опору і може виражатися рівнянням¹:

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

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 – сума маси велосипедиста і велосипеда, кг; g – прискорення сили тяжіння, м/с²; s – поздовжній ухил дороги, %; C_R – коефіцієнт опору коченню.

Швидкість зустрічного вітру залежить від абсолютної швидкості та напрямку вітру, швидкості та положення велосипеда по відношенню до 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. Аеродинамічний фактор опору, залежить від розміру велосипедиста, його положення на велосипеді, одягу, температури, тиску і вологості повітря. Для міського велосипедиста, що подорожує в не рекреаційних цілях, їде у вертикальній посадці і не носить спеціалізований одяг, при стандартній щільності повітря на рівні моря і температурі 15° С коефіцієнт аеродинамічного опору дорівнює приблизно 0,387 і може бути прийнятий константою. З урахуванням цього вираз (2) може бути спрощений до вигляду (3):

$$N_w = [K_A V^2 + mg(s + C_R)]V. \quad (3)$$

Можна припустити, що в нормальних умовах велосипедист, який здійснює поїздку з не рекреаційною метою, буде рухатися у транспортному потоці з фіксованою швидкістю, досягнення якої не вимагає надмірних зусиль. При цьому припущення про мету поїздки є важливим, оскільки при здійсненні поїздки з рекреаційною або спортивною метою ця умова не буде виконуватися через відсутність обмеження у часі або бажання велосипедиста збільшити фізичне навантаження під час руху. Якщо припустити, що

$$N_w = N_{max}, \quad (4)$$

то (5) може бути представлено, як

$$V_i = \frac{N_{max}}{K_A V^2 + mg(s_i + C_R) \frac{1}{C_{K+1}}}. \quad (5)$$

Час проходження ділянки на основі отриманої швидкості розраховується за допомогою загальновідомої залежності

¹Wilson, D.G./ Bicycling science. D.G. Wilson, J. Papadopoulos, F.R. Whitt: MIT press, 2004. – 447 p.

$$t_i = \frac{l_i}{v_i}, \quad (6)$$

де t_i – час проходження сегменту мережі, с; l_i – довжина сегменту мережі, м.

Тоді фізична робота велосипедиста на ділянці мережі визначається як:

$$w_{in} = N_{in} \cdot t_i. \quad (7)$$

А сумарна фізична робота або, іншими словами, накопичене зусилля, на маршруті дорівнює:

$$W_j = \sum w_{in}. \quad (8)$$

З метою збору фактичної інформації про шлях пересування запропоновано використовувати дані геопозиціонування маршрута зібрані за допомогою GPS трекінгу руху велосипедистів. Це надає найбільш точні дані про маршрут пересування велосипедиста порівняно з методами анкетування чи ментальних карт.

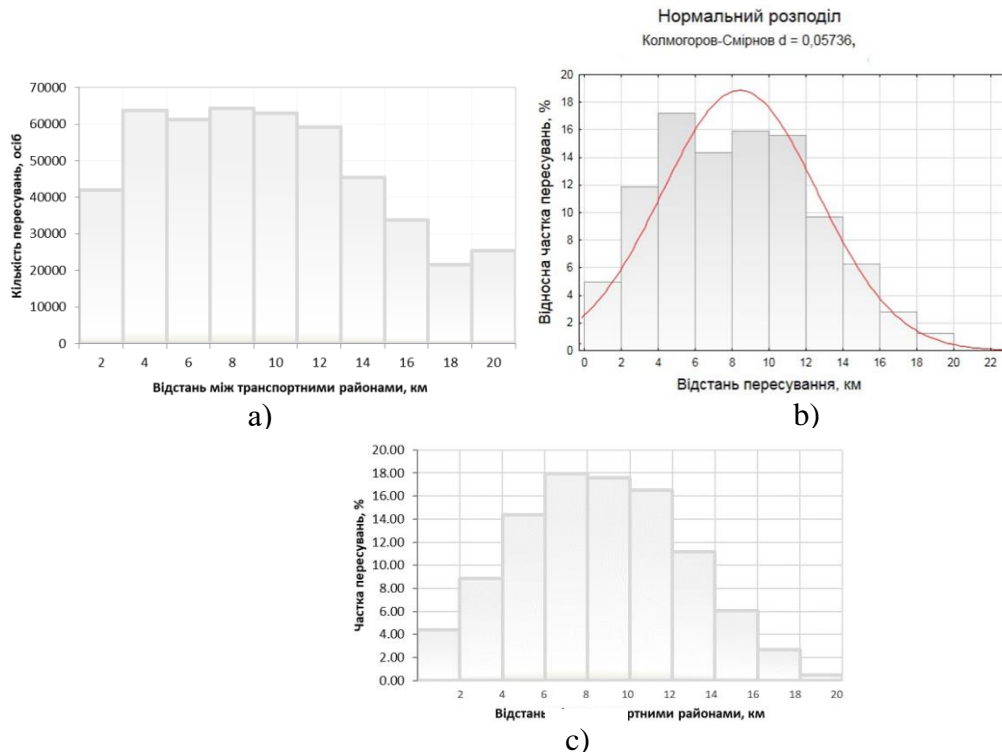
Формування набору альтернатив є найбільш складною задачею при дослідженні ставлення велосипедистів до параметрів шляху прямування. Це обумовлене значним впливом альтернатив на результати оцінки параметрів, великою кількістю альтернативних шляхів у реальному житті та складністю врахування методу прийняття велосипедистом конкретних рішень при поїздках. Для формування набору альтернатив було використано метод штрафування шляху. Такий метод дозволяє побудувати мережу достатньо реалістичних альтернатив, оскільки елементи мережі можуть використовуватися повторно.

У третьому розділі роботи проведено експериментальні дослідження руху велосипедистів в м. Харків на основі математичного моделювання шляху. Розподіл велосипедних поїздок по відстані дозволив встановити, що максимальний розмір транспортного району має становити 2 км у діаметрі або 4 км² за площею. У результаті реалізації алгоритму мікрорайонування було отримано 233 ТР, а після групування надто малих транспортних районів (діаметр яких менший за 500 м), було отримано 140 ТР.

Для формування місткостей транспортних районів було розроблено відповідну методичку, застосування якої передбачає використання даних про кількість виборців, що реалізована у програмному забезпеченні ArcGIS та складається з восьми етапів: визначення меж транспортних районів; геокодування адрес будівель з прив'язкою до виборчих діляниць; визначення центральних координат виборчої діляниці; присвоєння значення кількості населення, що проживає на території; інтерполяція даних для визначення кількості населення старше 14 років; акумуляція даних про кількість населення для кожного транспортного району; визначення центроїдів транспортних районів (центральні координати); просторова прив'язка населення до транспортного району.

Для отримання матриці велосипедних кореспонденцій було розраховано матрицю загальних кореспонденцій на основі гравітаційної моделі та проведено

процедуру трансформації загальної матриці кореспонденцій у відповідності до функції розподілу за відстанню, притаманної для велосипедних поїздок (рис. 1). Щільність розподілу відстані велосипедних кореспонденцій була отримана за результатами опитування (обсяг вибірки 320 осіб).



a - базовий розподіл транспортних кореспонденцій; b - щільність розподілу відстані велосипедних поїздок; c - щільність розподілу матриці велосипедних кореспонденцій.

Рисунок 1 – Функції розподілу відстаней поїздок

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 першому кроці алгоритм шукає найкоротший маршрут і генерує значення параметра найкоротшого маршруту. Потім довжини сегментів, що було використано на першому етапі, збільшуються вдвоє та повторюється пошук найкоротшої відстані. За результатами другого кроку формується друга альтернатива. На третьому етапі створюється альтернатива за алгоритмом пошуку найкоротшої відстані за умови, що довжини сегментів мережі, що задіяні в першому і другому етапі, мають штрафний коефіцієнт 2. Процедура повторюється доти, доки для кожної пари відправлення і прибуття не сформовано 5 варіантів шляху. У результаті було згенеровано альтернативи, які істотно відрізняються одна від одної, що задовольняє вимогам мультиномінальної логіт моделі.

З метою виконання експериментальних досліджень була розроблена методика проведення обстеження маршруту руху велосипедистів на основі методу оцінки виявлених вподобань. Згідно з цією методикою, масив даних про маршрути пересування велосипедистів формується на основі GPS-треків, отриманих за допомогою мобільних додатків. Кожен респондент може надати тільки один

маршрут ділової поїздки. Поїздки, які починаються та закінчуються в одному і тому ж місці, або середня швидкість руху яких вище 25 км/год., не вважаються діловими. Далі кожен GPS-трек геокодується за допомогою спеціального автоматизованого алгоритму. На першому етапі формується файл точок, що відповідають координатам початку і закінчення маршруту; на другому етапі набір GPS координат для кожного маршруту в форматі GPX конвертується у файл форми, в полі якого створюється унікальна назва маршруту; на третьому етапі всі маршрути об'єднуються в єдиний файл форми, який є базою для формування альтернатив з числовими значеннями параметрів шляху.

Збір даних через мобільні додатки є привабливим з точки зору доступу до даних, проте репрезентативність цих даних не була досі підтвердженою. 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. Дослідження дозволило отримати хороші статистичні характеристики моделі залежності добового розподілу велосипедних поїздок ($r = 0,86$, $r^2 = 0,73$).

Особливостями руху велосипедного транспорту є те, що мережа, якою може пересуватися велосипед, є значно більш розгалуженою ніж мережа для автомобільного транспорту. Тому при моделюванні можливих шляхів руху велосипедиста (рис. 2) окрім ВДМ, пристосованої для руху автомобільного транспорту (за винятком вулиць і доріг, рух якими є забороненим для велосипедистів), необхідно включати такі елементи мережі, як доріжки, стежки, пішохідні та велосипедні мости та інші елементи.

При формуванні моделі попиту використовувалася ВДМ, створена на основі відкритих даних OpenStreetMap. Місце розташування світлофорів було геокодовано за даними, що надав Департамент транспортної інфраструктури Харківської міської ради. Швидкість руху моторизованого транспорту визначалася за трьома категоріями відповідно до послуги зі спостереження за перевантаженням вулиць GoogleMap. Щільність паркування визначалась за методом експертних оцінок. Кількість поворотів (лівих і загальна) визначалася на основі алгоритму навігації розширення «Аналіз мережі» програми ArcGIS і програмного коду мовою Python. Частина шляху, що проходить по фізично відокремленій інфраструктурі, не була включена як параметр через те, що на момент дослідження загальна довжина велосипедної інфраструктури у м. Харків була меншою ніж 2 км. Кут повздовжнього нахилу отримано за допомогою топографічної моделі на основі картографічної зйомки. Визначення величини ухилу проводилося в чотири етапи. На першому етапі були сформовані файл форми вулиць міста Харкова і оцифрована карта горизонталей з висотою перерізу 1 м. На другому етапі визначені місця перетину вулиць з горизонталями. На третьому етапі розрахований кут нахилу ділянки ВДМ. Оскільки при моделюванні ВДМ місця перетину вулиць були розбиті на ділянки, які не збігаються з точкою перетину дороги з горизонталлю, аби зберегти географію ВДМ і визначити середній рівень ухилу було використано залежність (9):

$$s = \frac{h \cdot n}{l} \cdot 100, \quad (9)$$

де s – рівень ухилу, %; h – крок горизонталей, м; l – довжина ділянки ВДМ, м; n – кількість перетинів ВДМ горизонталями, од.

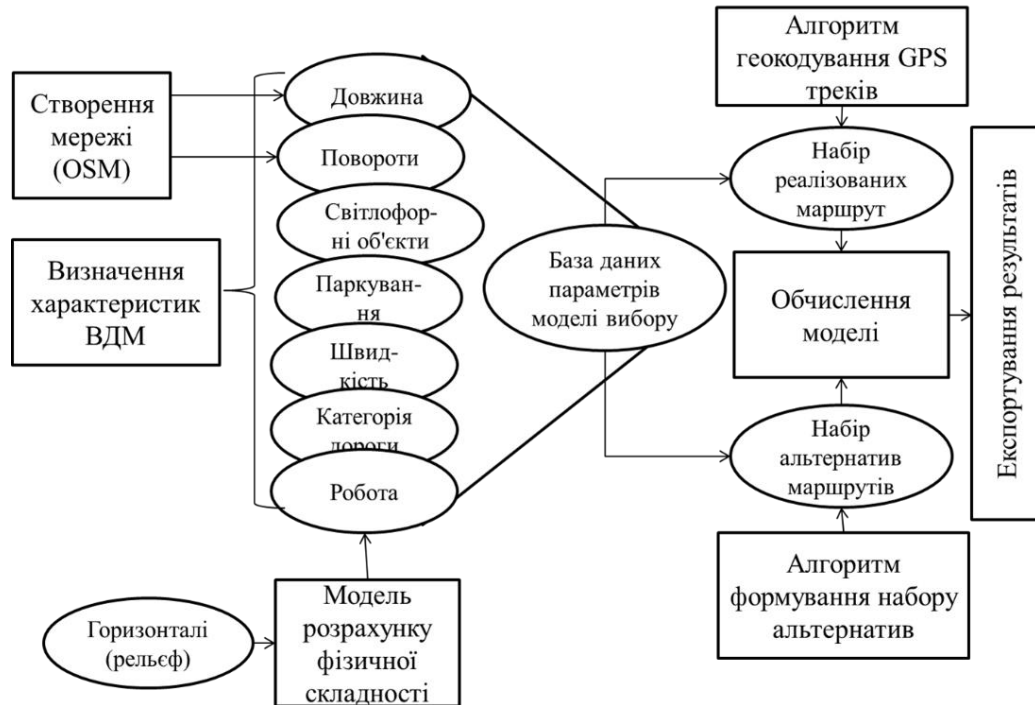


Рисунок 2 – Блок-схема процесу моделювання вибору шляху руху

На останньому етапі було проведено класифікацію вулиць в залежності від величини ухилу у відсотках для візуальної оцінки результатів.

Для розрахунку параметрів визначено математичний вид функції корисності шляху проходження велосипедиста (10).

$$U_{in} = \beta_L \cdot L_{in} + \beta_I \cdot I_{in} + \beta_K \cdot K_{in} + \beta_V \cdot V_{in} + \beta_D \cdot D_{in} + \beta_W \cdot w_{in} + \varepsilon_{in}, \quad (10)$$

де β – коефіцієнт відповідного параметру; L_{in} – загальна довжина i -го маршруту велосипедиста n , км; I_{in} – загальна кількість регульованих перехресть на маршруті, од.; K_{in} – кількість поворотів наліво на маршруті, од.; V_{in} – середньозважена швидкість руху моторизованого транспорту, км/год; D_{in} – середньозважений рівень щільності вуличного паркування, балів; w_{in} – накопичена фізична робота, КДж; ε_{in} – випадкова величина, що розподілена за законом Гумбеля.

Параметри моделі були обчислені за допомогою вільного програмного забезпечення BIOGEME 1.8. Специфікація моделі та функції ймовірності написані мовою програмування Python.

Базова модель показала, що кількість регульованих перехресть є значущим фактором з позитивним знаком. Малоімовірно, щоби велосипедист обирав маршрути, які потребують більше зупинок, тому було висунуто гіпотезу, що велосипедисти вибирають магістральні вулиці, а світлофори є їхнім невід'ємним

елементом. Тому фактор «кількість регульованих перехресть» був заміщений довжиною маршруту, що проходить вулицями міського значення. Також попереднє дослідження показало, що немає істотної різниці між кількістю лівих поворотів та загальною кількістю поворотів. З урахуванням цього, вдосконалена функція корисності (10) отримала наступний вигляд:

$$U'_{in} = \beta_L \cdot L_{in} + \beta_I \cdot MS_{in} + \beta_K \cdot T_{in} + \beta_V \cdot V_{in} + \beta_D \cdot D_{in} + \beta_w \cdot w_{in} + \varepsilon_{in}, \quad (11)$$

де MS_{in} – протяжність частини маршруту, що проходить головними вулицями, км; T_{in} – загальна кількість поворотів на маршруті, од.

Попри очікування, результат розрахунку скорегованої базової моделі показав, що фізична робота є статистично незначущим фактором, таблиця 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку коефіцієнтів скорегованої базової моделі

Показник	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
Фізична робота	0,005	0,015	0,35	0,73
Категорія вулиці	1,36	0,431	3,16	0,00

Це можна пояснити тим, що у розрахунку фізичної роботи велику роль відіграє протяжність маршруту тому виникає суттєва кореляція між цими двома показниками. Для визначення кінцевої математичної моделі, що має найвищі прогностні можливості, було вирішено визначити функції корисності для чотирьох моделей, (1) пошук найкоротшої відстані, (2) фактори якої виявилися значущими в результаті оцінки функції (Відстань-Повороти-Категорія вулиць), (3) фактори якої виявилися значущими за умови виключення протяжності маршруту (Робота-Повороти-Категорія вулиць) та модель (4), що включає всі чотири показники (Відстань-Робота-Повороти-Категорія вулиць). Математичний вигляд функції корисності для моделей представлений у (12-14).

Модель 2 «Відстань-Повороти-Категорія вулиць»:

$$U_{in} = -2,51 \cdot L_{in} + 1,44 \cdot MS_{in} + 0,351 \cdot T_{in} + \varepsilon_{in}. \quad (12)$$

Модель 3 «Робота-Повороти-Категорія вулиць»:

$$U_{in} = 1,02 \cdot MS_{in} + 0,072 \cdot T_{in} - 0,0186 \cdot W_{in} + \varepsilon_{in}. \quad (13)$$

Модель 4 «Відстань-Робота-Повороти-Категорія вулиць»

$$U_{in} = -2,53 \cdot L_{in} + 1,36 \cdot MS_{in} + 0,333 \cdot T_{in} + 0,0068 \cdot W_{in} + \varepsilon_{in}. \quad (14)$$

У результаті отримано функції корисності та ймовірність вибору маршруту, що дозволило реалізувати четвертий етап транспортної моделі – розподіл по мережі. Він був реалізований із застосуванням всіх трьох вищенаведених моделей з подальшим аналізом отриманих результатів.

У четвертому розділі роботи фіналізовано алгоритм формування мережі велосипедного транспорту, представлено практичне застосування запропонованої методики для формування концепції мережі велосипедного транспорту для м. Харків та надано рекомендації щодо їх використання на практиці. На першому етапі було проведено прогнозування потенційних потоків велосипедного транспорту на основі чотирьох сценаріїв. Перший сценарій включає типовий підхід до планування велосипедної інфраструктури, а саме вирішення задачі розподілу потоків за найкоротшою відстанню, а три інші сценарії засновані на моделях (12) – (14).

За результатами розрахунків було проведено валідацію моделей велосипедних потоків на основі підрахунку велосипедистів у 23 точках. Найбільш точною виявилася четверта модель (коефіцієнт кореляції без калібрування дорівнює 0,63), що підтверджує гіпотезу, що вибір маршруту руху велосипедистом не є лінійною функцією відстані, а залежить від сукупності характеристик ВДМ.

Результати розрахунків велопотоків (рис. 3) стали основою для визначення ієрархії та пріоритетності розбудови велоінфраструктури. Але при їх використанні слід враховувати, що вони розраховані за умови повної відсутності велоінфраструктури, тому створення елементів веломережі буде призводити до зміни розподілу велопотоків по транспортній мережі міста. Пріоритизація розвитку велосипедної мережі у місті має забезпечувати можливість поступового створення велоінфраструктури з одночасним виконанням принципу зв'язності веломережі.

Ефективність впровадження велосипедної мережі запропоновано оцінювати кількістю її потенційних користувачів. Дослідження латентного попиту на використання велосипеда за умови створення інфраструктури показало, що 80 % опитаних хотіли би частіше використовували велосипед ніж вони використовують його зараз, і лише 20 % опитаних не хотіли би використовувати велосипед для поїдок з утилітарною метою, навіть за наявності велосипедної інфраструктури. Для м. Харків 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.

Послідовність створення мережі велосипедного транспорту можна сформулювати як:

1. Формування та визначення ключових параметрів ВДМ;
2. Збір емпіричних даних щодо існуючих маршрутів руху регулярних і нерегулярних велосипедистів в місті;
3. Визначення функції корисності маршруту;
4. Розподіл велосипедних потоків у мережі;
5. Визначення основних коридорів – маршрутів руху;

6. Пріоритизація розбудови мережі та створення плану реалізації

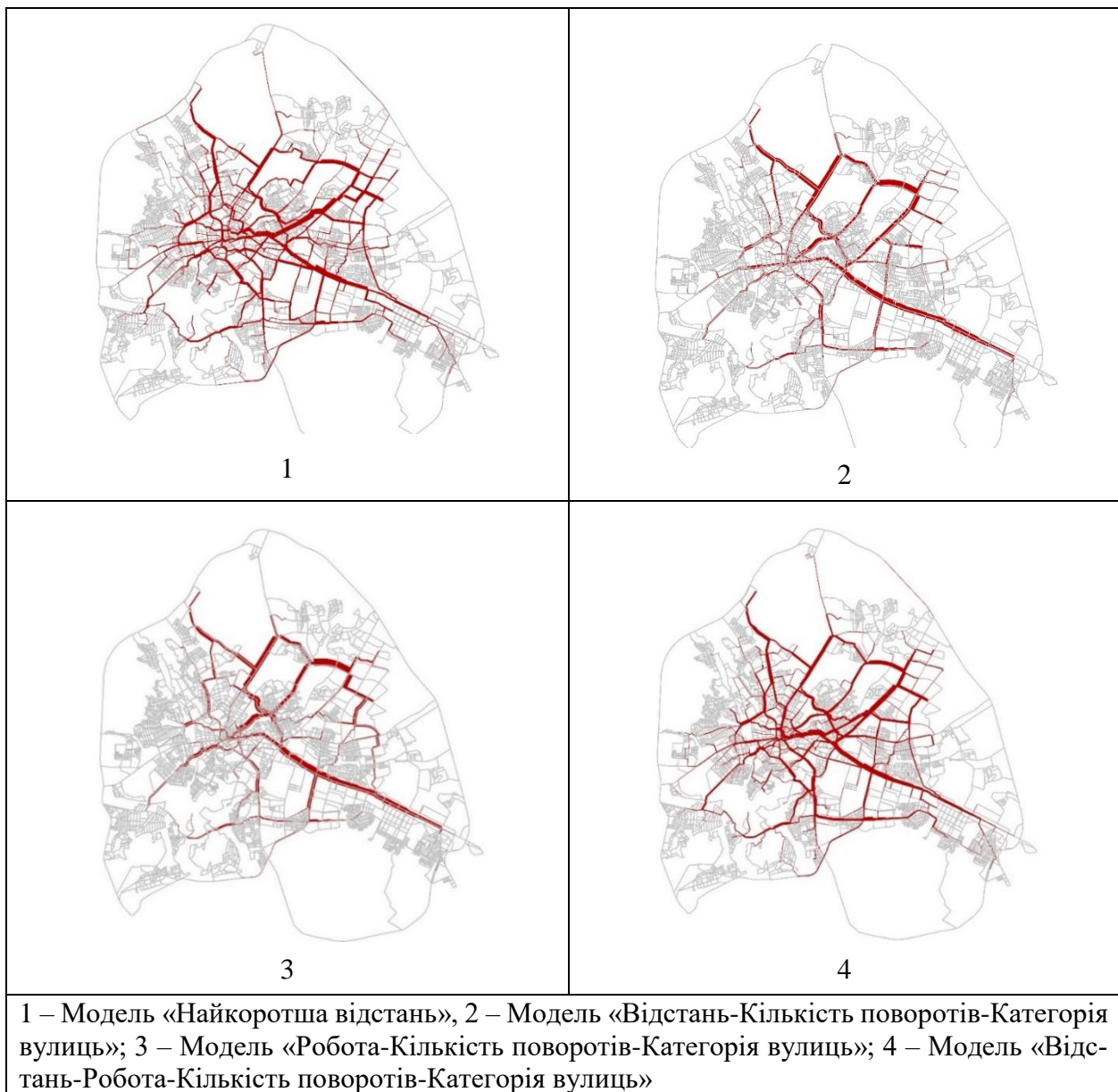


Рисунок 3 – Результати моделювання велосипедних потоків на ВДМ м. Харкова

Така послідовність розбудови велосипедної мережі і впровадження велосипедної інфраструктури була впроваджена при формуванні пріоритетності впровадження мережі велосипедного транспорту для м. Полтави у рамках розробки Концепції розвитку велосипедної інфраструктури м. Полтава на 2016 – 2020 рр. 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 реалізується Німецьким товариством міжнародного співробітництва GIZ.

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 придатної з яких є чотирьохкрокова транспортна модель. В 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 сформувати 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 НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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, комфорту 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.

АНОТАЦІЯ

Чернишова О.С. Формування мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем його використання. – 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.

У роботі розглянуто проблему планування мережі велосипедного транспорту в містах з низькою часткою велосипедних поїздок, розроблено принципи формування мережі маршрутів і запропоновано використання підходу до планування мережі велосипедного транспорту на основі результатів моделювання. Представлено підхід до трансформації матриці загальних кореспонденцій в матрицю велосипедних кореспонденцій, що розподілені за нормальним законом. Запропоновано визначати ймовірність обрання шляху пересування велосипедиста на основі функції корисності, отриманої з використанням моделей дискретного вибору. Для отримання зазначеної функції в роботі розроблено нові способи отримання емпіричних даних для оцінки корисності шляху. Проведено оцінку ефекту від реалізації концепції на основі кількості потенційних користувачів. Для міста Харкова латентний попит на велоінфраструктуру становить 518,1 тис. осіб при повному покритті міста велосипедною мережею і 149,5 тис. осіб при впровадженні першого етапу мережі представленому в роботі.

Результати дослідження мають практичне значення, що підтверджено актами впровадження розроблених у роботі методик при формуванні Концепції розвитку велосипедного руху і розбудови велосипедної інфраструктури м. Харкова, 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.

АННОТАЦИЯ

Чернышева Е.С. Формирование сети велосипедного транспорта в городах с низким уровнем его использования. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.01 «Транспортные системы» (275 – Транспортные технологии (на автомобильном транспорте)). – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2019.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной задачи формирования сети велосипедного транспорта, основанной на модели выбора пути следования велосипедистами при перемещении в транспортной сети в городах с низким уровнем использования велосипедного транспорта и неразвитой велосипедной сетью.

В работе рассмотрена проблема планирования сети велосипедного транспорта в городах с низкой долей велосипедных поездок, разработаны принципы формирования сети велосипедных маршрутов и предложено использование подхода к планированию сети велосипедного транспорта на основе результатов моделирования. Представлено подход к трансформации матрицы общих корреспонденций в матрицу велосипедных корреспонденций, которые распределены по нормальному закону. Предложено определять вероятность выбора пути передвижения велосипедистов на основе функции полезности, рассчитанной с использованием моделей дискретного выбора. Для получения указанной функции в работе предложено новые способы получения эмпирических данных для оценки привлекательности. Проведено оценку эффекта от реализации концепции на основе количества потенциальных пользователей. Для города Харькова латентный спрос на велоинфраструктуру составил 518,1 тыс. человек при полном покрытии города велосипедной инфраструктурой и 149,5 тыс. человек при внедрении первого этапа, представленного в работе.

Результаты исследования имеют практическое значение, которое подтверждено актами внедрения разработанных в работе методик при формировании Концепции велосипедного движения и обустройства велосипедной инфраструктуры г. Харькова, Концепции развития велосипедной инфраструктуры г. Полтава на 2016 – 2020 гг. и Плана устойчивой мобильности г. Житомир.

Ключевые слова: велосипед, сеть велосипедного транспорта, модель выбора пути передвижения, маршрут, вероятность выбора, полезность пути, моделирование.

ABSTRACT

Chernyshova O. 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.

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. The study of the distribution function for the city of Kharkiv showed that the trips are distributed normally.

The theoretical model for route choice based on multinomial logit model was used to estimate parameters of route utility function. The considered parameters considered are route length, number of turns and left turns, parking density, number of traffic lights, road category, traffic flow speed, and physical effort required to cycle. 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. The empirical data about selected routes were collected by mobile app, and five route alternatives were generated for each observed route 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).

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.

