

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

КУЗЬКІН ОЛЕКСІЙ ФЕЛІКСОВИЧ

УДК 656.072

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОРГАНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСІВ
В СИСТЕМАХ МІСЬКИХ МАСОВИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ**

05.22.01 – транспортні системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Бабушкін Геннадій Федорович,
Національний університет «Запорізька
політехніка», професор кафедри транспортних
технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Нагорний Євген Васильович,
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет, завідувач кафедри транспортних
технологій;

доктор технічних наук, професор
Мороз Микола Миколайович,
Кременчуцький національний університет імені
Михайла Остроградського, завідувач кафедри
транспортних технологій;

доктор технічних наук, доцент
Гюльєв Нізамі Уруджевич,
Харківський національний університет міського
господарства імені О. М. Бекетова, професор
кафедри транспортних систем і логістики.

Захист відбудеться «14» лютого 2020 р. об 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.089.03 у Харківському національному університеті міського господарства імені О. М. Бекетова за адресою: 61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова за адресою: 61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17.

Автореферат розісланий «13» січня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Д. П. Понкратов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Міський масовий громадський транспорт є невід'ємним складником інфраструктури сучасного міста та засобом забезпечення мобільності його мешканців. Він забезпечує доступ до виконання економічних функцій й соціальних потреб всім без виключення прошаркам населення, у тому числі й тим, які з тих чи інших причин не хочуть або не можуть мати індивідуального транспортного засобу чи не мають фізичної можливості або права керувати ним.

Зростання рівня автомобілізації є загальносвітовою тенденцією та Україна тут не є виключенням. Негативними наслідками автомобілізації, особливо у великих містах, є перевантаження міських магістралей рухом автомобільного транспорту, зниження швидкості сполучення, утворення транспортних заторів, зменшення частки міського простору для пішохідного руху, суттєве погіршення стану повітряного басейну міст шкідливими викидами відпрацьованих газів автомобільних двигунів.

Одним з шляхів попередження та подолання транспортних проблем, пов'язаних з високим рівнем автомобілізації у містах, є збільшення частки пересувань у місті з використанням міського масового громадського транспорту. Залучення власників автомобілів до користування ним можливе тільки за умови надання останнім рівня якості обслуговування та вартісних витрат принаймні не гірших у порівнянні з поїздкою на власному транспортному засобі. Якість надання транспортних послуг пасажиром, у свою чергу, безпосередньо залежить від належного рівня організації транспортних процесів у транспортній пасажирській системі міста. Вкрай необхідним є широке застосування методів математичного та економіко-математичного моделювання, що робить можливим вироблення оптимальних або близьких до них планових та управлінських рішень в умовах значної невизначеності та великої розмірності масивів даних, що притаманні процесам функціонування транспортної пасажирської системи міста. Виходячи з цього, розробка ефективних методів, моделей і алгоритмів організації транспортних процесів у транспортних пасажирських системах міст є актуальною проблемою сьогодення в Україні та світі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка» в рамках завдань «Транспортної стратегії України на період до 2020 р.» (схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р. № 2174-р), Програми розвитку автомобільного транспорту в Запорізькій області на 2013–2017 роки (затвердженої рішенням Запорізької обласної ради від 22.11.2012 р. № 12), Програми розвитку та вдосконалення міського пасажирського транспорту у місті Запоріжжя на 2017–2019 роки (затвердженої рішенням

Запорізької міської ради від 25.01.2017 р. № 36) та науково-дослідних робіт: ДБ № 02619 «Удосконалення процесів управління регіональними та міськими системами вантажних і пасажирських перевезень» (кафедральний бюджет, 2009–2012 роки, номер державної реєстрації 0109U007820); ДБ № 02012 «Розробка методів удосконалення міських та промислових транспортних систем» (кафедральний бюджет, 2012–2015 роки, номер державної реєстрації 0112U005344); № 2037 «Комплексне обстеження пасажиропотоків на маршрутах міського пасажирського транспорту загального користування в місті Запоріжжі» (номер державної реєстрації 0117U004758).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності транспортних процесів в системах міських масових пасажирських перевезень. Для досягнення поставленої мети у роботі були сформульовані та вирішені такі завдання дослідження:

– проаналізувати та узагальнити склад завдань з організації транспортних процесів пасажирських перевезень у транспортній пасажирській системі міста та теоретичних підходів до їх рішення із застосуванням методів математичного та економіко-математичного моделювання;

– розробити науковий підхід до формалізації маршрутних мереж громадського транспорту та визначити в його рамках основні показники, що впливають на ефективність функціонування транспортної пасажирської системи міста;

– встановити характер і ступінь впливу рівня розвитку маршрутної мережі громадського транспорту на транспортну рухливість населення на міському пасажирському транспорті та результативні показники пасажирських перевезень;

– розробити науковий підхід до розрахунку матриці міжрайонних пасажирських кореспонденцій у транспортній пасажирській системі міста на основі методів гравітаційного моделювання з використанням функції тяжіння, параметри якої визначаються на підставі характеристик маршрутної мережі та показників пасажирських перевезень;

– розробити теоретичні основи моделювання та оцінювання окремих складників тривалості обслуговування пасажирів у транспортній пасажирській системі міста та методи й алгоритми їх розрахунку;

– розробити науковий підхід та моделі визначення планової тривалості рейсу та оборотного рейсу пасажирського маршрутного транспортного засобу на міському маршруті з урахуванням інтересів транспортного оператора та пасажирів;

– реалізувати розроблені методи, моделі та алгоритми в умовах транспортної пасажирської системи міста засобами комп'ютерних інформаційних систем та технологій, виконати їх практичну апробацію та визначити їх ефективність.

Об'єктом дослідження є процеси масових пасажирських перевезень в транспортних системах міст.

Предметом дослідження є теоретичні основи організації транспортних процесів у системах міських масових пасажирських перевезень.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у роботі завдань використані методи теорії графів і теорії комплексних мереж для формалізації міської маршрутної системи та показників, що визначають її розвиток; методи кореляційно-регресійного аналізу – для встановлення ступеня і характеру впливу показників розвитку маршрутних мереж на результативні показники пасажирських перевезень у транспортній пасажирській системі міста; методи теорії міських пасажирських перевезень – при розробці моделей пішохідної доступності зупинок громадського транспорту і моделюванні матриці міжрайонних пасажирських кореспонденцій у містах; методи теорії імовірностей, математичної статистики, статистичного моделювання та стохастичної оптимізації – для оцінки складників тривалості обслуговування пасажирів у транспортній пасажирській системі міста, оптимізації планової тривалості виконання рейсу та оборотного рейсу на міських маршрутах; методи комбінаторної оптимізації – при розробці алгоритмів пошуку найкоротших шляхів пересування пасажирів у міських маршрутних мережах громадського транспорту.

Наукова новизна отриманих результатів. Методи, моделі та алгоритми, що відбивають розвиток теоретичних основ організації транспортних процесів у системах міських масових пасажирських перевезень, які розроблені у процесі виконання дисертації та визначають її наукову новизну, полягають у наступному.

Вперше:

– розроблено науковий підхід до формування маршрутних мереж міського масового громадського транспорту на основі використання методів і положень теорії графів, який відрізняється від існуючих врахуванням конфігураційних особливостей проходження трас маршрутів через зупинки та дозволяє реалізувати принципи математичної оптимізації при їх проектуванні, чим забезпечує скорочення можливих втрат при організації транспортного процесу;

– розроблена методологія оцінювання тривалості очікування пасажирів посадку у транспортні засоби міського масового громадського транспорту на зупинках при високій частоті руху, яка враховує можливість прибуття пасажирських транспортних засобів групами та забезпечує врахування нестационарного та стохастичного характеру формування потоків пасажирів на зупинкових пунктах та нерегулярність руху маршрутного пасажирського транспорту, що є характерним для схем з надмірним накладенням маршрутів;

– сформована концепція організації транспортних процесів на міському масовому громадському транспорті, яка ґрунтується на представленні

оцінювання їх ефективності через сукупність техніко-економічних параметрів, які визначаються плановою тривалістю рейсу, що, на відміну від існуючих, дозволило в межах наявної маршрутної мережі забезпечити скорочення потреби у рухомому складі та одночасно підвищити рівень транспортного обслуговування пасажирів.

Удосконалені та набули подальшого розвитку:

- теоретичні основи оцінки рівня розвитку маршрутних мереж громадського транспорту, які передбачають їх варіантну формалізацію у вигляді графів та їх аналіз з позицій теорії складних мереж і, на відміну від існуючих, встановлюють ступінь і характер впливу топологічних характеристик моделей маршрутних мереж на величини транспортної рухливості населення та результативні показники пасажирських перевезень у транспортній пасажирській системі міста;

- метод гравітаційного моделювання елементів матриці міжрайонних пасажирських кореспонденцій у містах, який, на відміну від існуючих, передбачає використання трикутного розподілу Сімпсона в якості функції тяжіння між транспортними районами з визначенням його параметрів на підставі характеристик транспортної мережі та показників пасажирських перевезень;

- моделі оцінки витрат часу пасажирів на піший підхід до зупинки громадського транспорту, що, на відміну від існуючих, враховують геометричну конфігурацію зони пішої доступності зупинки, яка формується з урахуванням вибору її пасажиром;

- методи та алгоритми пошуку найкоротших за тривалістю шляхів пересування пасажирів у маршрутних мережах з урахуванням пересадок, що базуються на методах комбінаторної оптимізації та, на відміну від існуючих, дозволяють суттєво скоротити простір пошуку рішення та врахувати можливі додаткові умови, що висуюються до шуканих шляхів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання результатів дисертаційного дослідження в умовах практичної діяльності організаторів регулярних перевезень у містах з метою підвищення ефективності функціонування їх транспортних пасажирських систем, а саме:

- моделі впливу показників розвитку маршрутної мережі громадського транспорту на обсяги пасажирських перевезень та техніко-економічні показники його роботи дозволяють виконувати прогнозування їх змінювання при рішенні завдань з удосконалення та оптимізації міських маршрутних систем масового громадського транспорту;

- методи, моделі та алгоритми визначення тривалості обслуговування пасажирів у транспортній пасажирській системі міста та його складників дають можливість оцінювати транспортну доступність об'єктів міської інфраструктури;

– методи моделювання елементів матриці міжрайонних пасажирських кореспонденцій дають змогу визначати основні укрупнені показники пасажирських перевезень у місті та обґрунтовувати варіанти формування та призначення діаметральних маршрутів міського громадського транспорту;

– оптимізаційний підхід до визначення планової тривалості рейсу та оборотного рейсу на міському маршруті робить можливим визначення необхідної кількості рухомого складу та складення розкладів руху пасажирського транспорту з урахуванням інтересів транспортного оператора і пасажирів;

– комплекс програмного забезпечення у вигляді інформаційно-аналітичної системи та її окремих програмних модулів, що реалізують розроблені у дисертаційній роботі моделі, методи та алгоритми мовами програмування C++ та Python, у сукупності дозволяють підвищити рівень організації транспортних процесів перевезень пасажирів у транспортній пасажирській системі міста в умовах автоматизованого планування й управління цими процесами.

Наукові положення та результати досліджень прийняті до впровадження та впроваджені в практичній діяльності управління з питань транспортного забезпечення та зв'язку Запорізької міської ради, Запорізького комунального підприємства міського електричного транспорту ЗКПМЕТ «Запоріжелектротранс», в навчальному процесі кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка», що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. За темою дисертаційної роботи опубліковано 63 друковані праці, з яких одна колективна монографія, 25 статей у фахових виданнях України (з них 12 одноосібних), в тому числі 5 публікацій у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз даних (з них 2 публікації індексовані у міжнародній наукометричній базі Scopus), одна стаття у збірнику наукових праць, тези 31 доповіді на наукових та науково-практичних конференціях, два свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір та три звіти з науково-дослідних робіт, що мають державну реєстрацію.

Сформульовані у дисертаційній роботі наукові положення, висновки та рекомендації, що виносяться на захист, отримані автором особисто. Внесок здобувача у наукових працях, опублікованих у співавторстві, полягає у наступному: сформовано вимоги до формування інформаційного комплексу вихідних статистичних ознак при дослідженні транспортних процесів на пасажирському транспорті [1]; встановлено аналітичні залежності для оцінки тривалості підходу пасажирів до зупинки з урахуванням геометричної форми зони пішохідної доступності [7]; досліджено бажану та фактичну тривалість очікування пасажирів на зупинці в залежності від інтервалу руху пасажирського транспорту на маршруті [8]; розроблено метод оцінки тривалості очікування пасажирів на зупинці за допомогою неперервного наближення для

нестационарних процесів їх надходження та відправлення [10]; сформульовані вимоги до критеріїв якості пасажирських перевезень та послідовність встановлення рівня і вдосконалення якості надання транспортних послуг на міському громадському транспорті [11, 29]; запропоновано коефіцієнт, що враховує додаткові витрати часу пасажира на очікування транспорту на зупинці, пов'язані з відмовами у посадці через переповнення салону транспортних засобів, та встановлені його значення в залежності від нерівномірності прибуття транспорту, наповненості останнього та процесу пасажироутворення на зупинці методом імітаційного моделювання [12]; досліджено інтенсивності руху маршрутних транспортних засобів на найбільш завантажених перехрестях міста Запоріжжя та розраховано їх внесок у забруднення повітряного басейну міста [13]; виконано статистичний аналіз та розраховано показники розвитку маршрутної мережі громадського транспорту міста Запоріжжя [16, 58]; досліджені статистичні показники топологічної структури маршрутних мереж громадського транспорту у містах Запоріжжя та Кривий Ріг, встановлені розподіли степенів вершин мереж та довжини найкоротших шляхів у них [17]; проаналізовано центральність посередництва вершин і ребер графів маршрутних мереж громадського транспорту міст Запоріжжя, Кривого Рогу та Одеси, встановлено закони та параметри їх розподілу [18]; виконано змістовний порівняльний аналіз розвитку маршрутних мереж громадського транспорту великих міст України на підставі положень теорії складних мереж [19, 35]; розроблено загальний підхід і процедуру управління транспортним процесом на підставі встановлення стаціонарності її складників [21]; розроблено метод формалізованого представлення зупинок міського громадського транспорту вершинами графа маршрутної мережі на підставі коефіцієнта суміщення зон пішохідної доступності зупинок [23, 36]; досліджено і встановлено характер та ступінь кореляційного зв'язку між тривалістю поїздки пасажира на маршрутному таксі та факторами, що впливають на неї [24]; встановлено вимоги до складу та структури бази даних інформаційної комп'ютерної системи транспортної пасажирської системи міста [27]; розроблено структуру і виконано програмну реалізацію дискретно-подієвої імітаційної моделі функціонування зупинки громадського транспорту [30]; встановлено показники розвитку маршрутної мережі громадського транспорту Заводського району міста Запоріжжя [33]; сформульовано основні функції програмного комплексу для автоматизації обробки даних, отриманих за результатами обстеження пасажирських потоків на міському громадському транспорті [34]; встановлено закони розподілу випадкової величини швидкості сполучення на міських маршрутах, що працюють у різних режимах руху [46]; виконано аналіз існуючого стану маршрутної мережі громадського транспорту міста Запоріжжя [48]; виконано статистичний та змістовний аналіз змінюваності середньої відстані поїздки пасажира протягом доби на міських маршрутах міста

Запоріжжя [56]; розраховано витрати часу пасажирів на очікування транспорту в умовах некоординованих та координованих розкладів руху на міських маршрутах, що мають спільну ділянку траси [57].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи та результати наукових досліджень і розробок доповідались, обговорювались і схвалені на: X Міжнародній науково-технічній конференції «Автомобільний транспорт: проблеми і перспективи» (Україна, м. Севастополь, 17–22 вересня 2007 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Логістичні проблеми управління транспортним комплексом» (Україна, м. Донецьк, 1–4 квітня 2009 р.); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Автомобільний транспорт: проблеми і перспективи» (Україна, м. Севастополь, 14–19 вересня 2009 р.); II–V Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (Україна, м. Вінниця, 19–20 жовтня 2009 р.; м. Житомир, 25–27 жовтня 2010 р.; м. Вінниця, 24–26 жовтня 2011 р.; м. Житомир, 22–24 жовтня 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні тенденції розвитку машинобудування і транспорту» (Україна, м. Кременчук, 3–5 листопада 2009 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Логістика промислових регіонів» (Україна, м. Донецьк – м. Святогірськ, 6–9 квітня 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Транспортні проблеми найзначніших міст» (Україна, м. Харків, 12–16 березня 2012 р.); I, III та IV Міжнародних науково-практичних конференціях «Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей» (Україна, м. Луцьк, 30 травня – 3 червня 2012 р.; 29 травня – 1 червня 2014 р.; 6–10 червня 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Міські і регіональні транспортні проблеми» (м. Харків, 17–19 листопада 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми організації авіаційних перевезень і застосування авіації в галузях економіки» (м. Київ, 24 листопада 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні методики, інновації та досвід практичного застосування у сфері технічних наук» (м. Люблін, Республіка Польща, 27–28 грудня 2017 р.); I та II Регіональних науково-практичних конференціях «Транспортні системи та технології: проблеми та перспективи розвитку» (м. Запоріжжя, Україна, 12 квітня 2018 р., 12 квітня 2019 р.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Транспорт і логістика: проблеми та рішення» (м. Одеса, Україна, 23–25 травня 2018 р.); III Всеукраїнській науково-теоретичній конференції «Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв’язання» (м. Львів, Україна, 28–30 березня 2019 р.); LXXV Науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, присвяченій 75-річчю з дня заснування університету (м. Київ, Національний транспортний університет, 13–17 травня 2019 р.); п’ятнадцятій

міжнародній науково-практичній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (м. Харків, 6–9 червня 2019 р.); науково-практичних конференціях «Тиждень науки ЗНТУ» (Україна, м. Запоріжжя, 2006–2019 р.).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел та семи додатків. Загальний обсяг дисертації складає 414 сторінок, у тому числі обсяг основного тексту 303 сторінки. Робота ілюстрована 60 рисунками та включає 56 таблиць. Перелік використаних джерел складається з 278 найменувань на 35 сторінках, додатки розміщено на 92 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір та актуальність теми дисертації, визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано мету й завдання дослідження, визначено новизну та практичну значущість отриманих результатів, зазначено особистий внесок автора, наведено дані щодо апробації результатів роботи, її обсягу та структури.

У **розділі 1 «Системи масових пасажирських перевезень у сучасних містах: теоретичні та практичні аспекти»** проаналізовано сучасний стан розвитку міського маршрутного транспорту загального користування у містах, визначено структуру, склад та зміст завдань організації транспортних процесів міських масових пасажирських перевезень та проведено аналіз існуючих наукових підходів до їх вирішення.

Враховуючи важливість транспортної пасажирської системи міста (ТПСМ) як однієї з підсистем життєзабезпечення сучасного міста, забезпечення мобільності його мешканців та реалізації їх конституційних прав, питанням удосконалення процесів організації міських пасажирських перевезень приділялась і приділяється значна увага як вітчизняних, так і закордонних науковців. Слід відзначити значний та вагомий внесок у розвиток різних аспектів теорії міських транспортних систем та міських пасажирських перевезень М. Є. Антошвілі, О. П. Артинова, Г. Ф. Бабушкіна, М. Я. Блінкіна, М. О. Брайловського, В. Вучика (Vukan R. Vuchic), Б. Л. Геронімуса, Н. У. Гюлева, П. Ф. Горбачова, Б. І. Грановського, С. Дерібле (S. Derrible), В. К. Долі, І. С. Єфремова, А. Х. Зільберталя, О. С. Ігнатенка, В. С. Маруніча, М. М. Мороза, А. Муссо (A. Musso), Є. В. Нагорного, І. В. Спіріна, К. фон Фербера (C. von Ferber), А. Цедера (A. Ceder), Ю. А. Шацького, Г. В. Шелейховського, В. Ф. Штанова та інших.

З позицій загальної теорії систем, ТПСМ у великих містах за ступенем складності відноситься до великих систем, має значні розміри та ієрархічну структуру. Їй притаманна висока ступінь невизначеності, великі обсяги

інформаційних, енергетичних, транспортних і пасажирських потоків. У ТПСМ виділяють декілька підсистем (місто, населення, транспорт), кожна з яких є складною та характеризується властивостями членованості та емерджентності, функціонує в умовах суттєвої невизначеності під впливом дій зовнішнього середовища. Складність процесу управління системою пасажирських перевезень у місті задля забезпечення її ефективного функціонування потребує широкого застосування математичних методів та інформаційних технологій у комплексі з апаратними та програмними засобами обчислювальної техніки, технічними засобами контролю та управління.

Багаторівневій структурі комплексу завдань організації транспортних процесів міських пасажирських перевезень (рис. 1) характерне те, що практично всі завдання є взаємопов'язаними одне з одним щодо вихідних даних та результатів рішення, вони носять багатовимірний комбінаторний характер з великою кількістю можливих варіантів розв'язку. Результати, отримані в ході розв'язку завдань кожного з етапів, є вихідними даними для розв'язку завдань наступного етапу послідовності. При цьому, однак, не виключається і наявність зворотного зв'язку – результати розв'язку завдань деякого етапу можуть використовуватись для уточнення та оптимізації рішень, отриманих на попередніх етапах.

Аналіз існуючих наукових підходів до рішення завдань організації транспортних процесів пасажирських перевезень у містах показав, що вони недостатньо враховують вплив складників ТПСМ на результативні показники її функціонування, стохастичність протікання транспортних процесів у ній, у неповній мірі забезпечують використання можливостей сучасної комп'ютерної техніки та інформаційних технологій щодо формування вихідних даних та аналізу отримуваних результатів.

Це стосується, зокрема, завдань прогнозування розвитку маршрутних мереж міського масового громадського транспорту (ММГТ) та результативних показників їх функціонування, визначення часових характеристик та оптимізації процесів обслуговування пасажирів у ТПСМ, параметрів технологічного забезпечення роботи маршрутних транспортних засобів (МТЗ) на міських маршрутах. Звідси випливає необхідність проведення наукових досліджень з розробки, розвитку та удосконалення методів, моделей і алгоритмів організації транспортних процесів у системах ММГТ, спрямованих на підвищення ефективності їх функціонування.

У розділі 2 «Розроблення теоретичних основ методів і моделей організації транспортних процесів на міському масовому пасажирському транспорті» викладено та обґрунтовано теоретичні підходи до формалізованого опису окремих завдань організації транспортних процесів у ТПСМ, що належать до різних рівнів, розроблено методи, моделі та алгоритми їх рішення.

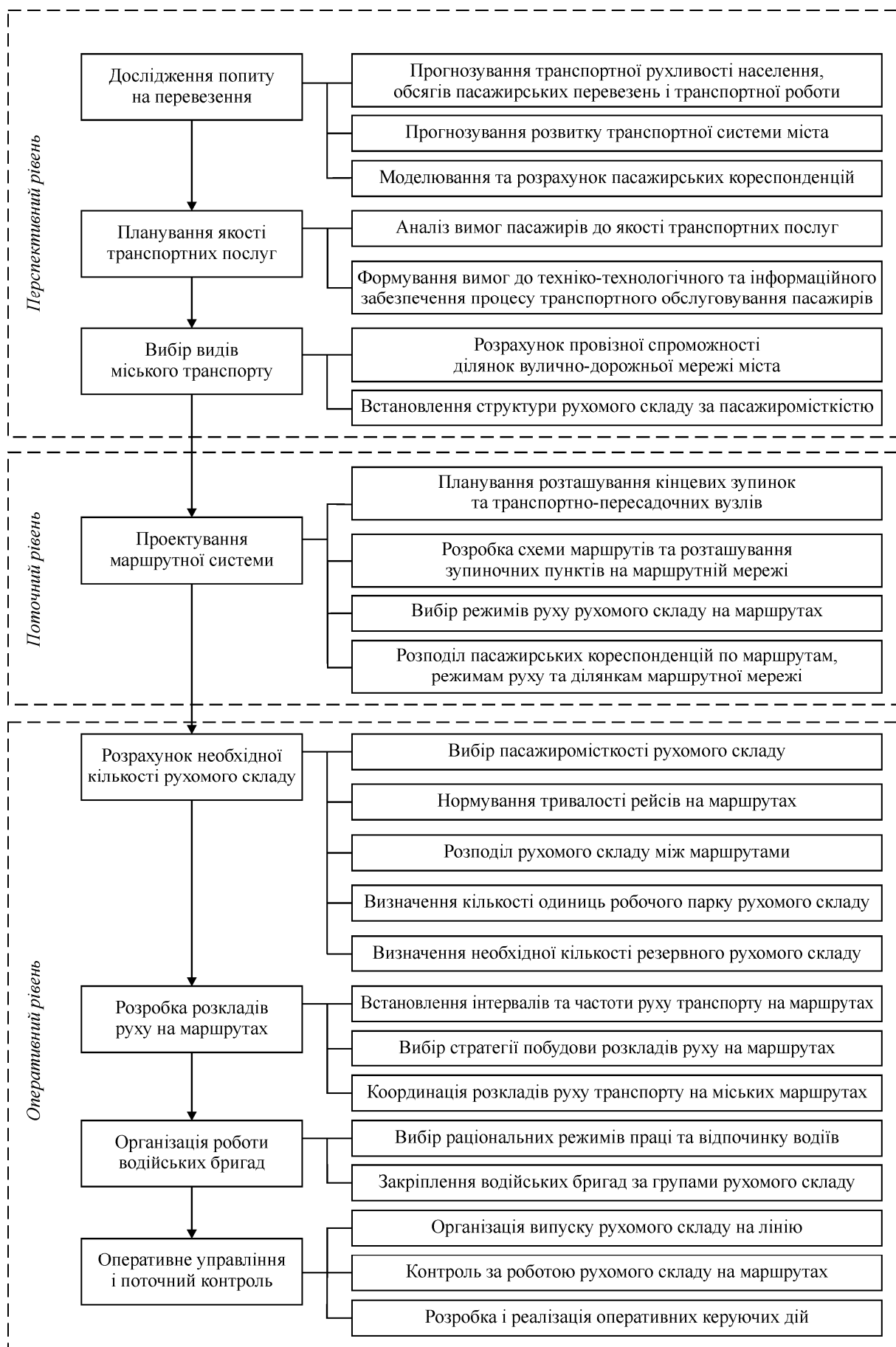


Рис. 1. Склад та структура завдань організації транспортних процесів міських масових пасажирських перевезень

Найпоширенішим способом формалізованого представлення маршрутних мереж є використання *графів*. У моделях маршрутних мереж у якості вершин графа зазвичай виступають зупинки ММГТ, а його ребрами є перегони між зупинками. Ототожнення зупинок маршрутного транспорту з вершинами графа маршрутної мережі у різних представленнях є цілком природним, оскільки зупинки фактично представляють собою об'єкти, що забезпечують доступ пасажирів до послуг ММГТ. При цьому зупинні пункти різних видів міського транспорту на маршрутній мережі можуть бути як суміщеними, так й ізольованими, розташовуватись як в зоні перехресть, так і поза їх межами. Таким чином, при побудові моделі маршрутної мережі постає завдання представлення декількох зупинних пунктів одного або різних видів транспорту однією вершиною графа шляхом їх об'єднання (агрегування). Таке об'єднання дозволяє скоротити розмірність підсумкового графа як за кількістю вершин, так і за кількістю ребер, оскільки відпадає необхідність введення до нього допоміжних концептуальних ребер, що позначають піші пересування між окремими зупинками.

При формалізованому представленні зупинок маршрутної мережі вершинами графа, у кожній з них доцільним є агрегування зупинкових пунктів (ЗП), розташованих безпосередньо у зоні перехресть міських вулиць та доріг або на ділянках маршрутів між перехрестями. У останньому випадку рішення про агрегування пропонується приймати на підставі значення коефіцієнту суміщення зон пішоїхідної доступності ЗП k_c , що визначається формулою

$$k_c = \frac{S_c}{S_0} = \frac{2 \arccos(\xi/2)}{\pi} - \frac{\xi}{4\pi} \sqrt{4 - \xi^2}, \quad (1)$$

де S_c – площа спільної зони пішоїхідної доступності обох ЗП; S_0 – площа пішоїхідної доступності кожного з ЗП; ξ – коефіцієнт, що визначається за формулою

$$\xi = \frac{l_{зуп}}{R_{п.д.маx}}, \quad (l_{зуп.} \in [0 \dots 2R_{п.д.маx}]; \xi \in [0 \dots 2]), \quad (2)$$

де $l_{зуп}$ – відстань між ЗП по осі вулиці; $R_{п.д.маx}$ – максимальне значення радіусу зони пішоїхідної доступності ЗП.

При формалізації міських маршрутних мереж з метою аналізу ступеня їх розвитку в роботі використані декілька способів їх представлення, які у попередніх дослідженнях прийнято називати *просторами*. Стосовно маршрутних мереж ММГТ розрізняють простори *зупинок*, *пересадок* та *маршрутів*.

Простір зупинок (L -простір) є простим графом, вершинами якого є зупинки ММГТ. Ребро між парою вершин існує у тому випадку, коли відповідні зупинки послідовно розташовані хоча б на одному з міських маршрутів. Природно, що таких маршрутів може бути декілька, у такому випадку можна

побудувати мультиграф, кратність ребер якого відповідає кількості маршрутів, на яких відповідні зупинки є послідовними (L' -простір).

Простір пересадок (P -простір) – простий граф, вершинами якого є зупинки ММГТ. Вершини зв'язуються ребром у випадку, коли шлях між відповідними зупинками можна подолати без зміни маршруту, тобто, без пересадки. Аналогічно простору зупинок, введенням кратних ребер, що відповідають кількості безпересадочних маршрутів між відповідними зупинками, отримуємо мультиграф, який називається P' -простором.

Простір маршрутів (C -простір) є простим графом, вершинами якого є маршрути ММГТ. Пару вершин графа з'єднує ребро лише у тому випадку, якщо відповідні маршрути мають хоча б одну спільну зупинку. Розширення цього графа до мультиграфа, кратність ребер якого відповідає кількості спільних зупинок на відповідних маршрутах, приводить до представлення маршрутної мережі у C' -просторі.

У розширеній теорії графів і теорії складних мереж визначено низку показників, що характеризують мережу та дають уяву про її розвиток та властивості, зокрема: середня степінь вершини $\langle k \rangle$, середній $\langle l \rangle$ та максимальний l_{\max} найкоротший шлях, кластерний коефіцієнт C , коефіцієнт асортативності r , центральність посередництва вершин $g(v)$ та ребер $g(e)$ мережі, ступені циклічності α , складності β та зв'язності γ мережі, індекси покриття σ та прямолінійності τ мережі. Кожному з цих показників в роботі дано змістовну предметну інтерпретацію з положень теорії міських пасажирських перевезень, наприклад: величина $\langle l_L \rangle$ (тут і далі нижній індекс показника позначає простір, якому він відповідає) характеризує середню відстань поїздки пасажирів на маршрутній мережі, виражену у кількості її перегонів, величина $\langle l_P \rangle$ – середню кількість пересадок під час такої поїздки, а величина $\langle l_C \rangle$ – середню кількість пересадок, необхідних для поїздки двома випадково обраними маршрутами. Отже, ці показники можуть бути використані для порівняльного аналізу рівня розвитку маршрутних мереж різних міст та його впливу на результативні показники пасажирських перевезень на цих мережах.

Пасажирські потоки у маршрутних мережах міст утворюються внаслідок реалізації транспортного попиту, який зазвичай представляється у вигляді матриць міжрайонних пасажирських кореспонденцій (ММПК). Як розвиток методу гравітаційного моделювання елементів ММПК розроблено науковий підхід з використанням у якості функції взаємного тяжіння між транспортними районами (ТР) трикутного статистичного розподілу Сімпсона, щільність імовірності якого визначається трьома параметрами: x_{\min} , x_{\max} – відповідно, мінімальне і максимальне значення випадкової величини; x_0 – мода (найбільш імовірне значення) випадкової величини.

Оцінкою *нижньої* межі відстані пересування пасажиром l_{\min} може служити мінімальна відстань, до досягнення якої пасажир не користується транспортом і пересування виконується пішки. За даними більшості дослідників значення l_{\min} починається з 0,5 км. Оцінкою *верхньої* межі відстані пересування пасажирів місті l_{\max} може служити максимальна відстань між центрами тяжіння ТР або максимальна довжина найкоротшого шляху у маршрутній мережі міста. У той же час, середня відстань (математичне очікування) поїздки пасажиром у місті може бути визначена на підставі обліково-статистичних даних, результатів обстеження пасажирських потоків або розрахунком за відомими емпіричними формулами.

Перевагою трикутного розподілу у порівнянні з іншими використовуваними у практичних розрахунках функціями тяжіння є те, що він є обмеженим з обох боків, що відповідає фізичній сутності процесу реалізації пасажирських кореспонденцій. Підхід до моделювання пасажирських кореспонденцій з використанням трикутного розподілу зменшує ступінь невизначеності гіпотетичних припущень про розподіл кореспонденцій між ТР і має порівняно невелику трудомісткість отримання вихідних даних та виконання обчислень.

Задача розподілу пасажирських кореспонденцій по ділянках маршрутної мережі зазвичай вирішується з використанням гіпотетичних припущень щодо вибору пасажиром шляху пересування, при цьому одним з основних чинників цього вибору є витрати часу на його реалізацію. У дисертації розвинуті та удосконалені наукові підходи до моделювання витрат часу на пересування пасажиром у ТПСМ та його окремих складників (пішохідного, очікування, поїздки). Отримані аналітичні вирази для оцінки тривалості підходу пасажиром до ЗП ММГТ у випадках, коли зони пішохідної доступності ЗП мають вигляд правильних геометричних фігур (кола, прямокутника, квадрата, шестикутника).

За невеликої довжини перегонів між зупинками, що є характерним для ММГТ, зони впливу окремих ЗП перекриваються, при цьому зону впливу транспортних ліній можна вважати обмеженою прямими, що є паралельними між ними та віддаленими від них на ширину зони пішохідної доступності $l_{\text{п.д.макс.}}$. Оскільки лінії однакового виграшу у часі пересування є рівнобічними гіперболами, зона впливу ЗП є замкненою геометричною фігурою, обмеженою двома гіперболами та двома прямими (рис. 2).

Середній час підходу пасажиром до ЗП для такої форми зони впливу залежить від довжини перегону $l_{\text{п}}$, ширини зони пішохідної доступності $l_{\text{п.д.макс.}}$ та коефіцієнта вибору пасажиром ЗП $k_{\text{вз}} = 1 + \frac{v_{\text{п}}}{v_{\text{с}}}$ (тут $v_{\text{п}}$ – швидкість пішого руху пасажиром, $v_{\text{с}}$ – швидкість сполучення ММГТ). Значення середньої тривалості підходу пасажиром до ЗП для наведеної на рис. 2 форми зони пішохідної доступності ЗП можуть бути знайдені числовим інтегруванням.

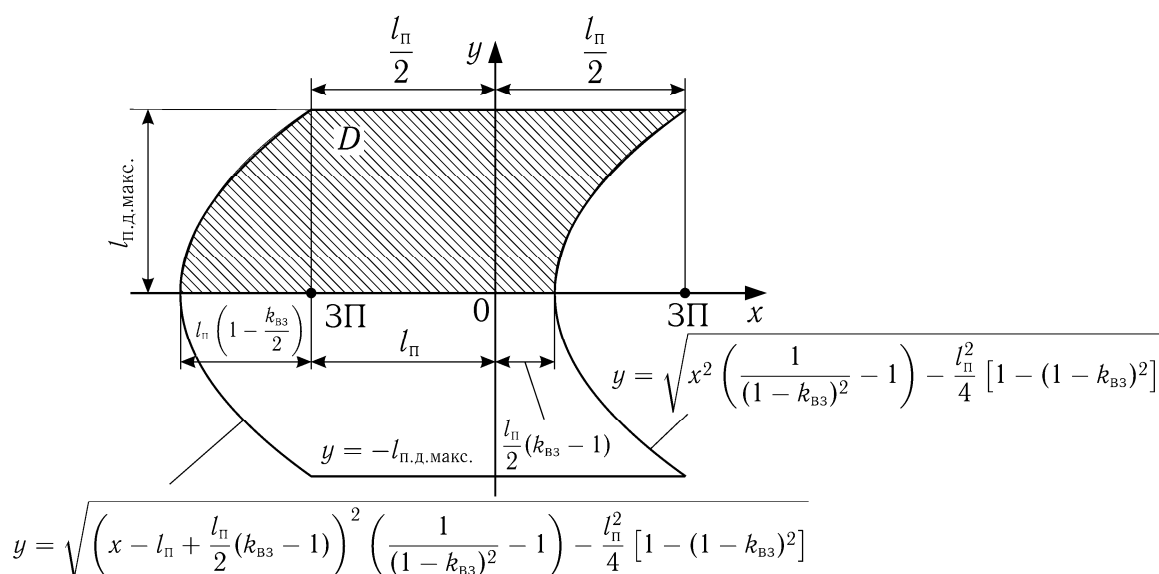


Рис. 2. Схема зони впливу зупинкового пункту

Для оцінки середньої тривалості очікування пасажирів на ЗП на практиці використовуються декілька аналітичних моделей, які у загальному випадку можна подати у наступному вигляді

$$\bar{T}_{\text{оч}} = t_1 + t_2 + t_{\text{дод}} = \frac{H}{2} + \frac{\sigma_H^2}{2 \cdot H} + t_{\text{дод}}, \quad (3)$$

де t_1 – час очікування, який залежить переважно від інтервалу руху МТЗ на ЗП, хв.; t_2 – час очікування, який залежить від точності дотримання розкладу (регулярності) руху МТЗ, хв.; $t_{\text{дод}}$ – додатковий час очікування, який враховує відмови пасажирів у посадці у МТЗ через переповнення салону або внаслідок перевезення пасажирів у незадовільних умовах, хв.; H – плановий інтервал руху МТЗ на ЗП, хв; σ_H – середнє квадратичне відхилення фактичних моментів прибуття МТЗ на ЗП від планових, хв.

При визначенні величини середньої тривалості очікування пасажирів на ЗП з урахуванням стохастичності процесів їх прибуття та відправлення, ЗП зазвичай представляють у вигляді моделі масового обслуговування. При цьому необхідно враховувати режим функціонування ЗП, який визначається ступенем його завантаження. Для неусталених перевантажених режимів функціонування ЗП, що є характерним для пікових періодів доби, пропонується використання детермінованих неперервних наближень (рис. 3). Кількість пасажирів $M_q(t)$, що очікують посадки у МТЗ на ЗП у довільний момент часу $t \in [0, T]$, визначається за формулою

$$M_q(t) = M_q(0) + n_{\text{п}}(t) - n_{\text{в}}(t) = M_q(0) + \int_{x=0}^{x=t} \lambda(x) dx + \int_{x=0}^{x=t} \mu(x) dx, \quad (4)$$

де $n_{\text{п}}(t)$, $n_{\text{в}}(t)$ – кількість пасажирів, що, відповідно, надійшли до ЗП та залишили його за проміжок часу t ($n_{\text{п}}(t) \geq n_{\text{в}}(t) \forall t \in [0, T]$); $\lambda(x)$, $\mu(x)$ –

відповідно, інтенсивність надходження та відправлення пасажирів з ЗП, що є функціями часу.

Площа, заштрихована на рис. 3, відповідає сумарній кількості пасажирогодин P , що витрачені на очікування. За граничних умови $M_q(0) = M_q(T) = 0$, ця величина дорівнює

$$P = \int_0^T [n_{\text{п}}(t) - n_{\text{в}}(t)] dt. \quad (5)$$

Середню довжину черги пасажирів на ЗП \overline{M}_q та середню тривалість очікування пасажиром посадки до МТЗ $\overline{T}_{\text{оч}}$ можна визначити як $\overline{M}_q = P/T$ та $\overline{T}_{\text{оч}} = P/n_{\text{п}}(T)$. Таким чином, виходячи з (4) та (5), задача зводиться до встановлення характеру та параметрів залежності змінювання величин $\lambda(t)$ та $\mu(t)$ у часі. В умовах сталого (стаціонарного) стану ЗП як системи обслуговування, параметр її завантаження визначається за формулою

$$\rho = \frac{\lambda \cdot H}{A}; \quad \rho < 1, \quad (6)$$

де λ – інтенсивність надходження пасажирів до ЗП; A – інтенсивність надходження вільних пасажиромісць у МТЗ, які прибувають на ЗП.

Для цього випадку середній час очікування пасажирів на ЗП $\overline{T}_{\text{оч}}$ пропонується розраховувати за залежністю

$$\overline{T}_{\text{оч}} = \frac{H}{2}(1 + k_{\text{дод}}), \quad (7)$$

де $k_{\text{дод}}$ – додатковий час очікування пасажирів, пов'язаний з нерегулярністю руху МТЗ та відмовами пасажирів у посадці, який може бути визначений методом

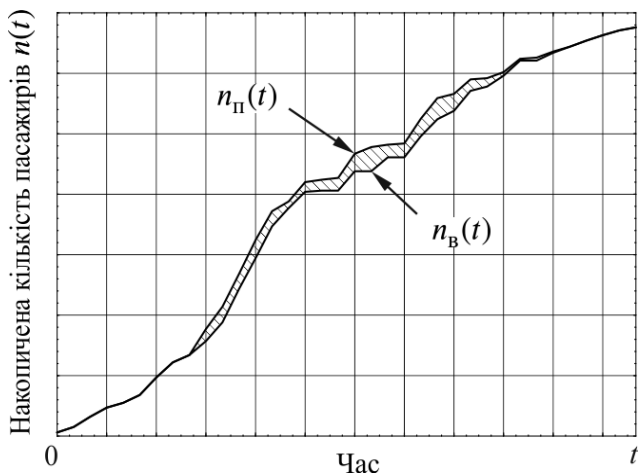


Рис. 3. Графічне представлення процесу утворення черги пасажирів на ЗП

статистичного моделювання. При цьому для заданого рівня завантаження зупинки ρ одна з величин, що містяться у правій частині рівняння (6) вважається випадковою, а інші дві – змінними та детермінованими.

Для опису та моделювання випадкових величин λ , H та A з відповідними коефіцієнтами варіації C_λ , C_H та C_A пропонується використовувати закон гамма-розподілу. Математичне очікування

$M(x)$ та коефіцієнт варіації $v(x)$ випадкової величини, розподіленої за законом гамма-розподілу, визначаються через його параметри як $M(x) = \alpha \cdot \beta$, $v(x) = \alpha^{-1/2}$ (тут α , β – відповідно, параметри форми та масштабу закону гамма-розподілу).

Параметри закону гамма-розподілу для статистичного моделювання кожної з випадкових величин, що входять до рівняння (6), наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Параметри закону гамма-розподілу для моделювання випадкових величин

Умови	$C_H = 0; C_\lambda = 0$	$C_A = 0; C_\lambda = 0$	$C_A = 0; C_H = 0$
Значення параметрів гамма-розподілу	$\alpha = \frac{1}{C_A^2};$ $\beta = \frac{\lambda \cdot H \cdot C_A^2}{\rho}.$	$\alpha = \frac{1}{C_H^2};$ $\beta = \frac{\rho \cdot A \cdot C_A^2}{\lambda}.$	$\alpha = \frac{1}{C_\lambda^2};$ $\beta = \frac{H \cdot C_\lambda^2}{\rho \cdot A}.$

З метою встановлення залежностей $k_{\text{дод}} = f(C_\lambda, \rho)$, $k_{\text{дод}} = f(C_H, \rho)$ та $k_{\text{дод}} = f(C_A, \rho)$ розроблено комп'ютерну імітаційну модель у середовищі програмування Turbo Delphi Explorer. Результати числових експериментів на моделі для прийнятих діапазонів змінювання її вихідних параметрів представлені в дисертації у графічному вигляді для різних значень параметра завантаження зупинки.

В умовах неузгоджених розкладів руху МТЗ на різних маршрутах і великій мережній частоті руху на їх спільній ділянці можливі випадки одночасного або майже одночасного прибуття на ЗП декількох МТЗ одного (рідше) або декількох різних маршрутів. Якщо пасажир може скористатися для поїздки будь-яким з них, він сприймає таку ситуацію як прибуття на ЗП одного МТЗ, що необхідно враховувати при визначенні часу очікування.

Виходячи з припущення, що потік прибуваючих МТЗ на ЗП є найпростішим (пуассонівським), імовірність того, що за деякий проміжок часу $\tau > 0$ на ЗП прибуде хоча б один МТЗ визначається як $P_{k>0}(\tau) = 1 - P_0(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau}$, де $P_0(\tau)$ – імовірність того, що протягом проміжку часу τ на ЗП не прибуде жодного МТЗ; λ – мережна (сумарна) інтенсивність прибуття МТЗ різних маршрутів на ЗП. Тоді сприйнятна (приведена) з точки зору пасажирів інтенсивність прибуття МТЗ на ЗП $\tilde{\lambda}$ та математичне очікування інтервалу руху МТЗ на ЗП \tilde{m}_H можна визначити за формулами

$$\tilde{\lambda} = \frac{P_{k>0}(\tau)}{\tau} = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\tau}; \quad \tilde{m}_H = \frac{1}{\tilde{\lambda}} = \frac{\tau}{1 - e^{-\lambda\tau}}. \quad (8)$$

Дисперсія та середнє квадратичне відхилення приведенного інтервалу руху можуть бути визначені, якщо розглянути прибуття МТЗ на ЗП як випадковий процес, що реалізується протягом кожного з послідовних проміжків часу величиною τ і полягає у настанні події прибуття на ЗП хоча б одного МТЗ з імовірністю $p = 1 - e^{-\lambda\tau}$ (успіх) чи не настанні цієї події (на ЗП не прибуде жодного МТЗ, невдача) з імовірністю $q = 1 - p = e^{-\lambda\tau}$.

Враховуючи що закон Пуассона є граничним випадком (при кількості реалізацій $n \rightarrow \infty$) біноміального розподілу, випадкова довжина ланцюжка подій до появи успіху, виражена у кількості інтервалів часу τ , розподілена за геометричним законом з дисперсією \tilde{D}_H та середнім квадратичним відхиленням $\tilde{\sigma}_H$

$$\tilde{D}_H = \frac{q \cdot \tau^2}{p^2} = \frac{\tau^2 \cdot e^{-\lambda\tau}}{(1 - e^{-\lambda\tau})^2}; \quad \tilde{\sigma}_H = \frac{\tau \cdot e^{-\frac{\lambda\tau}{2}}}{1 - e^{-\lambda\tau}}. \quad (9)$$

Підставляючи (8) та (9) у (3), отримаємо вираз для оцінки середньої тривалості очікування пасажиром прибуття МТЗ на ЗП у вигляді

$$\tilde{T}_{\text{оч}} = \frac{\tilde{m}_H}{2} + \frac{\tilde{\sigma}_H^2}{2\tilde{m}_H} = \frac{\tau}{2(1 - e^{-\lambda\tau})} + \frac{\tau^2 \cdot e^{-\lambda\tau}}{2(1 - e^{-\lambda\tau})^2} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\tau} = \frac{1}{2} \tau \cdot \frac{1 + e^{-\lambda\tau}}{1 - e^{-\lambda\tau}}. \quad (10)$$

На рис. 4 наведені порівняльні графіки залежностей коефіцієнта варіації інтервалу руху МТЗ на ЗП \tilde{v}_H та середньої тривалості очікування пасажиром прибуття МТЗ на ЗП $\tilde{T}_{\text{оч}}$ при $\tau = 1,0$ хв. для випадків врахування групового прибуття МТЗ та без нього.

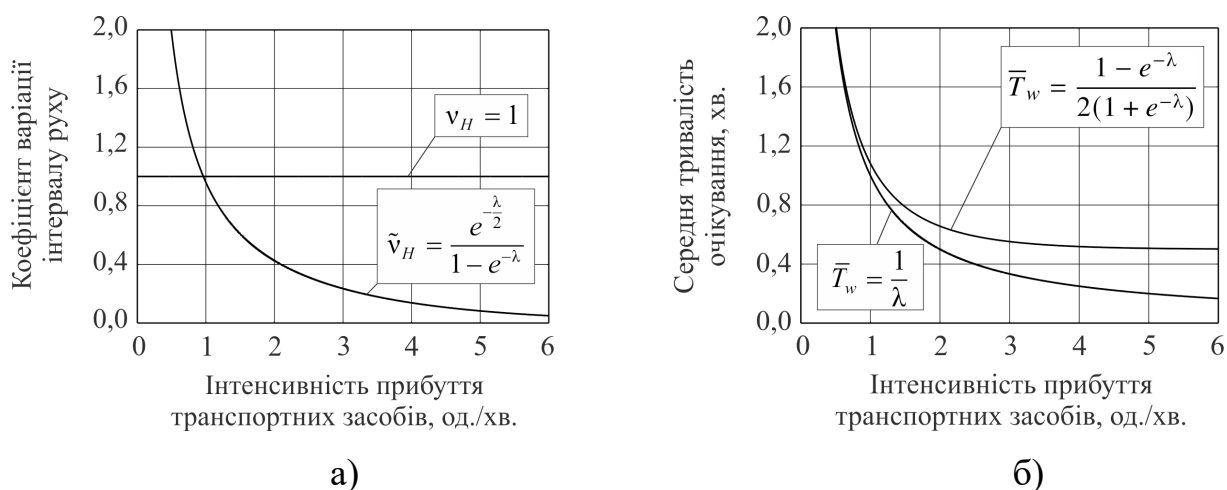


Рис. 4. Залежності коефіцієнта варіації інтервалу прибуття МТЗ на ЗП (а) та середньої тривалості очікування пасажиром на ЗП при $\tau = 1,0$ хв. (б)

Переміщення пасажирів між ЗП початку і завершення пересування у більшості випадків може бути здійснено декількома способами, кількість яких у реальних маршрутних мережах міст може бути досить великою. Кожен пасажир обирає шлях пересування з множини можливих на свій розсуд, але при цьому виборі природним є прагнення мінімізувати тривалість пересування, кількість пересадок та фінансові витрати.

Задача пошуку найкоротшого шляху на маршрутній мережі, поданій у вигляді графа, полягає у знаходженні такого шляху $L = \{v_s, \dots, v_d\}$ між початковою v_s та кінцевою v_d вершинами пересування з множини можливих, який мінімізує сумарні узагальнені витрати на пересування пасажиром

$$F(L) = C_1 w_{sk} + C_2 \sum_{\substack{(v_i, v_j) \in L \\ r_k \in R}} c_{ijk} + C_3 \sum_{\substack{r_i, r_j \in R \\ v_k \in L}} \tau_{ijk} \rightarrow \min, \quad (11)$$

де C_1, C_2, C_3 – відносна вага, відповідно, витрат пасажира на посадку у початковій вершині, пересування та пересадки ($C_1 + C_2 + C_3 = 1$); w_{sk} – узагальнені витрати на посадку пасажира (вартість, тривалість посадки або їх комбінація) у МТЗ маршруту $r_k \in R$ у вершині v_s ; c_{ijk} – витрати пасажира на пересування між вершинами v_i та v_j з використанням маршруту r_k ; τ_{ijk} – витрати пасажира на пересадку з маршруту r_i на маршрут r_j у вершині $v_k \in L$.

Для пошуку найкоротшого шляху на маршрутній мережі за критерієм мінімальної тривалості пересування у дисертації розроблено два наукові підходи та відповідні їм алгоритми, *перший* з яких передбачає перетворення вихідного графа маршрутної мережі з подальшим застосуванням одного з відомих алгоритмів пошуку найкоротших шляхів на орієнтованому графі, а *другий* – безпосереднє застосування модифікованого алгоритмічного методу «відгалужень і меж».

Алгоритм 1.

Крок 1. Побудова графа маршрутної мережі G_R . Граф маршрутної мережі (рис. 5, б) утворюється з графа транспортної мережі (рис. 5, а) представленням кожного перегону маршруту у вигляді пари різноспрямованих дуг з вагами c_{ijk} (тут i, j – номери суміжних вершин на маршруті k).

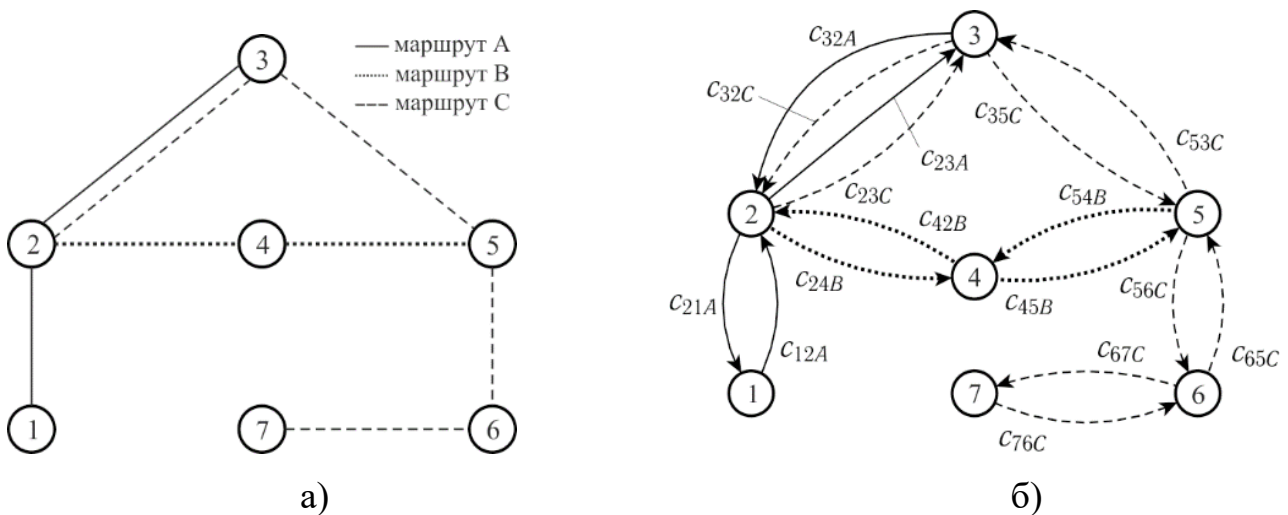


Рис. 5. Графічне представлення графа транспортної (а) та маршрутної (б) мережі

Крок 2. Перетворення графа маршрутної мережі у граф вузлових вершин G_N (рис. 6). *Вузловими* будемо називати вершини, через які проходить більше одного маршруту, інші вершини будемо називати *лінійними*.

У графі вузлових вершин кожна з вершин є реплікованою вершиною графа маршрутної мережі у кількості, що відповідає кількості маршрутів, що проходять через відповідну вершину. Надалі до графа додаються спрямовані дуги між вершинами за такими правилами:

а) якщо деяка пара вершин має однаковий номер маршруту та різні номери вершин, то між ними вводиться пара різноспрямованих дуг, вага яких дорівнює витратам на пересування між цими вершинами з використанням відповідного маршруту c_{ijk} (наприклад, 2С та 5С на рис. 6);

б) якщо деяка пара вершин має однаковий номер вершини та різні номери маршрутів, то між ними вводиться пара різноспрямованих дуг, вага яких дорівнює витратам на пересадку між відповідними маршрутами τ_{ijk} (наприклад, 2А та 2С на рис. 6).

Крок 3. Введення початкової та кінцевої вершини пересування до графа вузлових вершин за такими правилами:

а) якщо початкова (кінцева) вершина пересування є вузловою, то з'єднуємо її спрямованими від неї (до неї) дугами з усіма вершинами, що мають такий же номер та різні номери маршрутів, з вагами, що дорівнюють тривалості очікування пасажиром посадки у МТЗ у початковій вершині на відповідні маршрути (з нульовими вагами у випадку кінцевої вершини);

б) якщо початкова (кінцева) вершина є лінійною, то з'єднуємо її двома спрямованими від неї (до неї) дугами (однією, якщо початкова вершина є кінцевим пунктом деякого маршруту) з двома найближчими вузловими вершинами маршруту, якому вона належить. Вага кожної дуги дорівнює сумі витрат пасажиром на очікування МТЗ у початковій вершині та тривалості пересування до відповідної найближчої вузлової вершини маршруту (лише витратам на пересування у випадку кінцевої вершини);

в) якщо початкова і кінцева вершини є лінійними та належать одному й тому ж маршруту, вони з'єднуються дугою, що спрямована від початкової до кінцевої вершини, вага якої дорівнює витратам на пересування між цими вершинами на їх спільному маршруті.

Крок 4. Застосування алгоритму Дейкстри (або Флойда-Воршала) для пошуку найкоротшого шляху між початковою і кінцевою вершинами.

Алгоритм 2.

Крок 1. Розрахунок елементів матриці $D = ||d_{ij}|| (i, j = \overline{1, n})$ найкоротших відстаней без врахування маршрутних обмежень (пересадок) між усіма парами вершин мережі з використанням, наприклад, алгоритму Флойда-Воршала.

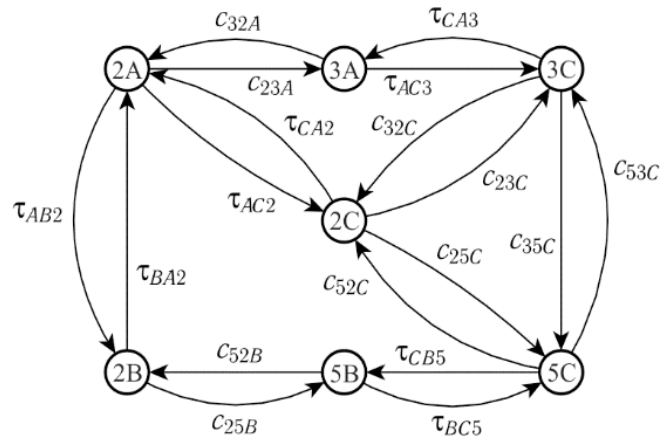


Рис. 6. Граф вузлових вершин

Крок 2. Отримана на кроці 1 найкоротша відстань між початковою p та кінцевою q вершинами приймається в якості нижньої оцінки довжини шуканого найкоротшого шляху $h(T)$.

Крок 3. Пошук верхньої оцінки довжини шуканого найкоротшого шляху $H(T)$ з використанням одного зі способів (у порядку збільшення ефективності): прямим алгоритмом (вважаючи, що пересадки виконуються у кожній з проміжних вершин найкоротшого шляху); жадібним алгоритмом (вважаючи, що пересадки на найкоротшому шляху виконуються лише у разі необхідності); алгоритмом пошуку найкоротшого шляху на спрямованому ациклічному графі, який є розширенням найкоротшого шляху дугами, що відповідають усім можливим пересадкам). При цьому якщо $h(T) = H(T)$, то розв'язування припиняється і найкоротший шлях знайдено, в іншому випадку вершині дерева пошуку розв'язків приписується оцінка $h(T)$ та виконується перехід до кроку 4.

Крок 4. Розгалуження кореня дерева пошуку розв'язків. Корінь дерева пошуку розв'язків розгалужується на гілки з вершинами, кількість яких дорівнює кількості можливих маршрутів, якими може скористатися пасажир для поїздки у початковій вершині p . Кожну вершину дерева пошуку розв'язків будемо позначати парою чисел (k, r) , де k – номер вершини маршрутної мережі, r – номер маршруту, яким може скористатися пасажир для поїздки у вершині k . Кожній відгалуженій з кореня дерева пошуку розв'язків вершині приписуємо оцінку $b(k, r) = h(T)$.

Крок 5. Вибір вершини-кандидата для розгалуження. В якості вершини-кандидата для розгалуження приймається нерозгалужена вершина дерева пошуку розв'язків з мінімальним значенням оцінки $b^* = \min\{b(k, r)\} = b^*(k^*, r^*)$, при цьому з розгляду виключаються усі нерозгалужені вершини з оцінкою $b(k, r) > H(T)$.

Крок 6. Перевірка вершини-кандидата та її оцінки. Якщо $k^* = q$, то найкоротший шлях знайдено, його довжина дорівнює b^* і розв'язування припиняється, інакше переходять до кроку 7.

Крок 7. Розгалуження вершини-кандидата. Для цього розглядаються вершини маршрутної мережі k' , що є суміжними вершині-кандидату k^* на маршруті r^* , та формуються відгалуження, кожне з яких відповідає маршруту r' , яким пасажир може продовжити шлях з вершини k' . У випадку, якщо вершина k^* є кінцевою на маршруті r^* , з неї виконується відгалуження з оцінкою $+\infty$, що буде позначати заборону подальшого відгалуження з цієї вершини.

Крок 8. Розрахунок оцінок відгалужених вершин. Оцінка b' кожної з вершин, відгалужених на кроці 7, визначається за формулою

$$b' = b^* + t_{k^*k'} + d_{k'q} - d_{k^*q} + f(k', r^*, r'), \quad (12)$$

де b^* – оцінка попередньої вершини дерева пошуку розв'язків; $t_{k^*k'}$ – відстань між вершинами k^* та k' на маршруті r^* ; $d_{k'q}$, d_{k^*q} – найкоротші відстані,

відповідно, між вершинами k' та k^* і кінцевою вершиною q без врахування маршрутних обмежень (отримані на кроці 1); $f(k', r^*, r')$ – функція, яка враховує можливу пересадку та визначається за формулою

$$f(k', r^*, r') = \begin{cases} 0, & \text{якщо } r^* = r'; \\ \tau_{k'}, & \text{якщо } r^* \neq r'. \end{cases} \quad (13)$$

Після цього виконується перехід до кроку 5.

Виконано програмну реалізацію розроблених алгоритмів у вигляді окремих програмних модулів мовами програмування Python та C++ у середовищі розробки Eclipse. Обидва алгоритми показали добру обчислювальну ефективність та можуть бути застосовані для пошуку найкоротших відстаней у маршрутних мережах ТПСМ реально існуючих розмірів.

Для встановлення величини планової тривалості рейсу та оборотного рейсу МТЗ на міському маршруті розроблено статистико-оптимізаційний метод, що передбачає використання в якості критерію оптимальності сумарних узагальнених витрат транспортного оператора та пасажирів у розрахунку на один виконаний на маршруті оборотний рейс згідно наступної економіко-математичної моделі:

$$C_{\Sigma} = C_{\text{то}} + C_{\text{пас}} = \left[t_s \int_{t_{\min}}^{t_s} f(t) dt - \int_{t_{\min}}^{t_s} t \cdot f(t) dt \right] \cdot \left[c_{\text{тр}} + \frac{Q \cdot \delta}{t_s + t'} \right] + \\ + c_{\text{пас}} \cdot Q \cdot \left[\int_{t_s}^{t_{\max}} t \cdot f(t) dt - t_s \int_{t_s}^{t_{\max}} f(t) dt \right] \Rightarrow \min, \quad (14)$$

де $C_{\text{то}}$, $C_{\text{пас}}$ – втрати, відповідно, транспортного оператора та пасажирів у розрахунку на один виконаний рейс, грн.; t_s – шукана планова тривалість рейсу на маршруті, хв; t_{\min} , t_{\max} – відповідно, мінімальна та максимальна тривалість рейсу, що визначається з технологічних міркувань або за результатами статистичних спостережень, хв.; $c_{\text{тр}}$ – вартість непродуктивного простою МТЗ в одиницю часу, грн./хв.; Q – середня кількість пасажирів, що перевозяться на маршруті за один рейс, пас.; δ – прибуток, що отримує транспортний оператор від перевезення одного пасажирів, грн./пас.; t' – тривалість міжрейсового відстїю МТЗ на кінцевій зупинці маршруту, хв; $c_{\text{пас}}$ – витрати пасажирів на очікування МТЗ на зупинці в одиницю часу у вартісному виразі, грн./хв.; $f(t)$ – щільність імовірності розподілу випадкової величини тривалості виконання рейсу на маршруті.

У розділі 3 «Експериментальні дослідження та оцінка застосовності розроблених методів і моделей організації транспортних процесів у системах міських масових пасажирських перевезень» проведено статистико-експериментальні дослідження та оцінку застосування розроблених методів, моделей і алгоритмів організації транспортних процесів у ТПСМ.

Отримано та проаналізовано статистичні показники розвитку маршрутних мереж ММГТ великих міст України (Запоріжжя, Кривого Рогу, Львова, Донецька та Одеси) при представленні їх у різних просторах. На рис. 7 наведені графіки розподілу степенів вершин мереж у просторах зупинок та пересадок.

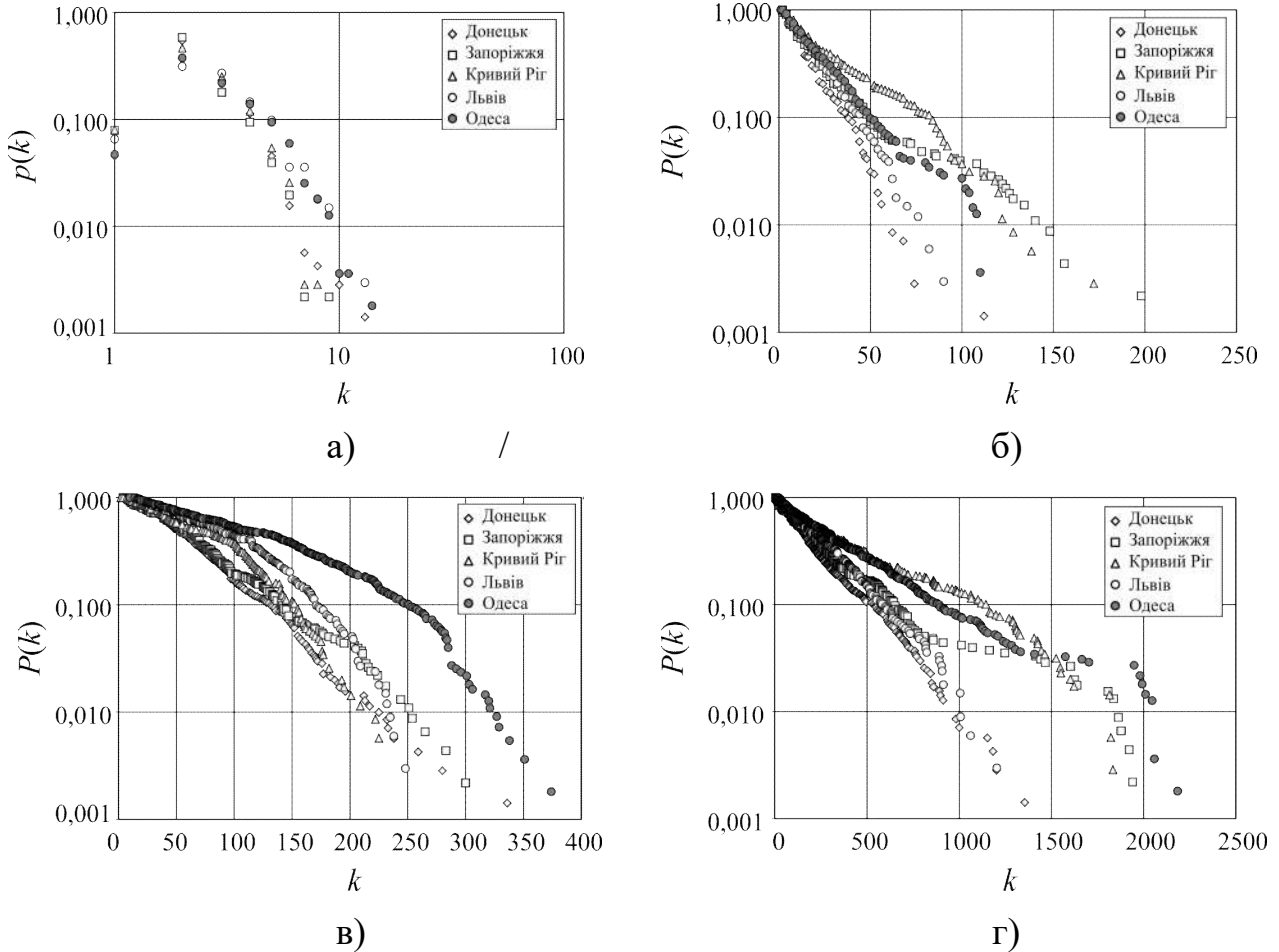


Рис. 7. Розподіл степенів вершин маршрутних мереж ММГТ великих міст України у різних просторах: L -простір (а), L' -простір (б), P -простір (в), P' -простір (г)

Як свідчать результати аналізу, розподіли степенів вершин досліджуваних маршрутних мереж, представлені у L -просторі, наближаються до степеневих, що мають вигляд $p(k) \sim k^{-\gamma}$. При цьому показник степеню $\gamma = 2,5 \dots 4,0$ є близьким до теоретичної моделі переважного приєднання Барабаші-Альберт, у якій $\gamma = 3,0$. Розподіли степенів вершин мереж у P -просторі є експоненціальними вигляду $p(k) \sim Ae^{-\alpha k}$ (з $A = 1,3 \dots 2,0$ та $\alpha = 0,012 \dots 0,022$) та вказують на випадкове приєднання вершин при їх формуванні та розвитку.

Однак, при цьому досліджувані мережі мають великі значення кластерних коефіцієнтів $C = 0,7 \dots 0,8$, що наближаються до відповідних значень моделей мереж «тісного світу» Ватса-Строгаца, для яких $C = 0,75$. У просторі пересадок спостерігаються властиві мережам «тісного світу» невеликі значення середньої довжини найкоротшого шляху у порівнянні з лінійними розмірами мережі.

Методом кореляційно-регресійного аналізу досліджено характер та ступінь впливу показників розвитку маршрутних мереж міського електричного транспорту у великих містах України на кількість маршрутних поїздок у відповідних мережах на рік Q_p , які припадають на одного мешканця міста (BPC)

$$BPC = \frac{Q_p}{N_m}, \quad (15)$$

де N_m – чисельність населення міста, чол.

Результати аналізу свідчать, що середню ступінь лінійного кореляційного зв'язку з величиною BPC мають величини середнього найкоротшого шляху $\langle l_p \rangle$ і коефіцієнт асортативності r_p маршрутної мережі, представленої у просторі пересадок, та середня степінь вершини $\langle k_C \rangle$ та кластерний коефіцієнт мережі C_c , представленої у просторі маршрутів.

Досліджено та встановлено наявність статистично значущого лінійного кореляційного зв'язку між топологічними показниками розвитку досліджуваних маршрутних мереж міського електротранспорту (ступенем складності β та ступенем зв'язності γ) та результативними показниками пасажирських перевезень у них (добовою продуктивністю одиниці рухомого складу $\Pi_{\text{доб}}$, пас./добу; приведеного питомого пробігу рухомого складу, що припадає на одного перевезеного пасажиря $L_{\text{пр.п.}}$, км/пас; приведених питомих витрат на перевезення одного пасажиря $Z_{\text{пр.п.}}$, грн./пас.), які визначаються за формулами

$$\Pi_{\text{доб}} = \frac{Q_p}{365 \cdot N_{\text{рс}}}; \quad L_{\text{пр.п.}} = \frac{L_{\text{рс}}}{Q_p \cdot \langle l_L \rangle}; \quad Z_{\text{пр.п.}} = \frac{Z_p}{Q_p \cdot \langle l_L \rangle}, \quad (16)$$

де $N_{\text{рс}}$ – середньодобовий випуск рухомого складу на лінію, од.; $L_{\text{рс}}$ – загальний річний пробіг рухомого складу на маршрутах, млн. км.; Z_p – річні експлуатаційні витрати, млн. грн.

Отримані лінійні парні регресійні залежності є достатньо точними і статистично адекватними, що дозволяє використовувати їх для прогнозування змінювання результативних показників роботи міського електричного транспорту при змінюванні маршрутних мереж (табл. 2).

Таблиця 2. Результати регресійного аналізу впливу показників розвитку маршрутних мереж на результативні показники пасажироперевезень

Рівняння регресії	Коефіцієнт детермінації R^2	Значення критерію Фішера F ($\alpha = 0,05$)	
		розрахункове	критичне
$\Pi_{\text{доб}} = 25,17 - 0,00717 \cdot \beta_p$	0,527	8,91	5,32
$L_{\text{пр.п.}} = 2,81 \times 10^{-3} + 0,0202 \cdot \gamma_p$	0,639	14,14	
$Z_{\text{пр.п.}} = (0,722 + 6,01 \cdot \gamma_L) \times 10^{-3}$	0,607	12,36	
$Z_{\text{пр.п.}} = -0,0091 + 0,4418 \cdot \gamma_p$	0,765	26,09	

З використанням запропонованого теоретичного підходу виконане моделювання елементів ММПК A_{ij} для умов міста Запоріжжя шляхом укрупненого транспортного районування міста (рис. 8) на підставі результатів визначення пасажирських потоків на ділянках маршрутної мережі міста методами візуального обстеження пасажиропотоків у ранкові пікові години доби та трикутного розподілу Сімпсона у якості функції взаємного тяжіння між ТР

$$A_{ij} = k \cdot A_i \cdot A_j \cdot f(l_{ij}); \quad f(l) = \begin{cases} \frac{2l - 1}{14,49}, & \text{при } 0,5 < l \leq 1,19; \\ \frac{43 - 2l}{426,51}, & \text{при } 1,19 < l \leq 21,5; \\ 0, & \text{у всіх інших випадках,} \end{cases} \quad (17)$$



Рис. 8. Укрупнене транспортне районування міста Запоріжжя

де k – калібрувальний коефіцієнт, який визначався за ітераційним методом Шацького; A_i , A_j – ємності транспортних районів з прибуття та відправлення, пас. Функція тяжіння відповідає параметрам $l_{\min} = 0,5$ км, $l_{\max} = 21,5$ км, $l_0 = 1,19$ км при середній відстані поїздки пасажирів у місті $\bar{l} = 7,73$ км.

На підставі проведених обстежень процесів прибуття та відправлення пасажирів з зупинок ММГТ у місті Запоріжжя встановлено, що неперервні наближення змінювання

величин інтенсивності надходження $\lambda(t)$ та відправлення $\mu(t)$ пасажирів з ЗП задовільно описуються дробово-лінійною функцією виду

$$f(t) = \frac{a + b \cdot t}{1 + c \cdot t + d \cdot t^2}. \quad (18)$$

(коефіцієнти детермінації отриманих моделей склали $R^2 = 0,52 \dots 0,71$, а різниця між розрахованими за (4) та (5) і фактично спостережуваними значеннями $\bar{M}_ч$ та $\bar{T}_{оч}$ на зупинках не перевищує 15%).

За результатами натурних спостережень інтервалів прибуття МТЗ на зупинках ММГТ міста Запоріжжя методом регресійного аналізу встановлено, що залежність середнього квадратичного відхилення мережного інтервалу руху $\sigma_{H(k)}$ від його математичного очікування \bar{H}_k є лінійною (коефіцієнт детермінації лінійних регресійних моделей склав $R^2 = 0,516 \dots 0,892$). При цьому випадкова величина інтервалів прибуття МТЗ на зупинки підпорядковується закону гамма-розподілу з параметром форми $k = 1,95 \dots 3,04$, відповідно, середню тривалість очікування пасажиром прибуття МТЗ на зупинку можна оцінити величиною $0,65 \dots 0,75 \bar{H}_k$.

Шляхом натурних спостережень за інтервалами прибуття МТЗ на восьми зупинках ММГТ міста Запоріжжя, з кількістю маршрутів, що їх обслуговують, від 3 до 8 встановлено, що при неузгоджених розкладах руху на окремих маршрутах потік прибуваючих на ЗП маршрутних транспортних засобів можна розглядати як найпростіший (пуассонівський). Оскільки одним з властивостей найпростішого потоку є *ординарність*, то факт одночасного прибуття на ЗП декількох МТЗ можна розглядати у відповідності до моделі (10) з введенням параметру чутливості τ – величини проміжку часу, протягом якого пасажир сприймає прибуття декількох МТЗ як прибуття одного МТЗ. З урахуванням цього, пропонується оцінювати середню тривалість очікування пасажирів на ЗП за формулою

$$\bar{T}_{\text{оч}} = \frac{60 \cdot k_c}{F_N}, \text{ де } k_c = f(F_N, \tau) = \frac{F_N}{2\tilde{F}_N} \left(1 + e^{-\frac{F_N \cdot \tau}{60}}\right) = \frac{F_N \cdot \tau}{120} \cdot \frac{1 + e^{-\frac{F_N \cdot \tau}{60}}}{1 - e^{-\frac{F_N \cdot \tau}{60}}}. \quad (19)$$

У формулах (19) F_N – фактична мережна частота прибуття МТЗ на ЗП, од./год; k_c – коефіцієнт, який залежить від F_N та τ ; \tilde{F}_N – приведена (сприйнятна пасажиром) частота прибуття МТЗ на ЗП, од./год. Графіки залежностей $\tilde{F}_N = f(F_N, \tau)$ та $k_c = f(F_N, \tau)$ наведені на рис. 9.

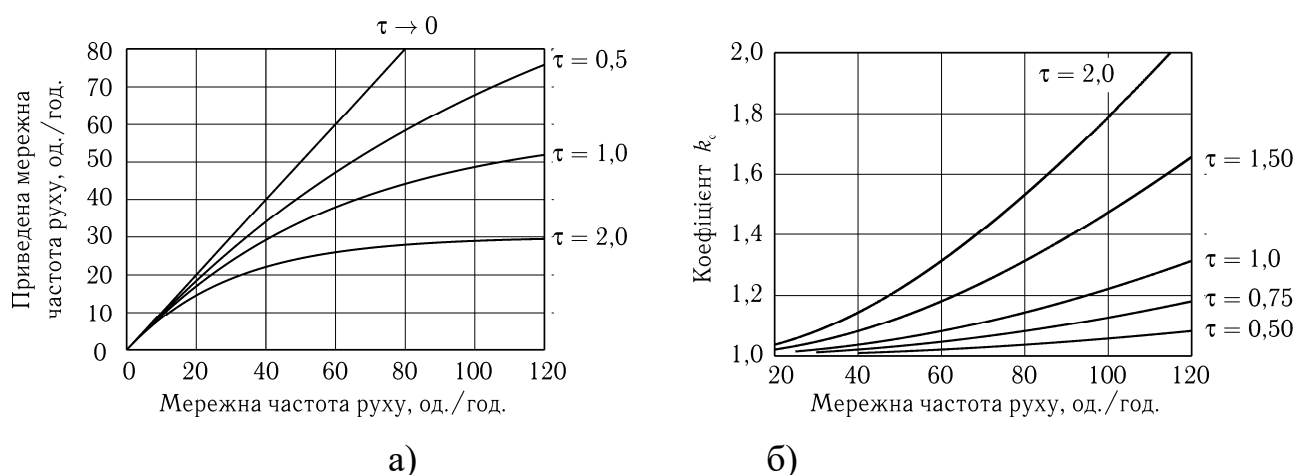


Рис. 9. Графіки залежностей $\tilde{F}_N = f(F_N, \tau)$ (а) та $k_c = f(F_N, \tau)$ (б)

З рис. 9 видно, що різниця у розрахунках середньої тривалості очікування пасажирів на ЗП з урахуванням можливості групового прибуття МТЗ та без неї виявляється суттєвою при мережній частоті руху МТЗ на ЗП, що складає $F_N \approx 30$ од./год чи більше. Значення параметра τ за таких умов можна приймати рівним 1,0 хв., оскільки саме з такою точністю зазвичай розробляється розклад руху МТЗ на маршрутах у містах.

З використанням оптимізаційної моделі планування тривалості рейсу та оборотного рейсу МТЗ на міському маршруті (14) встановлено оптимальні значення відповідних параметрів для маршрутів міського автобуса, тролейбуса та трамвая у місті Запоріжжя. Статистичний аналіз фактичної тривалості

виконання рейсів, отриманий за результатами комплексного обстеження пасажиропотоків, показав, що ця випадкова величина може бути задовільно описана як нормальним, так і рівномірним законами розподілу.

Наприклад, для тролейбусного маршруту № 14 «Сімферопольське шосе – Набережна» за результатами обстежень отримані значення тривалості виконання рейсів: у прямому напрямку руху $\bar{t}_1 = 63,55$ хв, $\sigma_{t1} = 3,65$ хв.; у зворотному напрямку руху $\bar{t}_2 = 61,35$ хв, $\sigma_{t2} = 4,13$ хв. Графіки зміни узагальнених витрат в залежності від величини планової тривалості рейсу, отримані за моделями (16) та (17) наведені на рис. 10.

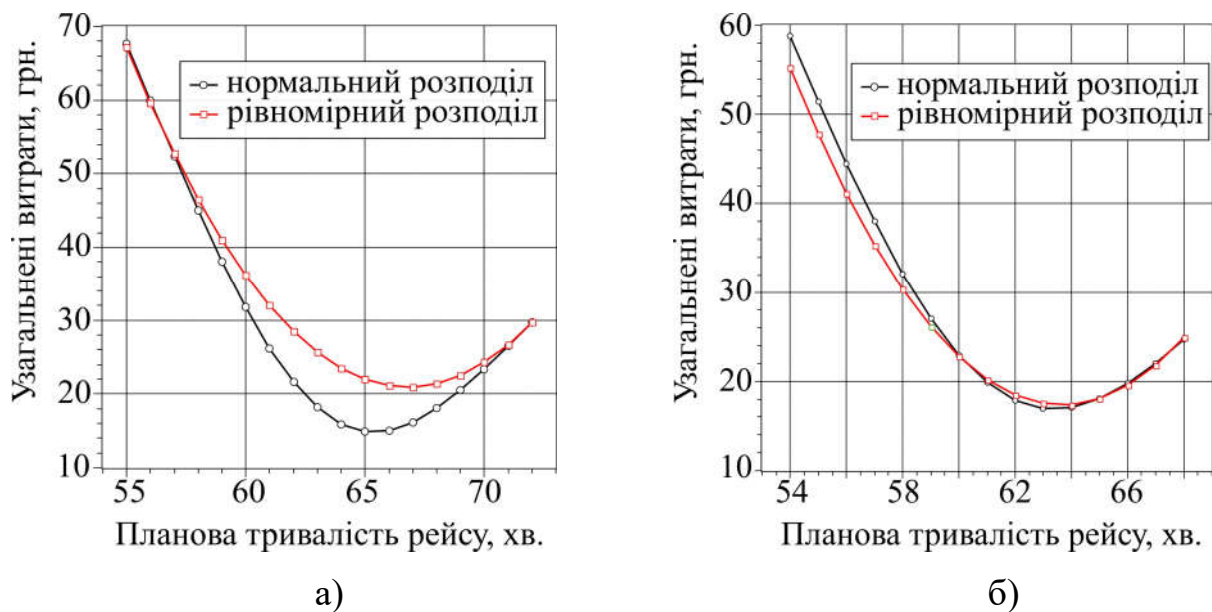


Рис. 10. Залежність узагальнених витрат від величини планової тривалості виконання рейсу (на прикладі тролейбусного маршруту № 14 міста Запоріжжя) за напрямками руху: прямому (а) та зворотному (б)

Оптимізація планової тривалості виконання рейсу на розглядуваному маршруті забезпечує скорочення узагальнених витрат у розрахунку на один виконаний оборотний рейс на 12 %.

Розділ 4 «Розроблення інформаційно-аналітичної системи аналізу транспортних пасажирських систем міст» присвячений комп'ютерній програмній реалізації результатів наукових досліджень дисертаційної роботи.

Розроблені у дисертаційній роботі методи, моделі та алгоритми програмно реалізовані в рамках створеної комп'ютерної інформаційно-аналітичної системи (ІАС) «TRANSIT». Систему реалізовано як програмний комплекс у операційній системі Windows на базі dBASE-сумісної реляційної системи управління базами даних (СУБД) з файл-серверною архітектурою та можливістю багатокористувацького доступу. Структура бази даних ІАС «TRANSIT» наведена на рис. 11.

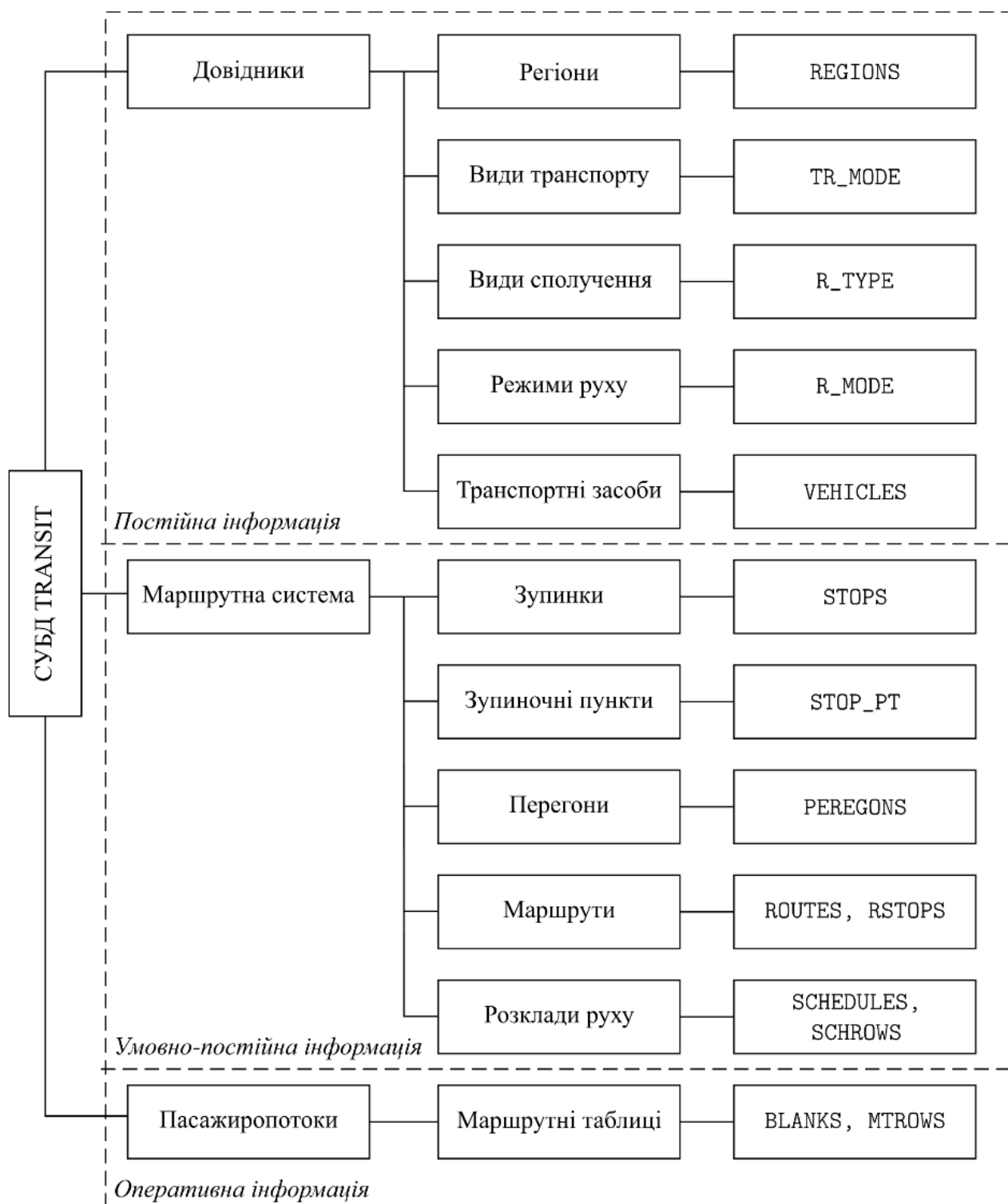


Рис. 11. Структура бази даних ІАС «TRANSIT» за типами збереженої інформації

Основними функціями, що реалізує ІАС «TRANSIT», є такі:

– введення, редагування та зберігання довідкових даних про маршрутну систему ММГТ (зупинки, перегони, види транспорту, маршрути, режими руху), розклади руху на маршрутах та характеристики МТЗ, що використовуються або можуть бути використані для виконання пасажирських перевезень;

- імпортування, введення, зберігання, перегляд, редагування та обробка даних про попит на перевезення, пасажирські потоки та результативні показники роботи рухомого складу ММГТ у пасажирській транспортній системі, які отримані шляхом обстеження пасажиропотоків безпосередньо на маршрутах;
- підготування маршрутних таблиць на паперових носіях та формування аналітичних звітів за результатами обстеження пасажиропотоків згідно вимог наказу Міністерства інфраструктури України від 15.07.2013 р. № 480;
- розрахунок показників розвитку мережі ММГТ в цілому та за окремими видами транспорту;
- розрахунок і моделювання матриць міжрайонних та міжзупинкових (у розрізі окремих маршрутів або їх груп) пасажирських кореспонденцій аналітичними методами протягом заданого часового проміжку, балансування матриць міжрайонних пасажирських кореспонденцій;
- розрахунок величини витрат часу пасажирів на пересування у ТПСМ з урахуванням тривалості очікування у початковому ЗП та у ЗП пересадки на шляху прямування;
- розрахунок оптимальної величини тривалості рейсу та оборотного рейсу МТЗ на міських маршрутах на підставі результатів транспортних обстежень.

IAC «TRANSIT» адаптована до вимог чинного законодавства України та у вигляді окремих модулів та бібліотек мовами програмування C++, Python та Delphi реалізує розроблені у дисертації теоретичні підходи до оцінки розвитку маршрутної мережі, моделювання та розрахунку пасажирських кореспонденцій, оцінки тривалості очікування пасажирів транспорту на зупинках, розрахунку найкоротших відстаней на маршрутних мережах, встановлення планової тривалості рейсу та оборотного рейсу МТЗ на міських маршрутах.

Розділ 5 «Реалізація результатів наукових досліджень в умовах транспортної пасажирської системи великого міста» присвячений практичним аспектам реалізації результатів досліджень та їх апробації в умовах транспортної пасажирської системи міста Запоріжжя.

З використанням IAC «TRANSIT» був виконаний аналіз транспортної пасажирської системи міста Запоріжжя та опрацювання даних за результатами комплексного обстеження пасажирських потоків у місті, проведеного у 2017 році згідно договору між виконавчим комітетом Запорізької міської ради та Національним університетом «Запорізька політехніка». В рамках роботи виконано аналіз розвитку існуючої маршрутної мережі ММГТ, обстежено пасажиропотоки на мережі автобусних, тролейбусних і трамвайних маршрутів міста, розраховано ММПК та визначено пасажирські потоки на ділянках маршрутної мережі, оцінено витрати часу пасажирів на пересування у ТПСМ, розроблено заходи з удосконалення маршрутної мережі ММГТ міста Запоріжжя (табл. 3), встановлено планові тривалості рейсів та оборотних рейсів на міських маршрутах, обґрунтовано клас, пасажиромісткість, кількість рухомого складу та розроблені розклади руху на маршрутах.

Таблиця 3. Порівняння існуючої та удосконаленої маршрутної системи ММГТ міста Запоріжжя

Показник	Значення показника для маршрутної системи	
	існуючої	пропонованої
1. Кількість маршрутів, що складають маршрутну систему, разом	106	89
в тому числі автобусних	92	75
тролейбусних	7	7
трамвайних	7	7
2. Кількість маршрутів, щодо яких рекомендовано:		
відкриття	9	
змінування траси	18	
закриття	26	
3. Довжина маршрутної мережі, км	296,9	
4. Сумарна довжина маршрутів, км	1470,8	1039,6
5. Маршрутний коефіцієнт	4,95	3,50
6. Кількість лінійного рухомого складу на маршрутах	1069	935

За результатами роботи запропоновано відкриття 9 нових автобусних маршрутів загального користування з обслуговуванням їх рухомим складом великої пасажиромісткості (клас I, пасажиромісткість від 80 пасажирів), внесення змін до схем та (або) кількості чи структури парку рухомого складу на 18 діючих маршрутах, закриття та виключення з мережі 26 маршрутів. Порівняльний аналіз показників існуючої та запропонованої маршрутних систем громадського транспорту міста Запоріжжя (табл. 3) свідчить, що ефективність реалізації наукових досліджень дисертаційної роботи досягається суттєвим зменшенням ступеня дублювання маршрутів (сумарна довжина маршрутів мережі скорочується на 29,3 %, а маршрутний коефіцієнт мережі зменшується з 4,95 до 3,50), при цьому кількість лінійного пасажирського рухомого складу на маршрутній мережі міста загалом зменшується на 134 одиниці (на 12,5 %).

В результаті фактичного впровадження запропонованих за результатами наукових досліджень дисертаційної роботи змін у місті Запоріжжя відкрито 7 нових автобусних маршрутів загального користування, які обслуговуються рухомим складом великої пасажиромісткості (клас I, від 80 пасажирів, маршрути обслуговуються комунальним транспортним оператором ЗКІМЕТ «Запоріжелектротранс»), внесені зміни до схем руху 6 існуючих автобусних маршрутів; закрито та виключено з маршрутної мережі 9 автобусних маршрутів. Внаслідок провадження змін суттєво покращились умови перевезень пасажирів, особливо у пікові години доби.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз та узагальнення накопиченого на теперішній час досвіду та теоретичних підходів до рішення завдань організації транспортних процесів у транспортних пасажирських системах сучасних великих міст свідчить, що, з огляду на їх великі розміри, складності структури, статистичної динаміки та невизначеності параметрів та характеристик, необхідність врахування пасажирів як активного суб'єкта, широке розповсюдження знайшли методи математичного і економіко-математичного моделювання. Використання цих методів і моделей дозволяє досліджувати змінювання параметрів і характеристик транспортної пасажирської системи міста та забезпечувати необхідні значення її вихідних характеристик з заданою для завдань організації перевезень пасажирів точністю, яка, втім, може бути обмеженою не лише вимогами до точності та способів отримання вихідних даних, обчислювальних потужностей сучасної комп'ютерної техніки, а й власне властивостями таких методів і моделей. Виходячи з цього, існує потреба у розробці, розвитку та удосконаленні методів, моделей і алгоритмів організації транспортних процесів у системах міського масового громадського транспорту, спрямованих на підвищення ефективності їх функціонування в умовах автоматизованого планування і управління.

2. Розвинуто теоретичні основи формалізації маршрутних мереж громадського транспорту методами теорії графів та їх аналізу з позицій теорії складних мереж, який передбачає агрегування зупинкових пунктів міських маршрутів у вершини графа маршрутної мережі з урахуванням суміщення зон їх пішохідної доступності та представлення графа маршрутної мережі у різних просторах. Подано предметну інтерпретацію показників розвитку маршрутної мережі громадського транспорту як складної мережі у предметній області теорії міських пасажирських перевезень. Проаналізовано характер можливого впливу цих показників на результативні показники функціонування транспортної пасажирської системи міста. На підставі проведених статистичних досліджень рівня розвитку маршрутних мереж громадського транспорту великих міст України встановлено, що вони є асортативними (коефіцієнт асортативності $r = 0,19 \dots 0,23$) у просторі зупинок та некорельованими з експоненціальним розподілом степенів вершин (показник степеню $\gamma = 2,5 \dots 4,0$) у просторі пересадок, що свідчить про еволюціонування цих мереж шляхом випадкового приєднання вершин. Виявлено високу ступінь кластеризації досліджених маршрутних мереж (кластерний коефіцієнт $C = 0,7 \dots 0,8$) та наявність у них ознак «тісного світу».

3. Для умов великих міст України методами кореляційно-регресійного аналізу встановлено наявність значущого лінійного кореляційного зв'язку середньої сили (коефіцієнт кореляції Пірсона $r_{xy} = 0,551 \dots 0,582$) між транспортною рухливістю населення на міському пасажирському електричному

транспорті великих міст України та показниками розвитку цих мереж. Встановлено, що додатну кореляцію з результативним показником мають середня довжина найкоротшого шляху мережі та її коефіцієнт асортативності у просторі пересадок, а від'ємну кореляцію – середня степінь вершини та кластерний коефіцієнт мережі у просторі маршрутів. Подано предметну інтерпретацію характеру спостережуваного кореляційного зв'язку між цими показниками і транспортною рухливістю населення на громадському транспорті досліджуваних міст. З використанням показників розвитку маршрутних мереж, що ґрунтуються на положеннях розширеної теорії графів, методами кореляційно-регресійного аналізу встановлено наявність статистично значущого кореляційного зв'язку між цими показниками (ступенем складності у просторі пересаджень та ступенем зв'язності у просторах зупинок та пересаджень) та результативними показниками роботи пасажирського електричного транспорту (добовою продуктивністю одиниці рухомого складу, його приведеним питомим річним пробігом та приведеними питомими витратами на перевезення одного пасажирів) у великих містах України. Коефіцієнти детермінації отриманих парних лінійних регресійних моделей дорівнюють $R^2 = 0,527 \dots 0,765$. Отримані моделі є статистично значущими, адекватними вихідним даним та можуть бути використані для планування показників роботи міського масового громадського транспорту при змінюванні характеристик його маршрутних мереж у досліджуваних містах.

4. Розвинуто теоретичні основи методу гравітаційного моделювання елементів матриці міжрайонних пасажирських кореспонденцій у містах. Запропоновано використання у якості функції тяжіння між транспортними районами функції трикутного статистичного розподілу Сімпсона. Параметри трикутного статистичного розподілу встановлюються на підставі апріорної інформації про характеристики транспортної мережі міста та показники пасажирських перевезень на ній (для умов міста Запоріжжя параметри розподілу дорівнюють $l_{\min} = 0,5$ км, $l_{\max} = 21,5$ км, $l_0 = 1,19$ км).

5. З використанням методів математичного моделювання, теорії імовірностей і математичної статистики, методів комбінаторної оптимізації розроблено та розвинуто теоретичні основи оцінки тривалості обслуговування пасажирів у транспортній пасажирській системі міста та її окремих складників, зокрема:

– отримані аналітичні та графічні залежності для оцінки витрат часу пасажирів на піший підхід до зупинок громадського транспорту у місті з урахуванням геометричної форми зони пішохідної доступності зупинки, яка утворюється з урахуванням вибору пасажиром зупинки на транспортній лінії;

– розроблено методи та моделі оцінки тривалості очікування пасажиром посадки у маршрутний транспортний засіб на зупинці. Розроблені моделі враховують стохастичний характер процесів підходу пасажирів до зупинки,

прибуття транспортних засобів та наявність у них вільних пасажиромісць. Отримані аналітичні та регресійні (коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,52 \dots 0,89$) моделі оцінки тривалості очікування пасажирів на зупинці в умовах наявності у пасажирів альтернативних маршрутів пересування та високої частоти руху маршрутного транспорту, що є характерним в умовах накладення маршрутних схем;

– розвинуто наукові підходи та на їх основі розроблені алгоритми пошуку найкоротших за тривалістю шляхів пересування пасажирів у маршрутних мережах громадського транспорту з урахуванням витрат часу пасажирів на можливі пересадки на шляху прямування на основі методів пошуку найкоротших відстаней на графах та алгоритмічного методу «відгалужень і меж». Програмна реалізація алгоритмів у інтерпретаторі Python 2.7 та компіляторі C++ в середовищі розробки Eclipse для тестової маршрутної мережі з $N = 110$ вершинами та $R = 1008$ маршрутами показала, що на пошук найкоротшого шляху між вибраною випадково парою вершин витрачається порядку 10^{-3} с машинного часу, що свідчить про придатність розроблених алгоритмів для рішення практичних завдань.

6. Розроблено теоретичний оптимізаційний підхід до визначення планової тривалості рейсу та оборотного рейсу транспортних засобів на міському маршруті. Підхід ґрунтується на статистико-імовірнісній моделі, критерієм оптимальності у якій є сумарні узагальнені витрати транспортного оператора та пасажирів в розрахунку на один виконаний оборотний рейс на маршруті. В моделі враховується стохастичний характер тривалості виконання рейсу, яка представляється статистичним законом розподілу її імовірностей. Отримані аналітичні вирази для визначення планової тривалості рейсу на міському маршруті для випадків її розподілу за нормальним та рівномірним законами розподілу випадкових величин.

7. Розроблені та удосконалені в дисертаційній роботі методи, моделі та алгоритми програмно реалізовані в рамках комп'ютерної інформаційно-аналітичної системи «TRANSIT» та її окремих програмних модулів. Інформаційно-аналітична система «TRANSIT», побудована на основі розробленої реляційної бази даних, передбачає рішення завдань з підготовки та обробки результатів обстеження пасажирських потоків на маршрутах громадського транспорту згідно вимог чинного законодавства України. Комплекс вирішуваних завдань інформаційно-аналітичної системи включає, зокрема, розрахунок показників розвитку маршрутної мережі громадського транспорту, моделювання та розрахунок елементів матриці міжрайонних пасажирських кореспонденцій, розрахунок найкоротших відстаней на маршрутній мережі, визначення тривалості очікування та поїздки пасажирів у транспортній пасажирській системі міста, нормування тривалості рейсу на маршрутах. Результати дисертаційних досліджень прийняті та впроваджуються

в практичній роботі управління з питань транспортного забезпечення та зв'язку Запорізької міської ради та Запорізькому комунальному підприємстві міського електричного транспорту «Запоріжелектротранс» в рамках реалізації міської програми розвитку пасажирського транспорту міста Запоріжжя на 2017–2019 роки. Ефективність реалізації наукових досліджень дисертаційної роботи досягається суттєвим зменшенням ступеня дублювання маршрутів (сумарна довжина маршрутів мережі скорочується на 29,3 %, а маршрутний коефіцієнт мережі зменшується з 4,95 до 3,50), при цьому кількість лінійного пасажирського рухомого складу на маршрутній мережі міста загалом зменшується на 134 одиниці (на 12,5 %). Теоретичні результати дисертаційної роботи використані в навчальному процесі кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка» у курсах навчальних дисциплін «Пасажирські перевезення» та «Міські транспортні системи» спеціальності 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)».

Можливими напрямками подальших наукових досліджень за тематикою дисертаційної роботи може бути вивчення та встановлення закономірностей впливу топологічних показників розвитку маршрутних мереж громадського транспорту на процеси формування та розподілу пасажирських потоків на них; врахування обмеженої кількості альтернатив при виборі пасажиром маршруту для здійснення поїздки у моделях оцінки витрат часу пасажирів на зупинках в очікуванні прибуття транспорту та встановлення його статистичного розподілу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії.

1. Дослідження транспортних процесів і систем методами факторного аналізу : монографія / О. А. Лашених, О. Ф. Кузькін, С. М. Турпак, С. В. Грицай. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. – 186 с.

Статті у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз.

2. Кузькін О. Ф. Дослідження регулярності руху маршрутних таксі у пікові години доби / О. Ф. Кузькін // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2015. – № 5/3(77). – С. 14–22. (Scopus)

3. Kuzkin O. Graph theory methods in analyzing commuting networks of municipal electric transport / O. Kuzkin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – No. 2(4). – P. 19–25. (Scopus)

4. Kuzkin O. An investigation of the bus headways and the passenger waiting time on the urban routes / O. Kuzkin // Technology audit and production reserves. – 2016. – No. 4(3)/30. – P. 4–9. (Index Copernicus)

5. Kuzkin O. Optimal planning of trip and round trip cycle time on an urban route / O. Kuzkin // *Technology audit and production reserves*. – 2018. – Vol. 2/2, No. 40. – P. 34–42. (Index Copernicus)

6. Кузькін О. Ф. Аналіз розвитку та рівня якості послуг громадського транспорту Запоріжжя / О. Ф. Кузькін // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : технічні науки*. – 2018. – Т. 29(68), № 2. – С. 307–313. (Index Copernicus)

Статті у наукових фахових виданнях України, які входять до переліку ДАК МОН України.

7. Кузькін О. Ф. Оцінка витрат часу на підхід пасажирів до зупинок міського маршрутного пасажирського транспорту / О. Ф. Кузькін, Є. І. Іванов // *Східноєвропейський журнал передових технологій*. – 2008. – № 1/4(31). – С. 30–32.

8. Врахування якості обслуговування у вартості за проїзд на пасажирському автотранспорті / Г. Ф. Бабушкін, В. Х. Козирев, О. Ф. Кузькін, Ю. О. Стовбур // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. – 2008. – № 7(125). – С. 61–63.

9. Кузькін О. Ф. Моделювання пасажирських кореспонденцій в системі міського громадського транспорту / О. Ф. Кузькін // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2009. – № 5(86). – С. 79–82.

10. Кузькін О. Ф. Моделювання процесів обслуговування пасажирів на зупиночних пунктах у міських транспортних системах / О. Ф. Кузькін, С. М. Турпак // *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. – 2009. – № 1. – С. 164–169.

11. Бабушкін Г. Ф. Оцінка якості транспортного обслуговування пасажирів у містах / Г. Ф. Бабушкін, О. Ф. Кузькін, В. Х. Козирев // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. – 2009. – № 11(141). – С. 25–27.

12. Кузькін О. Ф. Факторний аналіз тривалості очікування пасажиром посадки у системі міського транспорту загального користування / О. Ф. Кузькін, Д. Я. Муковська // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського*. – 2009. – № 6(59). – С. 114–118.

13. Транспортно-екологічні проблеми м. Запоріжжя / Г. Ф. Бабушкін, О. Ф. Кузькін, В. П. Юдин, О. О. Падченко // *Нові матеріали і технології в металургії і машинобудуванні*. – 2010. – № 1. – С. 144–146.

14. Кузькін О. Ф. Нормативно-правові аспекти оцінки якості послуг міського маршрутного транспорту загального користування / О. Ф. Кузькін // *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. – 2010. – № 2(53). – С. 79–84.

15. Кузькін О. Ф. Пошук найкоротших шляхів у міських маршрутних мережах / О. Ф. Кузькін // *Східноєвропейський журнал передових технологій*. – 2011. – № 6/4(54). – С. 8–12.

16. Кузькін О. Ф. Статистичний аналіз маршрутної мережі громадського транспорту Запоріжжя / О. Ф. Кузькін, А. Е. Мовчан // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2011. – № 1. – С. 34–42.

17. Кузькін О. Ф. Топологічні характеристики мереж громадського транспорту великих міст України / О. Ф. Кузькін, А. Е. Мовчан, А. С. Іорданова // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2012. – № 1/4(55). – С. 58–63.

18. Кузькін О. Ф. Центральність посередництва у комплексних маршрутних мережах великих міст України / О. Ф. Кузькін, М. І. Лазуткін // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2012. – № 2/11(56). – С. 37–39.

19. Кузькін О. Ф. Аналіз комплексних мереж маршрутного транспорту загального користування великих міст України / О. Ф. Кузькін, А. Е. Мовчан // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 4. – С. 83–89.

20. Кузькін О. Ф. Пошук шляхів у маршрутних мережах міст методом відгалужень і меж / О. Ф. Кузькін // Комунальне господарство міст : науково-технічний збірник. – Х. : ХНАМГ, 2012. – № 103. – С. 378–388.

21. Кузькін О. Ф. Управління просторовим транспортним процесом з використанням геостатистичних методів / О. Ф. Кузькін, О. А. Лащених, А. В. Якимов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2012. – № 3(62). – С. 107–110.

22. Кузькін О. Ф. Розвиток маршрутних мереж громадського транспорту великих міст України / О. Ф. Кузькін // Наукові нотатки. – 2014. – № 46. – С. 332–340.

23. Кузькін О. Ф. Формалізація міських маршрутних мереж методами теорії графів / О. Ф. Кузькін, Л. А. Веремеєнко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2014. – № 4(211). – С. 49–54.

24. Лащених О. А. Дослідження роботи маршрутного таксі методом активно-пасивного експерименту / О. А. Лащених, О. Ф. Кузькін, А. В. Якимов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2014. – № 2(69). – С. 145–148.

25. Кузькін О. Ф. Вплив топології маршрутної мережі на показники роботи міського громадського транспорту / О. Ф. Кузькін // Наукові нотатки. – 2016. – № 55. – С. 222–227.

26. Кузькін О. Ф. Аналіз маршрутної системи міського громадського транспорту Запоріжжя / О. Ф. Кузькін // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2018. – № 2(243). – С. 132–139.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

27. Кузькін О. Ф. Автоматизована обробка даних про пасажиропотоки на маршрутах міського транспорту / О. Ф. Кузькін, С. В. Грицай // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів,

науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 17–22 квітня 2006 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2006. – Т. 1. – С. 21–22. (очна)

28. Кузькін О. Ф. Сучасний міський транспорт Запоріжжя: стан і перспективи розвитку / О. Ф. Кузькін // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 23–28 квітня 2007 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2007. – Т. 1. – С. 35–36. (очна)

29. Бабушкін Г. Ф. Оцінка якості послуг пасажирського транспорту загального користування / Г. Ф. Бабушкін, О. Ф. Кузькін, Ю. О. Стовбур // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 14–18 квітня 2008 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. – Т. 1. – С. 31. (очна)

30. Кузькін О. Ф. Імітаційне моделювання функціонування зупиночного пункту міського громадського транспорту / О. Ф. Кузькін, Л. В. Гайтота // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 14–18 квітня 2008 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. – Т. 1. – С. 39–40. (очна)

31. Кузькін О. Ф. Моделювання процесів обслуговування пасажирів на зупинках у міських транспортних системах / О. Ф. Кузькін // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 13–17 квітня 2009 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – Т. 1. – С. 42–43. (очна)

32. Кузькін О. Ф. Оцінка якості розвитку маршрутної мережі транспорту загального користування міста Запоріжжя / О. Ф. Кузькін // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 12–16 квітня 2010 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2010. – Т. 1. – С. 190–192. (очна)

33. Кузькин А. Ф. Оценка качества транспортного обслуживания жителей Заводского района города Запорожья маршрутным транспортом общего пользования / А. Ф. Кузькин, Д. Я. Муковская // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 12–16 квітня 2010 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2010. – Т. 1. – С. 194. (очна)

34. Кузькін О. Ф. Структура, зміст та функції інформаційної системи міського транспорту загального користування / О. Ф. Кузькін, А. В. Якимов // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 12–16 квітня 2010 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2010. – Т. 1. – С. 195. (очна)

35. Кузькін О. Ф. Аналіз комплексних мереж маршрутного транспорту загального користування великих міст України / О. Ф. Кузькін, А. Е. Мовчан // Збірник тез доповідей IV міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця, 24–26 жовтня 2011 р.). – Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 41. (заочна)

36. Кузькін О. Ф. Формалізація міських маршрутних мереж методами теорії графів / О. Ф. Кузькін, Л. А. Веремеєнко // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики» (м. Луганськ, 5–8 травня 2011 р.). – Луганськ : Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2011. – С. 6–8. (заочна)

37. Кузькін О. Ф. Аналіз статистичних характеристик комплексної мережі транспорту загального користування Запоріжжя / О. Ф. Кузькін // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 11–15 квітня 2011 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2011. – Т. 1. – С. 199–201. (очна)

38. Кузькін О. Ф. Пошук шляхів у маршрутних мережах міст методом відгалужень і меж / О. Ф. Кузькін // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Транспортні проблеми найкрупніших міст» (м. Харків, 12–16 березня 2012 р.). – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2012. – С. 79–82. (заочна)

39. Кузькін О. Ф. Алгоритми пошуку найкоротших відстаней у маршрутних мережах міст / О. Ф. Кузькін // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 09–13 квітня 2012 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. – Т. 2. – С. 102–103. (очна)

40. Кузькін О. Ф. Імовірнісний підхід до моделювання альтернативних маршрутів при проектуванні маршрутних мереж міського транспорту / О. Ф. Кузькін // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 15–19 квітня 2013 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2013. – Т. 1. – С. 66–67. (очна)

41. Кузькін О. Ф. Топологічний аналіз маршрутних мереж міського транспорту загального користування великих міст України / О. Ф. Кузькін // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 14–18 квітня 2014 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. – Т. 1. – С. 27–28. (очна)

42. Кузькін О. Ф. Тривалість очікування пасажирів на зупинці за наявності альтернативних маршрутів / О. Ф. Кузькін // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Міські та регіональні транспортні проблеми» (м.

Харків, 17–19 листопада 2015 р.). – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – С. 10. (очна)

43. Кузькін О. Ф. Вплив рівня автомобілізації на транспортну рухливість мешканців великих міст України / О. Ф. Кузькін // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 14–18 квітня 2015 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. – Т. 1. – С. 176. (очна)

44. Кузькін О. Ф. Структура складових якості послуг масового пасажирського транспорту у містах / О. Ф. Кузькін // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 18–22 квітня 2016 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. – Т. 1. – С. 46. (очна)

45. Кузькін О. Ф. Комплексне обстеження пасажиропотоків на маршрутах міського пасажирського транспорту загального користування в місті Запоріжжя / О. Ф. Кузькін // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 18–21 квітня 2017 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2017. – С. 2228. (очна)

46. Кузькін О. Ф. Статистичний аналіз швидкості сполучення на міських автобусних маршрутах міста Запоріжжя / О. Ф. Кузькін, Д. С. Носач, В. С. Фролов // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 18–21 квітня 2017 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2017. – С. 2228. (очна)

47. Кузькін О. Ф. Комплексне обстеження пасажиропотоків на маршрутах міського пасажирського транспорту міста Запоріжжя / О. Ф. Кузькін // Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми організації авіаційних перевезень і застосування авіації в галузях економіки» (м. Київ, 24 листопада 2017 р.). – Київ : Національний авіаційний університет, 2017. – С. 158–160. (заочна)

48. Кузькін О. Ф. До питання вибору пасажирями типу автобусного рухомого складу / О. Ф. Кузькін, І. М. Райда // Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences. International research and practice conference : Conference proceedings (Radon, Republic of Poland, December 27–28, 2017). – Radom : Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2017. – С. 146–149. (заочна)

49. Кузькін О. Ф. Аналіз маршрутної системи міського громадського транс-порту Запоріжжя / О. Ф. Кузькін // Збірник наукових праць за матеріалами VII Міжнародної науково-практичної конференції «Транспорт і логістика: проблеми та рішення» (м. Одеса, 23–25 травня 2018 р.). – Одеса : Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет, 2018. – С. 276–279. (заочна)

50. Кузькін О. Ф. Аналіз транспортної рухливості населення міста Запоріжжя / О. Ф. Кузькін // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 16–20 квітня 2018 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. – С. 125–126. (очна)

51. Кузькін О. Ф. Дослідження впливу надійності автобусного розкладу на тривалість очікування пасажирів / О. Ф. Кузькін // Транспортні системи та технології : проблеми та перспективи розвитку. Тези доповідей I Регіональної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів та учнів (м. Запоріжжя, 12 квітня 2018 р.). – Запоріжжя : Запорізький національний технічний університет, 2018. – С. 42–44. (очна)

52. Кузькін О. Ф. Дослідження закономірностей змінювання обсягу перевезень пасажирів пільгових категорій на міських автобусних маршрутах міста Запоріжжя / О. Ф. Кузькін // Збірник тез доповідей III Всеукраїнської науково-теоретичної конференції «Проблеми з транспортними потоками та напрямки їх розв'язання» (м. Львів, 28–30 березня 2019 р.). – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2019. – С. 61–63. (заочна)

53. Кузькін О. Ф. Транспортна доступність як основа сучасної парадигми в транспортному плануванні міст / О. Ф. Кузькін // Транспортні системи та технології : проблеми та перспективи розвитку. Тези доповідей II Регіональної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів та учнів (м. Запоріжжя, 12 квітня 2019 р.). – Запоріжжя : Запорізький національний технічний університет, 2019. – С. 21–24. (очна)

54. Кузькін О. Ф. Теоретичні основи організації транспортних процесів в системах міських масових пасажирських перевезень / О. Ф. Кузькін // Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика. Тези доповідей п'ятнадцятої науково-практичної конференції (м. Харків, 6–8 червня 2019 р.). – Харків : Українська державна академія залізничного транспорту, 2019. – С. 42–44. (очна)

55. Кузькін О. Ф. Гравітаційне моделювання міжрайонної матриці пасажирських кореспонденцій у місті Запоріжжя / О. Ф. Кузькін // LXXV Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, присвячена 75-річчю з дня заснування університету : тези доповідей. – К. : НТУ, 2019. – Т. 3. – С. 188. (заочна)

56. Кузькін О. Ф. Дослідження змінюваності середньої відстані поїздки пасажирів на міських маршрутах загального користування міста Запоріжжя / О. Ф. Кузькін, Р. С. Монін // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців молодих учених і аспірантів

«Тиждень науки-2019. Транспортний факультет» (м. Запоріжжя, 15–19 квітня 2019 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. – Т. 1. – С. 58–60. (очна)

57. Кузькін О. Ф. Оцінка ефекту узгодження розкладів руху на спільних ділянках міських автобусних маршрутів / О. Ф. Кузькін, К. М. Чеботар // Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців молодих учених і аспірантів «Тиждень науки-2019. Транспортний факультет» (м. Запоріжжя, 15–19 квітня 2019 р.). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. – Т. 1. – С. 60–62. (очна)

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

58. Кузькін О. Ф. Статистичний аналіз маршрутної мережі громадського транспорту Запоріжжя / О. Ф. Кузькін, А. Е. Мовчан // Збірник наукових праць третьої міжнародної науково-практичної конференції «Логістика промислових регіонів» (м. Донецьк, 06–09 квітня 2011 р.). – Донецьк : ЛАНДОН-XXI, 2011. – С. 110–114.

59. Удосконалення процесів управління регіональними та міськими системами вантажних і пасажирських перевезень : звіт про НДР (остаточний) / Запорізький національний технічний університет ; кер. Г. Ф. Бабушкін ; виконавець: Г. Ф. Бабушкін, О. Ф. Кузькін [та ін.]. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. – 321 с. – Шифр теми № 02619 № держ. реєстрації 0109U007820.

60. Розробка методів удосконалення міських та промислових транспортних систем : звіт про НДР (остаточний) / Запорізький національний технічний університет ; кер. Г. Ф. Бабушкін ; виконавець: Г. Ф. Бабушкін, О. Ф. Кузькін [та ін.]. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. – 321 с. – Шифр теми № 02012 № держ. реєстрації 0112U005344.

61. Комплексне обстеження пасажиропотоків на маршрутах міського пасажирського транспорту загального користування в місті Запоріжжя : звіт про НДР (остаточний) / Запорізький національний технічний університет ; кер. Кузькін О. Ф. ; виконавець: Кузькін О. Ф. [та ін.]. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2017. – 321 с. – Шифр теми № 2037 № держ. реєстрації 0117U004758.

62. А. с. 52604 Україна, Монографія «Дослідження транспортних процесів і систем методами факторного аналізу» / Лащених О. А., Кузькін О. Ф., Турпак С. М., Грицай С. В.; заяв. Запорізький національний технічний університет; заявл. 19.12.13. – 1 с.

63. А. с. 89877 Україна, Комп'ютерна програма «Інформаційно-аналітична система TRANSIT» / Кузькін О. Ф. ; заяв. Запорізький національний технічний університет; заявл. 18.06.19. – 1 с.

АНОТАЦІЯ

Кузькін О. Ф. Теоретичні основи організації транспортних процесів в системах міських масових пасажирських перевезень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.01 – транспортні системи. – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, 2020.

Дисертаційна робота присвячена розвитку теоретичних основ організації транспортних процесів масових маршрутних перевезень пасажирів у містах з використанням наукових підходів, спрямованих на підвищення ефективності перевезень в умовах автоматизованого планування і управління.

Розвинуто наукові підходи до формалізованого опису та оцінки ступеня розвитку міських маршрутних мереж та розроблено моделі його впливу на результативні показники перевезень та техніко-економічні показники роботи міського пасажирського транспорту. Розвинуто метод гравітаційного моделювання матриці міжрайонних пасажирських кореспонденцій у містах на основі використання в якості функції тяжіння між транспортними районами трикутного статистичного розподілу.

Розроблено моделі та алгоритми оцінки тривалості обслуговування пасажирів у транспортній пасажирській системі міста та його складників з урахуванням статистичної невизначеності процесу перевезень. Удосконалені алгоритми пошуку найкоротших шляхів пересування пасажирів з урахуванням пересадок на шляху прямування. Запропоновано оптимізаційний підхід до нормування тривалості рейсу та обороту пасажирського рухомого складу на міському маршруті з урахуванням інтересів транспортного оператора та пасажирів.

Розроблені методи, моделі та алгоритми програмно реалізовані в рамках створеної комп'ютерної інформаційно-аналітичної системи та виконана її апробація в умовах транспортної пасажирської системи великого міста.

Ключові слова: транспортна пасажирська система міста, моделювання, маршрутна мережа, пасажирські кореспонденції, зупинка, тривалість пересування, найкоротший шлях, рейс, оборотний рейс, інформаційна система.

АННОТАЦИЯ

Кузькин А. Ф. Теоретические основы организации транспортных процессов в системах городских массовых пассажирских перевозок. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.01 – транспортные системы. – Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, Харьков, 2020.

Диссертационная работа посвящена развитию теоретических основ организации транспортных процессов массовых маршрутных перевозок пассажиров в городах с использованием научных подходов, направленных на повышение эффективности перевозок в условиях автоматизированного планирования и управления.

Получили развитие научные подходы к формализованному описанию и оценке степени развития городских маршрутных сетей и разработаны модели ее влияния на результативные показатели перевозок и технико-экономические показатели работы городского пассажирского транспорта. Получил развитие метод гравитационного моделирования матрицы межрайонных пассажирских корреспонденций в городах на основе использования в качестве функции тяготения между транспортными районами треугольного статистического распределения.

Разработаны модели и алгоритмы оценки продолжительности обслуживания пассажира в транспортной пассажирской системе города и его составляющих с учетом статистической неопределенности процесса перевозок. Усовершенствованы алгоритмы поиска кратчайших путей перемещения пассажиров с учетом пересадок на пути следования. Предложен оптимизационный подход к нормированию продолжительности рейса и обратного рейсу пассажирского подвижного состава на городском маршруте с учетом интересов транспортного оператора и пассажиров.

Разработанные методы, модели и алгоритмы реализованы в рамках созданной компьютерной информационно-аналитической системы, выполнена ее апробация в условиях транспортной пассажирской системы большого города.

Ключевые слова: транспортная пассажирская система города, моделирование, маршрутная сеть, пассажирские корреспонденции, остановка, время перемещения, кратчайший путь, рейс, обратный рейс, информационная система.

ABSTRACT

Kuz'kin O. The theoretical frameworks of transportation process organization in urban mass transit systems. – The manuscript.

Thesis of Doctor of Technical Engineering in Transport Systems 05.22.01. – O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 2020.

Urban mass passenger transport is one of the integral subsystems of urban infrastructure, designed to meet the city's needs in transportation and ensure the mobility of its inhabitants. One of the contemporary paradigms in the development of transport systems in major cities around the world is the desire to attract car owners to use urban mass passenger transport, thereby reducing the growth of automobile and its negative consequences. Only if the level of organization of transport processes

of passenger traffic and the quality of providing transport services are not good, compared with the implementation of a potential passenger travel on its own car, such involvement is possible. Thus, there is a problem of theoretical foundation development of the transport process organization in the systems of urban mass passenger transportation in order to ensure their effective functioning.

The scientific principles of route network modeling, defined by methods of theory of graphs, and their comparative analysis, defined by methods of the complex network theory, are developed. The methodological approach to the formalization of route network in the form of graphs with aggregation of stop points at the graph vertex, taking into account their placement on the network and the mutual arrangement of their pedestrian accessibility zones, is developed. The theoretical approach to the definition of the main route network indicators of urban route passenger transport is developed and their substantive interpretation is presented. The statistical indicators of the transit networks development in large cities of Ukraine are analyzed in the representation ones in different spaces. The methods of correlation-regression analysis have defined that the average degree of correlation between transport mobility of the population have the average shortest path and coefficient of assortativity of route network, represented in the transfer space, and the average vertex degree and the cluster coefficient for network is represented in the route space. The statistically significant linear correlation between the topological characteristics of the investigated transit networks and the result indicators of passenger traffic in them were found.

The theoretical approach for the gravity modeling method and calculation of the O-D matrix elements in cities has been developed. It allows using the function of the triangular statistical Simpson's distribution as a function of gravity between transport zones. The parameters of the triangular distribution are established on the basis of prior information about the characteristics of the city's transport network and passenger traffic indicators. Using the developed theoretical approach, the modeling of O-D matrix elements in the conditions of the city of Zaporizhzhia (Ukraine) was performed, based on the preliminary urban transport zone and the results of determining the passenger flows on the route network links with the help of visual inspection methods.

The theoretical approach to the time assessment establishing of the urban transit network accessibility is developed. It expresses the length of the passenger's pedestrian approach to the stop. It takes into account the geometric configuration of their pedestrian accessibility zone and passenger's stop choice on the transport line.

The models of passenger average waiting-time estimation at the transit stop are developed, which includes the non-stationary nature of the passenger arrival process and the presence of additional waiting-time, associated with transport arrival irregularity and refusals to boarding passengers. The methods for passenger average waiting-time estimation are developed for the conditions of isolated routes and the

conditions of high arrival rate of passenger vehicles, which is typical for the case of route scheme superposition.

Taking into account the time of transfers, the theoretical and algorithmic approaches in order to find the shortest paths on the transit network have been developed for modeling and estimating the time, spent by the passenger. The approaches are based on the combinatorial optimization methods with replication of the transit network vertexes, network reduction and the application of the search algorithms of the shortest distances of Floyd-Worcesl or Dijkstra or the modified return method on the basis of the algorithmic method «branches and boundaries».

To establish the scheduled trip and round trip cycle-time on the city route, a statistical-optimization method has been developed. It involves minimization of the total generalized costs of the transport operator and the passenger in terms of one performed trip on a route. The calculations for the developed optimization model in order to determine the planned trip time on the city route are executed. The recommendations for setting the initial values of the model parameters during practical calculations and its SWOT analysis are given.

A computer information system “Transit,” which implements the theoretical scientific approaches developed in thesis, methods, models, and algorithms in the form of subsystems and unit program are designed which has implemented in conditions of transit system of large city.

The research results of the thesis were accepted and implemented in practical work by the Transport and Communications Department of Zaporizhzhia City Council and the Zaporizhzhia Municipal Enterprise of Urban Electric Transport “Zaporizhelectrotrans”, in the educational process of the Department of Transport Technologies of National University “Zaporizhzhia Polytechnic”.

Key words: urban transit system, modelling, route network, OD-matrix, urban stop, transit impedance, trip time, cycle trip time, information system.

Підписано до друку 08.01.2020 р. формат 60x84 1/16 1,9 д.а. Тираж 100 прим. Зам. №1
69063, м. Запоріжжя, НУ «Запорізька політехніка», Друкарня, вул.Жуковського,64