

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КОНРАД ТЕТЯНА ІГОРІВНА



УДК 004.415.2

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО
РОЗПОДІЛУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ
ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ
МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ**

01.05.03 – математичне та програмне забезпечення
обчислювальних машин і систем

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі інженерії програмного забезпечення факультету кібербезпеки, комп'ютерної та програмної інженерії Національного авіаційного університету.

Науковий керівник лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор **ПИСАРЧУК Олексій Олександрович**, Національний авіаційний університет, професор кафедри інженерії програмного забезпечення.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент **СУЛЕМА Євгенія Станіславівна**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем;

доктор технічних наук, професор **РАКУШЕВ Михайло Юрійович**, Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, професор кафедри застосування космічних систем та геоінформаційного забезпечення інституту забезпечення військ (сил) та інформаційних технологій.

Захист відбудеться «30» квітня 2021 року о 10:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.19 Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1, факультет кібербезпеки, комп'ютерної та програмної інженерії, ауд. 6.205.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Автореферат розіслано «30» березня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради, доктор технічних наук, доцент



Р. С. Одарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсивне зростання попиту на вантажні перевезення «від дверей до дверей» обумовлює необхідність залучення до перевізного процесу двох та більше видів транспорту. Оскільки у використанні кожного виду транспорту існують певні ресурсні обмеження, що унеможливають здійснення перевезення від відправника до одержувача лише одним видом транспорту, доцільним є мультимодальне перевезення, що дає можливість максимально поєднати переваги взаємодіючих видів транспорту на окремих етапах перевізного процесу.

Обмеженість ресурсів окремих видів транспорту (шляхи сполучення, пункти взаємодії видів транспорту) з можливістю пропуску певної кількості одиниць рухомого складу за одиницю часу, в поєднанні з вимогами відносно безпеки (координації рухомого складу), оперативності (реагування на детерміновані та стохастичні зміни в системі), точності (дотримання режимності роботи, часових інтервалів, графіків, розкладів руху) та достовірності (визначення маршруту), які пред'являються до перевізного процесу ускладнюють вибір оптимального маршруту мультимодального перевезення, що здійснюється диспетчером за допомогою автоматизованих систем управління (АСУ) перевезеннями. Вибір диспетчером оптимального маршруту доставки з урахуванням наявних факторів, вимог та обмежень, здійснюється шляхом обробки вхідної інформації в АСУ перевезеннями. Забезпечення високої ефективності перевезень за якісними характеристиками вихідної інформації зазначених автоматизованих систем, щодо визначення оптимального маршруту, можливо досягати шляхом удосконалення їх математичного та інформаційного забезпечення.

Дослідженню проблем і перспектив розвитку транспортних галузей взаємодіючих видів транспорту присвячено праці вчених: Стасюка О.М, Петренко О.І., Малахівської Г.В., Кірюхіної О.Ю., які досліджують стратегічні перспективи розвитку морських, авіаційних, автомобільних та залізничних перевезень; Березового М.І., Брайковської А.М., Підлісного І.П., Горяїнова Н.А., дослідження розвитку транспортних мереж. Підвищенню ефективності організації вантажних перевезень за участі різних видів транспорту присвячено праці вчених: Кузнецова М.М., Сівченко І.В., Кухарчика О.Г., Воркута А.І., Абрамова А.А., Правдіна М.В., Негрей В.Я, Подкопаєва В.Л., Галабурди В.Г., Тихомирова І.Г., Персіанова В.А, Жана-Поля Родріго. Дослідженню графіків руху присвячено праці вчених Каретникова А.Д., Логвінової Н.О.

Дослідженню інформаційної взаємодії видів транспорту та інтелектуальних транспортних систем присвячено праці вчених: Волкової Т.В., Гайкова А.Р, Євсєвої О.П., Баранова О.В., Баранова В.Ю. Дослідженню та проектуванню архітектури інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень присвячено праці Субача І.Ю, Микитюка А.В., Кубрака В.О., Герасимова Б.М., Дивизинюка М.М., Пушкар О.І., Нестеренко О.В., Савенко О.І., Фаловського О.О.; дослідження автоматизованих систем управління на транспорті наведено в працях Забари С.С., Дехтярук М.Т.

Аналіз традиційних підходів вирішення задачі пошуку оптимального маршруту перевезень, показав переважне застосування однокритеріальних моделей. Питанням формалізації оптимізаційних задач за допомогою багатокритеріальних моделей присвячено праці вчених Цвіркуна А.Д., Зіатдінова Ю.К., Баранова Г.Л., Брахмана Т.Р., Бусленка М.П., Вороніна А.М., Вермішева Ю.Х., Антушева Г.С. Методи розв'язку багатокритеріальних задач розглянуті в працях Анкудінова Г.І., Писарчука О.О., Даника Ю.Г., Шестакова В.І., Харченко В.П., Кіні Р.Л., Райфи Х.

Аналіз показав, що традиційні підходи до вирішення задачі вибору оптимального маршруту перевезення: по-перше спрямовані на підвищення ефективності організації

перевізного процесу на окремих видах транспорту; по-друге, досі відкритим та актуальним залишається питання розробки архітектури систем підтримки прийняття рішень з автоматизованого розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах; по-третє, формалізація оптимізаційної задачі в однокритеріальній формі з домінуючим показником (критерієм) оптимальності не забезпечує вирішення комплексної задачі розподілу транспортних потоків та вибору оптимального маршруту доставки вантажів в мультимодальних транспортних мережах. Тому доцільним є розробка архітектури програмної системи підтримки прийняття рішень з автоматизованого розподілу транспортних потоків з формалізацією задачі вибору оптимального маршруту в багатокритеріальній формі.

Виходячи з вище викладеного на сучасному етапі функціонування транспортної галузі України для розподілу обмежених ресурсів та визначення оптимального маршруту доставки вантажів вирішення потребує актуальне наукове завдання удосконалення архітектури систем підтримки прийняття рішень з автоматизованого розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах. З огляду на це, побудова математичної моделі багатокритеріального розподілу транспортних потоків для автоматизованих систем мультимодальних транспортних мереж спрямованої на розвиток основ побудови архітектури програмного забезпечення автоматизованих систем є важливою науково-прикладною задачею, що дозволяє підвищити ефективність автоматизованого управління транспортними потоками в мультимодальних транспортних мережах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні дослідження за темою дисертації було виконано на кафедрі інженерії програмного забезпечення факультету кібербезпеки, комп'ютерної та програмної інженерії Національного авіаційного університету в рамках фундаментальних тем НДР № 29/09.01.02 «Онтології у інженерії програмного забезпечення» (2016–2018 р.); 58/09.01.02 «Методологія підвищення ефективності процесів життєвого циклу розробки програмного забезпечення у гнучких підходах його розробки» (2019–2022 р.); «Експертна система ситуаційного синтезу програми технічного обслуговування регіональних транспортних літаків типу АН-32 на базі оптимізаційних нейронних мереж» (шифр «CALS-авіоніка») (2019–2020 р.).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності автоматизованого управління транспортними потоками в мультимодальних транспортних мережах. Відповідно до сформульованої мети визначено основні завдання дослідження:

1. Провести аналіз принципів побудови та особливостей функціонування мультимодальної транспортної мережі з виявленням напрямків транспортних потоків з інтенсивним використанням шляхів спільного користування.

2. Провести аналіз існуючих методологічних підходів до розподілу транспортних потоків.

3. Обґрунтувати показники та критерії оптимальності маршруту перевезення вантажів. Побудувати інфологічну модель факторів, показників та критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажів в мультимодальних транспортних мережах.

4. Розробити математичну модель багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах.

5. Розробити архітектуру програмної системи підтримки прийняття рішень багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах.

б. Провести оцінювання ефективності та адекватності розроблених підходів.

Об'єктом дослідження є процес оптимального планування розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах.

Предметом дослідження є архітектура системи підтримки прийняття рішень багатокритеріального розподілу обмежених ресурсів.

Методи дослідження проведені в дисертаційній роботі, ґрунтуються на використанні відомих методів: *теорії імовірності* – для аналізу принципів формування та розподілу транспортних потоків; *системного аналізу* – для вирішення транспортних (розподільчих) задач; *математичного моделювання та математичної логіки* – для побудови інфологічної моделі факторів, показників і критеріїв оптимальності маршруту; методики багатокритеріального розподілу обмежених ресурсів; методики багатокритеріального вибору оптимального маршруту; *теорії графів* – для побудови маршрутів; *синтезу* – для побудови математичної моделі багатокритеріального розподілу транспортних потоків.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. *Уперше розроблено* інфологічну модель факторів, показників та критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажів в мультимодальних транспортних мережах, яка базується на методах евристичного аналізу предметної галузі і відрізняється формалізацією задачі визначення оптимального маршруту у багатокритеріальній формі ієрархії вкладених груп критеріїв, що забезпечує підвищення адекватності математичних моделей розв'язку оптимізаційних задач транспортного типу.

2. *Удосконалено* математичну модель багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах, яка базується і відрізняється багатокритеріальним вибором оптимального маршруту на графах з використанням вкладених згорток за нелінійною схемою компромісів, що забезпечує підвищення ефективності управління транспортними потоками за компромісним відношенням вектору показників ефективності до вартості.

3. *Удосконалено* архітектуру програмної системи підтримки прийняття рішень багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах, яка базується на використанні в розрахунковому блоці структурних елементів, що забезпечують отримання обумовлених рішень про оптимальний маршрут перевезень, як результат синергетичного об'єднання розробленої інфологічної моделі факторів та показників і удосконаленої математичної моделі оптимального розподілу транспортних потоків. Архітектура програмної системи відрізняється удосконаленням структури розрахункового блоку завдяки формалізації транспортної задачі в багатокритеріальній формі та вибором оптимального маршруту за інтегрованим показником ефективності графових структур. Застосування удосконаленої архітектури дозволяє підвищити ефективність управління транспортними потоками за показниками оперативності і достовірності вихідних рішень.

Обґрунтованість і вірогідність отриманих у роботі наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджується результатами дисертаційного дослідження; коректним використанням методів системного аналізу, теорії графів на етапах моделювання, обробки експериментальних даних та аналізу результатів досліджень, а також залученням широкої наукової громадськості до апробації результатів роботи на наукових конференціях і їх публікації у визнаних наукових фахових виданнях.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена архітектура програмної системи підтримки прийняття рішень багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах може бути використана для підтримки

прийняття рішення про вибір оптимального маршруту перевезення вантажу диспетчером автоматизованої системи управління рухом на транспорті.

Отримані результати впроваджено на кафедрі інженерії програмного забезпечення факультету кібербезпеки, комп'ютерної та програмної інженерії Національного авіаційного університету у навчальний процес при проведенні лабораторних робіт згідно з програмою навчальних дисциплін «Основи інженерії програмного забезпечення» та «Аналіз вимог і моделювання програмного забезпечення» зі спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» та науково-дослідну роботу; у виробничий процес ПрАТ «РАЗНОБИТПРОДУКТ» (акти НАУ від 21.12.2020 та ПрАТ «РАЗНОБИТПРОДУКТ» від 16.11.2020).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації одержані автором самостійно. У дисертаційній роботі автором особисто розроблена інфологічна модель факторів, показників і критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажів в мультимодальних транспортних мережах; математична модель багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах; архітектура програмної системи підтримки прийняття рішень багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах. Роботи [9, 10] виконані одноосібно. Деякі роботи виконані у співавторстві з науковим керівником та іншими вченими. Зокрема, здобувачу належать: у роботі [1] – інфологічна модель факторів, показників та критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажів; у роботі [2] – технологія автоматизованого управління транспортними потоками в мультимодальній транспортній мережі; у роботі [3, 7] – аналіз особливостей взаємодії автомобільного та залізничного видів транспорту під час перевезення вантажів; у роботах [4, 5] – аналіз та обґрунтування основних факторів впливу та причин доцільності розділення руху транспортних потоків пасажирського та вантажного рухомого складу на шляхах спільного користування з інтенсивним рухом транспортних засобів; у роботі [6] – методика багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальній транспортній мережі; у роботі [8] – аналіз стану автомобільних і залізничних перевезень швидкопсувних вантажів; у роботі [11] – оцінювання достовірності вибору оптимального маршруту перевезення в мультимодальній транспортній мережі.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дослідження доповідалися на наступних наукових конференціях: LXVII, LXVIII, LXIX, LXX, LXXI, LXXII наукових конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету, м. Київ, 2011 р. – 2016 р.; IV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики», м. Євпаторія, 14–16 травня 2013 р.; V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики», м. Луганськ, 5–8 травня 2014 р.; Науково-практичній конференції «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», м. Харків, 18–20 листопада 2015 р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу», м. Київ, 24–25 жовтня 2017 р.; I Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем (PCSITS)», м. Київ, 05–06 квітня 2018 р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Інженерія програмного забезпечення 2018», м. Київ, 04–08 червня 2018 р.; International Conference on Software Engineering, June 03–06, 2019. Kyiv.

Публікації. За результатами дослідження опубліковано 24 наукових праці: з них 11 статей: 5 у наукових фахових виданнях України; 4 – у наукових фахових виданнях

України, які входять до міжнародних наукометричних баз даних; 2 – в інших виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, та 13 тез наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 115 найменувань та двадцяти одного додатку. Загальний обсяг дисертації становить 232 сторінки, з яких 139 сторінок основного тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено зв'язок з науковими програмами, темами; сформульовано мету і визначено основні завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження; описано наукову новизну та практичне значення роботи. Наведено інформацію про апробацію отриманих результатів, вказано список публікацій здобувача за темою роботи, описано особистий внесок здобувача, охарактеризовано структуру роботи.

У **першому розділі** проаналізовано принципи побудови та особливості функціонування мультимодальної транспортної мережі. Досліджено методи організації мультимодальних перевезень та автоматизовані системи керування перевезеннями на взаємодіючих видах транспорту. Схема проведення дисертаційного дослідження наведена на рис. 1.

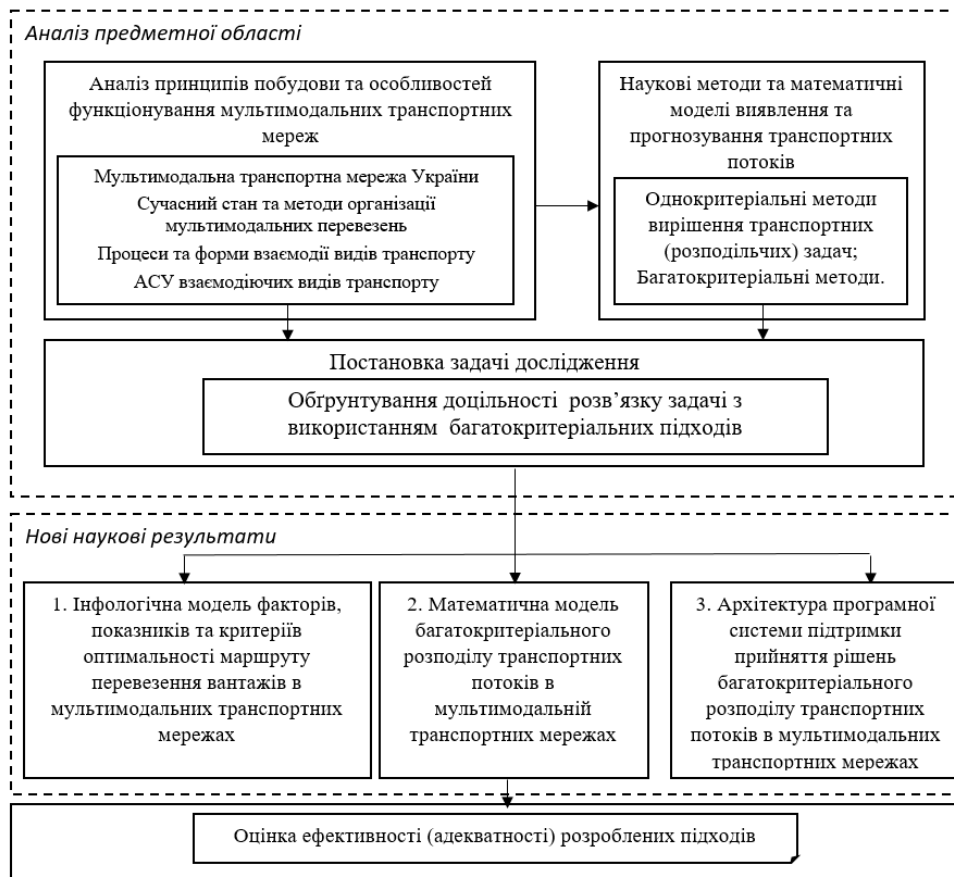


Рисунок 1. Схема проведення дисертаційного дослідження

Основні автоматизовані системами керування перевезеннями та комплекси наданням інформаційних послуг на взаємодіючих видах транспорту наступні: на залізничному транспорті – Автоматизована система керування пасажирськими перевезеннями (АСК ПП УЗ); Єдина автоматизована система керування вантажними перевезеннями (АСК ВП УЗ-Є); Автоматизована система оформлення електронних перевізних документів (АС Клієнт УЗ); Автоматизована система документообігу замовлень на перевезення вантажів та формування планів (АС Месплан); Сервіс онлайн резервування та покупки квитків; на автомобільному транспорті – Автоматизовані системи керування автотранспортними підприємствами (АСК АТП); Автоматизовані системи керування дорожнім рухом (АСК

ДР); Системи безпеки автомобіля; на водному транспорті – Інформаційна система керування рухом суден (VTMIS); Інформаційна система посту регулювання руху суден (ПРПС «Одеса»); Інформаційний сервіс «VTMIS Odessa»; Система дальньої ідентифікації і контролю за місцеположенням суден (LRIT); на авіаційному транспорті – Автоматизована система керування повітряним рухом (АСК ПР) «AIRCON-2100» яка є інтегруючою системою, що використовує системи спостереження, системи зв'язку та супутникові навігаційні системи. Аналіз автоматизованих систем управління перевезеннями взаємодіючих видів транспорту виявив відсутність єдиного підходу до визначення оптимального маршруту перевезення вантажів під час мультимодального перевезення.

Аналіз існуючих математичних моделей виявлення та прогнозування транспортних потоків на основі імовірнісного аналізу, виявлення прихованих (циклічних) коливань транспортних потоків, теорії черг показав, що транспортний потік містить детерміновану та стохастичну складову і має певні особливості та характеристики, які варто врахувати під час розробки архітектури програмної системи підтримки прийняття рішень багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах. Аналіз теоретичних методів вирішення транспортних (розподільчих) задач, а саме методу потенціалів; за часовим критерієм; за критерієм пошуку найкоротшого шляху; в мережевий постановці (на графі) показав, що у вирішенні задачі пошуку оптимального маршруту переважають однокритеріальні моделі, що не забезпечує вирішення комплексної задачі розподілу транспортних потоків та вибору оптимального маршруту доставки вантажів в мультимодальних транспортних мережах. Для досягнення високої ефективності розв'язку оптимізаційних задач розподілу транспортних потоків та вибору оптимального маршруту доставки вантажів за допомогою АСУ взаємодіючих видів транспорту доцільним є застосування багатокритеріальних моделей.

Спираючись на результати проведеного аналізу, сформульоване наукове завдання дисертаційного дослідження – удосконалення архітектури систем підтримки прийняття рішень з автоматизованого розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах. Обґрунтовано необхідність розроблення інфологічної моделі факторів, показників та критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажів; математичної моделі багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах та архітектури програмної системи підтримки прийняття рішень багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах.

У **другому розділі** для формалізації задачі визначення оптимального маршруту перевезення в багатокритеріальній формі розроблено *інфологічну модель факторів, показників та критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажу в мультимодальних транспортних мережах* (рис. 2). В основу моделі покладено ієрархією вкладених груп критеріїв.

Пояснення фізичної сутності встановлених показників і критеріїв оптимальності згідно з позначеннями та поясненнями розрахунку, що описують зміну частинних критеріїв, наведено в табл. 1.

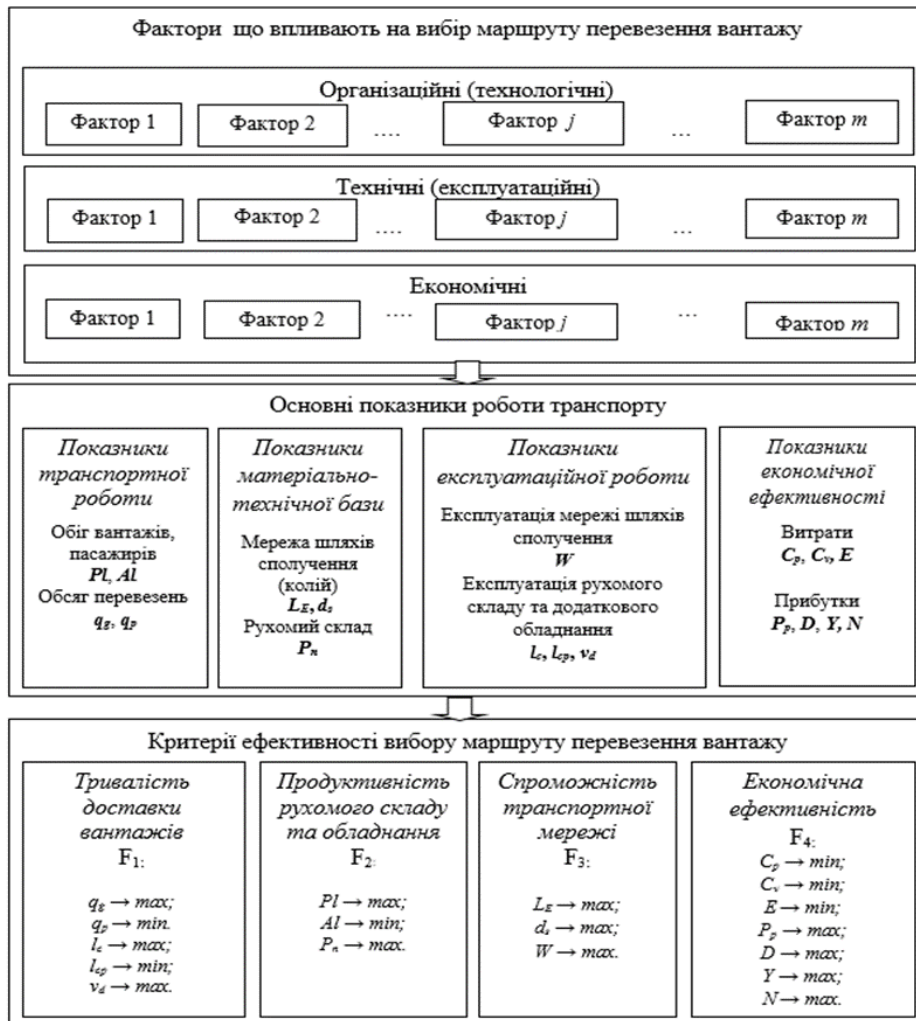


Рисунок 2. Інфологічна модель факторів, показників та критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажів в мультимодальних транспортних мережах

Таблиця 1

Узагальнена таблиця показників та критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажу

Узагальнений показник	Частковий показник	Напрямок екстремуму	Фізична сутність
<i>F₁</i>	<i>q_g</i>	max	Обсяг перевезень вантажу
	<i>q_p</i>	min	Обсяг перевезень пасажирів
	<i>l_c</i>	max	Середня дальність перевезення вантажу
	<i>l_{cp}</i>	min	Середня дальність перевезення пасажирів
	<i>v_d</i>	max	Швидкість доставки вантажу
<i>F₂</i>	<i>Pl</i>	max	Вантажообіг
	<i>Al</i>	min	Пасажирообіг
	<i>P_n</i>	max	Вантажопідйомність одиниці рухомого складу
<i>F₃</i>	<i>L_E</i>	max	Експлуатаційна довжина шляху між пунктами
	<i>d_S</i>	max	Густина мережі
	<i>W</i>	max	Інтенсивність перевезень

Узагальнений показник	Частковий показник	Напрямок екстремуму	Фізична сутність
F_4	C_p	min	Собівартість перевезення пасажирів
	C_v	min	Собівартість перевезення вантажів
	P_p	max	Продуктивність праці
	D	max	Доходи
	E	min	Витрати
	Y	max	Прибуток
	N	max	Плата за перевезення вантажу

Розрахунок частинних критеріїв оптимальності маршруту за показниками наведеними у табл. 1 проводиться для кожної вершини графа транспортної мережі за виразами наведеними в табл. 2.

Таблиця 2

Розрахунок частинних критеріїв оптимальності маршруту

Показник	Вираз	Пояснення розрахунку
q_g	$q_g = \sum_{1}^n q_E$,	q_E – елементарний вантажопотік (обсяг перевезеного вантажу за одиницю часу).
q_p	$q_p = n$,	n – кількість проданих білетів.
l_c, l_{cp}	$l_c = \frac{Pl}{q_g}, l_{cp} = \frac{Al}{q_p}$,	Pl – вантажообіг нетто; q_g – обсяг перевезень вантажів; Al – пасажирообіг; q_p – обсяг перевезених пасажирів.
v_d	$v_d = \frac{l_g}{T_g}$,	l_g – дальність пробігу вантажу; T_g – загальний час знаходження вантажу на транспорті.
Pl	$Pl = p_1 l_1 + \dots + p_i l_i$,	$p_1 l_1, p_i l_i$ – вантажообіг окремих партій вантажів (p_1, p_i) при відповідній відстані перевезення (l_1, l_i).
Al	$Al = A_1 l_1 + \dots + A_i l_i$,	A_i – кількість відправлених пасажирів, на відстань l_i .
P_n	$P_n = \frac{p_0 m_0}{1 + k_t}$,	p_0 – допустиме осьове навантаження; m_0 – кількість колісних пар в вагоні; k_t – технічний коефіцієнт тари в вагоні.
L_E	L_E	Довідкові дані, значення реальних відстаней між пунктами.
d_s	$d_s = \frac{1000 \cdot L_E}{S}$,	L_E – протяжність експлуатаційної довжини мережі; S – площа території.
W	$W = \frac{\sum Pl + \sum Al}{L_E}$,	$\sum Pl$ – вантажообіг; $\sum Al$ – пасажирообіг; L_E – експлуатаційна довжина лінії.

Показник	Вираз	Пояснення розрахунку
$C_p, C_v,$	$C_{p,v} = Al(Pl) \cdot c_{r(p,v)},$	$c_{r(p,v)}$ – розрахункова ставка перевезень; Al – пасажирообіг; Pl – вантажообіг нетто.
P_p	$P_p = \frac{\sum Pl_c}{H_e},$	$\sum Pl_c$ – річний обсяг транспортної роботи у приведених тонно-кілометрах; H_e – середньооблікова чисельність робітників, зайнятих в експлуатаційній роботі.
D	$D = D_G + D_p$	D_G – доходи від вантажних перевезень; D_p – доходи від пасажирських перевезень.
E	$E = E_G + E_p,$	E_G – витрати від вантажних перевезень; E_p – витрати від пасажирських перевезень.
Y	$Y = D - E,$	D – сумарні доходи за вироблену і реалізовану продукцію, роботу і послуги; E – експлуатаційні витрати.
N	N	Довідкові дані, за Тарифним керівництвом № 4 залізниць України.

Основними критеріями ефективності вибору маршруту перевезення вантажу визначено наступні: F_1 – тривалість доставки вантажів; F_2 – продуктивність рухомого складу та обладнання; F_3 – спроможність транспортної мережі (інфраструктурних об'єктів); F_4 – економічна ефективність.

Сформульовано систему суперечних частинних критеріїв оптимальності маршруту, яка свідчить про отримання багатокритеріальної оптимізаційної задачі визначення оптимального маршруту перевезень, вираз (1):

$$\delta = \begin{cases} q_p \rightarrow \max; q_v \rightarrow \min; l_c \rightarrow \max; l_{cp} \rightarrow \min; \\ v_d \rightarrow \max; Pl \rightarrow \max; Al \rightarrow \min; \\ P_n \rightarrow \max; L_E \rightarrow \max; d_s \rightarrow \max; \\ W \rightarrow \max; C_p \rightarrow \min; C_v \rightarrow \min; P_p \rightarrow \max; \\ D \rightarrow \max; E \rightarrow \min; Y \rightarrow \max; N \rightarrow \max. \end{cases} \quad (1)$$

Сформована система частинних критеріїв є суперечливою, що впливає з таких міркувань. Одночасне нарощування обсягів перевезень вантажів та пасажирів одними лініями буде негативним чином впливати на пропускну та провізну здатність елементів транспортної мережі. Таким чином, сукупність суперечливих частинних критеріїв оптимальності маршруту, свідчить про зведення задачі синтезу до багатокритеріальної форми.

Для розв'язку оптимізаційної задачі в багатокритеріальній формі з метою підвищення ефективності управління транспортними потоками за компромісним відношенням вектору показників ефективності до вартості розроблено *математичну модель багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах*. В основу моделі покладено багатокритеріальний вибір оптимального маршруту на графах з використанням вкладених згорток за нелінійною схемою компромісів.

Для побудови графу мультимодальної транспортної мережі вершинами обираються пункти взаємодії видів транспорту, ребрами – шляхи сполучення. Характеристиками ребер графа є реальні відстані між вершинами. Граф

мультимодальної транспортної мережі є неорієнтованим, оскільки перевезення може здійснюватись як у прямому так і в зворотньому напрямках. Під маршрутом розуміється незациклена послідовність ребер. Альтернативні маршрути описуються графом з вектором показників і критеріальних вимог для кожного конкретного варіанту маршруту. Маршрут обирається за результатом аналізу інтегрованого критерію ефективності кожного варіанту обходу графа (рис. 3).

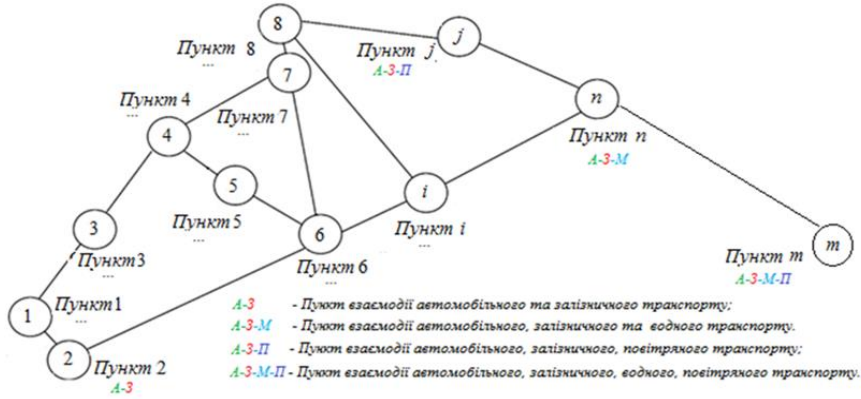


Рисунок 3. Граф мультимодальної транспортної мережі

1. Формування критеріальних вимог

Відповідно до моделі підсистемами частинних критеріїв (1), система критеріїв, що характеризує оптимальність вибору маршруту перевезення вантажу залізничним рухомим складом F_M для показників унітарного типу у вигляді (2), комбінаторні показники оптимального маршруту характеризуватимуться розширенням системи критеріїв (3).

$$F_M = \begin{cases} F_1 \rightarrow \min; \\ F_2 \rightarrow \min; \\ F_3 \rightarrow \min; \\ F_4 \rightarrow \min. \end{cases} \quad (2)$$

$$F_1 = \begin{cases} q_g \rightarrow \max; \\ q_p \rightarrow \min; \\ l_c \rightarrow \max; \\ l_{cp} \rightarrow \min; \\ v_d \rightarrow \max. \end{cases} \quad F_2 = \begin{cases} Pl \rightarrow \max; \\ Al \rightarrow \max; \\ Pn \rightarrow \max. \end{cases} \quad F_3 = \begin{cases} L_E \rightarrow \max; \\ d_s \rightarrow \max; \\ W \rightarrow \max. \end{cases} \quad F_4 = \begin{cases} C_v \rightarrow \min; \\ C_p \rightarrow \min; \\ P_p \rightarrow \max; \\ D \rightarrow \max; \\ E \rightarrow \min; \\ Y \rightarrow \max; \\ N \rightarrow \max. \end{cases} \quad (3)$$

Вироблення рішення щодо оптимальності маршруту перевезення за суперечливими критеріями (1) реалізується їх зведення до інтегрованої оцінки за нелінійною схемою компромісів відповідно до згортки професора А.М. Вороніна, із застосуванням технології вкладених згорток. У згортці використовується нелінійна схема компромісів, що дозволяє одержати парето-оптимальне рішення при невеликих обчислювальних витратах. Оптимізаційна задача розв'язується за наявності обмежень, що забезпечує унімодальність функції узагальненого критерію і у будь-якому випадку гарантує отримання єдиного рішення. Згортка дозволяє використовувати мінімаксий підхід, тобто концентруватись на екстремізації домінуючого частинного критерію оптимальності.

Критерій згортки для дискретно заданих частинних критеріїв оптимальності має вигляд (4)

$$Y(y_0) = \sum_{l=1}^b \gamma_{0l} (1 - y_{0l})^{-1} \rightarrow \min \quad (4)$$

де $l=1..b$ – кількість включених у згортку частинних критеріїв оптимальності; γ_{0l} – нормований ваговий коефіцієнт; y_{0l} – нормативний частинний критерій.

Нормування відносно суми поточних значень для критеріїв, що мінімізуються (5), та для критеріїв, що максимізуються (6):

$$\Phi_{0l}^{\min} = \frac{\phi_l^{\min}}{\sum_{i=1}^N \phi_{li}^{\min}}, \quad (5)$$

$$\Phi_{0l}^{\max} = \left(\phi_l^{\max} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{1}{\phi_{li}^{\max}} \right)^{-1} \quad (6)$$

2. Формування узагальнених критеріїв оптимальності для кожного маршруту здійснюється за виразами (7)–(10).

$$F_{li} = (1 - q_{g_i o})^{-1} + (1 - q_{p_i o})^{-1} + (1 - l_{c_i o})^{-1} + (1 - l_{cp_i o})^{-1} + (1 - v_{d_i o})^{-1} \rightarrow \min; \quad (7)$$

У виразах (7)–(10) індекс $i=1..N$ характеризує відповідні частинні й узагальнені критерії для різних варіантів побудови маршруту, індексом нуль позначені нормовані критерії.

Частинні критерії нормуються відносно максимальних (мінімальних) значень сформованого абстрактного маршруту:

$$\Phi_{0l}^{\min} = \frac{\phi_l^{\min}}{\max \phi_l^{\min} + \Delta}; \quad (11)$$

$$\Phi_{0l}^{\max} = \frac{\min \phi_l^{\max} - \Delta}{\phi_l^{\max}}, \quad (12)$$

де $\max \phi_l^{\min}$, $\min \phi_l^{\max}$ – максимальні та мінімальні значення мінімізуючого і максимізуючого критеріїв на інтервалі їх розгляду; Δ – коефіцієнт запасу, $\Delta = 0,03$.

Нормування узагальнених критеріїв здійснюється за умов їх мінімізації згідно з виразом (13):

$$F_{i0} = F_i / F_{\max}, \quad (13)$$

де F_{\max} – найгірша оцінка певного варіанта побудови системи.

Параметр F_{\max} визначається окремо для кожного узагальненого критерію (7)–(10) і формується із найгірших (для нормованих – максимальних) значень, що описують зміну частинних критеріїв при розгляді всіх сформованих варіантів її побудови.

2. Інтегрований критерій оптимальності визначається за нормованими узагальненими критеріями, що являє собою багатокритеріальну оптимізаційну модель (14).

$$F_{Mi} = (1 - F_{10})^{-1} + (1 - F_{20})^{-1} + (1 - F_{30})^{-1} + (1 - F_{40})^{-1} \rightarrow \min. \quad (14)$$

Вибір оптимального маршруту полягає в аналізі значень, що описують зміну інтегрованого критерію оптимальності. У цьому випадку оптимальним припускатиметься маршрут $i = 1 \dots N$, для якого буде виконуватись вимога мінімізації критерію (15).

$$N_{opt} = i, \text{ якщо } F_{Mi} \rightarrow \min. \quad (15)$$

Оцінка достовірності вибору оптимального маршруту і прийняття остаточного рішення здійснюється за інтегрованою оцінкою (12) слід її пронормувати до найгіршого варіанта оцінювання ефективності системи загалом відповідно до виразу:

$$F_{M0} = 1 - \frac{F_{Mi}}{\max F_M}. \quad (16)$$

Розрахунок $\max F_M$ за виразом (17):

$$\begin{aligned} \max F_M = & (1 - [\max F_{10} - \Delta])^{-1} + (1 - [\max F_{20} - \Delta])^{-1} \\ & + (1 - [\max F_{30} - \Delta])^{-1} + (1 - [\max F_{40} - \Delta])^{-1}. \end{aligned} \quad (17)$$

Після нормування інтегрованої оцінки матимемо її зміну у межах від нуля до одиниці з найвищою оцінкою – наближеною до одиниці, а найнижчою – наближеною до нуля. Рішення приймається суб'єктивно на підставі інтегрованої оцінки у вигляді лінгвістичної категорії «добре – погано» із застосуванням фундаментальної шкали оцінок, табл. 3

Таблиця 3

Фундаментальна шкала оцінок

Інтегрована оцінка ефективності F_{M0}	Лінгвістична категорія ефективності	Ранг маршруту (пріоритет)
1,0–0,7	Висока	P^1
0,7–0,5	Добра	...
0,5–0,4	Задовільна	...
0,4–0,2	Низька	...
0,2 і менше	Незадовільна	P^n

Розподіл показника інтегрованої оцінки ефективності F_{M0} від максимального до мінімального значення в межах лінгвістичної категорії, дозволяє ранжувати маршрути за пріоритетом, P^i , де i – порядковий номер пріоритету. Маршруту з пріоритетом P^1 вважається оптимальним.

Результати математичного моделювання доводять, що отримана згідно із запропонованим підходом математична модель забезпечує вибір оптимального достовірного маршруту перевезення.

Основним результатом, отриманим у даному розділі є інфологічна модель факторів, показників та критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажу в мультимодальних транспортних мережах та математична модель багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах.

У **третьому розділі** розроблено архітектуру програмної системи підтримки прийняття рішень багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах. Архітектура програмної системи відрізняється удосконаленням структури розрахункового блоку завдяки формалізації транспортної задачі в багатокритеріальній формі та вибором оптимального маршруту за інтегрованим показником ефективності графових структур. Структурні елементи, які використано в розрахунковому блоці, забезпечують отримання обумовлених

рішень про оптимальний маршрут перевезень, є результатом синергетичного об'єднання розробленої інфологічної моделі факторів та показників і удосконаленої математичної моделі оптимального розподілу транспортних потоків.

Метою розробки архітектури програмної системи підтримки прийняття рішень багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах є підвищення ефективності управління транспортними потоками на АСУ взаємодіючих видів транспорту за показниками оперативності і достовірності вихідних рішень. Програмна система багатокритеріального розподілу транспортних потоків належить до класу експертних систем спеціального призначення, підклас – система підтримки прийняття рішень (СППР). Призначенням СППР багатокритеріального розподілу транспортних потоків є підтримка прийняття рішення диспетчера АСУ перевезеннями про вибір оптимального маршруту перевезення вантажів в мультимодальних транспортних мережах. Складові запропонованої структурної схеми СППР багатокритеріального розподілу транспортних потоків в комплексі реалізують визначені специфічні функції і вимоги до програми, рис. 4.

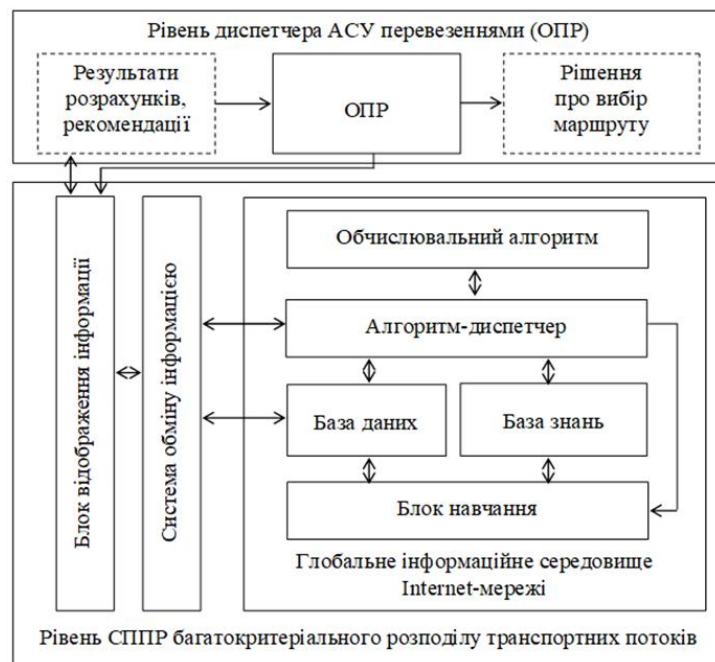


Рисунок 4. Структурна схема СППР багатокритеріального розподілу транспортних потоків

Реалізація архітектурних рішень відносно розробки програмно-алгоритмічного забезпечення СППР багатокритеріального розподілу транспортних потоків передбачає впровадження системи на програмно-апаратних комплексах АСУ взаємодіючих видів транспорту.

Вимоги до СППР багатокритеріального розподілу транспортних потоків:

1. Необхідність забезпечення розрахункових операцій у відповідності до розробленої математичної моделі багатокритеріального розподілу транспортних потоків.
2. Розрахунки слід проводити в режимі реального часу.
3. Вихідні дані для розрахунків повинні бути своєчасно автоматизовано поповнюваними і поновлюваними в on-line режимі із достовірних джерел, що досягатиметься динамічними технологіями побудови і оновлення бази даних із зв'язком з глобальною мережею Internet.
4. Сформовані рішення мають носити як односкладний характер так і мати можливість тлумачення з формуванням певних рекомендацій і пояснень зрозумілою

користувачеві (диспетчеру АСУ) термінологією.

Математичне забезпечення обчислювального алгоритму. Обчислювальний алгоритм реалізує розрахункові операції відповідно до розробленої інфологічної моделі факторів, показників та критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажу, рис. 2, табл. 2, (1) та математичної моделі багатокритеріального розподілу транспортних потоків (2)–(15). В основу математичного забезпечення обчислювального алгоритму покладено методику багатокритеріального вибору оптимального маршруту перевезення вантажів та методику оптимального розподілу обмежених ресурсів. Структурна схема блоку обчислювального алгоритму зображена на рис. 5.

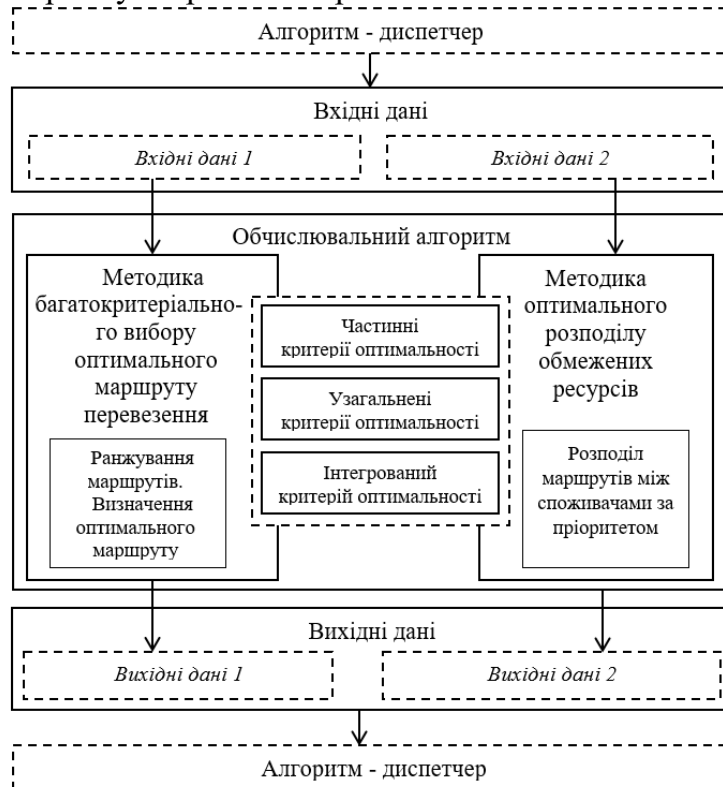


Рисунок 5. Структурна схема блоку обчислювального алгоритму

Удосконалення структури розрахункового блоку досягається завдяки формалізації транспортної задачі в багатокритеріальній формі (1) та вибором оптимального маршруту за інтегрованим показником ефективності графових структур (14). Застосування розробленого математичного забезпечення в обчислювальному алгоритмі архітектури СППР багатокритеріального розподілу транспортних потоків дозволяє підвищити ефективність управління транспортними потоками за показниками оперативності і достовірності вихідних рішень.

Вхідні дані. Вхідними даними 1 для розрахунків за методикою багатокритеріального вибору оптимального маршруту перевезення вантажів є числові значення часткових показників оптимальності сформованих маршрутів, табл. 1. Вхідними даними 2 для розрахунків за методикою оптимального розподілу обмежених ресурсів є кількість споживачів послуг перевезення (вантажовідправників); категорія групи важливості за пріоритетом обслуговування споживача; категорія споживача в межах групи важливості; кількість наявних альтернативних маршрутів; часткові показники маршрутів, табл. 1.

Методика багатокритеріального вибору оптимального маршруту перевезення вантажів призначена для реалізації завдання вибору оптимального маршруту доставки вантажів в мультимодальних транспортних мережах. Методика базується на

поданні задачі в багатокритеріальній формі із застосуванням нелінійної схеми компромісів. Сутність методики пояснюється структурною схемою, рис. 6.

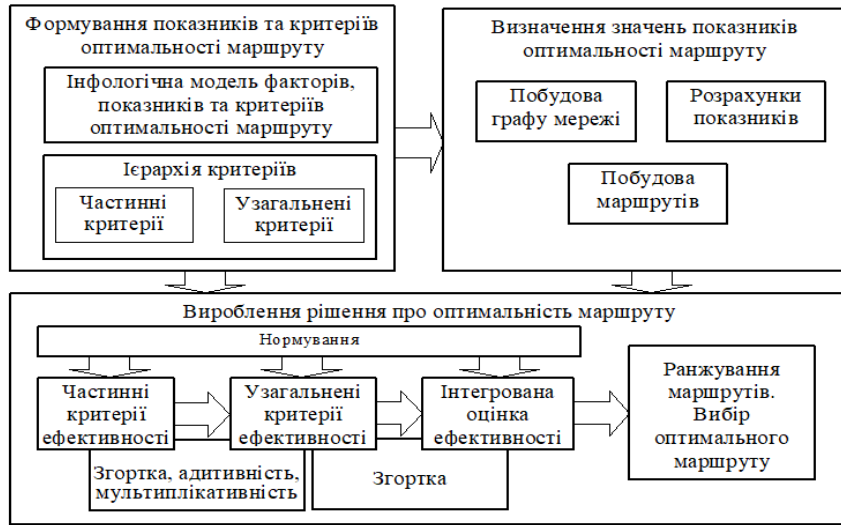


Рисунок 6. Структурна схема етапів методики багатокритеріального вибору оптимального маршруту

Критерії ефективності унітарного типу:

$$F_M = \begin{cases} F_1 \rightarrow extr; \\ F_2 \rightarrow extr; \\ F_3 \rightarrow extr; \\ F_n \rightarrow extr. \end{cases} \quad (18)$$

Категорії критеріїв: F_1 – тривалість доставки; F_2 – продуктивність рухомого складу; F_3 – спроможність транспортної мережі; F_n – економічна ефективність.

Критерії ефективності комбінаторного типу:

$$F_1 = \begin{cases} \alpha_1 \rightarrow extr, \alpha_2 \rightarrow extr, \dots, \\ \alpha_n \rightarrow extr, \end{cases} \quad F_3 = \begin{cases} \gamma_1 \rightarrow extr, \gamma_2 \rightarrow extr, \dots, \\ \gamma_n \rightarrow extr, \end{cases} \quad (19)$$

$$F_2 = \begin{cases} \beta_1 \rightarrow extr, \beta_2 \rightarrow extr, \dots, \\ \beta_n \rightarrow extr, \end{cases} \quad F_n = \begin{cases} \delta_1 \rightarrow extr, \delta_2 \rightarrow extr, \dots, \\ \delta_n \rightarrow extr. \end{cases}$$

Узагальнені критерії оптимальності:

$$F_{1i} = (1 - a_{1i0})^{-1} + (1 - a_{2i0})^{-1} + \dots + (1 - a_{ii0})^{-1} \rightarrow extr;$$

$$F_{2i} = (1 - \beta_{1i0})^{-1} + (1 - \beta_{2i0})^{-1} + \dots + (1 - \beta_{ii0})^{-1} \rightarrow extr;$$

$$F_{3i} = (1 - \gamma_{1i0})^{-1} + (1 - \gamma_{2i0})^{-1} + \dots + (1 - \gamma_{ii0})^{-1} \rightarrow extr;$$

$$F_{ni} = (1 - \delta_{1i0})^{-1} + (1 - \delta_{2i0})^{-1} + \dots + (1 - \delta_{ii0})^{-1} \rightarrow extr;$$
(20)

Інтегрована оцінка оптимальності маршруту:

$$F_i = (1 - F_{1i0})^{-1} + (1 - F_{2i0})^{-1} + (1 - F_{3i0})^{-1} + (1 - F_{ni0})^{-1} \rightarrow extr,$$

$$F_0 = \frac{F}{\max F}, \quad \max F = \sum_{l=1}^k (1 - [\max F_l - \Delta])^{-1}. \quad (21)$$

Розроблена методика передбачає вибір оптимального маршруту за сформованою системою критеріїв унітарного (18) чи комбінаторного типу (19) за

якими у відповідності до технології вкладених згорток за нелінійною схемою компромісів формуються узагальнені (20) та інтегрований (21) критерії.

Методика оптимального розподілу обмежених ресурсів призначена для користувачів (споживачів) транспортних послуг – вантажовідправників, та передбачає реалізацію завдання виділення оптимального маршруту за пріоритетом обслуговування споживачів. Методика базується на використанні багатокритеріальної оптимізаційної моделі, отриманої із застосуванням вкладених згорток за нелінійною схемою компромісів, що забезпечує врахування у розв'язку значної кількості критеріальних вимог, різнорідність потреб споживачів та обмеженість ресурсів (шляхів сполучення, маршрутів).

Структурна схема етапів методики зображена на рис. 7.

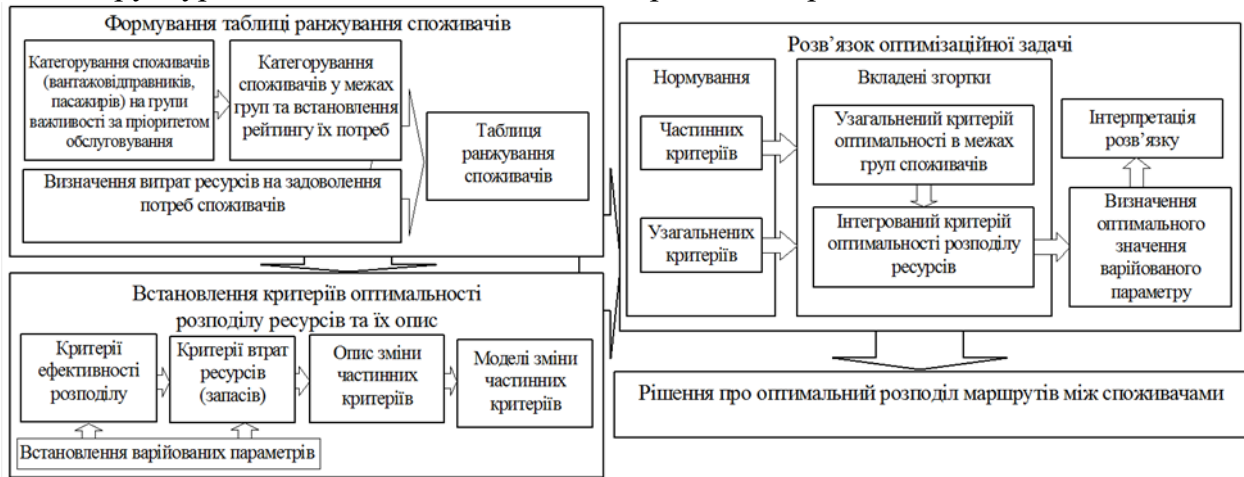


Рисунок 7. Структурна схема етапів методики оптимального розподілу обмежених ресурсів

Постановка задачі. Дано: $SP = \{ SP_i \}$, $i = 1 \dots I$ – множина споживачів (вантажовідправників); $SP_i \subset \{ Pot_{ij} \}$, $j = 1 \dots J$ – множина різнорідних потреб споживачів (обсяг, умови відправлення, відстань, вартість тощо); $PS = \{ PS_k \}$, $k = 1 \dots K$ – множина обмежених ресурсів, а саме шляхів сполучення (маршрутів) $PS_k \subset \{ Zap_{km} \}$, $m = 1 \dots M$; кількість маршрутів значно менша за кількість споживачів та переліку їх потреб.

Необхідно: здійснити розподіл обмежених ресурсів Zap_{km} , а саме маршрутів шляхами сполучення PS_k між споживачами SP_i так, щоб задоволення їх потреб Pot_{ij} забезпечувало найкращу ефективність виконання цільових задач споживачами.

Розв'язок задачі оптимального розподілу обмежених ресурсів.

1. Формування таблиці ранжувань.

2. Формування системи частинних критеріїв за варійованим параметром n_i кількість постачальників, що виділяються для обслуговування потреб споживача при обмеженнях на загальну кількість постачальників N

$$n_i, \sum_{i=1}^I n_i \leq N, \quad (22)$$

$$\begin{cases} P_1(n_1) \rightarrow \max, S_1(n_1) \rightarrow \min, P_2(n_2) \rightarrow \max, S_2(n_2) \rightarrow \min, \dots, \\ P_i(n_i) \rightarrow \max, S_i(n_i) \rightarrow \min, \dots, P_1(n_1) \rightarrow \max, S_1(n_1) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (23)$$

$$P_i(n_i) = P_0 + P_1 n_i + P_2 n_i^2 + \dots, S_i(n_i) = S_0 + S_1 n_i + S_2 n_i^2 + \dots \quad (24)$$

3. Розв'язок оптимізаційної задачі

3.1. Система узагальнених критеріїв віднесених до l груп важливості:

$$\begin{cases} \delta_1 (n_{11}, n_{12}, \dots, n_{1i}, \dots, n_{1l_1}) \rightarrow \min, \delta_2 (n_{21}, n_{22}, \dots, n_{2i}, \dots, n_{2l_2}) \rightarrow \min, \dots, \\ \delta_l (n_{l1}, n_{l2}, \dots, n_{li}, \dots, n_{ll_l}) \rightarrow \min, \dots, \delta_L (n_{L1}, n_{L2}, \dots, n_{Li}, \dots, n_{LL_L}) \rightarrow \min, \\ S (n_{11}, n_{12}, \dots, n_{1i}, \dots, n_{1l_1}, n_{21}, n_{22}, \dots, n_{2i}, \dots, n_{2l_2}, \dots, n_{l1}, n_{l2}, \dots, n_{li}, \dots, n_{ll_l}, \\ \dots, n_{L1}, n_{L2}, \dots, n_{Li}, \dots, n_{LL_L}) \rightarrow \min, \end{cases} \quad (25)$$

3.2. Інтегрований критерій оптимальності розподілу обмежених ресурсів (оптимізаційна модель оптимального розподілу)

$$\begin{aligned} & \Omega(n_{11}, n_{12}, \dots, n_{1i}, \dots, n_{1l_1}, n_{21}, n_{22}, \dots, n_{2i}, \dots, n_{2l_2}, \dots, n_{l1}, n_{l2}, \dots, n_{li}, \dots, n_{ll_l}, \dots, n_{L1}, n_{L2}, \dots, n_{Li}, \dots, n_{LL_L}) = \\ & = G_{01} (1 - \delta_{01} (n_{11}, n_{12}, \dots, n_{1i}, \dots, n_{1l_1}))^{-1} + G_{02} (1 - \delta_{02} (n_{21}, n_{22}, \dots, n_{2i}, \dots, n_{2l_2}))^{-1} + \\ & + \dots + G_{0l} (1 - \delta_{0l} (n_{l1}, n_{l2}, \dots, n_{li}, \dots, n_{ll_l}))^{-1} + \dots + G_{0L} (1 - \delta_{0L} (n_{L1}, n_{L2}, \dots, n_{Li}, \dots, n_{LL_L}))^{-1} + \\ & + F_0 (1 - S(n_{11}, n_{12}, \dots, n_{1i}, \dots, n_{1l_1}, n_{21}, n_{22}, \dots, n_{2i}, \dots, n_{2l_2}, \dots, n_{l1}, n_{l2}, \dots, n_{li}, \dots, n_{ll_l}, \dots, n_{L1}, \\ & n_{L2}, \dots, n_{Li}, \dots, n_{LL_L}))^{-1} \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (26)$$

Розроблена методика передбачає:

1. Формування таблиці ранжування споживачів ресурсів за пріоритетом обслуговування;
2. Встановлення системи частинних критеріїв оптимальності (23) та їх опис в аналоговій формі (24) за даними таблиці ранжувань;
3. Послідовне формування узагальнених (25) та інтегрованого критерію оптимальності (26) і пошук його екстремуму відносно варійованих параметрів з урахуванням пріоритету в обслуговуванні споживачів.

Вихідні дані. Вихідними даними 1 методики багатокритеріального вибору оптимального маршруту перевезення вантажів є розрахункові значення інтегрованого критерію оптимальності маршрутів (14), та його тлумачення у лінгвістичній формі, табл. 3. Виведення даних відбувається за допомогою системи обміну інформацією (СОІ) та блоку відображення інформації у формі впорядкованого списку порядкових номерів альтернативних маршрутів; рангу маршрутів за пріоритетом; порядкового номеру встановленого оптимального маршруту та рекомендаціями стосовно прийняття остаточного рішення. Вихідними даними 2 методики оптимального розподілу обмежених ресурсів є розрахункове числове значення інтегрованого критерію оптимальності розподілу ресурсів, та його тлумачення у лінгвістичній формі. Виведення даних відбувається за допомогою СОІ та блоку відображення інформації у вигляді порядкового номера оптимального маршруту та споживача якому надано оптимальний маршрут; рекомендацій стосовно остаточного рішення.

Таким чином, наведені результати реалізують процес проектування архітектури СППР багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах. Підтвердження працездатності запропонованих підходів проведено за допомогою *розрахункового прикладу*.

Моделювання розподілу транспортних потоків мультимодальної транспортної мережі здійснювалось на етапі транспортування вантажу залізничним рухомим складом у перспективному напрямі вантажопотоків у внутрішньодержавному та міжнародному сполученні, а саме Південь – Захід. Для побудови графу транспортної мережі було обрано вузлові станції діючого маршруту пасажирського поїзда №108Ш Одеса-Головна – Ужгород (через станцію Чоп), що є показовим, оскільки перевезення на маршруті здійснюється коліями спільного користування вантажного і пасажирського рухомого складу, та доповнено вузловими залізничними станціями

Західного регіону України з інтенсивним рухом пасажирського та вантажного рухомого складу. Вузлові та прикордонні станції є вершинами графа. Всього вершин – 13. Характеристиками ребер графа є реальні відстані між вершинами, усього ребер 16, загальна довжина ребер графа становить 1625 км. Побудову маршрутів на графі транспортної мережі здійснено з вершини 13 (ст. Одеса-Застава1) до вершини 1 (ст. Чоп). Всього побудовано 14 альтернативних маршрутів (рис. 8).

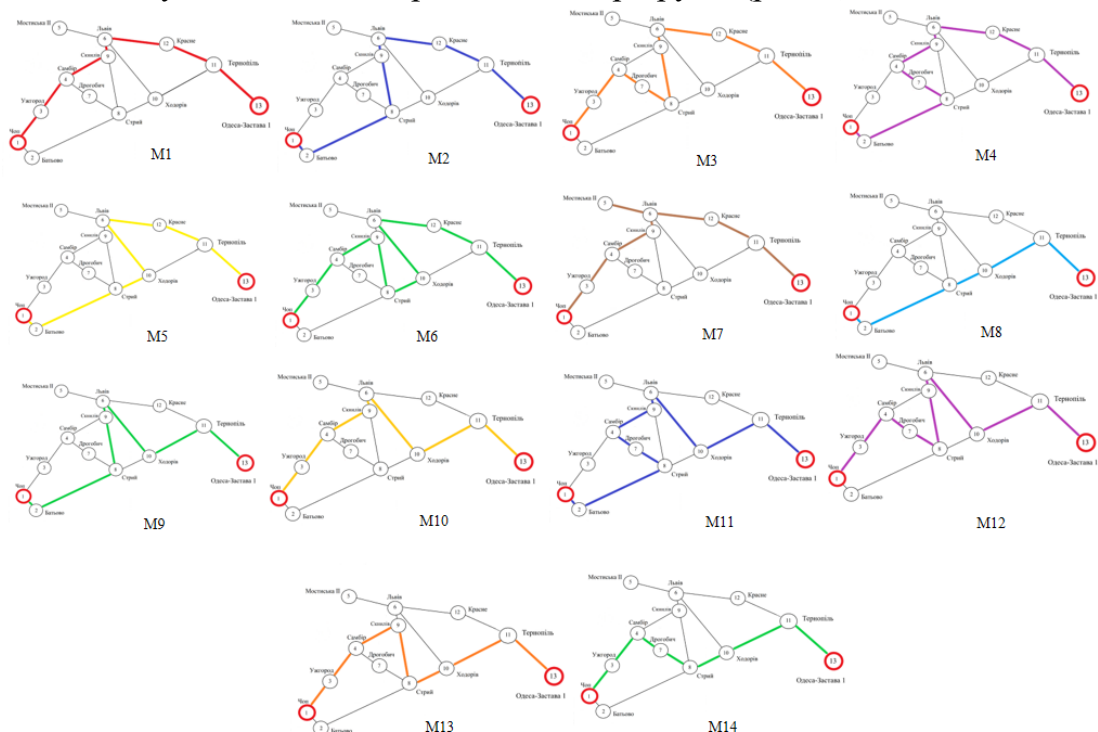


Рисунок 8. Схеми конфігурацій альтернативних маршрутів

Розраховано часткові показники станцій прокладених маршрутів. Проведені розрахунки за виразами (1)–(13) та визначені показники інтегрованого критерію оптимальності (14), табл. 4, показали, що вимога мінімізації (15) виконується до інтегрованого показника маршруту M14, тому вважається що маршрут M14 є оптимальним $N_{opt} = M14$.

Таблиця 4

Розрахункові значення інтегрованого критерію оптимальності маршрутів M1 – M14

Маршрут	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14
Критерій F_{Mi}	73,51650463	79,71601133	74,36313379	80,5614058	76,4197704	74,41829595	78,99883789	75,22613278	79,31042424	73,36768255	80,18445785	74,19934119	70,93301418	70,50074282

Оцінювання достовірності вибору оптимального маршруту за виразом (16)–(17) дало наступне значення інтегрованої оцінки ефективності, табл. 5 та розподіл маршрутів за лінгвістичними категоріями, табл. 6.

Оскільки інтегрована оцінка ефективності маршруту M14 відноситься до лінгвістичної категорії «Висока» з пріоритетом P^1 . Вважається, що оптимальність маршруту встановлено достовірно.

Таблиця 5

**Розрахункові значення
інтегрованої оцінки ефективності
маршрутів М1 – М14**

Критерій Маршрут	F_{M0}
М1	0,696200807
М2	0,642057336
М3	0,688274516
М4	0,635319721
М5	0,669751422
М6	0,687764336
М7	0,647886111
М8	0,680378586
М9	0,645340765
М10	0,69761301
М11	0,638306366
М12	0,689793859
М13	0,721557521
М14	0,725981711

Таблиця 6

**Розподіл маршрутів
за лінгвістичними категоріями**

Інтегрована оцінка ефективності F_{M0}	Лінгвістична категорія ефективності	Маршрут/ ранг маршруту
1,0–0,7	Висока	М14 (P ¹), М13 (P ²),
0,7–0,5	Добра	М10 (P ³), М1 (P ⁴), М12 (P ⁵), М3 (P ⁶), М6 (P ⁷), М8 (P ⁸), М5 (P ⁹), М7 (P ¹⁰), М2 (P ¹¹), М9 (P ¹²), М11 (P ¹³), М4 (P ¹⁴).
0,5–0,4	Задовільна	–
0,4–0,2	Низька	–
0,2 і менше	Незадовільна	–

Оцінювання ефективності (адекватності) розроблених підходів поведено за допомогою порівняльного аналізу результуючих показників альтернативних маршрутів М14, М13, М4., табл. 7. Вибір таких маршрутів для порівняльної оцінки пояснюється наступним: маршрут М14 є оптимальним, першого пріоритету P¹, зі встановленою достовірністю, лінгвістична оцінка «висока»; маршрут М13 є наближеним до оптимального, другого пріоритету P², з лінгвістичною оцінкою «висока»; маршрут М4 є маршрутом з найнижчим пріоритетом P¹⁴, лінгвістична оцінка «добре».

Таблиця 7

Порівняльна оцінка маршрутів

Показник	Маршрут		М4 Пріоритет P ¹⁴	М14 Пріоритет P ¹	М13 Пріоритет P ²
	Узагальнений показник	Частковий показник			
F_1	q_g	max	104698,38	58150,38	68940,38
	q_p	min	35939	21368	21335
	l_c	max	1201,27	1114,03	1130,03
	l_{cp}	min	1169,66	1083,08	1099,25
	v_d	max	3300	2640	2640
F_2	Pl	max	25040,988	21377,381	21959,031
	Al	min	10808,524	10168,651	10169,123
	P_n	max	418	327	280
F_3	L_E	max	1075	1043	1109
	d_s	max	398,07	316,35	316,35
	W	max	103,884	69,939	76,709

Узагальнений показник	Частковий показник	Напрямок екстремуму	М4 Пріоритет P ¹⁴	М14 Пріоритет P ¹	М13 Пріоритет P ²
F_4	C_p	min	4025965,686	3782150,81	3782334,37
	C_v	min	9946751,69	4025744,14	4024507,23
	P_p	max	57,528	43,858	46,029
	D	max	15501951,32	9028639,5	10529177,33
	E	min	2118910,568	1234094,928	1439198,498
	Y	max	13383040,71	7794544,532	9089978,792
	N	max	37931,0926	33451,4379	34229,3373

Якісна порівняльна оцінка дає наступні результати: маршрут М4 є найбільш завантаженим за показниками вантажних транспортних потоків, тому не є доцільним збільшення частки вантажного рухомого складу на даному маршруті; маршрут М14 не містить максимальних показників екстремумів вантажних транспортних потоків, а за показниками пасажирських перевезень спостерігається мінімальне завантаження, тому маршрут є оптимальним для орієнтування руху вантажного рухомого складу; маршрут М13 містить лише одне значення максимального показника екстремуму і може використовуватись як альтернатива оптимальному маршруту М14, вразі стохастичного впливу (тимчасового блокування) оптимального маршруту. Кількісна порівняльна оцінка маршрутів за напрямками екстремуму, показала завантаженість маршруту М4 на 92 %, М13 на 1,8 %, в той час як ресурс можливого довантаження оптимального маршруту М14 – 67 %.

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні вирішено актуальне наукове завдання удосконалення архітектури систем підтримки прийняття рішень з автоматизованого розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах.

1. Проаналізовано принципи побудови та методи організації мультимодальних перевезень на основі інформаційної взаємодії видів транспорту за допомогою автоматизованих систем управління перевезеннями. Аналіз показав відсутність єдиного підходу до визначення оптимального маршруту перевезення вантажів під час мультимодального перевезення за допомогою АСУ взаємодіючих видів транспорту. Основним завантаженим напрямком транспортних потоків з інтенсивним використанням шляхів спільного користування встановлено напрям Південь–Захід.

2. Аналіз традиційних підходів показав, що традиційна формалізація оптимізаційної задачі в однокритеріальній формі не забезпечує вирішення комплексної задачі вибору оптимального маршруту перевезення в мультимодальних транспортних мережах. Обґрунтовано доцільність застосування методів багатокритеріальної оптимізації для розв'язку оптимізаційних задач розподілу транспортних потоків та вибору оптимального маршруту доставки вантажів за допомогою АСУ взаємодіючих видів транспорту.

3. Уперше розроблено інфологічну модель факторів, показників та критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажів в мультимодальних транспортних мережах, яка базується на методах евристичного аналізу предметної галузі і відрізняється формалізацією задачі визначення оптимального маршруту у багатокритеріальній формі ієрархії вкладених груп критеріїв, що забезпечує підвищення адекватності математичних моделей розв'язку оптимізаційних задач транспортного типу.

4. Удосконалено математичну модель багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах, яка базується і відрізняється багатокритеріальним вибором оптимального маршруту на графах з використанням вкладених згорток за нелінійною схемою компромісів, що забезпечує підвищення ефективності управління транспортними потоками за компромісним відношенням вектору показників ефективності до вартості.

5. Удосконалено архітектуру програмної системи підтримки прийняття рішень багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах, яка базується на використанні в розрахунковому блоці структурних елементів, що забезпечують отримання обумовлених рішень про оптимальний маршрут перевезень, як результат синергетичного об'єднання розробленої інфологічної моделі факторів та показників і удосконаленої математичної моделі оптимального розподілу транспортних потоків. Архітектура програмної системи відрізняється удосконаленням структури розрахункового блоку завдяки формалізації транспортної задачі в багатокритеріальній формі та вибором оптимального маршруту за інтегрованим показником ефективності графових структур. Застосування удосконаленої архітектури дозволяє підвищити ефективність управління транспортними потоками за показниками оперативності і достовірності вихідних рішень.

6. Оцінювання адекватності розроблених підходів проведено за допомогою розрахункового прикладу вибору оптимального маршрута на графі транспортної мережі та порівняльного аналізу результуючих показників альтернативних маршрутів.

Розроблені моделі та архітектура програмної системи підтримки прийняття рішень багатокритеріального розподілу транспортних потоків у комплексі забезпечують виконання процедури вибору оптимального маршруту перевезення реалізація якої забезпечує підвищення ефективності автоматизованого управління транспортними потоками в мультимодальних транспортних мережах. Практичне значення отриманих результатів полягає у доведенні теоретичних методів до їх практичної реалізації. Значення розв'язаної у дисертації задачі для науки полягає в подальшому розвитку теоретичних та прикладних основ створення математичних моделей та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень для розподілу транспортних потоків. Методи дослідження містять методи теорії імовірності; системного аналізу; методи математичного моделювання та математичної логіки теорії графів; синтезу. Наукові та прикладні результати досліджень, отримані в дисертації, доцільно використовувати: при розробці програмного забезпечення для формування маршрутів транспортних засобів, систем управління (координації та навігації) рухом транспортних засобів; у науково-дослідних організаціях.

Таким чином – у дисертаційній роботі реалізовані дослідження та здійснено розв'язок конкретної науково-прикладної задачі побудови математичної моделі багатокритеріального розподілу транспортних потоків для автоматизованих систем мультимодальних транспортних мереж спрямованої на розвиток основ побудови архітектури програмного забезпечення автоматизованих систем, що відповідає п.12 та п.14 паспорту спеціальності 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем.

Перспективою подальших досліджень є дослідження механізму впливу на значення часткових показників оптимальності маршруту з метою направленої зміни рангу маршруту та приведення до значень оптимального маршруту.

Дисертаційна робота являється завершеною кваліфікаційною науковою працею, а її мета досягнута.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Всього за темою дисертації опубліковано 24 публікації. Наведено основні публікації:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Конрад Т.І. Інфологічна модель факторів, показників та критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажів залізничним рухомим складом / Т.І. Конрад, О.О. Писарчук, О.В. Мороз, М.Д. Стукач, А.М. Баланчук // Вісник інженерної академії. Науковий журнал. – Київ : Вид-во НАУ, 2019. – № 1. – С. 148–156.
2. Конрад Т.І. Технологія автоматизованого управління транспортними потоками в мультимодальній транспортній мережі / Т.І. Конрад, О.О. Писарчук // Наукоємні технології. Науковий журнал. – Київ : Вид-во НАУ, 2020. – № 4 (48). – С. 451–459. DOI: 10.18372/2310-5461.48.15128.
3. Конрад Т.І. Аналіз сучасного стану організації автомобільно-залізничних перевезень вантажів в Україні / Т.І. Конрад, С.В. Ширяєва // Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник. Ч. 2. – К. : НТУ, 2012. – Вип. 26. – С. 363–369.
4. Конрад Т.І. Обґрунтування розділення руху вантажних і пасажирських поїздів в Україні в контексті підвищення ефективності автомобільно-залізничних вантажних перевезень / Т.І. Конрад, С.В. Ширяєва // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2016. – Вип. 1 (34). – С. 541–553.
5. Конрад Т. І. Залучення іноземного досвіду розділення руху вантажних і пасажирських поїздів для підвищення ефективності автомобільно-залізничних вантажних перевезень в Україні / Т. І. Конрад, С. В. Ширяєва // Наукові нотатки: зб. наук. праць. – Луцьк: Вид-во ЛНТУ, 2016. – Вип. 55. – С. 437–441.

Статті у наукових фахових виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз даних:

6. Конрад Т.І. Методика багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальній транспортній мережі / Т.І. Конрад, О.О. Писарчук, О.В. Маранов, В.І. Воробей, М.Я. Коршунов, М.К. Пустовий // Новітні технології: зб. наук. праць. – Київ : Вид-во УНТ, 2018. – Вип. 3 (7). – С. 81–88. DOI: 10.31180/2524-0102/2018.3.07.09. Index Copernicus, Scientific Indexing Services (SIS), e-Library.
7. Конрад Т.І. Аналіз закордонного досвіду організації автомобільно-залізничних перевезень вантажів / Т.І. Конрад, С.В. Ширяєва // Управління проектами, системний аналіз і логістика: Науковий журнал. – К.: НТУ, 2012. – Вип. 10. – С. 292–297. Science Index.
8. Конрад Т. І. Аналіз сучасного стану автомобільних і залізничних перевезень швидкопсувних вантажів в Україні / Т. І. Конрад, С. В. Ширяєва // Управління проектами, системний аналіз і логістика: Науковий журнал. – К. : НТУ, 2014. – Вип. 13 – С. 212–220. Science Index, e-Library.
9. Конрад Т. І. Дослідження часу обороту контейнера у автомобільно-залізничному сполученні / Т. І. Конрад // Управління проектами, системний аналіз і логістика: Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К. : НТУ, 2015. – Вип. 15. Ч. 1 – С. 48–56. Science Index, e-Library.

Статті опубліковані в інших виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних:

10. Tetiana Konrad. Mathematical Model of Multicriterial Distribution of Transport Flows in The Multimodal Transport Network. International Journal “INFORMATION THEORIES & APPLICATIONS” Vol. 26, Number 4, 2019. Printed in Bulgaria., pp. 334–358. ISSN 1310-0513 (printed).

11. Pysarchuk Oleksii, Konrad Tetiana. Assessment Of The Reliability Of Multicriterial Choosing The Optimal Route Of Cargo Transportation In The Multimodal Transport Network. POLISH JOURNAL OF SCIENCE № 35, Vol. 1., 2021, Printed in Poland, pp. 25–35. ISSN 3353-2389.

АНОТАЦІЯ

Конрад Т.І. Математична модель багатокритеріального розподілу транспортних потоків для автоматизованих систем мультимодальних транспортних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем. – Національний авіаційний університет, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2021.

Основні результати дослідження.

Уперше розроблено інфологічну модель факторів, показників та критеріїв оптимальності маршруту перевезення вантажів в мультимодальних транспортних мережах, яка базується на методах евристичного аналізу предметної галузі і відрізняється формалізацією задачі визначення оптимального маршруту у багатокритеріальній формі ієрархії вкладених груп критеріїв, що забезпечує підвищення адекватності математичних моделей розв'язку оптимізаційних задач транспортного типу. Удосконалено математичну модель багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах, яка базується і відрізняється багатокритеріальним вибором оптимального маршруту на графах з використанням вкладених згорток за нелінійною схемою компромісів, що забезпечує підвищення ефективності управління транспортними потоками за компромісним відношенням вектору показників ефективності до вартості. Удосконалено архітектуру програмної системи підтримки прийняття рішень багатокритеріального розподілу транспортних потоків в мультимодальних транспортних мережах, яка базується на використанні в розрахунковому блоці структурних елементів, що забезпечують отримання обумовлених рішень про оптимальний маршрут перевезень, як результат синергетичного об'єднання розробленої інфологічної моделі факторів та показників і удосконаленої математичної моделі оптимального розподілу транспортних потоків.

Ключові слова: мультимодальне перевезення, оптимальність, багатокритеріальна оптимізація, фактор, критерій, архітектура, система підтримки прийняття рішень.

АННОТАЦИЯ

Конрад Т.И. Математическая модель многокритериального распределения транспортных потоков для автоматизированных систем мультимодальных транспортных сетей. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.03 – математическое и программное обеспечение вычислительных машин и систем. Национальный авиационный университет, Министерство образования и науки Украины, Киев, 2021.

Основные результаты исследования.

Впервые разработана инфологическая модель факторов, показателей и критериев оптимальности маршрута перевозки грузов в мультимодальных транспортных сетях, которая базируется на методах эвристического анализа предметной области и отличается формализацией задачи определения оптимального маршрута в многокритериальной форме иерархии вложенных групп критериев, что обеспечивает повышение адекватности математических моделей решения оптимизационных задач транспортного типа. Усовершенствована математическая модель многокритериального распределения

транспортных потоков в мультимодальных транспортных сетях, которая базируется и отличается многокритериальным выбором оптимального маршрута на графах с использованием вложенных сверток по нелинейной схеме компромиссов, что обеспечивает повышение эффективности управления транспортными потоками по компромиссному отношению вектора показателей эффективности к стоимости. Усовершенствована архитектура программной системы поддержки принятия решений многокритериального распределения транспортных потоков в мультимодальных транспортных сетях, основанная на использовании в расчетном блоке структурных элементов, обеспечивающих получение обусловленных решений про оптимальный маршрут перевозок, как результат синергетического объединения разработанной инфологической модели факторов и показателей и усовершенствованной математической модели оптимального распределения транспортных потоков.

Ключевые слова: мультимодальные перевозки, оптимальность, многокритериальная оптимизация, фактор, критерий, архитектура, система поддержки принятия решений.

ABSTRACT

Konrad T. I. Mathematical model of multicriteria distribution of transport flows for automated systems of multimodal transport networks. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Speciality 01.05.03 – Mathematics and Software for Computing Machines and Systems. – National Aviation University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The main results of the study.

For the first time, an infological model of factors, indicators, and criteria of optimal route of cargo transportation in multimodal transport networks was developed, which is based on methods of a heuristic analysis of the subject area and differs in formalizing the problem of determining the optimal route in a multicriteria hierarchy of nested groups of criteria which improves an increase in the adequacy of mathematical models for solving transport-type optimization problems. The mathematical model of multicriteria distribution of traffic flows in multimodal transport networks is improved, which is based on and differs in multicriteria choice of the optimal route on graphs using nested convolutions according to the nonlinear scheme of compromises which improves an increase in the efficiency of traffic flow management by a compromise ratio of the vector of efficiency to cost. Improved the architecture of the software system for decision support of the multicriteria distribution of traffic flows in multimodal transport networks, which is based on the use in the calculation block of structural elements that provide conditional decisions on the optimal route of transportation as a result of synergistic integration and an improved mathematical model of the optimal distribution of traffic flows. The architecture of the software system differs in the improvement of the structure of the calculation unit due to the formalization of the transport problem in a multicriteria form and the choice of the optimal route for the integrated efficiency of graph structures. The use of advanced architecture allows increasing the efficiency of traffic flow management in terms of efficiency and reliability of the original solutions. The mathematical support of the computational algorithm is based on the method of multi-criteria selection of the optimal route for the transportation of goods and the method of optimal distribution of limited resources.

The assessment of the adequacy of the developed approaches was carried out using a computational example of choosing the optimal route on the graph of the transport network and a comparative analysis of the resulting indicators of alternative routes.

Keywords: multimodal transportation, optimality, multicriteria optimization, factor, criterion, architecture, decision support system.

Підп. до друку 30.03.2021. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.
Тираж 100 пр. Замовлення № -1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Любомира Гузара, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002